

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف 1
UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 1
UFAS (ALGERIE)

THESE

Présentée à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat En Sciences

En optique et mécanique de précision

Par

M. HAMDIA Amine

THEME :

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INTERFACE BANDE ABRASIVE-PIECE POUR LA SUPERFINITION DES SURFACES PAR LE PROCEDE DE TOILAGE

Soutenue le : 27/09/2018

Devant le jury composé de :

M. HAMIDOUCHE Mohamed
M. ALIOUANE Toufik
M. MAHFOUDI Chawki
M. KHERRIS Sahraoui
M. BOUZID Djamel

Pr. Université de Sétif 1
Pr. Université de Sétif 1
Pr. U Oum El-Bouaghi
MCA. C U de Tissemsilt
Pr. Université de Sétif 1

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invité

Remerciements

Avant tout, nos remerciements iront à Dieu qui nous a donné la force et le courage de réaliser ce travail.

Tout au long de la réalisation de cette thèse, nous avons été très bien entourés par des personnes qui nous ont guidés, inspiré, encouragé, critiqué et surtout, qui nous ont permis d'avancer.

A ce titre, nous tenons à remercier vivement notre encadreur le Professeur ALJOUANE Toufik de l'université de Sétif 1 pour son suivi, son soutien et ses orientations tout au long de notre recherche.

Nous remercions aussi les membres de jury d'avoir consacré leur temps et leurs efforts pour examiner ce travail. Premièrement, mes sincères remerciements et ma gratitude vont à M. HAMDOUCHE Mohamed professeur à l'université de Sétif 1, pour avoir accepté de juger ce travail et d'en présider le jury de soutenance. Ensuite, je remercie sincèrement les membres de mon jury : M. MAHFOUDI Chauki professeur à l'université d'Oum El-Bouaghi et M. KHERRIS Sahraoui maître de conférences classe A de centre universitaire de Fissemsilt en tant qu'examineurs attentifs. J'aimerais également remercier M. BOUZID Djamel, je suis particulièrement honoré de ton présence dans le jury.

Ma gratitude la plus profonde ira à mon épouse pour son soutien et ses contributions, que dieu l'aide dans sa thèse de doctorat.

Enfin, nous ne saurions pas oublier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Enfin, je dédié ce travail à :

- *Mes parents (ma mère et mon père),*
- *Mon épouse,*
- *Mes collègues et mes amis.*

Résumé :

L'étude de super finition des pièces mécaniques est motivée par des intérêts multiples liés d'une part aux besoins d'accroissement des performances et de la fiabilité des systèmes mécaniques sollicités de plus en plus sévèrement. D'autre part, aux économies que représentent l'augmentation de la durée de vie et l'amélioration du rendement de ces pièces mécaniques. Le toilage est un procédé de super finition de plus en plus utilisé dans l'industrie automobile, en complément du tournage dur. Le toilage est une variante de procédé de finition avancée dont la particularité réside dans sa neutralité sur le plan thermique. C'est un procédé de finition récent, ce qui fait que les mécanismes de travail de ce procédé et son influence sur l'intégrité et la fonctionnalité des surfaces reste un domaine vague. En effet, il donne des surfaces de bonne qualité avec des tolérances géométriques de plus en plus précises. Ces avantages intéressent de plus en plus les industriels. Le toilage des pièces de formes compliquées commence à remplacer d'autres procédés comme la rectification. Cette étude permet de situer les performances du toilage par rapport aux autres procédés parce qu'il maintient l'état de surface à un état stable et amélioré quelque soit l'état de surface issu des procédés conventionnels.

Mots- clés: toilage, super finition, tournage dur, intégrité de surface, film abrasif, rugosité.

Sommaire

Introduction générale.....	7
CHAPITRE 1 : PROCEDE DE SUPERFINITION PAR TOILAGE	
1. Introduction.....	10
2. Rappel sur le tournage dur.....	10
3. Définition de super finition.....	12
4. Définition de toilage.....	12
5. Principes de fonctionnement.....	15
6. Effet des paramètres technologiques de toilage.....	16
6.1. Temps de cycle.....	16
6.2. Support de la bande.....	19
6.3. Vitesse de la bande.....	21
6.4. Taille des grains abrasifs.....	24
6.5. Pression de contact.....	25
6.6. Fréquence d'oscillation.....	26
6.7. Lubrification.....	27
7. Caractérisation des surfaces toilées.....	29
7.1. Texture de surface.....	29
7.2. Contraintes résiduelles.....	35
7.3. Microstructure métallurgique.....	37
CHAPITRE 2 : L'OUTIL DE COUPE DE TOILAGE	
1. Introduction.....	40
2. La bande abrasive.....	40
3. Paramètres de la bande abrasive.....	46
3.1. Densité des sommets des grains abrasifs.....	46
3.2. Hauteur moyenne des sommets des grains abrasifs.....	47
3.3. Angle moyen aux sommets des grains abrasifs.....	47
4. Mécanismes d'usure de la bande abrasive.....	49
4.1. Temps de toilage.....	49
4.2. Fréquence d'oscillation.....	51
4.3. Vitesse d'avance.....	52
4.4. Lubrification.....	53
4.5. Structure de la bande.....	57
4.6. Modélisation des mécanismes d'usure des grains abrasifs.....	63
5. Morphologie des micro-copeaux.....	65
CHAPITRE 3 : PARAMETRES DU PROCESSUS DE TOILAGE	
1. Introduction.....	70
2. Procédure expérimentale.....	70
2.1. Matériau usiné.....	70
2.2. Moyens utilisés.....	71
2.2.1. Dispositif de toilage.....	71
2.2.2. Bandes abrasives.....	73
2.2.3. Profilomètres.....	73
2.2.4. Microscope électronique à balayage MEB.....	74
2.2.5. Microscope à force atomique AFM.....	75
2.3. Paramètres mesurés de la texture de surface.....	75

2.3.1.	Paramètres de la rugosité de surface.....	75
2.3.2.	Paramètres fonctionnels.....	78
3.	Résultats et discussions.....	80
3.1.	Effet du temps de toilage.....	80
3.1.1.	Perte en masse.....	80
3.1.2.	Perte en épaisseur.....	80
3.1.3.	Rugosité de surface.....	82
3.1.4.	Taux de portance.....	86
3.2.	Effet de la grosseur des grains abrasifs.....	87
3.2.1.	Perte en masse.....	88
3.2.2.	Perte en épaisseur.....	88
3.2.3.	Rugosité de surface.....	90
3.2.4.	Taux de portance.....	91
3.3.	Effet de la vitesse de rotation de la pièce.....	94
3.4.	Variation de l'état de la bande.....	95
3.5.	Effet de la grosseur décroissante des grains abrasifs.....	96
3.5.1.	Perte en masse.....	96
3.5.2.	Perte en épaisseur.....	97
3.5.3.	Rugosité de surface.....	98
3.5.4.	Taux de portance.....	102

CHAPITRE 4 : INFLUENCE DES GALETS DE CONTACT SUR LA TEXTURE DE SURFACE TOILEE

1.	Introduction	108
2.	Texture de surface initiale.....	109
2.1.	Rugosité de surface initiale.....	110
2.2.	Taux de portance initial.....	110
3.	Influence des différents galets sur la texture de surface.....	111
3.1.	Galets métalliques et alliages métalliques	111
3.1.1.	Galet en acier (G-AC).....	111
3.1.2.	Galet en aluminium (G-AL).....	113
3.1.3.	Galet en laiton (G-LA).....	115
3.1.4.	Comparaison de la texture de surface générée par les galets métalliques et alliages métalliques.....	118
3.2.	Galets polymères.....	123
3.2.1.	Galet en polystyrène (G-PS).....	123
3.2.2.	Galet en polyoxyméthylène (polyacétal) (G-POM C).....	124
3.2.3.	Galet en polyamide (G-PA 6).....	126
3.2.4.	Galet en polypropylène-copolymère (G-PPC).....	128
3.2.5.	Galet en polypropylène-homopolymère (G-PPH).....	131
3.2.6.	Galet en polyéthylène haute densité (G-PEHD).....	132
3.2.7.	Galet en polyéthylène basse densité (G-PEBD).....	134
3.2.8.	Comparaison de la texture de surface générée par les galets polymères..	137
	Conclusion générale.....	144
	Bibliographie.....	146

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, des évolutions intéressantes et rapides ont marqué la mécanique automobile. Cette dernière recherche de plus en plus une meilleure qualité de l'intégrité de la surface fonctionnelle dans le domaine de la fabrication des pièces mécaniques de la plus haute précision (les vilebrequins, les arbres à cames, les soupapes, les engrenages, les synchroniseurs de la boîte de vitesse,...etc). Ceci pour des intérêts multiples liés d'une part aux besoins d'accroissement des performances et à la fiabilité des systèmes mécaniques sollicités dans le temps (ces sollicitations peuvent conduire à la rupture), d'autre part aux économies que représentent l'augmentation de la durée de vie et l'amélioration du rendement des pièces de dureté élevé (≥ 45 HRC). Le comportement fonctionnel des pièces finies tel que le vilebrequin dépend considérablement de son intégrité de surface (texture de surface; rugosité et défauts de surface, contraintes résiduelles et couches blanches). Cette dernière affecte la fonctionnalité des surfaces qui est sensiblement influencée par le procédé de super finition utilisé.

La nécessité d'une qualité de plus en plus précise des pièces mécaniques exige énormément l'utilisation de nouvelles technologies d'usinage mécanique avec une géométrie d'outil indéfinie comme par exemple: la rectification à traits croisés, le pierrage, **le toilage**,...etc. Car la super finition de ces pièces utilise les procédés par abrasion plutôt que les autres technologies de principe différent (le galetage, le brunissage,...etc.).

Habituellement, cette dernière technologie d'abrasion est apparue comme le procédé adéquat pour finir les surfaces fonctionnelles des pièces mécaniques de précision constituant le moteur de véhicule. Le procédé de toilage est un procédé de super finition avancée de plus en plus utilisé dans l'industrie automobile, en complément du procédé de tournage dur (TD). Il s'intéresse à la super finition des organes mécaniques pouvant subir une usure, une fatigue ou une déformation due au fonctionnement. L'usinage de précision par toilage est une nouvelle technique de super finition par rapport aux autres procédés ayant le même principe et objectif.

Le toilage occupe l'étape finale dans la production des pièces mécaniques de haute précision par enlèvement de matière mettant en jeu un outil appelé bande abrasive. La texture de surface s'obtient par action mécanique de la bande abrasive constituée d'un grand nombre de grains abrasifs de haute dureté, de formes aléatoires et appliqués sur un support élastique de faible épaisseur et retenus par un liant. Ce procédé améliore quel que soit l'état de surface issu de tournage dur (TD).

Ce procédé permet aux fabricants de réduire ou d'éliminer les défauts d'intégrité de surface engendrés par les procédés de pré-usinage. Néanmoins, la difficulté de ce processus de super finition par bande abrasive réside dans le grand nombre des paramètres de pilotage. S'ajoute à cela les paramètres liés au matériau mis en forme et ceux de l'outil de coupe. En effet, parmi les éléments essentiels constituant le dispositif de toilage, le galet de contact apparait comme l'élément le plus important puisque c'est le responsable de transmission de la pression aux grains abrasifs. Donc, il a un rôle crucial sur la qualité de l'intégrité de surface obtenue et le comportement des grains abrasifs. Par conséquent, la détermination des effets des paramètres technologiques de cette technique d'usinage abrasive s'avère le principal objectif de cette étude.

Pour cela, notre travail de recherche est subdivisé en quatre chapitres, deux théoriques et deux pratiques.

Le premier chapitre théorique décrit le processus d'usinage par toilage. D'abord, on présente un rappel sur le procédé de tournage dur (TD) qui précède le processus de toilage. Ensuite, on aborde les deux principes de fonctionnement utilisés jusqu'à présent, ainsi que l'effet des paramètres technologiques qui peuvent l'influencer. On termine par une caractérisation de l'intégrité de la surface toilée. L'outil de coupe de ce procédé de super finition a été étudié dans le deuxième chapitre théorique. Dans cette partie, on présente essentiellement les paramètres de la topographie de la bande abrasive. Ainsi, le mécanisme d'usure des grains abrasifs constituant la bande abrasive.

Concernant la partie pratique, elle se compose de deux chapitres. Le premier chapitre comporte trois parties essentielles. Dans le premier volet, la démarche de la procédure expérimentale a été présentée (matériau usiné, moyens utilisés comme : le dispositif de toilage, les bandes abrasives, les profilomètres...etc, les paramètres mesurés de la texture de surface pendant toute cette étude expérimentale). Le deuxième volet présente les résultats et discussions de l'effet des différents paramètres du processus de toilage sur la texture de surface. Dans le troisième volet, on étudie l'influence de la taille décroissante des grains abrasifs sur la texture de la surface toilée.

Le dernier chapitre pratique comprend l'impact des différents types des galets de contact (métalliques, alliages métalliques et polymères) et des différentes duretés sur la texture de la surface toilée. Ainsi, nous faisons une comparaison approfondie entre les différents cas étudiés.

Notre travail de recherche comprend ainsi une introduction générale et une conclusion générale afin de résumer les résultats trouvés.

CHAPITRE 1

Procédé de super finition par toilage

1. Introduction.....	10
2. Rappel sur le tournage dur.....	10
3. Définition de super finition.....	12
4. Définition de toilage.....	12
5. Principes de fonctionnement.....	15
6. Effet des paramètres technologiques de toilage.....	16
6.1. Temps de cycle.....	16
6.2. Support de la bande.....	19
6.3. Vitesse de la bande.....	21
6.4. Taille des grains abrasifs.....	24
6.5. Pression de contact.....	25
6.6. Fréquence d'oscillation.....	26
6.7. Lubrification.....	27
7. Caractérisation des surfaces toilées.....	29
7.1. Texture de surface.....	29
7.2. Contraintes résiduelles.....	35
7.3. Microstructure métallurgique.....	37

1. Introduction

Au cours de fabrication des pièces mécaniques de précision constituant le moteur de l'automobile (le vilebrequin, l'arbre à cames, la soupape, le synchroniseur de la boîte de vitesse,...etc), l'usinage se termine par une étape finale, appelée la finition ou la super finition. On peut citer comme exemple : la rectification à traits croisés, le toilage, le pierrage, le galetage,...etc. Le but étant d'obtenir un produit dont la qualité de la surface de contact liée à la notion de l'intégrité de surface soit meilleure. Par conséquent, améliorer considérablement cette intégrité jusqu'à une certaine profondeur pour augmenter la tenue en fatigue (augmenter la durée de vie en fatigue), la résistance à l'usure et à la corrosion. Le procédé d'usinage par toilage est une étape principale dans l'industrie automobile pour la super finition de ces pièces de précision et l'obtention des surfaces fonctionnelles.

2. Rappel sur le tournage dur

Le tournage dur (TD) se définit comme une opération de tournage sur des métaux durs (aciers et fontes) [Grz12]. Ces matériaux sont traités et durcis thermiquement, d'une dureté de 45 HRC à 65 HRC [Grz05], donc le tournage de ces métaux avec ces conditions s'appelle le tournage dur. Il se présente comme une alternative intéressante à la rectification conventionnelle. Cette dernière demeure souvent longue, coûteuse, non flexible et dégrade l'environnement. Cette dégradation est due aux liquides de refroidissement lors de l'usinage des pièces de précision [Grz05]. Par le tournage dur (TD), les coûts de fabrication peuvent être réduits puisque, il s'agit d'un usinage à sec, tout en diminuant le temps de production (délais d'usinage) et améliorant la qualité globale du produit [Klo05].

Le tournage dur des pièces en acier de dureté supérieure à 60 HRC avec les outils de coupe mélangés en céramique et PCBN (nitride de bore cubique polycristallin) est l'un du processus les plus intéressants pour la finition précise [Klo05, Khe10]. Depuis le début des années 1980, il a été appliqué dans de nombreux cas comme la production de roulements, engrenages, pignons de boîtes de vitesses, pignons de transmission, vilebrequins, arbres à cames...etc. [Grz05].

Pour usiner ces matériaux de haute dureté par ce procédé (TD), il est nécessaire d'utiliser des outils de coupe de haute résistance à la température, à l'usure et de bonne stabilité chimique. Ceci grâce aux outils céramiques ou de nitride de bore cubique (CBN) [Grz05, Grz12]. Le tournage dur par outil de coupe CBN 7020 permet d'obtenir un bon état de surface ($Ra = 0,38$

μm à $1,04 \mu\text{m}$) compris dans les limites de la rugosité obtenue par la rectification ($Ra = 0,2 \mu\text{m}$ à $1,1 \mu\text{m}$) (voir figure 1.1) [Ben07].

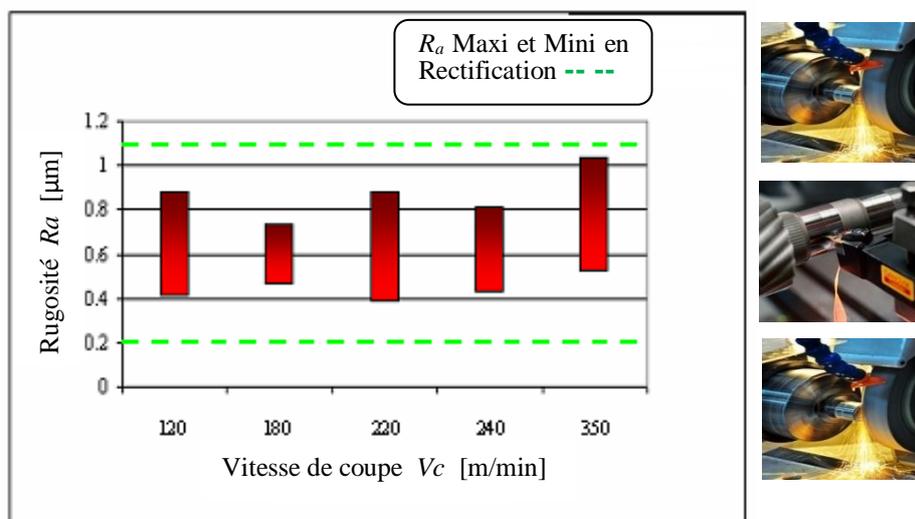


Figure 1.1 : Comparaison de l'état de surface obtenu à différentes vitesses de coupe entre le tournage dur par CBN 7020 ($f = 0,08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$) et la rectification [Ben07]. Le tableau 1.1 présente une comparaison entre le tournage dur et la rectification cylindrique. Désormais, il est courant de voir des pièces ayant une qualité de surface de $0,15 \mu\text{m}$ (Ra) obtenue directement par usinage sans rectification.

Tableau 1.1 : Comparaison entre le tournage dur (TD) et la rectification [Pag03].

	TOURNAGE DUR	RECTIFICATION
Gamme d'usinage	Plus courte : suppression de la phase rectification	Plus complexe car changement de prises des pièces
Temps d'usinage	Faible si $L < 40 \text{ mm}$	Important sauf si L est grand
Etats de surface [Ra]	$0,15 \mu\text{m}$	$0,15 \mu\text{m}$
Défaut de forme	Facilite l'opération de polissage	Evite les problèmes dus aux stries en hélice
Précision	Jusqu'à IT-5	Jusqu'à IT-3
Coût Machine	150000 €	380000 €
Coût outil	6 à 45 €	45 €
Coût main d'œuvre	1 €	3,5 €
Environnement	Retraitement des copeaux : dépollution (huile de coupe)	Les boues de rectifications sont difficiles et chères à retraiter

3. Définition de super finition

Les procédés de super finition sont les procédés permettant d'atteindre des qualités (rugosité et dimension) inatteignables par les procédés courants (tournage, fraisage, rectification,... etc) [Rech09]. Ils permettent à l'utilisateur d'obtenir une finition régulière et une qualité de surface souhaitée. Les procédés de super finition sont [Rech09] :

- Mécaniques : galetage, brunissage, ...
- Chimiques : polissage électrochimique, ...
- Abrasions : toilage, pierrage (rodage), polissage, ...

4. Définition de toilage

La super finition par toilage est un procédé d'usinage classé parmi les procédés de super finition par enlèvement de matière. Il se fait par action mécanique d'un outil coupant constitué d'un grand nombre des grains abrasifs de haute dureté, de forme aléatoire entre eux et de petite taille. Alors, l'outil de coupe dans ce processus d'usinage est une bande abrasive régénérée automatiquement et appliquée sur une pièce en rotation avec une pression définie par un support. Relativement à la géométrie du support pressant la bande contre la surface toilée, il existe deux configurations distinguées de cette technique d'usinage abrasif. La première, le support est un galet élastique de forme cylindrique en polyester de dureté bien définie appliqué sur le film abrasif qui oscille axialement (Figure 1.2) [Jou05, Khe13]. La deuxième configuration, le support est une mâchoire de forme définie pressant la bande abrasive sur la pièce cylindrique toilée. L'angle de contact bande abrasive/surface toilée peut varier entre 160° et 320° [Elm07, Ser15a, Ser15b].



Figure 1.2 : Principe de toilage par galet (a); Structure de la bande (b); Vue au MEB d'une toile réelle de calibre 20 μm (c); Exemple du dispositif de toilage par galet (d) [Jou05, Khe07a].

Dans les deux principes de toilage (par mâchoire ou par galet), cette technologie de super finition utilise l'action mécanique de l'abrasion à faible vitesse, le frottement des grains abrasifs plus dur que la pièce à toiler permettant d'éroder les matériaux avec haute précision, ce qui limite le temps de rodage d'un moteur. La finition par la bande abrasive est récente dans le domaine des procédés de super finition des matériaux durs par rapport à la rectification, spécialement pour le polissage des pièces mécaniques de précision constituant le moteur automobile (les vilebrequins, les arbres à cames, les soupapes,...etc) [Khe13, Elm07].

Ce procédé de super finition est largement utilisé, remarquablement simple et peu coûteux (économique). Malheureusement, son développement pratique est difficile parce que les mécanismes physiques de base de ce processus d'abrasion, jusqu'à se jour sont méconnus et les rapports entre les variables de processus et les caractéristiques de surface en particulier du point de vue de l'aspérité et de la tolérance sont difficiles à définir car les paramètres sont nombreux [Elm07, Mez09a]. Ainsi, dans l'industrie, la gamme de procédé de toilage reste encore empirique, avec chaque spécification de nouvelle production, les tests préliminaires sont en effet nécessaires pour réaliser la configuration opérationnelle optimale du processus. Le temps d'installation est rendu plus long par le fait que les variables de processus sont nombreuses et il est très difficile d'évaluer les effets de leurs combinaisons [Elm07, Mez09a]. D'ailleurs, le rôle joué par chaque variable de fonctionnement dépend profondément du type d'opération de toilage (ébauche "phase de pré-finition" ou de finition) [Mez09b].

Rech et Moisan ont montré que le toilage est un procédé complémentaire au tournage dur [Rec03a]. En effet, des études précédentes [Kis99, Rec03b] ont mis en évidence que malgré les performances du tournage dur en termes de précision dimensionnelle et d'état de surface, des problèmes importants peuvent se poser et exister sur l'intégrité de surface. Il a été déjà démontré que l'usure en dépouille V_B des outils entraînait une dérive des contraintes résiduelles de traction (figure 1.3.a), ainsi que des modifications métallurgiques (couches blanches – figure 1.3.b). Ce qui détériore la tenue en fatigue et diminue la résistance à l'usure des pièces mécaniques. De plus, cette dérive s'accompagne d'une détérioration de la topographie de surface due à l'apparition de refoulements de matière sur les côtés des sillons (figure 1.3.c). Ces morceaux de matières très dures, très fragiles et facilement détachables constituent des sources majeures d'endommagement des cônes de synchroniseur, ainsi que les dentures des engrenages [Rec03a]. Ces phénomènes induisent une usure rapide de pièces en service [Khe07a]. Rech et Moisan (Rec03c) ont prouvé que le toilage enlève les refoulements

de matière induit par le tournage dur. Il mène à une surface plus homogène, qui améliore considérablement les paramètres de rugosité et de la courbe de portance.

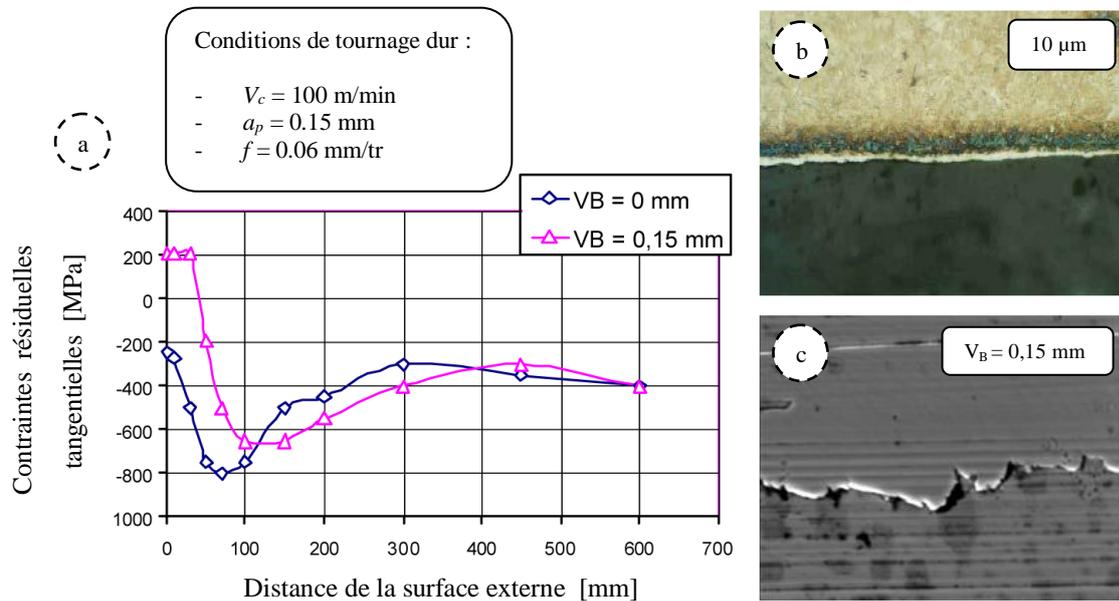


Figure 1.3 : Problèmes d'intégrité de surface observés sur des surfaces tournées [Rec03a].

Aujourd'hui, cette technologie de finition avancée est utilisée parmi diverses technologies de fabrication dans le domaine de l'industrie automobile pour améliorer l'efficacité environnementale des moteurs de véhicules par la réduction de la consommation d'huile, ainsi que la consommation de carburant et la limitation des émissions de CO₂, sans doute, avec l'amélioration de l'efficacité globale du moteur [Elm07]. De plus, l'avantage principal de cette technique est plus simple et moins coûteuse [Van10].

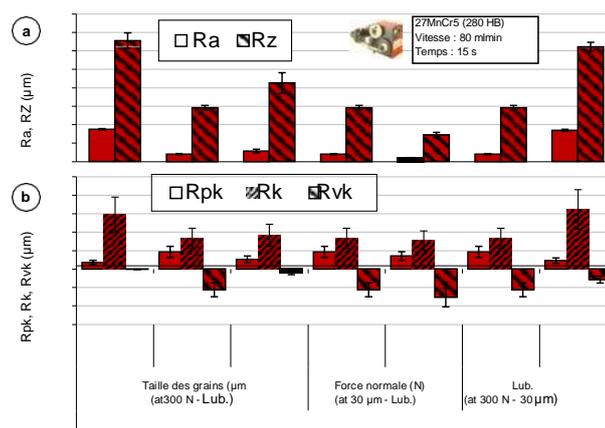


Figure 1.4 : Influence de la taille des grains abrasifs, la charge normale et la lubrification de toilage sur : la rugosité de surface (a) et les paramètres de portance (b) [Cou16].

En conclusion, l'importance du procédé de tournage dur dans l'industrie mécanique est primordiale, mais pendant l'enlèvement des copeaux, le réseau cristallin de la surface de

l'organe mécanique est endommagé jusqu'à une certaine profondeur. Le toilage est une solution intéressante pour corriger les défauts laissés par TD. Il réduit les irrégularités de surface et améliore de façon très significative l'intégrité de la surface [Khe07a, Rec03a]. Cette dernière peut être complètement modifiée lors de l'application de procédé de toilage lubrifié et peut être améliorée par rapport à l'état initial de tournage à sec (figure 1.4) [Cou16].

5. Principes de fonctionnement

Dans l'usinage à l'abrasif par toilage deux variantes peuvent être distinguées [Sur07] :

- ❖ La première variante consiste à mettre en contact la pièce à usiner avec une toile abrasive sans fin tournant autour de deux cylindres (toilage avec courroie abrasive). Le contact avec la pièce est de type tangentiel comme dans le cas de rectification. La toile est remplacée lorsque son pouvoir abrasif est fortement réduit (les conditions de finition ne sont pas stables). Pour cette raison, cette configuration de toilage est utilisée surtout pour des opérations d'ébauche dans le cas des matériaux fragiles.
- ❖ La deuxième variante, se caractérise par le défilement continu ou indexé d'un ruban abrasif neuf. Ce défilement assure les mêmes conditions de finition pour chaque pièce. Dans cette typologie de super finition par toilage, différentes configurations peuvent être aussi distinguées en fonction de la géométrie du support pressant la toile abrasive contre la surface à usiner :
 - ☞ Le toilage par galet (figure 1.5.a) : un galet cylindrique, de dureté définie, presse la toile abrasive sur la pièce. Le contact bande/surface usinée est très limité.
 - ☞ Le toilage par mâchoire (figure 1.5.b) : des mâchoires de forme définies pressent ensemble la toile abrasive sur la pièce cylindrique. Le contact bande abrasive/surface toilée peut recouvrir la totalité de la circonférence de la pièce. Ce type de toilage est réservé à l'obtention simultanée de spécifications macro-géométriques (circularité,...) et micro-géométriques (ondulation et rugosité).

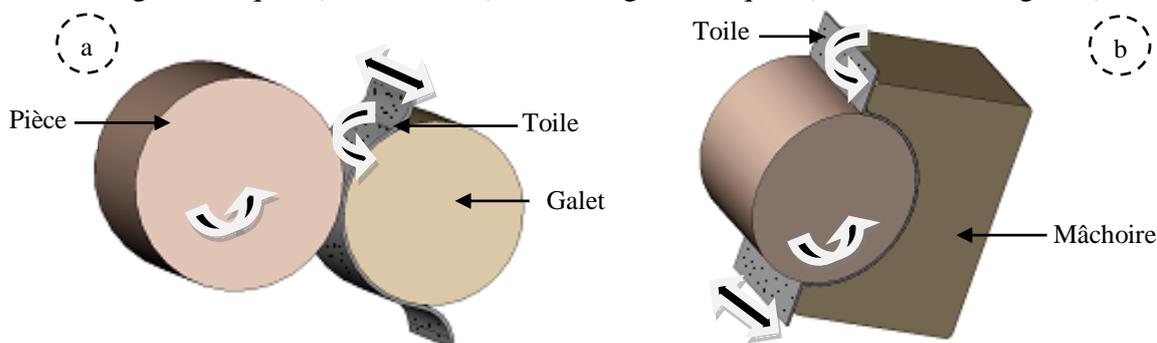


Figure 1.5 : Principe de toilage : (a) par galet et (b) par mâchoire.

6. Effet des paramètres technologiques de toilage

Le processus de toilage de précision est un procédé de fabrication mécanique complexe vu le grand nombre des paramètres qui peuvent l’influencer. L’organigramme ci-dessous montre les paramètres ayant une grande influence sur le mécanisme du processus d’usinage abrasif.

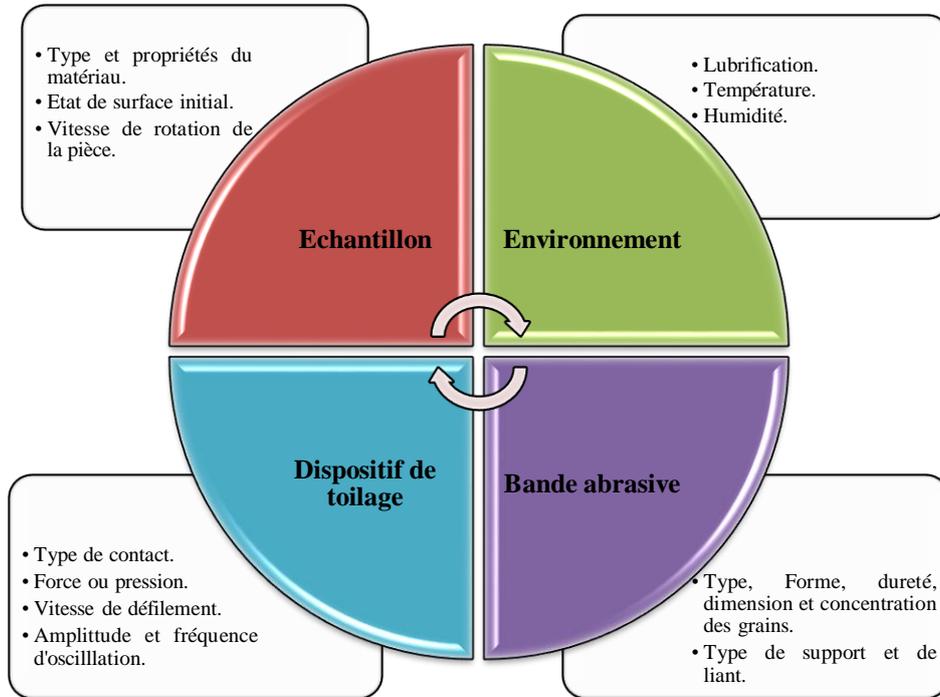


Figure 1.6 : Facteurs influençant le procédé de super finition par toilage.

Donc, la super finition par toilage est un procédé complexe vu le grand nombre des paramètres technologiques qui peuvent l’influencer tels que :

6.1. Temps de cycle

Tous les procédés d’usinages par enlèvement de matière sont raccordés par leur temps d’exécution. Les chercheurs et les fabricants recherchent toujours une durée d’usinage faible afin de diminuer le prix de revient des pièces mécaniques de précision, c’est ce qui s’applique au toilage. Ghidossi et al [Ghi05] ont utilisé un autre critère pour mesurer la rugosité en fonction de la durée de toilage par mâchoire. Ce critère s’appelle gain de rugosité G_R . Il permet de s’affranchir des dispersions des valeurs de la rugosité et de ne pas se contenter de caractériser l’état de surface par un nombre. G_R ou ΔR_g est défini comme étant le rapport du critère de rugosité R (NF EN ISO 12085). Il est donné par l’équation suivante [Mez09b] :

$$\Delta R_g = \frac{R_{initial} - R_{final}}{R_{initial}} \dots\dots\dots(1.1)$$

La figure 1.7 représente la variation du gain de rugosité G_R en fonction de la durée de l'opération de super finition par toilage $t_{toilage}$.

Dans un premier temps, la dimension des irrégularités de surface diminue considérablement avec la durée de toilage ($G_R = 5,1$ dans les 9 premières secondes). La rugosité R obtenue est de l'ordre de $0,25 \mu\text{m}$. G_R se stabilisé à ce niveau au delà des 9 secondes de toilage, même si la dispersion augmente sensiblement, notons ici que la variation des irrégularités de surface avec la durée du toilage confirme la présence de deux régimes distincts [Ghi05] :

- ✚ Régime primaire transitoire (G_R croît).
- ✚ Régime secondaire établi (G_R constant).

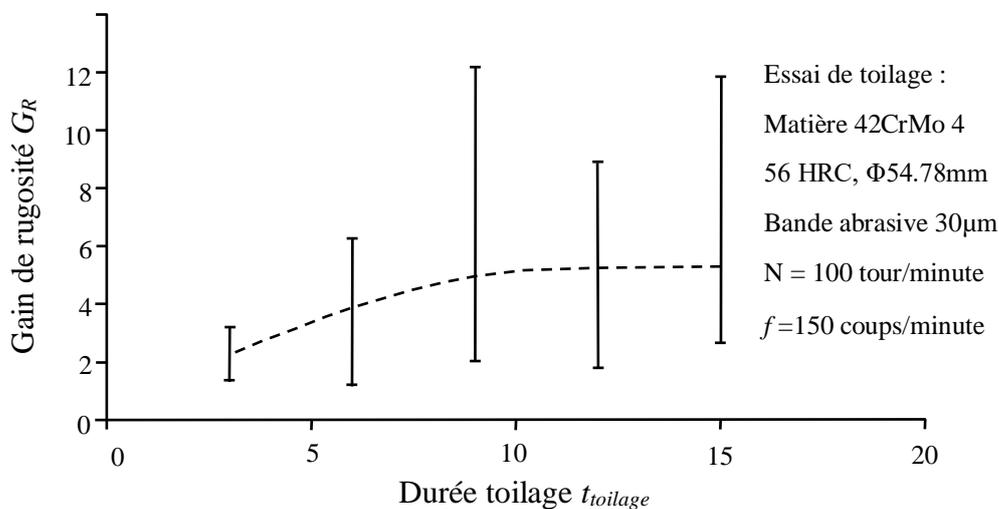


Figure 1.7 : Evolution du gain de rugosité G_R en fonction de la durée de toilage $t_{toilage}$ [Ghi05].

Dans son étude concernant l'influence du temps de cycle et la fréquence d'oscillation sur la surface toilée des tourillons de vilebrequin en acier trempé de dureté 50 HRC (D38MSV5S) par le principe de mâchoire avec une force de serrage (F_c) égale à 400 N , l'influence de la durée du cycle se manifeste par deux régimes de toilage [Elm07]:

- ☞ D'une part, un régime primaire de l'opération de toilage, qualifié de transitoire et caractérisé par un temps limite de coupe ; au cours de laquelle la finition de courte durée implique plutôt une prédominance par l'action d'enlèvement de matière (action de coupe, déformation plastique). Ce régime caractérisé par une forte réduction de R (environ 60 %) pour le cycle de temps $t_{processus} < 6 \text{ s}$.
- ☞ A l'inverse, le prolongement de l'opération de toilage jusqu'à un régime stationnaire (régime secondaire), conduit à la prédominance de la composante de frottement et non pas à un enlèvement de matière (surcharge de l'espace de stockage des copeaux).

En ce qui concerne le principe de toilage par galet, Khellouki et al [Khe07a] ont étudié l'évolution de deux paramètres d'amplitude de rugosité Ra et Rt en fonction de la durée de cycle. Ils ont démontré que cette évolution est composée de trois étapes (voir figure 1.8) :

1. Une première période de réduction rapide pendant les premières secondes de toilage. La rugosité de surface initiale $Ra = 0,25 \mu\text{m}$ a été améliorée à $0,1 \mu\text{m}$ après le toilage par galet en polyuréthane, ce qui représente une réduction de 60 %,
2. Une deuxième période de réduction lente,
3. Une troisième période de stabilisation.

Ils ont noté que le temps nécessaire à la stabilisation de Ra et Rt (transition de la deuxième période à la troisième) t_s est plus grand pour une vitesse d'avance de film plus lent que pour une vitesse plus rapide. Le processus de toilage est plus efficace pendant quelques secondes. Après cela, l'action de toilage est ralentie et arrêtée définitivement.

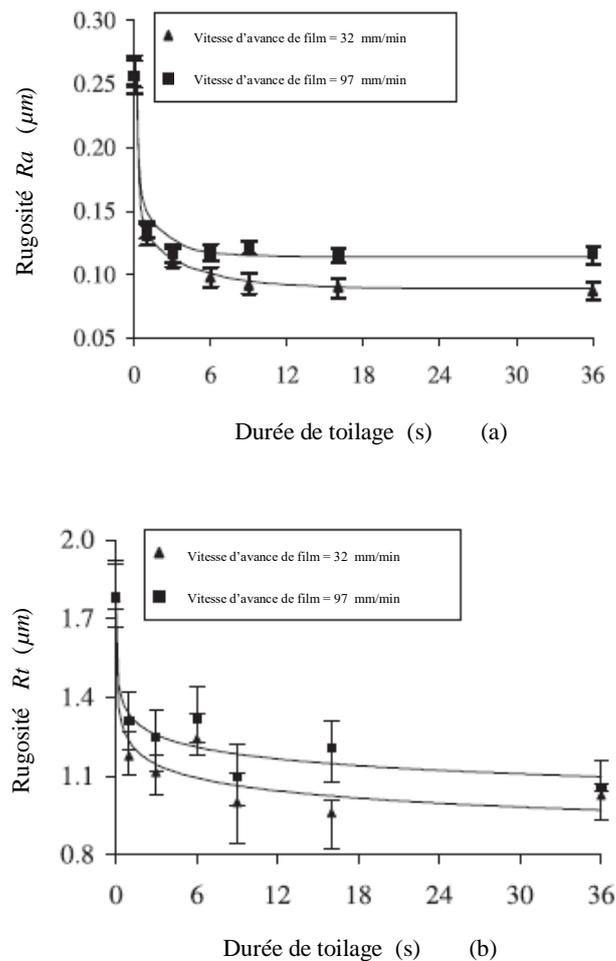


Figure 1.8 : Influence de la durée de toilage sur les paramètres Ra et Rt (conditions : $V_t = 160 \text{ m/min}$; $F = 310 \text{ N}$; $n_{osc} = 12 \text{ Hz}$; $a = 3 \text{ mm}$; $H_s = 90 \text{ Shore A}$) [Khe07b].

6.2. Support de la bande

Selon l'application et la qualité de finition exigée, la dureté des mâchoires ou des galets de travail est fondamentale. Lorsque la dureté des mâchoires augmente (mâchoire souple de dureté 58 HRC \rightarrow mâchoire dure de dureté 66 HRC), il y a une amélioration significative de l'épaisseur de la matière enlevée e_r ($3,5 \mu\text{m} \rightarrow 5 \mu\text{m}$). Concernant le temps du cycle t_c , $t_c^s = 6 \text{ s}$ pour la mâchoire souple et $t_c^h = 7 \text{ s}$ pour la mâchoire rigide. En termes de rugosité finale, les deux types de mâchoires présentent des performances comparables ($R = 0,3 \mu\text{m}$ pour la mâchoire rigide et $R = 0,25 \mu\text{m}$ pour la mâchoire souple). L'ondulation est réduite rapidement en finition : après 3 s, l'ondulation obtient sa valeur minimale (environ $0,22 \mu\text{m}$). De plus, cette valeur ne peut être modifiée qu'avec l'augmentation de la dureté du support de la bande abrasive (mâchoire) [Elm07].

Dans le deuxième cas de toilage par galet, Khellouki et al [Khe05] ont montré que la dureté du galet est un élément essentiel qui fait varier considérablement l'état de surface. Un galet tendre donne le meilleur état de surface. En effet, ce dernier s'écrase plus contre la pièce à toiler par rapport à un galet dur. Ceci augmente la surface en contact et par conséquent le nombre des grains actifs, ce qui améliore justement l'état de surface (voir l'effet d'élasticité de galet de contact sur le comportement de grain abrasif représenté dans la figure 1.9).

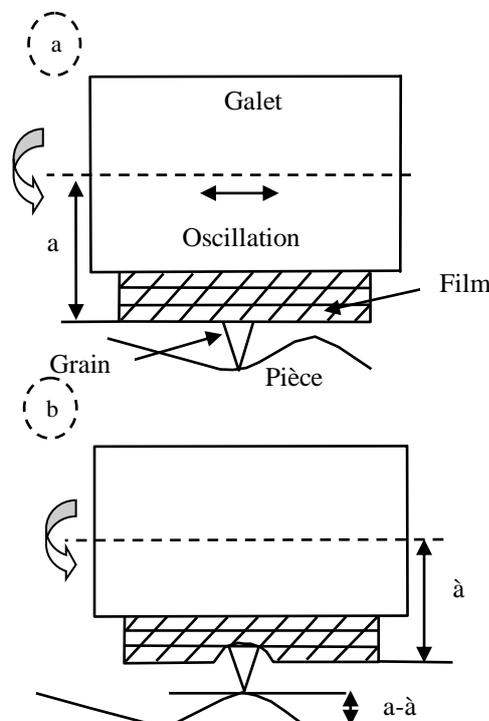


Figure 1.9 : Influence de l'élasticité du galet et du film supportant les grains abrasifs, (a) : au passage sur un creux d'ondulation, (b) : au passage sur un sommet d'ondulation [Khe05].

Pendant le processus de toilage, le galet de contact est déformé contre la pièce cylindrique (figure 1.10). Le paramètre L caractérise la longueur de la zone de contact entre la pièce finie et la bande abrasive. La largeur de cette zone de contact l dépend de la force appliquée F et de module d'Young du galet de contact, qui est liée à la dureté Shore A du matériau. Pour déterminer la relation entre la déformation du galet de contact (caractérisée par la largeur l) et la force appliquée F , Khellouki et al [Khe07a, b] ont quantifié expérimentalement deux duretés différentes des galets. Leurs expériences ont été effectuées sans aucune rotation de la pièce. La relation trouvée entre les deux (l et F) est proportionnelle ($F \nearrow \Rightarrow l \nearrow$).

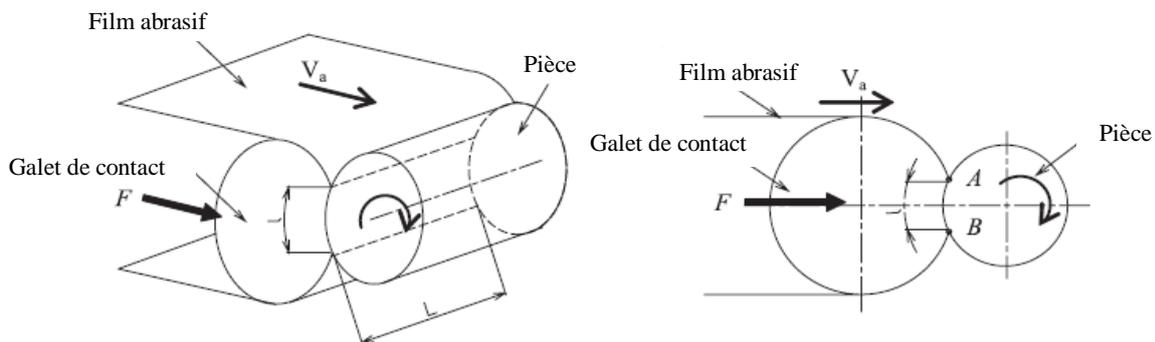


Figure 1.10 : Déformation élastique de la zone de contact [Khe07a, Khe07b].

Dans les deux articles publiés en 2007, Khellouki et al [2007a, b] ont étudié théoriquement et expérimentalement l'influence, ainsi que l'interaction de plusieurs paramètres du processus de toilage sur la texture de surface et l'enlèvement de matière des pièces en acier à roulement 100Cr6 (AISI 52100) de dureté 62 HRC. Les expériences sont faites statiquement (sans aucune rotation de la pièce usinée) afin de déterminer la relation entre deux galets en polyuréthane de dureté différente (dureté 90 Shore A et 70 Shore A) et d'autres paramètres comme la force appliquée, la pression de contact, la rugosité de surface et l'enlèvement de matière (figure 1.11). La conclusion intéressante de cette étude consiste à trouver d'une part une relation proportionnelle entre la déformation des deux galets de contact et la force appliquée et d'autre part, la relation entre la dureté du galet et sa déformation qui est inversement proportionnelle (la déformation du galet de dureté 70 Shore A est plus grande que celle du galet de dureté 90 Shore A). De plus, la même relation proportionnelle a été trouvée entre la pression moyenne de contact P_s et les deux paramètres suivants : la force appliquée F et la dureté du galet de contact. Dans les deux articles, la texture de surface a été améliorée lorsque la dureté du galet diminue ou la force appliquée augmente. Concernant l'action du galet sur l'enlèvement de matière, le galet plus dur enlève plus de matière que le galet souple, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation de la pression de contact moyenne.

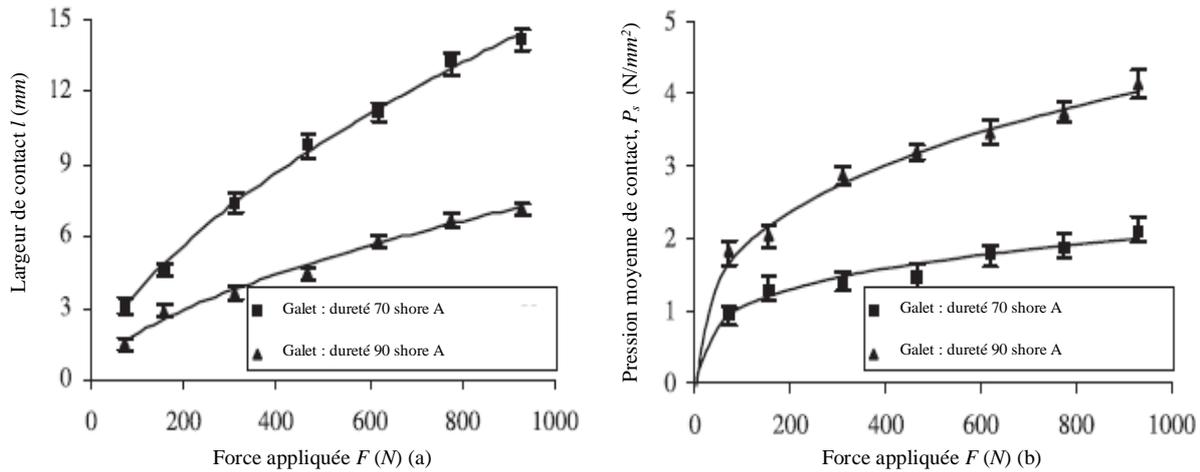


Figure 1.11 : Effet de la force appliquée sur: (a) la largeur de la zone de contact et (b) la pression de contact moyenne (essai statique : sans aucune rotation de la pièce) [Khe07b].

Le tableau 1.2 présente deux paramètres de contact (largeur de contact l et la pression moyenne de contact P_s) pour deux valeurs de dureté du galet (90 et 70 Shore A).

Tableau 1.2 : Paramètres de contact (l et P_s) pour deux valeurs différentes de dureté du galet de contact [Khe07b].

Paramètres de contact	Dureté du galet de contact	
	90 Shore A	70 Shore A
Largeur de contact, l (mm)	3,6	7,4
Pression moyenne de contact, P_s (N/mm ²)	2,9	1,4

6.3. Vitesse de la bande

La vitesse de défilement (appelée aussi la vitesse d'avance de la bande) est un paramètre influant fortement la performance de procédé de toileage. Quand l'avance de la bande abrasive augmente, les paramètres de la rugosité de hauteur Ra et Rt augmentent également [Khe07b]. Ainsi, pour avoir un bon état de surface, l'avance de la toile doit être faible. En effet, l'avance de la bande abrasive est sensée régénérer cette dernière afin d'introduire des grains neufs et améliorer aussi la capacité de coupe de l'outil de coupe. Une première explication consiste à proposer l'idée selon laquelle des grains plus arrondis (qui sont le résultat d'une avance faible du film abrasif) conduisent à des états de surface plus pertinents (figure 1.12) [Khe05].

La figure 1.13 illustre le déplacement d'un grain abrasif à une durée de toileage fixe, mais à deux vitesses d'avance différentes. Donc, dans le cas d'une vitesse lente, l'état de surface est

meilleur, les grains passent plus de temps en contact avec la pièce finie. Les grains abrasifs se trouvent plus arrondis, ce qui conduit à un meilleur état de surface [Khe05]. La durée nécessaire t_s pour qu'un grain abrasif passe de point A au point B peut être déterminée par la déformation l et la vitesse d'avance du film V_a comme suit [Khe07a, Khe07b] :

$$t_s = \frac{l}{V_a} \dots\dots\dots(1.2)$$

t_s devient plus long, si la déformation l augmente (pour des forces appliquées élevées ou des galets doux) et/ou lorsque la vitesse d'avance du film diminue.

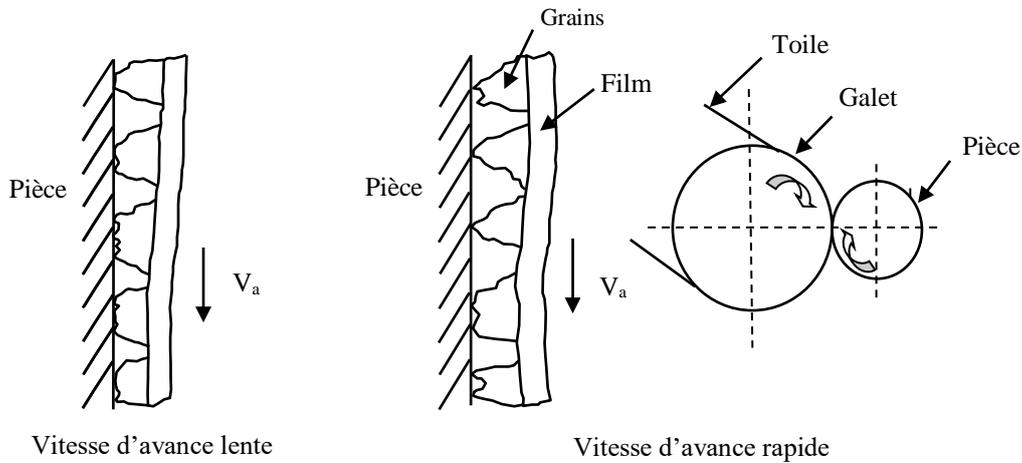


Figure 1.12 : Influence de la vitesse d'avance V_a de la bande abrasive sur le comportement d'usure des grains abrasifs dans la zone de contact [Khe05].

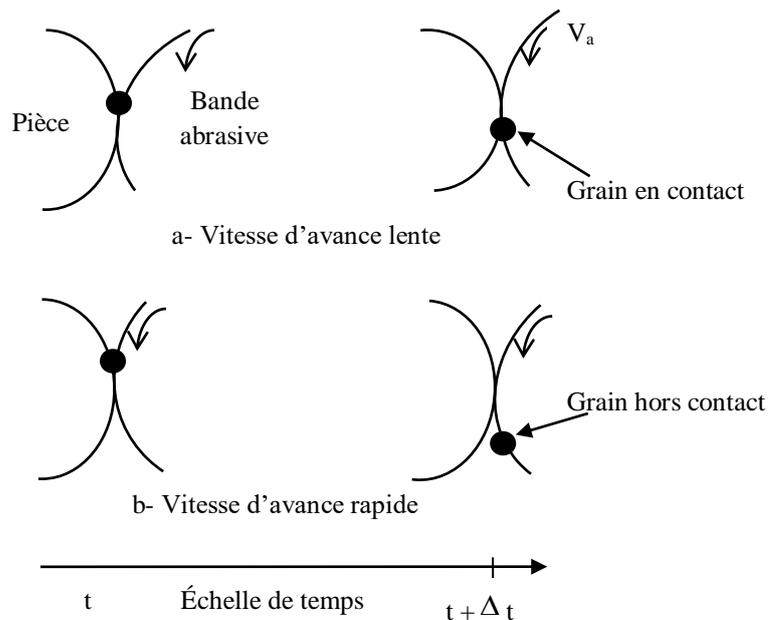
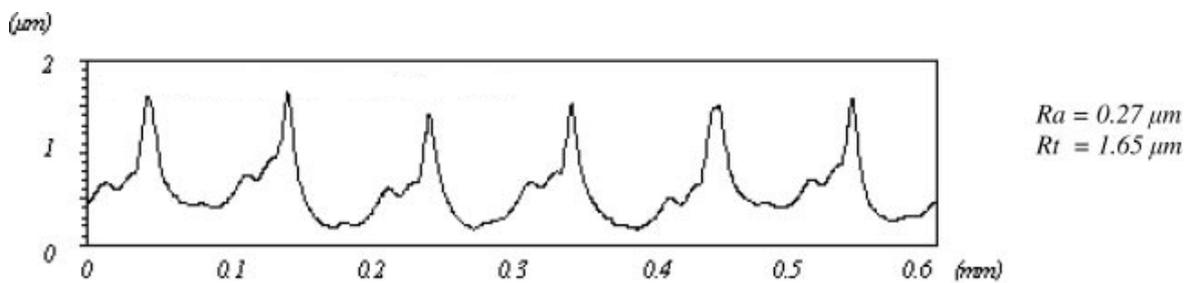
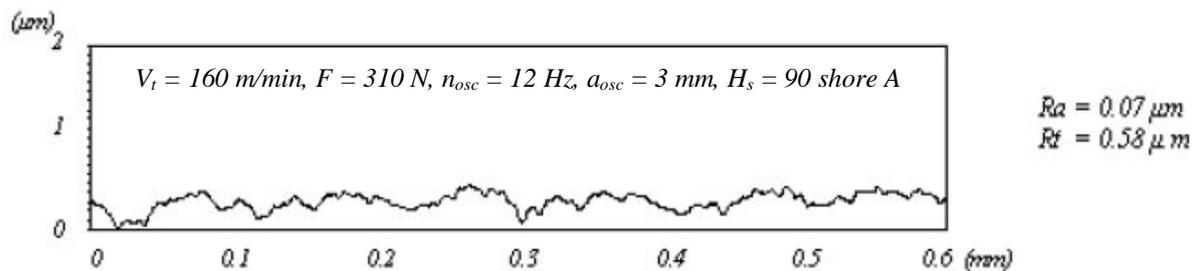


Figure 1.13 : Déplacement d'un grain abrasif en contact pour la même durée de toilage et à deux vitesses d'avance différentes V_a [Khe05].

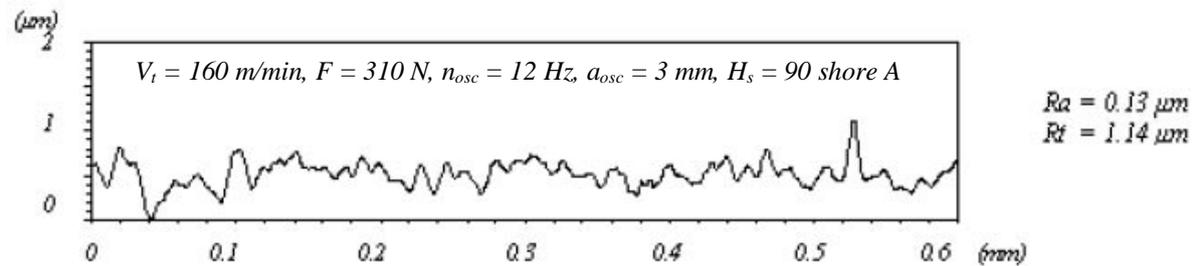
Khellouki et al [Khe07b] ont analysé trois profils de rugosité de surface avant et après toilage des pièces en acier de roulement 100Cr6 (AISI 52100) trempées à dureté 62 HRC (figure 1.14). Ils ont trouvé que sans vitesse d'avance de la bande (vitesse nulle : $V_a = 0$ mm/min) qui s'accompagne d'un nombre croissant d'arêtes de coupe des grains abrasifs, les profils de rugosité sont constitués par de petites aspérités. Dans le deuxième cas, pour une vitesse d'avance rapide du film qui s'accompagne d'un nombre réduit d'arêtes de coupe des grains abrasifs, les aspérités sont plus grandes et plus profondes (une texture superficielle rugueuse). Ils ont indiqué dans leur conclusion qu'une faible vitesse d'avance du film abrasif est plus appropriée pour obtenir une meilleure rugosité de surface.



(a) Profil après tournage dur ($V_t = 120$ m/min, $f = 0,1$ mm/rev, $a_p = 3$ mm).



(b) Profil après toilage sans vitesse du film ($V_a = 0$ mm/min).



(c) Profil après toilage avec vitesse rapide du film ($V_a = 97$ mm/min).

Figure 1.14 : Comparaison des profils obtenus par : (a) tournage dur, (b) toilage sans avance ($V_a = 0$ mm/min), et (c) vitesse d'avance rapide du film ($V_a = 97$ mm/min) [Khe07b].

6.4. Taille des grains abrasifs

Les grains abrasifs de taille, de forme et d'orientation variable permettent l'enlèvement de matière par abrasion à l'échelle micrométrique ou submicrométrique. De manière évidente, les grains abrasifs de grosseur élevée génèrent plus de micro-copeaux, d'où un fort taux d'enlèvement de matière. Ce dernier croît linéairement avec la taille des grains abrasifs [Elm07]. La circularité est indépendante de la taille des grains de la toile abrasive dans le cas d'un matériau moins dur. Contrairement au cas où la contre face est un acier par exemple, les défauts de circularité sont diminués par le toilage. L'effet de dureté superficielle de la contre face explique cette différence [Elm07].

De nombreux chercheurs ont fait différents essais de super finition par différents principes de toilage. Des configurations ont été faites sur chacun de ces essais. Mezghani et al [Mez09a, Mez09b] ont trouvé que c'est la bande abrasive de granulométrie 30 μm qui permet toujours d'atteindre des valeurs minimales de rugosité et donne par conséquent un meilleur état de surface par rapport aux autres bandes de taille de grains abrasifs inférieure (9 μm) ou supérieure (80 μm) à cette grosseur sur différents matériaux durs (acier : D38MSV5S de dureté ≈ 55 HRC et fonte : GS51 de dureté ≈ 30 HRC [Mez09a, Mez09b], acier de cémentation 27MnCr5 de dureté après trempe est : 280 ± 20 HB [Cou16]). Ces essais ont été réalisés dans différents conditions de toilage ou de tournage dur (figure 1.15). Le taux obtenu de réduction de la rugosité maximale (égal 85 %) est presque deux fois de celui obtenu par la taille des grains plus fine 9 μm et plus grossière 80 μm . De plus, la valeur de la taille optimale des grains est indépendante de la pression de contact appliquée [Mez09a, Mez09b].

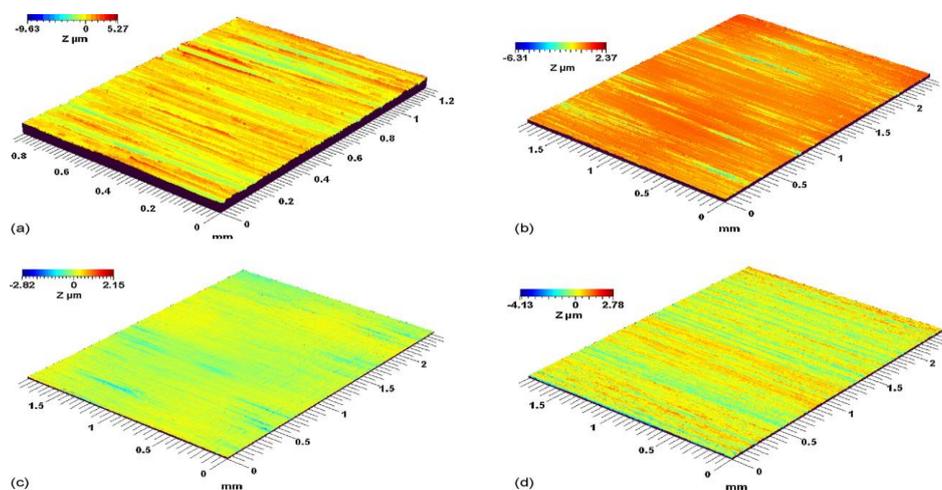


Figure 1.15 : Vue 3D de topographie des surfaces extérieures de l'acier original (a) et après le toilage par différentes tailles des grains : 9 μm (b), 30 μm (c), et 80 μm (d) [Mez09b].

6.5. Pression de contact

Pendant la finition par la bande abrasive, la pression de contact (force appliquée sur la surface de contact) est le paramètre influençant significativement la topographie de surface avec la durée efficace de contact (entre un grain abrasif et la surface finie) et le nombre de grains actifs dans le contact [Khe07a]. En général, l'augmentation de la pression a un effet positif sur la rugosité. En effet, quand la pression de contact entre la pièce et la bande abrasive augmente, le nombre des grains actifs augmente également. Par voie de conséquence, le nombre d'arêtes de coupe coupant la matière augmente, ce qui améliore l'état de surface. La rugosité décroît beaucoup plus vite lorsqu'on augmente la pression de contact [Cha08].

Selon Khellouki et al [khe07a, khe07b] la pression de contact entre la pièce finie et la bande abrasive augmente lorsque la force appliquée augmente, mais P_s est plus élevé pour un galet dur que pour un galet souple. De plus, le paramètre de rugosité R_a diminue. Cette réduction est rapide pour les forces appliquées faibles parce que le nombre de grains actifs est plus grand et moins usé. Par contre, lorsque la force appliquée est supérieure à 310 N, la réduction de rugosité est lente en raison de l'usure rapide des grains (haute pression locale), alors que la forme des grains dépend de la pression entre le galet de contact et la surface de la pièce toilée (figure 1.16). Les auteurs ont défini la relation entre la pression moyenne de contact macroscopique et la force moyenne appliquée sur la surface toilée par :

$$P_s = \frac{F}{l \times L} \dots\dots\dots(1.3)$$

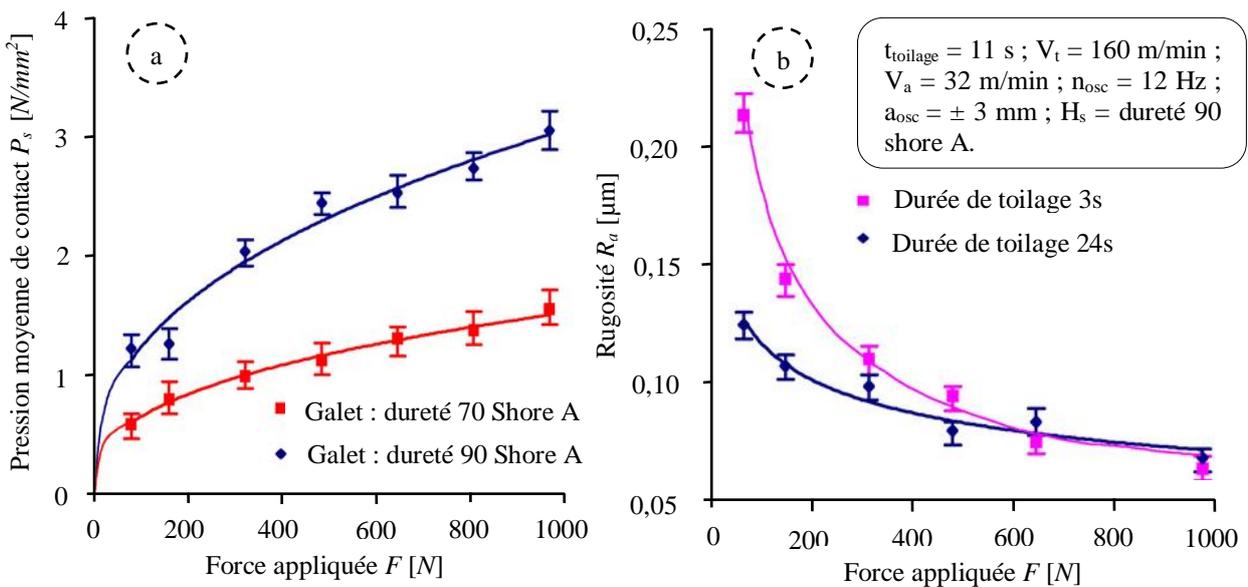


Figure 1.16 : Influence de la force appliquée sur : (a) pression moyenne de contact P_s ; essai statique (b) paramètre de rugosité R_a [Khe07a].

Les mêmes chercheurs [khe07a, khe07b] ont indiqué que l'enlèvement de matière augmente avec la force appliquée ou le temps de toilage. La réduction de diamètre est plus grande pour un galet plus dur que pour un galet souple comme illustre la figure 1.17. Ceci est dus à l'augmentation de la force de coupe de chaque grain abrasif (caractérisé par la pression moyenne de contact P_s) et au nombre des grains actifs N_g (caractérisé par la largeur de contact l entre la pièce toilée et l'outil de coupe). Ils ont conclut que l'augmentation du nombre des grains actifs N_g est le paramètre le plus influent dans le cas d'un galet plus souple, ainsi, l'augmentation de P_s est le paramètre le plus influent dans le cas d'un galet plus dur.

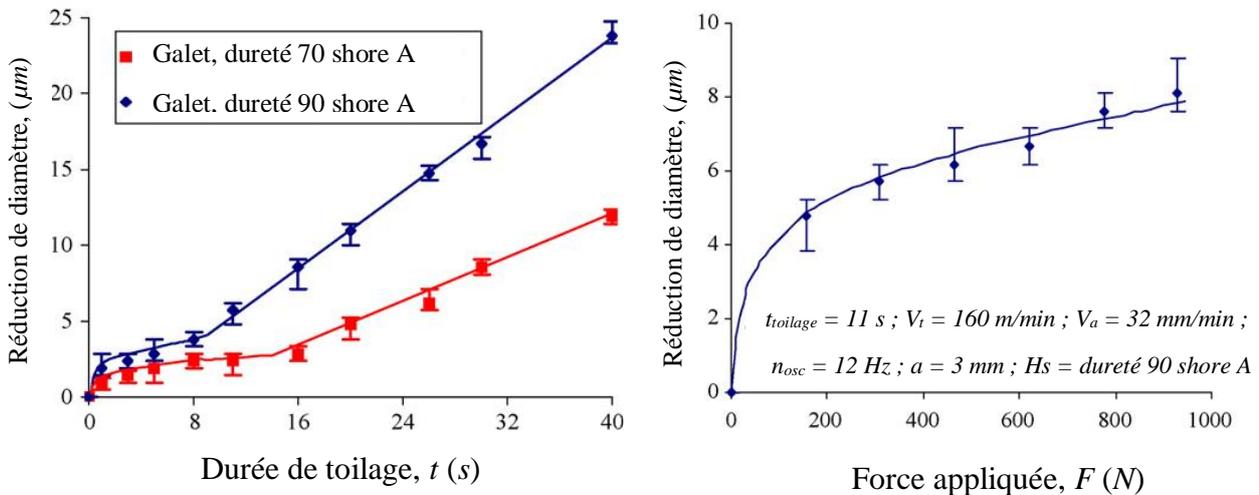


Figure 1.17 : Réduction de diamètre par toilage en fonction de : (a) temps de toilage et (b) force appliquée [Khe07a].

6.6. Fréquence d'oscillation

L'enlèvement de matière dans le processus de toilage est assuré par deux mouvements : la rotation de la pièce et l'oscillation axiale des mâchoires ou de galet avec une fréquence f et amplitude A . La fréquence d'oscillation de la bande abrasive influence non seulement le taux d'enlèvement de matière mais également la réduction des irrégularités de surface de la pièce finie. L'épaisseur de la matière enlevée sans oscillation de la bande ($f = 0$) est inférieure à celle obtenue en faisant osciller la bande [Elm07]. La figure 1.18 montre une progression croissante de gain de rugosité G_R en fonction de f . On note aussi que sans oscillation de la bande ($f = 0$), le gain de rugosité reste à un niveau très faible de 1,9 par rapport aux fréquences supérieures. Cette augmentation du gain de rugosité G_R dès que $f > 0$ montre l'influence très importante de l'oscillation transversale de la bande sur l'action des grains. En effet, en faisant osciller le contact toile/pièce, la densité des grains actifs augmente [Ghi05].

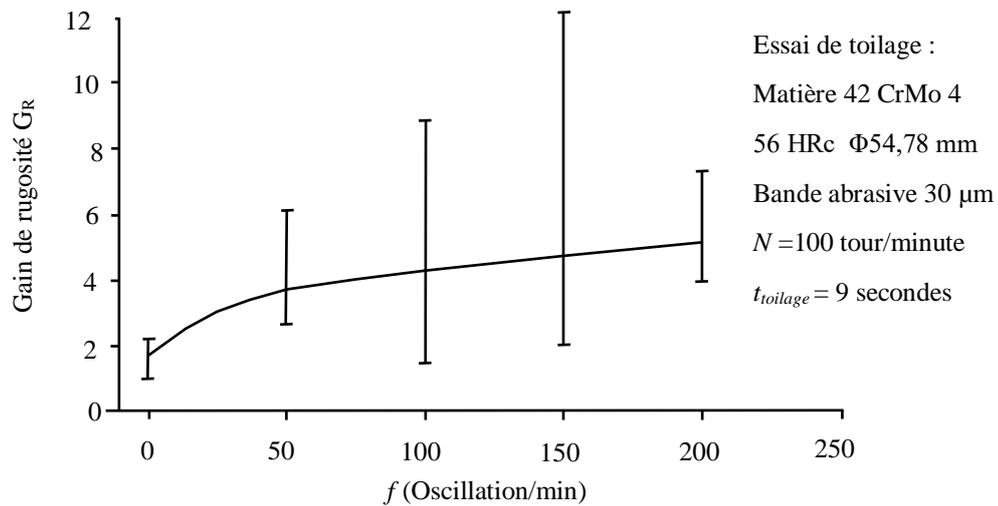


Figure 1.18 : Evolution du gain de rugosité G_R en fonction de la fréquence d'oscillation f de la bande abrasive [Ghi05].

6.7. Lubrification

Le lubrifiant joue un rôle primordial dans tous les procédés d'usinage par enlèvement de copeaux. D'après ce qui est reconnu, ce paramètre améliore toujours l'état de surface obtenu par les procédés d'usinage classique comme : la rectification, le tournage, le fraisage...etc. Pour cette raison, l'étude approfondie de son influence sur l'intégrité de surface usinée par ces nouveaux procédés d'usinage est intéressante. En technique d'usinage par toilage, Khellouki et al [khe10] sont les premiers chercheurs ayant étudiés profondément l'effet de lubrification sur la rugosité de surface produite par toilage. Ils ont utilisé deux méthodes de lubrification : la lubrification conventionnelle par l'huile minérale et la lubrification de quantités minimales (micro-pulvérisation) comme présente dans la figure 1.19.

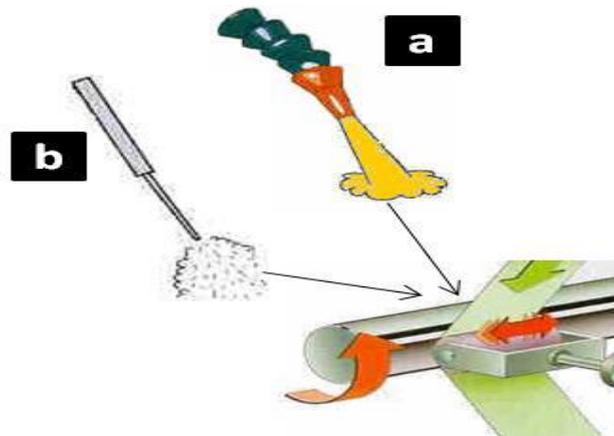


Figure 1.19 : Modes de lubrification dans le toilage : (a) lubrification conventionnel avec l'huile minérale, (b) lubrification de quantités minimales [Khe10].

Les chercheurs en question ont fait une comparaison entre le toilage à sec et toilage avec liquide d'arrosage d'une part. Puis le toilage par lubrification de quantités minimales par rapport au toilage par lubrification conventionnel d'autre part. Dans les deux cas, en fonction de la vitesse de défilement de la bande abrasive. Cette dernière est constituée d'une seule couche des grains abrasifs Al_2O_3 de grosseur moyenne $30\ \mu m$ stockés sur une bande de papier élastique renforcée par des fibres. Ils ont montré que la lubrification de quantités minimales (*MQL*) avec une faible vitesse de défilement de la bande abrasive est la meilleure manière d'obtenir des caractéristiques optimales de rugosité de surface (voir figure 1.20).

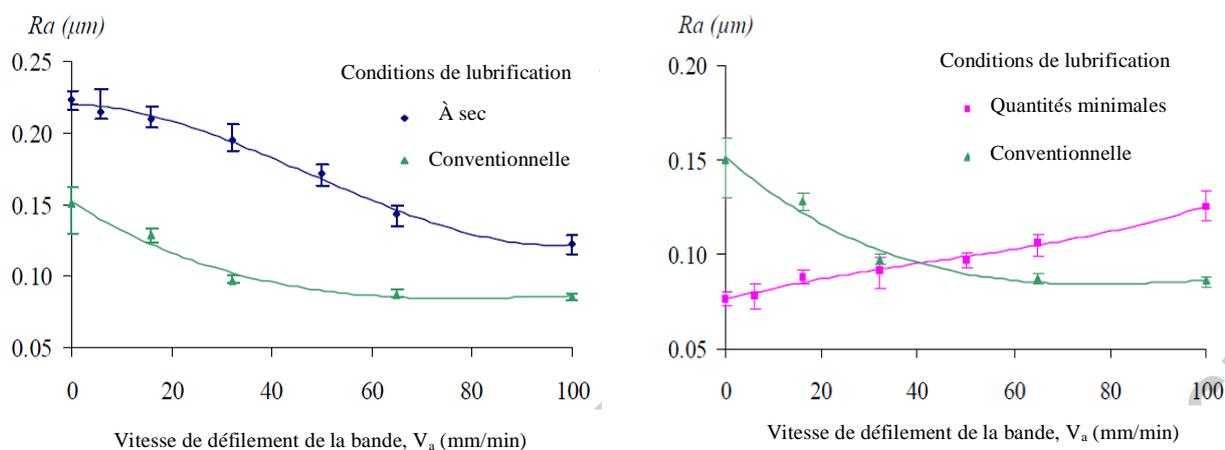


Figure 1.20 : Rugosité Ra en fonction de la vitesse de défilement de la bande : (a) toilage à sec et toilage avec liquide d'arrosage conventionnel, (b) toilage de quantités minimales et toilage avec liquide d'arrosage conventionnel (Conditions de toilage : Acier : 100Cr6 trempé à 62 HRC, $t_{toilage} = 9\ s$, $F_N = 310\ N$, $H_s = 90\ Shore\ A$, $n_{osc} = 12\ Hz$, $a_{osc} = 3\ mm$) [Khe10].

L'application de *MQL* a indiqué un grand potentiel d'obtenir une rugosité de surface bien meilleure que la lubrification conventionnelle dans les mêmes conditions de la productivité. Dans ces conditions (toilage avec lubrification de quantités minimales), le processus n'est pas une opération de toilage de base, mais une combinaison de toilage (action de base de la bande) et d'un rodage dû à la présence d'une suspension composée de : grains abrasifs libres + micro-copeaux + l'huile, dans l'interface de contact entre la pièce et la bande (voir ce phénomène dans la figure 1.21). La suspension est beaucoup plus épaisse quand la vitesse d'avance de la bande abrasive est faible et disparaît progressivement au fur et à mesure que la vitesse d'avance de bande augmente, ce qui signifie que l'action de rodage devient limitée pour la haute vitesse (c'est-à-dire avec une régénération rapide des grains abrasifs dans le contact). Ce phénomène explique pourquoi les paramètres de rugosité augmentent avec la vitesse dans les conditions *MQL*. Par ailleurs, le toilage sec n'est pas approprié puisque il ne

permet pas d'atteindre une rugosité de surface acceptable par rapport à une lubrification classique par l'huile minérale. De plus, ce phénomène conduit à une destruction rapide des grains abrasifs de la bande [Khe10].

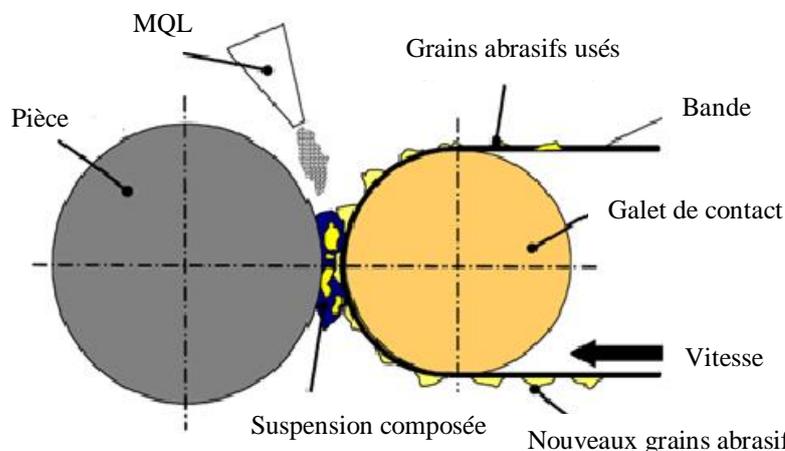


Figure 1.21 : Illustration du phénomène de rodage qui accompagne l'action de toilage sous conditions *MQL* [Khe10].

En conclusion, il est possible de diminuer de manière significative la vitesse de la bande pour un niveau donné de la qualité de surface, ce qui permet de diminuer de manière très significative le coût de l'outil. Cette diminution importante de la vitesse de bande abrasive est associée à un risque plus grand de destruction de la bande à cause de phénomène de rodage. L'application de *MQL* au lieu de la lubrification conventionnelle peut apporter un avantage environnemental significatif [Khe10].

7. Caractérisation des surfaces toilées

7.1. Texture de surface

La texture des surfaces joue un rôle particulièrement important concernant le comportement des interfaces. Donc, l'étude de la texture des surfaces est une étape fondamentale pour évaluer les transformations géométriques d'une surface induite notamment par un procédé de finition. Le comportement des surfaces en contact fait principalement intervenir l'aire réelle de contact qui dépend de la rugosité mais aussi de la déformation des aspérités. Le but de toilage est de réduire, d'une part, les défauts géométriques de la surface de la pièce et, d'autre part, les défauts de structure [Van10].

L'influence du toilage sur la topographie des surfaces a été le moteur du développement de cette technique. Le toilage permet d'apporter une amélioration très significative de la rugosité de surface. Dans son travail sur l'acier de roulement 100C6 (AISI 52100) de dureté 62 HRC

après sa trempe et avec les paramètres de coupe de tournage dur et de toilage, le paramètre de la rugosité moyenne arithmétique R_a passe de $0,27 \mu\text{m}$ à $0,09 \mu\text{m}$ et la profondeur de rugosité du cœur R_k passe de $0,9 \mu\text{m}$ à $0,38 \mu\text{m}$ [Khe05]. Dans une autre étude, le même paramètre de rugosité R_a passe de $0,3 \mu\text{m}$ à $0,2 \mu\text{m}$ après la super finition par procédé de toilage d'un acier de cémentation 27MnCr5 trempé à l'azote de dureté superficielle $850 \text{HV}_{0.3}$ [Rec03a]. Une analyse 3D de la texture de surface toilée (surface échantillonnée est $1,25 \times 1,25 \text{ mm}^2$ selon ISO 4288) par un galet de polymère de dureté 70 shore A (figure 1.22 et figure 1.23) et à travers deux profils de rugosité extraits (figure 1.24.a) permet de savoir que le toilage entraîne une réduction de l'amplitude des écarts micro-géométriques et de supprimer les hélices de l'outil de coupe de tournage dur, ainsi qu'une augmentation de densité des stries peu profondes, ce qui améliore fortement la courbe de taux de portance (courbe d'Abbott-Firestone) (figure 1.24.b).

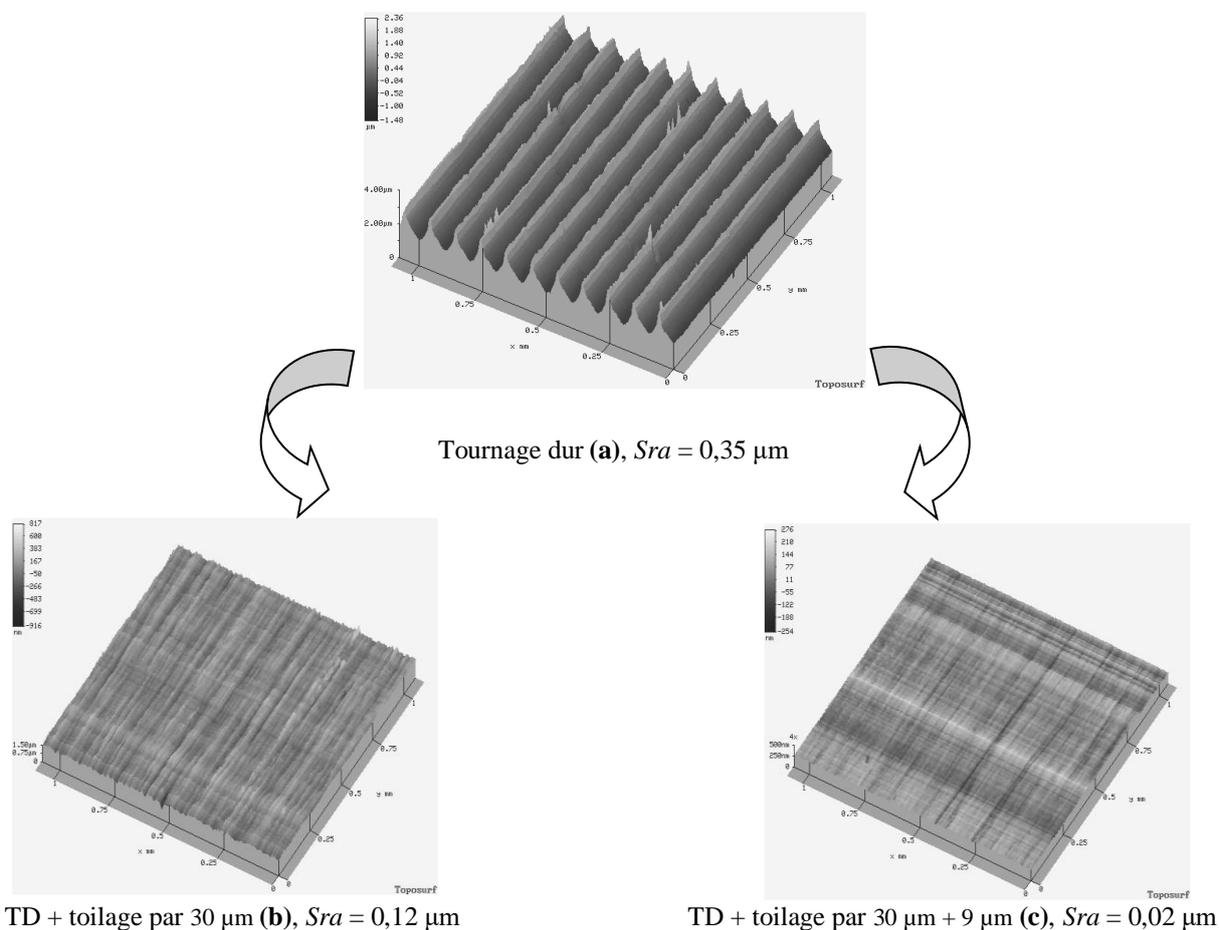


Figure 1.22 : Vue isométrique de la surface après tournage dur et après tournage dur + toilage (Conditions de toilage : Toile : Al_2O_3 , Vitesse de rotation de la pièce : 900 tr/min , Avance de toile : $0,6 \text{ mm/s}$, Fréquence d'oscillation : 12 Hz , Amplitude d'oscillation : $\pm 0,5 \text{ mm}$, Pression : 2 bars , Temps : 9 s , Système de refroidissement : *MQL*) [Grz08].

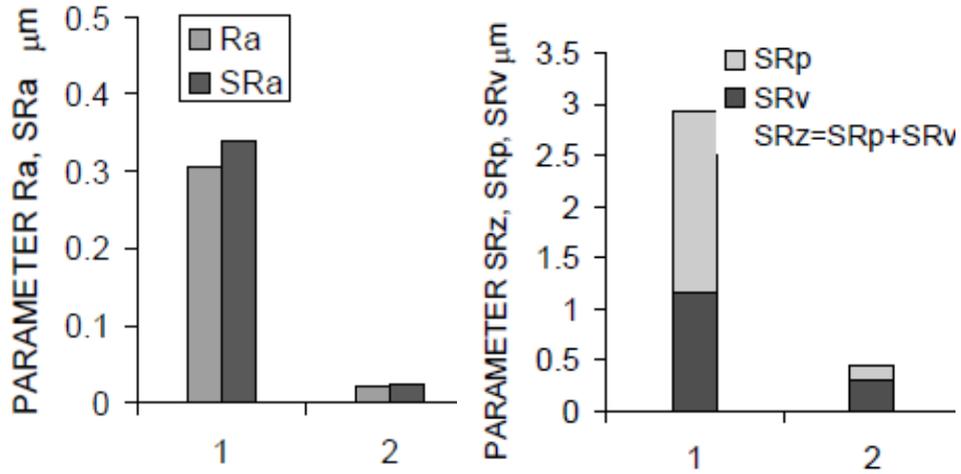


Figure 1.23 : Comparaison des paramètres : R_a avec SR_a , SR_p avec SR_v avant et après toilage, (1) tournage dur, (2) toilage par $30\ \mu\text{m} + 9\ \mu\text{m}$ [Grz08].

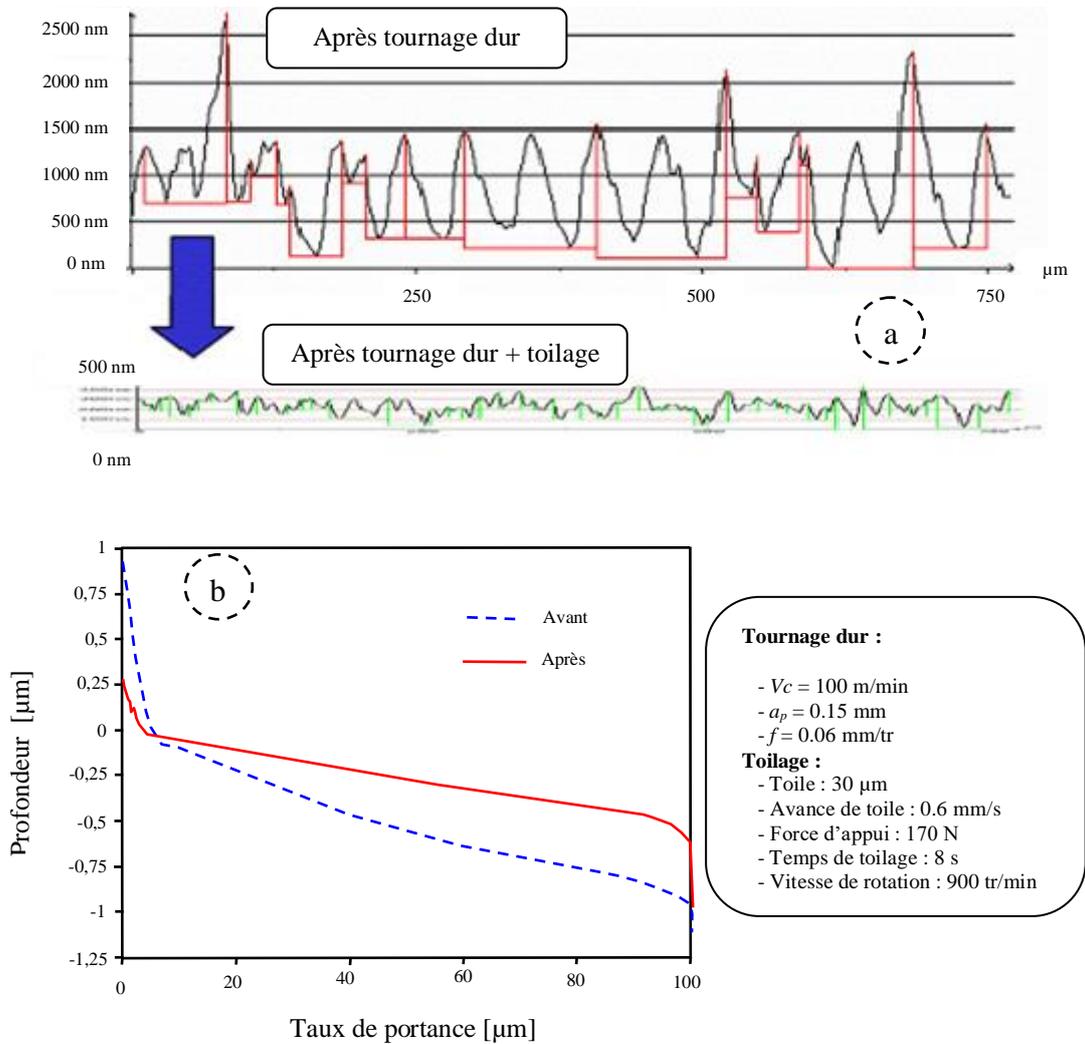


Figure 1.24 : Evolution du profil de rugosité et du taux de portance [Jou05, Rec03a].

L'analyse des surfaces tournées qui présentant des refoulements de matière (figure 1.3.c), permet de constater que les protubérances en bord de sillons ont complètement disparu. Cela permet d'une part une amélioration très significative du potentiel de durée de vie de la pièce, et d'autre part de garantir une topographie de surface constante en sortie de ligne de production [Rec03a]. Le toilage améliore significativement la rugosité ($Ra \sim 0,27 \mu\text{m}$ à $Ra \sim 0,11 \mu\text{m}$) par élimination des refoulements de matière laissés par le tournage dur (exemple : bourrelets, manteaux,...etc) [Rec09]. Par contre, il ne modifie pas les écarts de forme et d'ondulation [Rec09, Khe07a]. Le tableau 1.3 représente les paramètres d'état de surface obtenus par deux bandes abrasives différentes (Al_2O_3 : $9 \mu\text{m}$ et $80 \mu\text{m}$) sur des pièces cylindriques en acier de dureté superficielle supérieure à 50 HRC. Le paramètre de la rugosité moyenne arithmétique mesuré par un interféromètre à lumière blanche tridimensionnelle (WYKO NT 3300) égal à $0,9 \mu\text{m}$ (la surface échantillonnée en 640×480 points avec une échelle de pas de $1,94 \mu\text{m}$ dans les deux directions x et y).

Tableau 1.3 : Paramètres de rugosité pour deux surfaces obtenus par toilage avec deux tailles différentes des grains abrasifs [Mez08a].

	Taille des grains ($9 \mu\text{m}$)	Taille des grains ($80 \mu\text{m}$)
Ra (nm)	331.44	377.97
Rq (nm)	501.06	482.75
Rz (μm)	4.96	4.57
Rt (μm)	5.51	4.95

Une analyse globale de la topographie de surface avant et après l'opération de toilage indique que cette opération a complètement supprimé la topographie de la surface hélicoïdale obtenue par tournage dur. Cette nouvelle topographie a un intérêt dans certaines applications, tels que les problèmes d'étanchéité à l'huile entre un arbre et un joint en caoutchouc [Jou05]. En outre, ce processus a supprimé complètement les "bavures" obtenues sur chaque côté des sillons en raison du flux de matériau latéral induit par l'opération de tournage dur. Cette technique enlève habituellement une profondeur de coupe radiale d'environ $4 \mu\text{m}$, mais cette valeur peut être incluse entre 2 et $12 \mu\text{m}$ [Jou05].

De plus, le procédé de toilage fait disparaître la largeur moyenne des éléments du profil laissé par le tournage dur. Cela constitue un avantage important en termes de limitation de la période du rodage de la surface en fonctionnement. Le paramètre d'espacement moyen Rsm diminue considérablement après deux passages de toilage par deux bandes abrasives de grosseur $30 \mu\text{m}$ et de $9 \mu\text{m}$. La valeur obtenue de ce paramètre par tournage dur avec l'outil

de coupe en CBN est $62,5 \mu\text{m}$. Après le toilage avec diminution de la grosseur des grains abrasifs ($30 \mu\text{m} + 9 \mu\text{m}$), elle devient $20,5 \mu\text{m}$. De plus, la pente quadratique moyenne diminue légèrement (inférieure 4°). Ceci est résumé dans la figure ci-dessous.

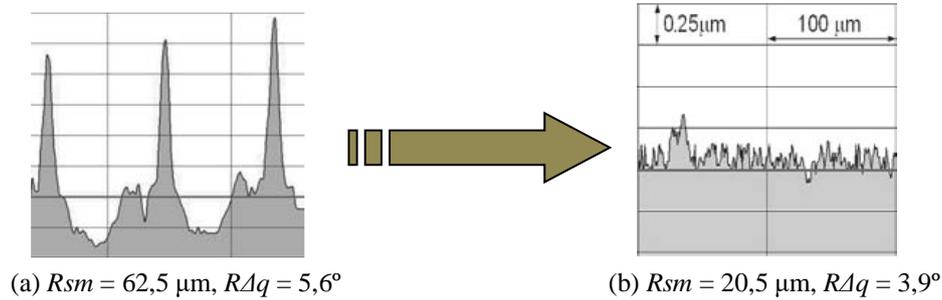


Figure 1.25 : Formes caractéristiques des profils 2D : (a) après tournage dur avec CBN, (b) après tournage dur + toilage avec bande abrasive $30 \mu\text{m} + 9 \mu\text{m}$ [Grz08].

L'effet de cette technique de super finition des matériaux durs sur les paramètres de la courbe du taux de portance (R_k , R_{pk} et R_{vk}) est très limité. Parmi les chercheurs ayant étudié la corrélation entre ces paramètres et le procédé de toilage, on peut citer : Khellouki et al [Khe07b]. Ces derniers ont trouvé que l'augmentation de la force appliquée réduit la pente équivalente de la courbe de portance et diminue les pics (figure 1.26). Ainsi, la surface obtenue par toilage approche la configuration qui caractérise une surface "plateau". Ce type de surface est nécessaire pour les bonnes propriétés de portance.

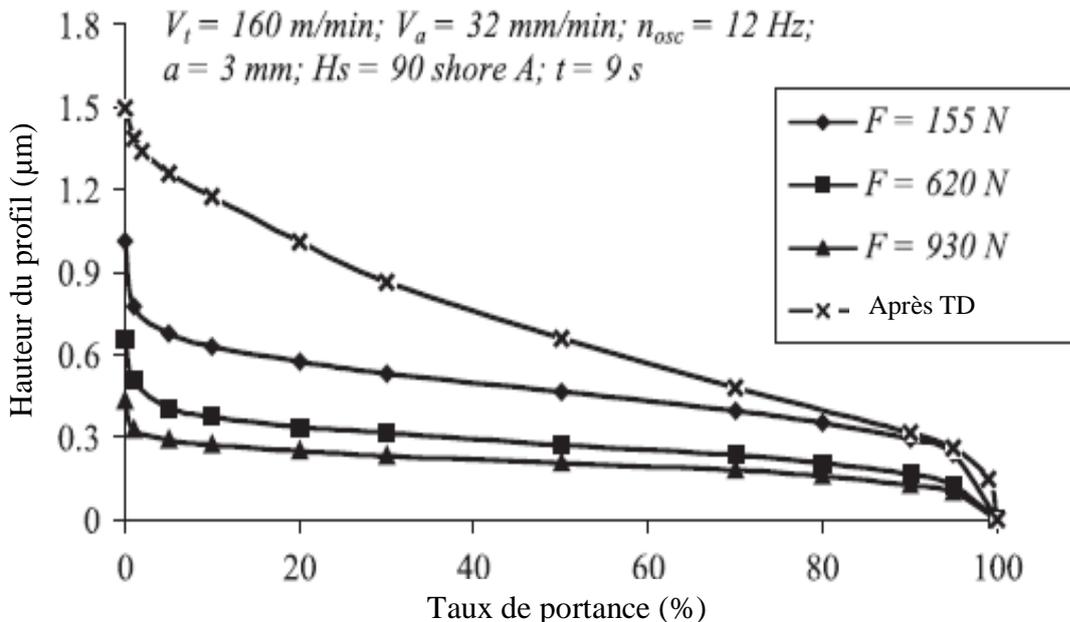


Figure 1.26 : Courbes de surface de portance pour différentes forces appliquées [Khe07b].

En effet, une autre étude montre que l'outil de toilage enlève les sommets du profil de la rugosité d'origine sans pour autant arriver au fonds des creux. La signature de l'outil de

tournage dur reste donc légèrement visible [Khe07a]. Les mêmes chercheurs, mais dans une autre étude concernant l'influence du processus de toilage sur la texture de surface obtenue par tournage dur [Khe07b] à travers deux différentes durées de super finition (3 secondes et 24 secondes). Ils ont indiqué que les paramètres liés à la hauteur du profil (R_a et R_t) et les paramètres de la courbe du taux de portance (R_k , R_{pk} et R_{vk}) deviennent plus faibles avec l'augmentation de la force appliquée. Cette réduction est rapide pour des forces appliquées faibles (inférieures à 310 N) et lente pour des forces appliquées élevées. Cette réduction de la texture de surface est liée au nombre des grains abrasifs actifs N_g et leurs formes. N_g augmente avec la force appliquée, alors que la forme des grains abrasifs dépend de la pression entre le grain et la surface usinée d'une part, et de la durée de contact d'autre part (niveau d'usure). La figure suivante représente les résultats des paramètres de la courbe du taux de portance en fonction de la force appliquée.

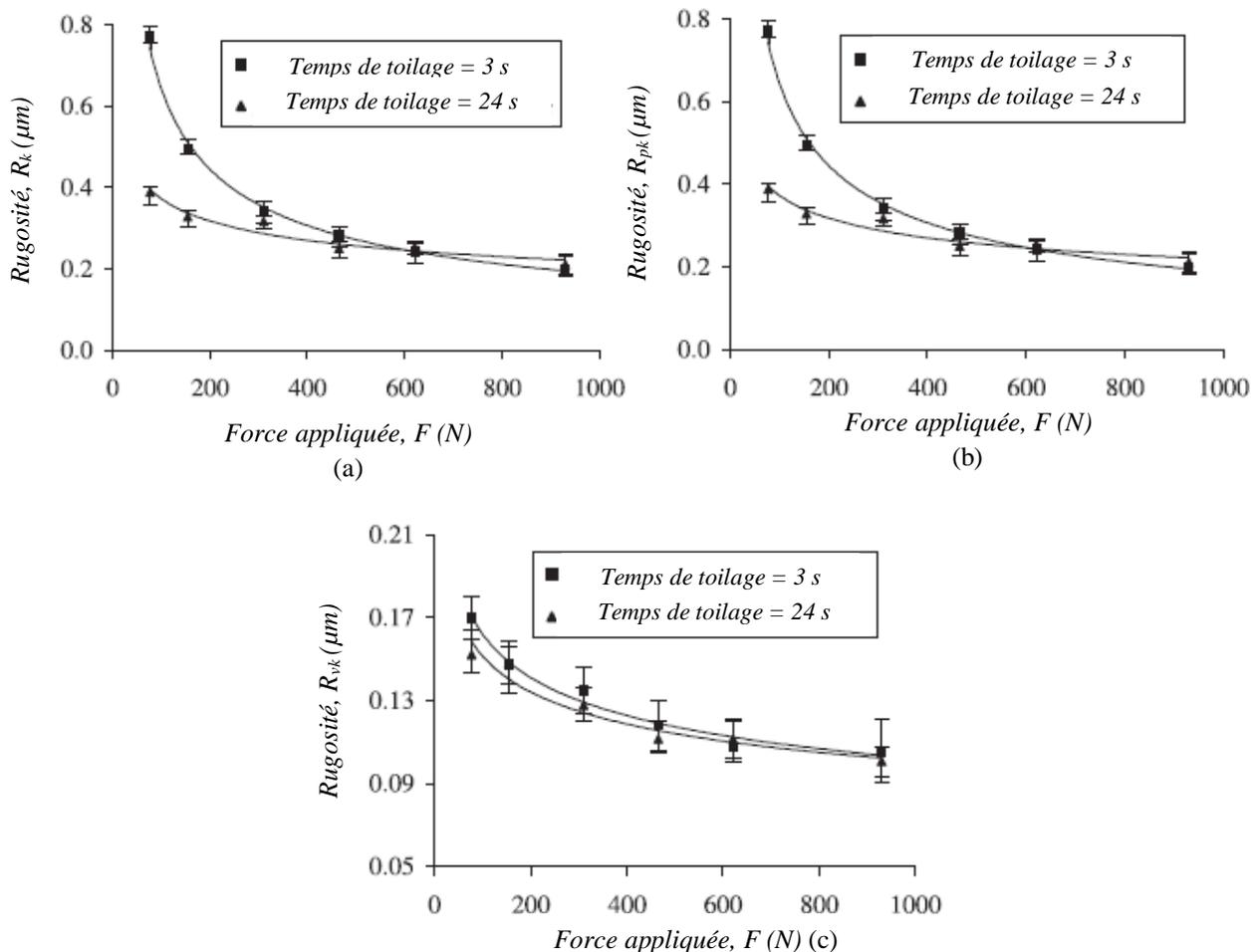


Figure 1.27 : Influence de la force appliquée sur les paramètres relatifs à la courbe du taux de portance (R_k , R_{pk} , R_{vk}) (conditions de toilage : $V_t = 160$ m/min; $V_a = 32$ mm/min;

$n_{osc} = 12$ Hz; $a_{osc} = 3$ mm; $H_s = 90$ Shore A) [Khe07b].

7.2. Contraintes résiduelles

De façon générale, les contraintes résiduelles dans une structure sont les contraintes multiaxiales statiques qu'existent en l'absence de toute sollicitation extérieure (forces, moments,...etc). Elles apparaissent dans la pièce après suppression d'un chargement initialement introduit [Rem01].

Tout procédé d'élaboration et de fabrication (usinage, mise en forme, soudage,...etc) et toute sollicitation d'origine mécanique (déformation plastique qui accompagne la génération de copeau), métallurgique (refroidissement inhomogène, transformation de phase), thermique (montée de température générée par la coupe) ou autres génèrent dans une pièce des contraintes résiduelles qui peuvent influencer (positivement ou négativement) son comportement en fatigue, en rupture et en corrosion [Hab06]. Les effets de ces contraintes sont souvent préjudiciables. Elles constituent alors un facteur d'endommagement et de mauvaise tenue en fatigue. Les contraintes résiduelles de traction sont néfastes à la pièce mécanique, car elles accélèrent l'apparition et la propagation des fissures. Par contre, dans le deuxième cas, les contraintes résiduelles de compression ont un rôle bénéfique car elles augmentent la ténacité. C'est pourquoi, la mesure de leurs valeurs avec ce nouveau procédé de fabrication à savoir le tournage dur et le toilage présente un intérêt actuel dans ce domaine.

Rech et al [Rec08] sont les premiers chercheurs ayant étudiés les contraintes résiduelles induites au cours de processus de super finition par bande abrasive après une opération préliminaire de tournage dur par deux approches ; expérimentale et numérique sur l'acier de roulement 100C6 de dureté 60 HRC après sa trempe. La distribution des profils de contraintes résiduelles biaxiales avec les composants tangentiels (σ_{11}) et axiaux (σ_{22}) mesurés par diffractomètre de rayon X de précision de mesure ± 60 MPa sont présentés dans la figure 1.28. Ils ont produits deux pièces avec les mêmes conditions de coupe de tournage dur ou de toilage afin de contrôler la stabilité des résultats. Néanmoins, les formes des courbes sont semblables pour les deux pièces et les deux directions de mesure. Sur la base de ces résultats, il s'avère que le tournage dur induit des contraintes résiduelles de traction dans la couche externe. Par conséquent, il existe des contraintes résiduelles de compression dans la couche inférieure afin de respecter l'équilibre mécanique du système [Rec08]. La caractérisation de surface toilée a montré que les contraintes résiduelles engendrées sont de compression. Ces contraintes sont localisées dans une sous-couche plus importante et très mince entre 5 et 10 μm de distance de la surface [Rec08]. De plus, il est clair qu'en dessous du 5 μm , les profils

des contraintes sont semblables pour les deux méthodes de fabrication (tournage dur ou toilage). Ceci prouve que le procédé de toilage n'affecte pas l'état de contrainte résiduelle au-dessous de cette couche [Rec08]. Parmi les paramètres du processus de la technique de toilage, la lubrification apparaît comme un paramètre clé pour obtenir des contraintes de compression [Rec08]. La profondeur de cette couche affectée dépend fortement de la profondeur de pénétration des grains abrasifs (la charge locale appliquée sur le grain ; c'est-à-dire la force macroscopique appliquée par le système, la rigidité du galet, la taille et la densité des grains) [Rec08]. Un autre chercheur, mais toujours avec l'équipe de Rech [Cou16], ils ont trouvé que le toilage lubrifié ne modifie que les contraintes résiduelles de traction vers compression de subsurface sur une courte profondeur de 10-20 μm d'un acier de cémentation 27MnCr5.

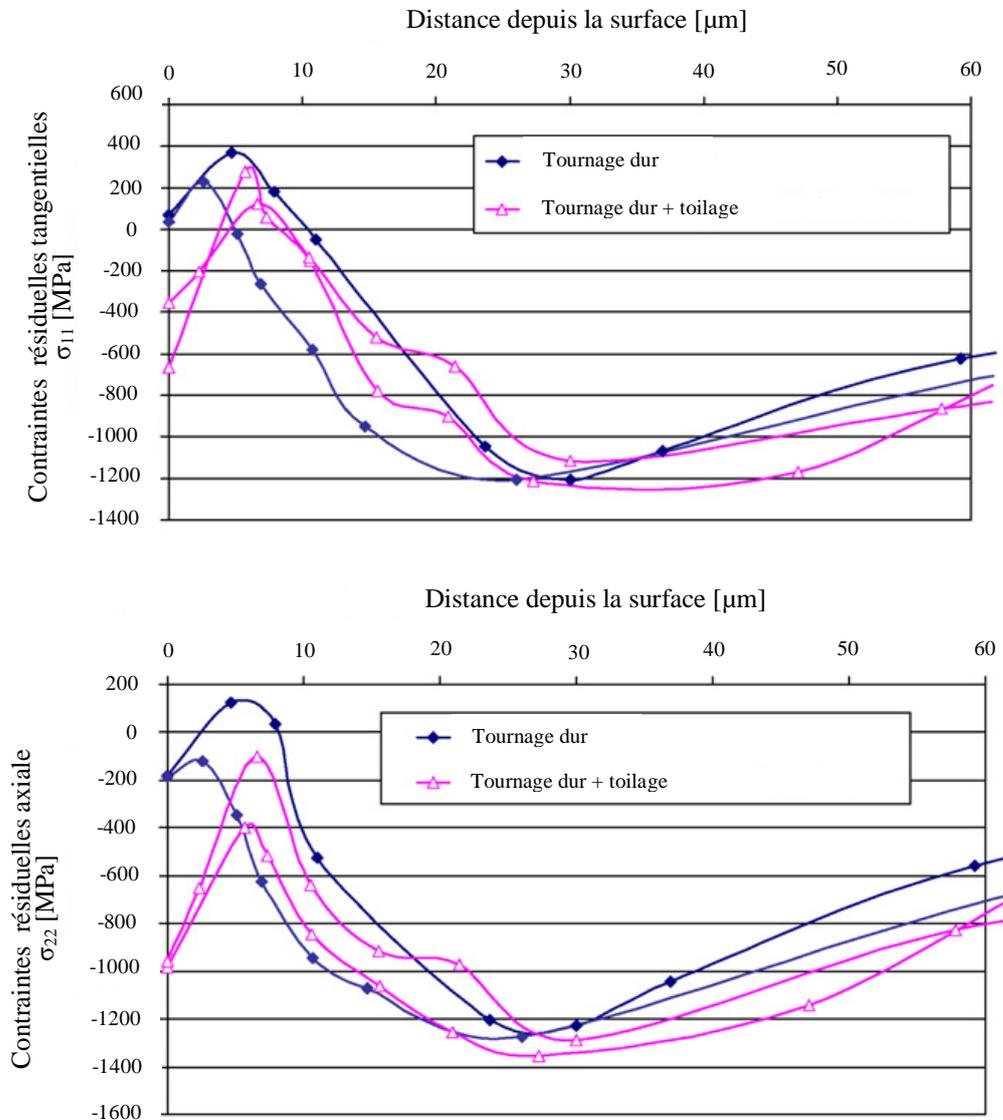


Figure 1.28 : Distribution des contraintes résiduelles dans la subsurface après tournage dur par CBN et après tournage dur + toilage [Rec08].

Grzesik et al [Grz08] ont trouvé que les contraintes résiduelles axiales sont plus élevées que ceux tangentiels. Ils ont atteint des valeurs d'environ -1000 MPa. Les plus fortes contraintes résiduelles de compression dans l'amplitude sont mesurées dans la profondeur d'environ 30 μm ((-1200) \div (-1400) MPa). Il convient également de noter que le tournage dur induit des contraintes tangentiels et axiales de traction de (150) \div (400) MPa à une faible distance de la surface. En général, le procédé de super finition par la bande abrasive de grosseur moyenne des grains abrasifs 9 μm induit des contraintes résiduelles de compression dans une sous-couche très mince d'environ $\sim 5 \mu\text{m}$ [Grz08].

De surcroît, le tournage dur (TD) engendre un état de contraintes résiduelles qui évolue vers la traction avec l'usure de l'outil [Ham05]. Le toilage a une action essentiellement mécanique et tend à écrouir les surfaces obtenues par tournage dur (TD). Il tend à introduire des contraintes résiduelles de compression sur une épaisseur de l'ordre de 10 μm . Ces contraintes donnent aux pièces une meilleure tenue à la fatigue, à la fissuration et à la corrosion [Ham05]. L'un des principaux avantages de toilage est le faible niveau de contrainte mécanique et la densité microscopique des fissures, car la température de surface n'augmente pas pendant le processus [Van10].

7.3. Microstructure métallurgique

Lors du processus de fabrication par enlèvement de matière des métaux durs, il y a une apparition des couches blanches (bandes blanches) au niveau de la couche superficielle de la pièce usinée et du copeau obtenu (figure 1.29). La couche blanche formée pendant l'usinage dur est généralement une phase dure et fragile. Ce qui peut provoquer la présence des craquelures et d'autres défauts de surface. Ces défauts posent problème dans la phase de mise en service de ces pièces et plus particulièrement pour les industries aéronautiques et automobiles [Hab06].

La zone blanche est provoquée par une montée en température supérieure à la température de transformation de phase et par les fortes énergies générées par les frottements (amenée à la surface de la pièce et la face arrière du copeau) appliqués par l'outil. La formation de cette couche est influencée par l'usure de l'outil (l'usure en dépouille) et les conditions de coupe. Ils mettent en évidence la sensibilité de la profondeur de la couche blanche avec l'usure de l'outil et les conditions de coupe (augmentation de la profondeur avec l'usure de l'outil et la vitesse de coupe) [Hab06].

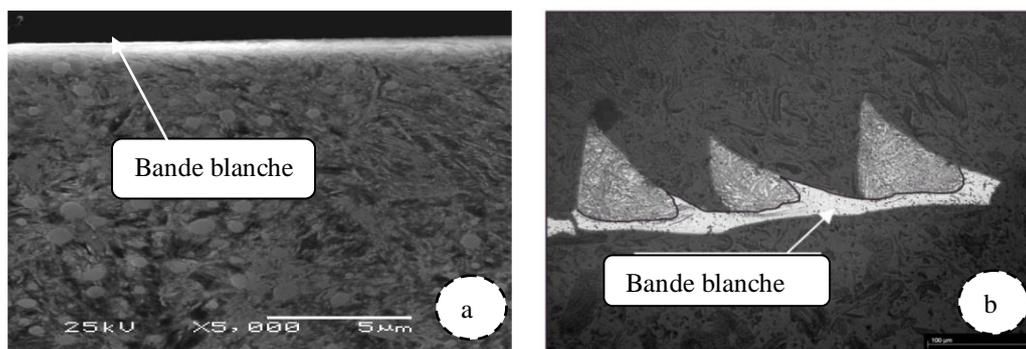


Figure 1.29 : Exemples des couches blanches obtenues en usinage dur (100Cr6 sans carbure, 55 HRC). (a) couche blanche observée au niveau de la surface usinée ($V_c = 200$ m/min, $f = 0,1$ mm/tr) et (b) couche blanche observée sur un copeau ($V_c = 100$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr) [Hab06].

L'observation des microstructures à l'issue de l'opération de toilage réalisée sur des surfaces obtenues par tournage dur avec des outils neufs permet de constater que cette opération n'affecte pas la microstructure laissée par l'opération précédente (TD). A cet égard, il faut avoir à l'esprit que cette opération se fait avec des vitesses relatives (grains abrasifs/surface usinée) très faibles, de surcroît sous huile entière. Ce qui tend à limiter les températures locales atteintes [Rec03a].

L'analyse micrographique des surfaces obtenues par tournage dur à l'aide des outils usés permet de constater que le toilage n'est pas en mesure de supprimer ces couches blanches. En effet, le toilage permet d'écrêter les irrégularités de surface sur une profondeur de 1 à 2 μm , mais ne permet pas de supprimer les modifications de microstructure de dizaine de microns d'épaisseur [Rec03a].

CHAPITRE 2

L'outil de coupe de toilage

1. Introduction.....	40
2. La bande abrasive.....	40
3. Paramètres de la bande abrasive.....	46
3.1. Densité des sommets des grains abrasifs.....	46
3.2. Hauteur moyenne des sommets des grains abrasifs.....	47
3.3. Angle moyen aux sommets des grains abrasifs.....	47
4. Mécanismes d'usure de la bande abrasive.....	49
4.1. Temps de toilage.....	49
4.2. Fréquence d'oscillation.....	51
4.3. Vitesse d'avance.....	52
4.4. Lubrification.....	53
4.5. Structure de la bande.....	57
4.6. Modélisation des mécanismes d'usure des grains abrasifs..	63
5. Morphologie des micro-copeaux.....	65

1. Introduction

Chaque usinage des pièces mécaniques de précision par enlèvement de copeaux contient un outil de coupe responsable de cet enlèvement. En usinage par toilage, l'outil de coupe est une bande abrasive constituée de trois composantes principales à savoir : les grains abrasifs employés comme des micro-outils pour l'enlèvement de la matière par abrasion, le support des grains et le liant. En commerce, il existe une grande variante de cet outil de coupe. La grande différence entre eux réside dans les grains (leur type, leur taille, leur distribution et orientation...etc), le type de support et son épaisseur (papier, toile, polyester...etc), le liant. Ces derniers sont renforcés par des fibres ou non. Dans ce chapitre théorique, nous faisons une recherche bibliographique sur cet outil. Ainsi nous présentons son utilisation et son comportement au cours de l'opération de toilage.

2. La bande abrasive

Comme nous avons précisé précédemment, l'outil de coupe de super finition par toilage est une bande abrasive constituée principalement des grains abrasifs dans le plus largement utilisé en oxyde d'aluminium (Al_2O_3), mais également en carbure de silicium (SiC) (moins coûteux que le nitrure de bore cubique CBN ou le diamant). Ces grains sont déposés sur un support de différentes épaisseurs de type généralement en polyester ou en toile par plusieurs méthodes comme : l'électrostatisme, le laminage...etc. Les grains sont collés sur le support et retenues entre eux par une résine synthétique. Aujourd'hui, on trouve plusieurs variantes de ces bandes dans le commerce, et leur choix dans l'usinage restent très difficile d'évaluer.

L'efficacité de l'opération de toilage dépend fortement de la fonctionnalité de la bande abrasive. Cette dernière se compose généralement de la base ; des grains, support des grains et du liant. Selon ces trois éléments structuraux, plusieurs variétés des bandes sont utilisées dans l'industrie, leur choix reste encore très empirique. L'évaluation des propriétés des bandes abrasives dans le procédé de toilage est un problème complexe en raison d'une large gamme des conditions de l'opération et des propriétés de la bande (la taille nominale des grains abrasifs, leur géométrie non uniforme, les angles tranchantes de coupe d'un grain, l'espace de stockage des copeaux entre les grains, densité des grains actifs et la distribution relative sur le support) [Mez08b]. La caractéristique la plus importante de la bande abrasive est constituée notamment par sa morphologie (l'angularité des grains abrasifs, leur pouvoir de pénétration et leur capacité de coupe), ainsi que la distribution de leur orientation géométrique (densité

active des grains abrasifs) du processus d'abrasion par toileage [Elm07]. La figure 2.1 montre les topographies des surfaces des toiles abrasives à granulométrie croissante.

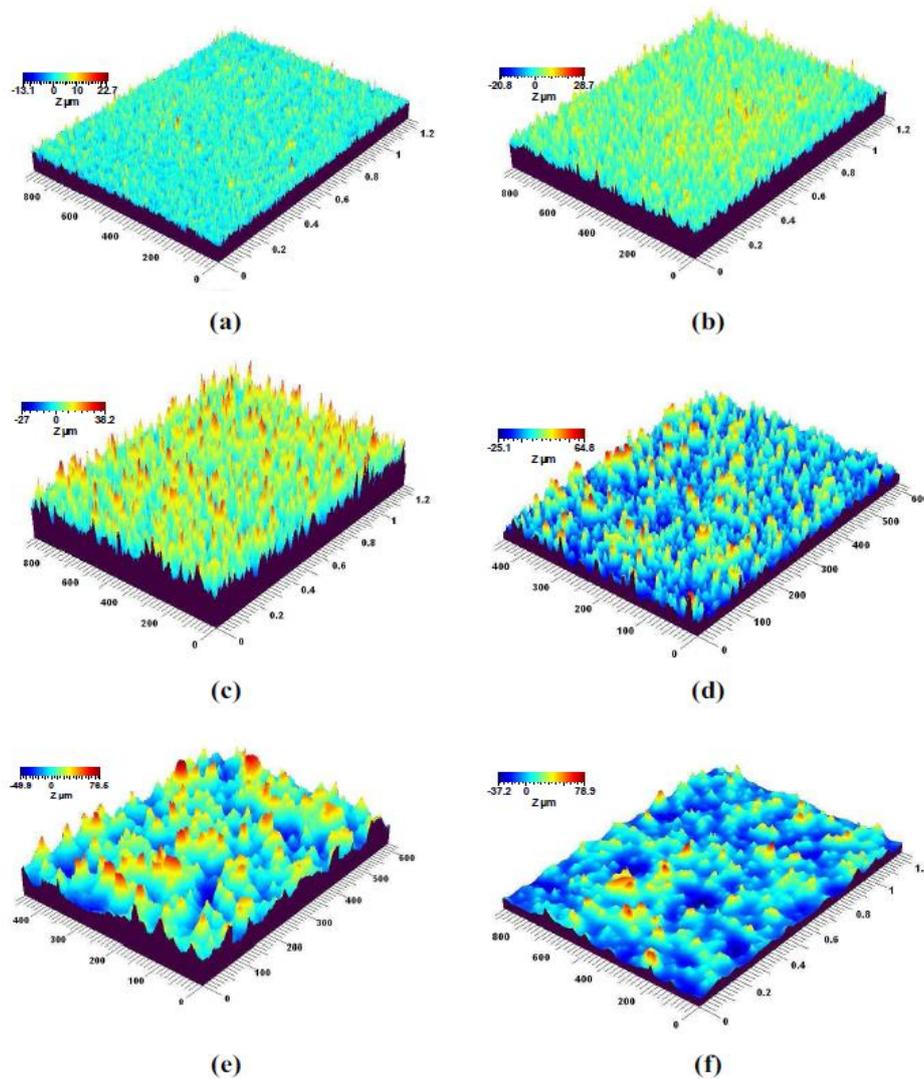


Figure 2.1 : Vue 3D des surfaces des toiles abrasives pour différentes tailles de grains : (a) 9 μm (b) 15 μm (c) 30 μm (d) 40 μm (e) 60 μm (f) 80 μm [Sur07].

L'examen comparatif des vues 3D des films abrasifs montre que [Sur07]:

- La structure du film abrasif se définit par un nombre des grains abrasifs de plus en plus grand lorsque la granulométrie est faible. Dans ce cas, la structure de la bande est fermée alors que pour une grosse granulométrie, la toile présente une structure plus ouverte. On voit bien ici qu'il existe deux limites par exagération : le cas où tous les grains se touchent et celui où il n'y a plus qu'un grain sur le film. Tout est donc inévitablement lié entre grosseur du grain et structure de toile.

- Les grains abrasifs portés par les différents films présentent à la surface leurs meilleures aptitudes à la coupe (l'angularité des grains pour le film de $30\ \mu\text{m}$ est de $15\ \mu\text{m}$).
- L'espace inter-grains est suffisamment grand, même entre les grains fins. Ce qui n'est pas aussi facile sur une meule de rectification. Ceci va permettre le logement de micro-copeaux lors de l'usinage.

La vue 3D de la figure 2.2 montre une image d'une bande abrasive de taille moyenne des grains d'environ $60\ \mu\text{m}$, où le paramètre A_r donne une idée sur la capacité de stockage de micro-copeaux de la bande abrasive, tandis que le paramètre R_i quantifie la capacité de pénétration des grains abrasifs dans la surface toilée [Elm07].

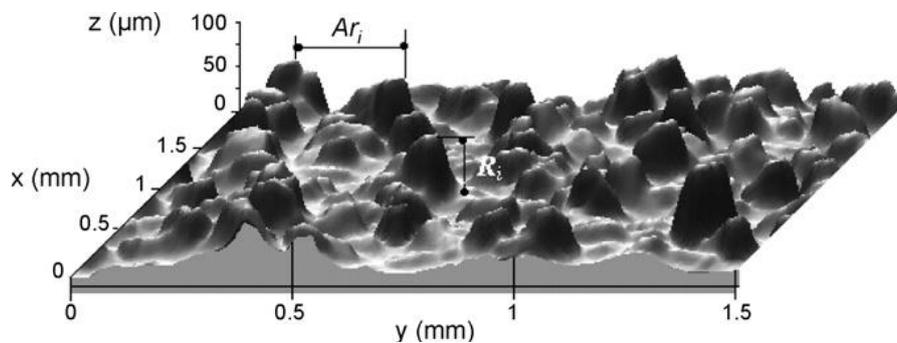


Figure 2.2 : Vue d'ensemble typique 3D d'une bande abrasive 3M de taille moyenne des grains d'environ $60\ \mu\text{m}$, montrant la signification des paramètres A_r et R [Elm07].

Le tableau suivant présente les caractéristiques d'une bande abrasive commerciale 3M de référence 372L qui présente un support en polyester. La valeur moyenne d'espace entre les grains est d'environ $195\ \mu\text{m}$ tel que défini par le paramètre A_r qui assure un grand stockage de micro-copeaux et cette bande est d'angularité approximative à $15\ \mu\text{m}$.

Tableau 2.1 : Caractéristiques de la bande abrasive neuve, référence 372L et fourni par le producteur 3M [Elm07].

Producteur	3M
Type	Micro-finition 372
Matériau des grains	Al_2O_3
Taille moyenne des grains	$30\ \mu\text{m}$
Largeur de la bande	19,84 mm
Rugosité moyenne	$R = 18\ \mu\text{m}$
Espace moyenne entre les grains	$A_r = 195\ \mu\text{m}$

Il est clair que la difficulté réside ici dans la morphologie particulière de chaque grain (figure 2.3) : un seul grain abrasif peut contenir plusieurs pics et plusieurs arrêtes tranchantes. En plus, le nombre des arrêtes est aléatoire d'un grain à un autre. Dans leur étude, Hamdi et al [Hamd03] ont trouvé qu'un grain est constitué au moins de trois arêtes de coupe actives.

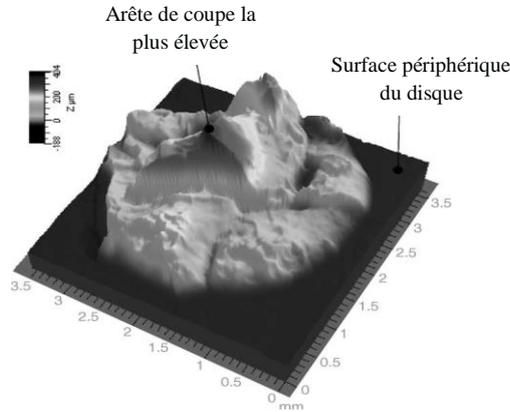


Figure 2.3 : Topographie d'un grain abrasif [Ham03].

Pour comprendre la physique de l'abrasion, un modèle numérique tridimensionnel a été établi par Jourani et al [Jou05]. Son algorithme programmé utilise le logiciel Matlab qui étudie le contact entre deux papiers abrasifs définis par leurs grosseurs du grain ($S20 = 20 \mu\text{m}$; $S30 = 30 \mu\text{m}$) et une pièce plane sous une pression nominale de contact de 4 MPa. Les matières employées pour les deux surfaces sont Al_2O_3 ($E = 350 \text{ MPa}$; $\mu = 0.25$). La pièce plane est en acier AISI 1046 ($E = 210 \text{ MPa}$; $\mu = 0.3$; $H = 1280 \text{ MPa}$). La surface de contact nominale des deux surfaces est $A_{nom} = 1024 \mu\text{m} \times 1024 \mu\text{m}$. Elle contient des points de repères 256×256 . Les topographies des deux bandes abrasives sont montrées par la figure 2.4.

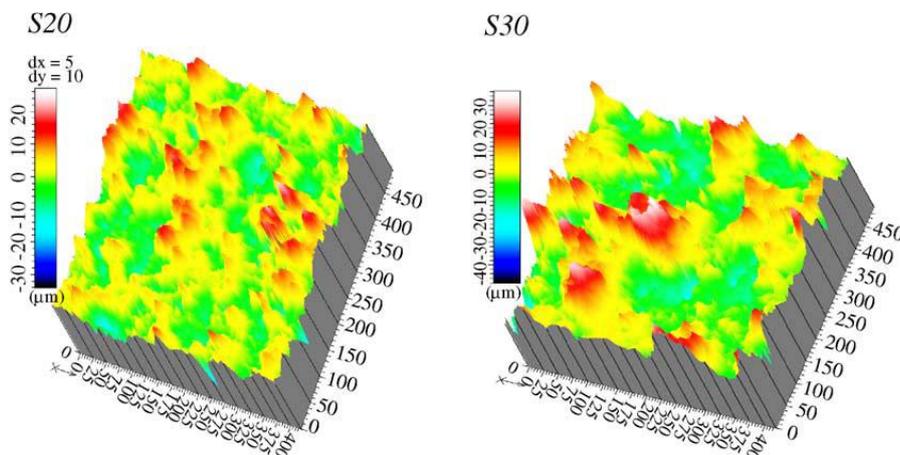


Figure 2.4 : Topographie des papiers abrasifs S20 et S30 [Jou05].

Les distributions calculées de la force pour deux approches de contact sont présentées dans la figure 2.5. La force résultante augmente avec l'augmentation de l'angle d'attaque.

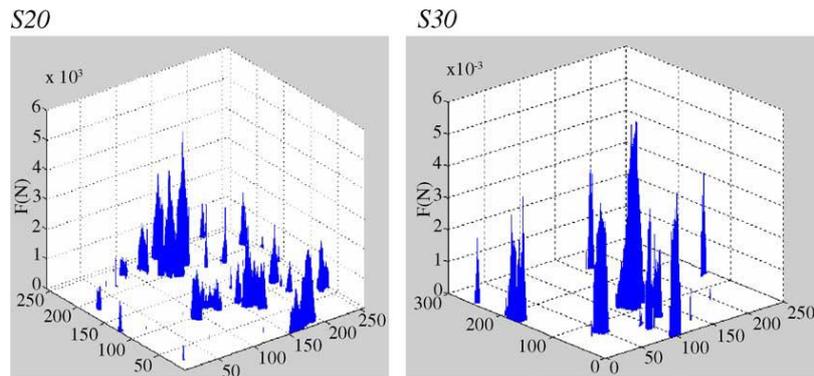


Figure 2.5 : Distribution des charges normales [Jou05].

La surface réelle de contact est beaucoup plus petite que la surface de contact nominal A_{nom} (voir la figure 2.6). Les chercheurs en question ont montré que pour différentes surfaces de contact la distribution des surfaces réelles de contact dépend fortement de la distribution d'angle d'attaque de la bande abrasive.

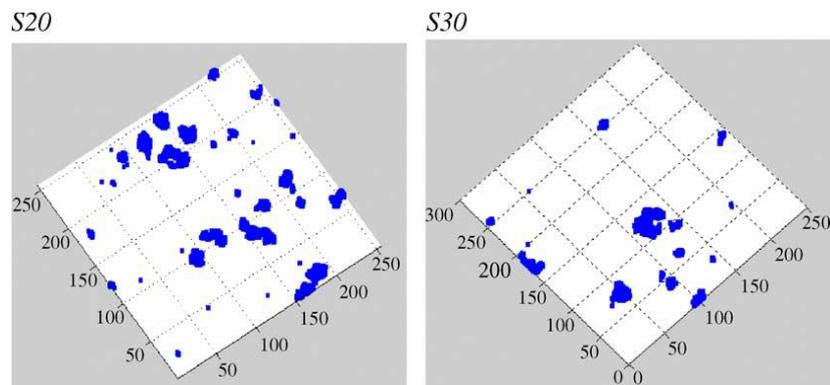


Figure 2.6 : Distribution de surface réelle de contact [Jou05].

La figure 2.7 présente une topographie 3D de la disposition des grains abrasifs appliqués sur un film de polyester. Le matériau des grains abrasifs est de l'oxyde d'aluminium avec une taille des grains moyenne d'environ $80 \mu\text{m}$.

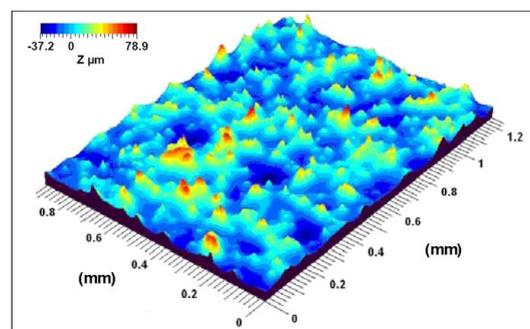


Figure 2.7 : Surface de la bande abrasive (3M, 372L) mesurée par un interféromètre tridimensionnel de lumière blanche (NT de WYKO 3300) [Mez08b].

Un grain abrasif a une morphologie particulière [Ham03] : un seul grain peut contenir plusieurs pics et diverses arêtes de coupe. De plus, le nombre des arêtes de coupe est aléatoire d'un grain à l'autre. Afin d'évaluer cette morphologie, Mezghani et al [Mez08b] ont segmenté l'image topographique de la bande abrasive 3M (désignée sous le nom 372L) par un algorithme appelé : algorithme des lignes de partage des eaux "LPE". L'application de cet algorithme permet la détection des lignes d'arêtes (arêtes tranchantes) des grains abrasifs dans la surface de bande. Les maximums de ces lignes détectées sont les premiers éléments entrant en contact avec la surface de la pièce. Ces lignes actives représentent alors les arrêtes de coupe des grains abrasifs. Un exemple d'une topographie de la surface de la bande avec sa transformation en ligne de partage est donné dans la figure 2.8. Cet exemple montre trois ou quatre lignes de crête détectées pour chaque grain abrasif.

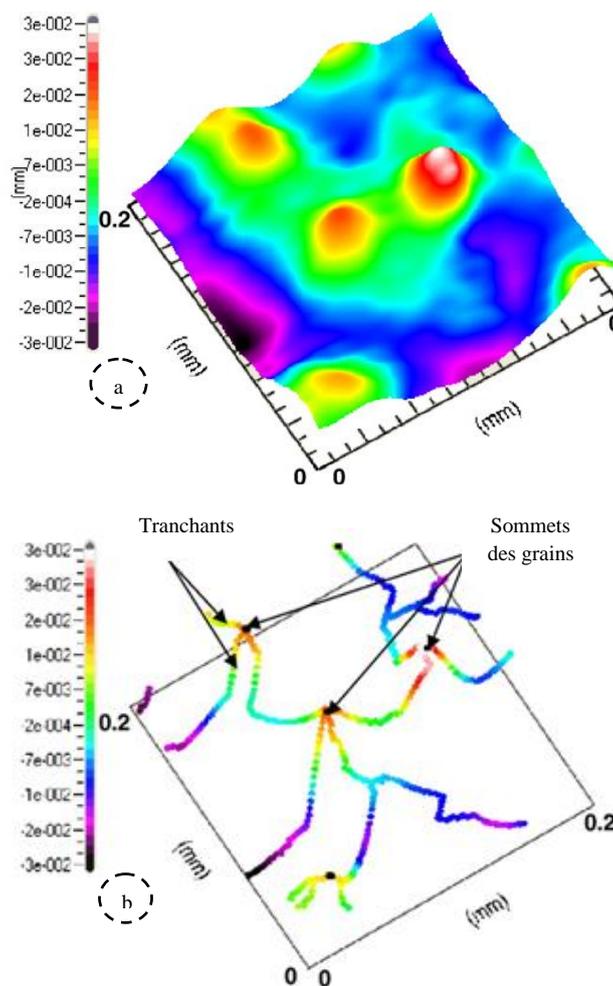


Figure 2.8 : (a) : Vue 3D de la surface de la bande abrasive (80 μm), (b) : lignes tranchantes détectées (arêtes de coupe) et les sommets des grains abrasifs [Mez08b].

3. Paramètres de la bande abrasive

Un ensemble de trois paramètres nouveaux et essentiels pour une caractérisation complète de la topographie de la surface de l'outil de coupe sont définis par Mezghani et al [Mez08b]. Le calcul de ces paramètres prend en compte la morphologie du grain en considérant qu'un abrasif présente généralement plusieurs sommets.

Après chaque essai de toilage, Mezghani et al [Mez08b] ont appliqué un ruban adhésif sur la surface de film abrasif pour éliminer les couches de micro-copeaux les plus superficielles. La bande abrasive en oxyde d'aluminium a été nettoyée par un bain à ultrasons. Ensuite, la surface de la bande a été métallisée pour permettre l'acquisition de sa topographie par l'interféromètre 3D en raison de la forte pente de la morphologie de surface. Puis, les paramètres d'abrasivité (abrasivité : signifie simplement la capacité des grains abrasifs à rendre la bande coupante) ont été calculés à partir de la topographie de l'image et comparés aux valeurs originales.

3.1. Densité des sommets des grains abrasifs ρ_s [mm^{-2}]

Elle représente le nombre de pics (crêtes) par unité de surface. Ce paramètre (densité des pics abrasifs en surface de la bande), calculé avant et après le toilage avec les bandes abrasives nous informe sur le comportement de l'usure des grains abrasifs au cours de cette opération par écrasement ou par rupture.

La figure 2.9 représente la variation de la densité des sommets de surface de la bande abrasive en fonction de la grosseur des grains avant et après toilage.

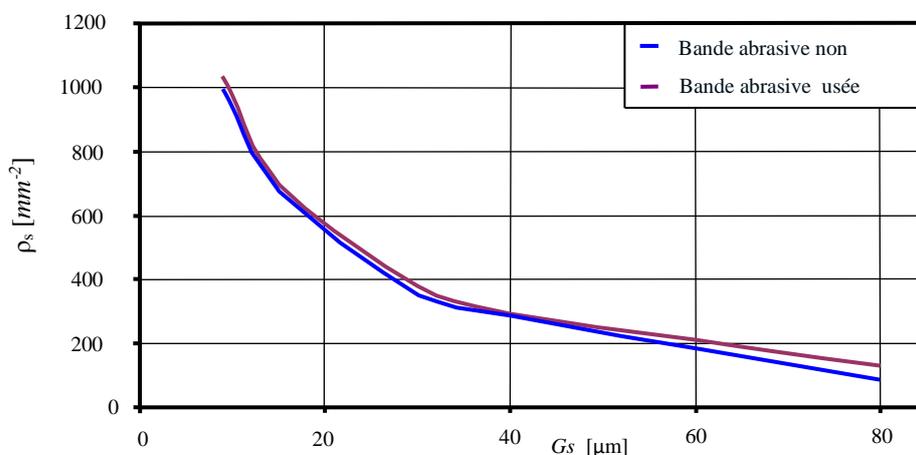


Figure 2.9 : Densité de sommets de surface de la bande abrasive en fonction de la grosseur des grains avant et après toilage (éprouvette en acier, $P = 0,8$ MPa) [Mez08b].

Comme indiqué la figure 2.9, les densités de sommets des grains restent presque constantes avant et après le toilage. Par conséquent, dans les conditions de travaux testées, la rupture et la fracture des grains ne sont pas prédominants et peuvent être négligées [Mez08b].

3.2. Hauteur moyenne des sommets des grains abrasifs H_m [μm]

Il s'agit de la hauteur moyenne des pics détectés. La hauteur de chaque sommet est calculée par rapport à un plan de référence fixe situé au niveau supérieur du substrat de la bande abrasive. Cette hauteur de référence est déterminée à partir de la courbe d'Abbott-Firestone correspondant à un taux de portance de 95 %.

La figure 2.10 représente la variation du taux d'usure de la hauteur des grains abrasifs en fonction de la grosseur des grains. Ce taux est mesuré par le paramètre ΔH_m estimé à partir de l'équation (2.1) [Mez08b, Mez09b].

$$\Delta H_m = 100 \times ((H_{m \text{ initial}} - H_{m \text{ final}}) / H_{m \text{ initial}}) \dots\dots\dots (2.1)$$

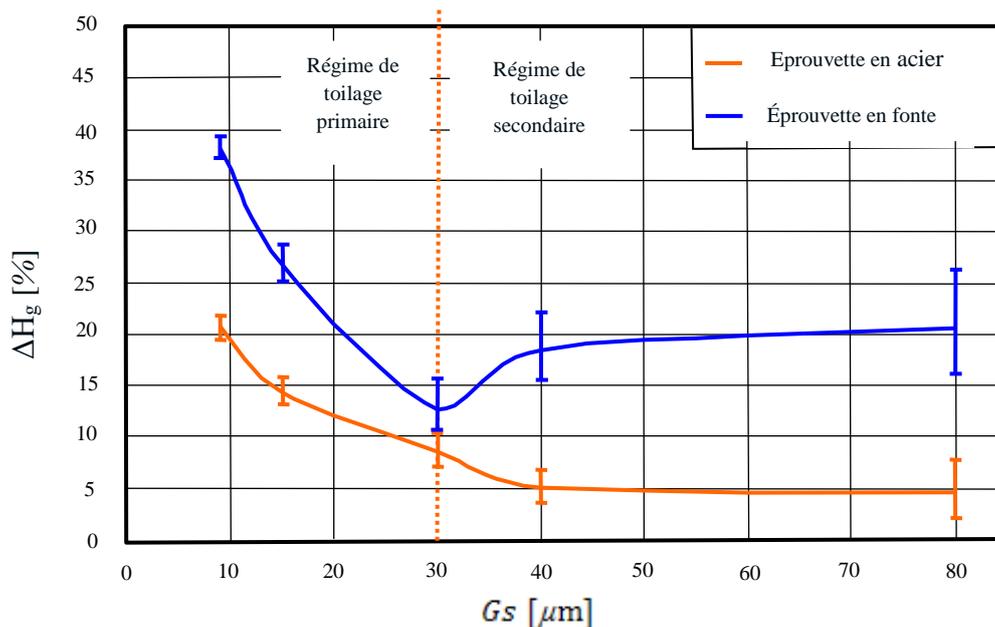


Figure 2.10 : Taux d'usure de la hauteur des grains abrasifs en fonction de la grosseur des grains pour deux valeurs de pression de contact [Mez08b].

3.3. Angle moyen aux sommets des grains abrasifs θ_s [$^\circ$]

Ce paramètre est très important pour identifier les mécanismes physiques activés dans le processus d'abrasion. Des essais de rayage effectués avec différents angles et différents matériaux confirment l'influence de ce paramètre sur les mécanismes activés au cours du

processus d'usinage par abrasion. En effet, plus l'angle d'attaque des arêtes de coupe est grand (angle au sommet plus petit de grain abrasif θ_s), plus il favorise les phénomènes de coupe et donc d'enlèvement de matière [Mez08a, Mez08b].

La figure 2.11 montre la variation de taux d'angle $\Delta\theta_s$ (équation (2.2) [Mez08b]) en fonction de la grosseur des grains abrasifs, qui varie de 15 μm à 80 μm .

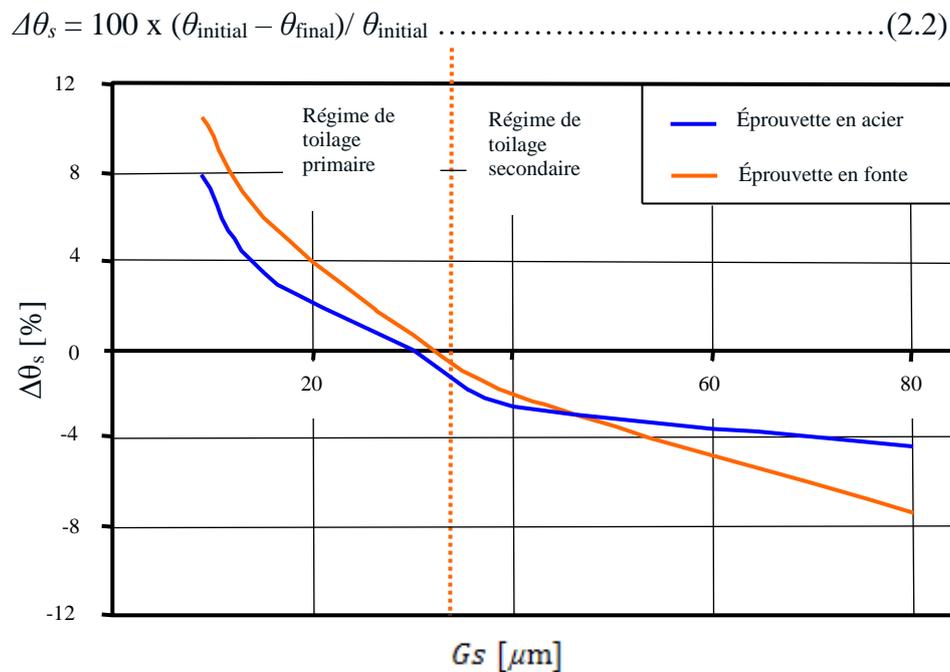


Figure 2.11 : Modification du taux relatif d'angle $\Delta\theta_s$ à différents grains abrasifs pour deux matériaux d'échantillon [Mez08b].

Le tableau 2.2 illustre l'ensemble de ces trois paramètres calculés pour les surfaces des bandes abrasives neuves de diverses tailles de granulacions de 9 à 80 μm .

Tableau 2.2 : Caractéristiques des surfaces des bandes abrasives avant toilage [Mez08b].

Taille de grain [μm]	ρ_s [mm^{-2}]	H_m [μm]	θ_s [degrés]
9	994	8,47	125,5
15	678	12,68	125,9
30	357	21,39	125,6
40	284	35,12	113,7
60	123	45,55	116,5
80	88	53,93	122,4

Mezghani et al [Mez08b, Mez09b] ont démontré que la granulométrie de 30 μm sépare l'usure de la bande abrasive en deux régimes distingués. Ils ont identifié un minimum du taux de variation d'angularité et de la réduction de hauteur pour la grosseur du grain abrasif 30 μm . En fait, avec une réduction des angles des sommets du grain, les grains abrasifs les plus grosses présentent une plus grande capacité de couper et d'enlever le copeau que les grains les plus fins, ce qui se traduit par un enlèvement de copeaux plus élevé. Au contraire, l'augmentation d'angle aux sommets des grains abrasifs plus fins pendant le toilage favorise le mécanisme de labourage. Il induit la réduction de la hauteur de granulation et de sa capacité d'indentation.

4. Mécanismes d'usure de la bande abrasive

La qualité des surfaces finies dépend de l'état d'usure de la bande abrasive [Mez09b]. L'étude de mécanisme d'usure des bandes abrasives nous conduit directement à étudier le comportement d'usure des grains abrasifs au cours de ce processus. Ces derniers sont des petits outils de coupe responsables de l'enlèvement de matière et de l'usure de la bande (constituée des grains). Les mécanismes d'usure des grains abrasifs en toilage sont des phénomènes très complexes, car les grains abrasifs ont des formes très irrégulières et une distribution aléatoire sur la bande. Ainsi, la connaissance exacte de la surface de contact et des mécanismes d'usure demeure très difficile [Khe07a]. L'évaluation des propriétés des abrasives appliquées pour l'utilisation dans le toilage est un problème complexe du à la variation de la morphologie de grain de particule à particule [Ham03]. La base de ce processus d'abrasion n'est pas encore bien comprise puisque il est basé sur des règles empiriques. Le temps de cycle et la fréquence d'oscillation de la bande sont considérés comme les variables les plus importants de procédé. L'usure de la bande abrasive constitue un indicateur important des influences du temps de cycle et de la fréquence d'oscillation sur le processus [Elm07].

4.1. Temps de toilage

Au cours du processus de toilage, les grains abrasifs qui constituent la bande abrasive sont usés partiellement ou totalement en fonction des conditions d'usinage comme tous les outils de coupe. Parmi ces conditions, le temps de cycle apparaît comme un paramètre crucial pendant cette opération (malgré il est très court). La caractéristique la plus importante de la bande abrasive est sa morphologie. Elle prend en compte à la fois l'angularité des grains (pénétration et capacité de coupe) et la distribution de leur orientation géométrique (densité des grains actifs) au cours du processus de toilage [Elm07]. La structure des grains d'abrasifs d'oxyde d'alumine en fonction de la durée de toilage t_{toilage} est présentée dans la figure 2.12. Les formes micrographiques ont été réalisées au MEB, par visée avec une inclinaison à 5° par

rapport à la surface de la bande abrasive. La bande neuve porte des grains d'abrasifs orientés, de taille moyenne $30\ \mu\text{m}$, qui présentent à la surface leur meilleure aptitude à la coupe (angularité $\approx 15\ \mu\text{m}$). De plus, l'espacement entre les grains est suffisamment grand pour permettre le logement de micro-copeaux. Toutefois, après seulement une courte période de toilage (voir figure 2.12), le pouvoir de coupe diminue (l'angularité chute à environ $8\ \mu\text{m}$). Jusqu'à 6 secondes de toilage, les arêtes tranchantes restent encore vives (voir figure 2.12). Après ce temps ($t_{\text{toilage}} = 9$ secondes), les grains s'émousent rapidement et la hauteur active des grains abrasifs chute rapidement au dessus de la résine [Ghi05]. La bande abrasive perd sa fonctionnalité au cours du temps non seulement par l'usure des grains abrasifs, mais, surtout, à la surcharge de stockage de l'espace entre les grains par le micro-débris [Elm07]. Après seulement trois secondes de toilage, la surface de travail de la bande est entièrement recouverte par des micro-débris. La couche transférée est constituée de micro-copeaux libres et d'une accumulation de micro-copeaux dans les grains abrasifs. La prolongation du temps de cycle conduit à la fragmentation de ces micro-copeaux et à leur agglomération sous forme des particules fortement compactées. La fragmentation, l'agglomération des particules compactées et l'évacuation de la couche transférée rendent instable l'opération de toilage [Elm07].

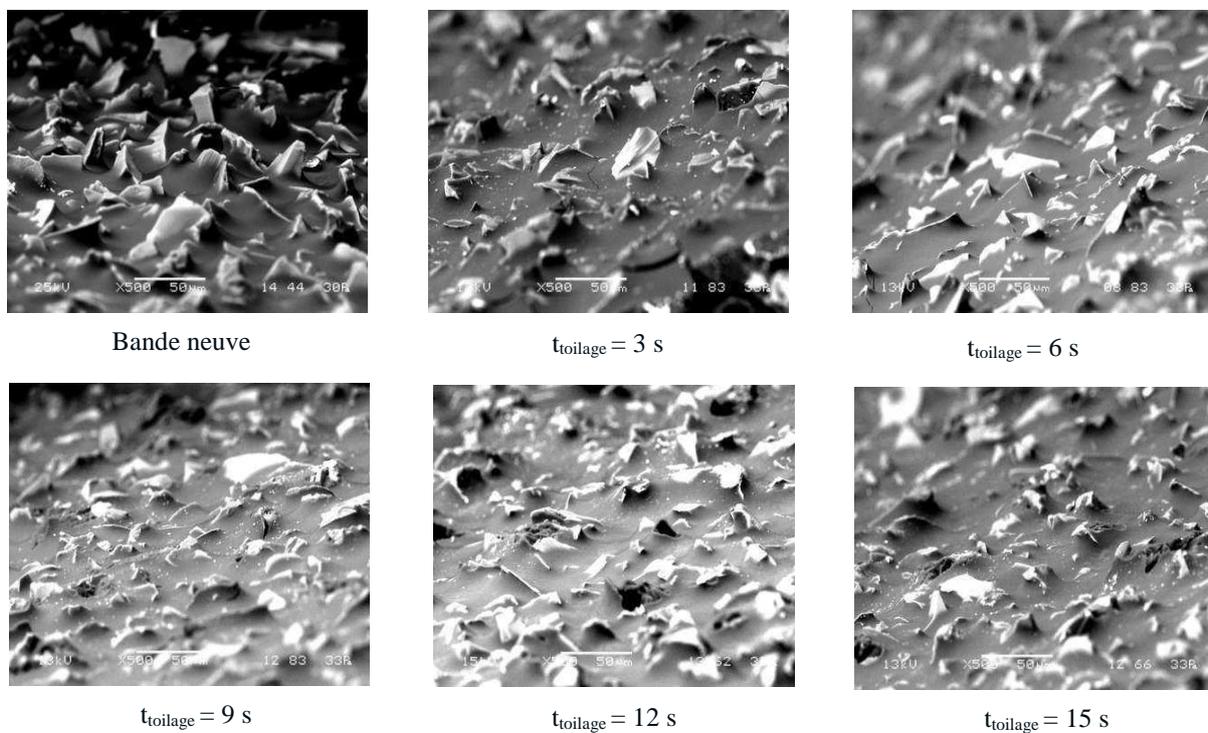


Figure 2.12 : Morphologie évolutive des grains d'abrasifs en fonction de la durée de toilage par mâchoire t_{toilage} ($N = 100\ \text{tr/min}$, $f = 150$ oscillations par minute) [Ghi05].

4.2. Fréquence d'oscillation

La fréquence d'oscillation est le troisième paramètre de coupe responsable de l'enlèvement de matière pendant le processus de toilage avec les deux autres paramètres : la vitesse de rotation de la pièce et la pression exercée par le galet ou mâchoire sur la bande abrasive. L'oscillation axiale de la bande abrasive donne à chaque grain l'opportunité de rendre sa capacité de coupe efficace. De plus, la fréquence d'oscillation améliore sensiblement le processus de finition du point de vue de la finition et de la durée de vie de la bande [Elm07]. Cependant, le paramètre de fréquence d'oscillation ne semble pas avoir d'influence directe et significative sur le mode de fragmentation des grains d'abrasifs en toilage (voir figure 2.13). En effet, l'oscillation de la toile suivant l'axe de la pièce implique une augmentation de pouvoir de coupe des grains abrasifs. Dans ce cas, l'influence de la fréquence d'oscillation se manifeste plus au niveau de l'état de surface que dans la formation des grains usés qui présentent des morphologies évolutives très marquées : nouvelle angularité ou usure des arrêtes de coupe. Ajoutons qu'il est possible de noter le rôle important de la lubrification en termes d'élimination des copeaux logés dans l'outil et de maintien la capacité de coupe des grains abrasifs de la bande abrasive [Ghi05, Elm07].

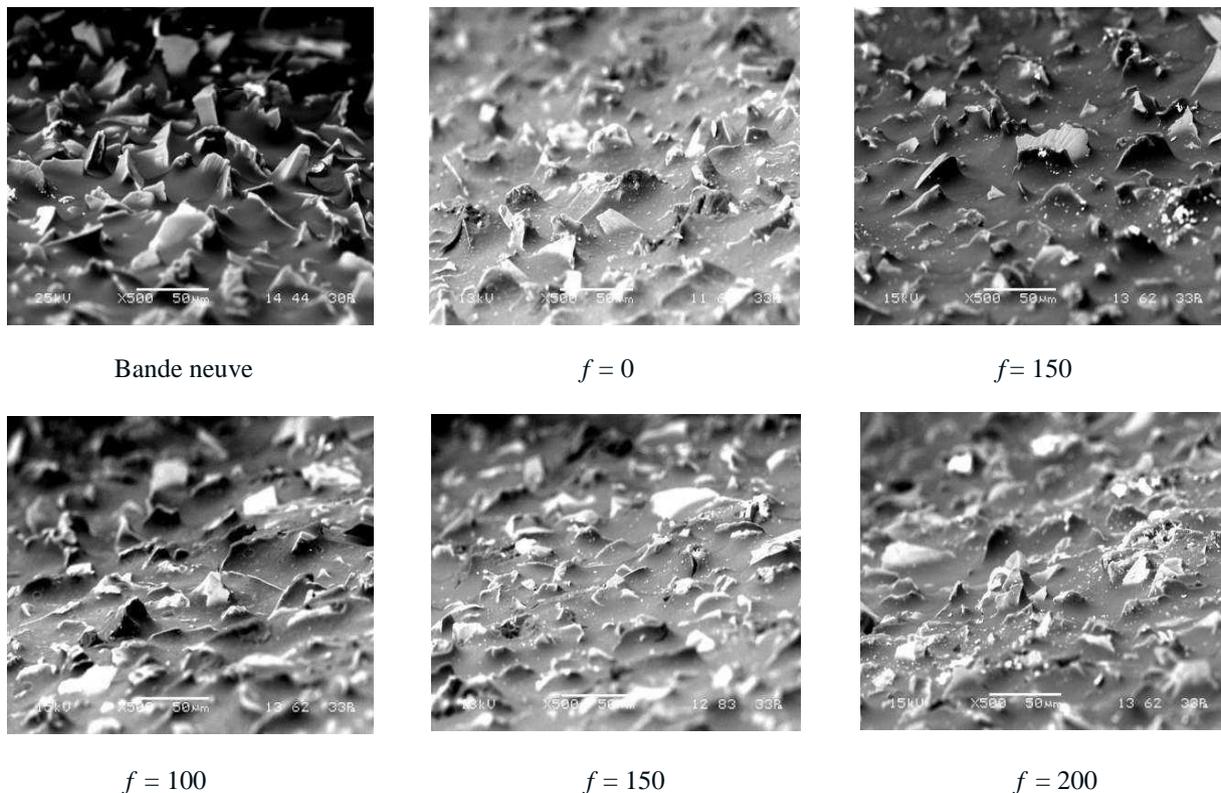
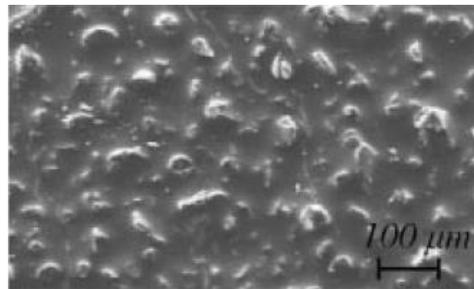


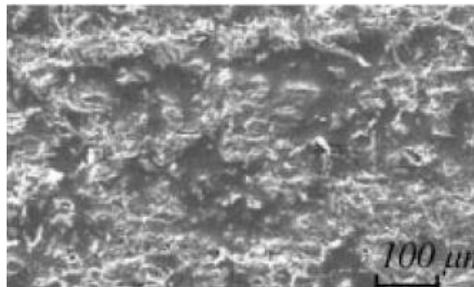
Figure 2.13 : Morphologie évolutive des grains d'abrasifs en fonction de la fréquence d'oscillation f ($N = 100$ tours/min, $t_{toilage} = 9$ secondes) [Ghi05].

4.3. Vitesse d'avance

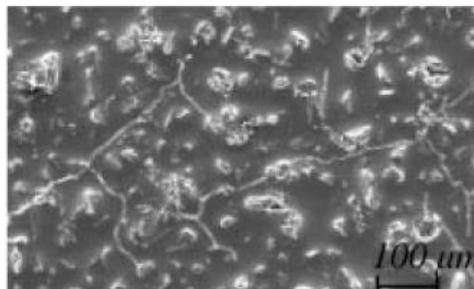
La vitesse d'avance de la bande est considérée parmi les paramètres influençant d'une manière significative le comportement d'usure des grains abrasifs lors du procédé de toilage. A partir des images MEB (figure 2.14), Khellouki et al [Khe07b] indiquent que l'usure des grains abrasifs augmente lorsque la vitesse d'avance du film diminue, car les grains abrasifs restent plus longtemps en contact avec la surface toilée. Par exemple, sans aucune avance de film, la durée effective de contact t_s est égale à 9 s, alors qu'elle n'est égale à 2,2 s que pour une vitesse de film de 97 mm/min. De plus, les grains sont plutôt fragmentés avec toilage. La fragmentation réduit la hauteur des grains et augmente la densité des arêtes de coupe (figure 2.15), ce qui améliore probablement la rugosité de surface dans le cas d'une vitesse d'avance de film lente.



(a) Nouveau film abrasif



(b) Vitesse d'avance de film = 0 mm/min



(c) Vitesse d'avance de film = 97 mm/min

Figure 2.14 : Image MEB des films abrasifs de 30 μm pour deux vitesses d'avance (Conditions de coupe pour les films abrasifs utilisés: $V_t = 160$ m/min, $F = 310$ N, $n_{osc} = 12$ Hz, $t = 9$ s, $H_s = 90$ Shore A) [Khe07b].

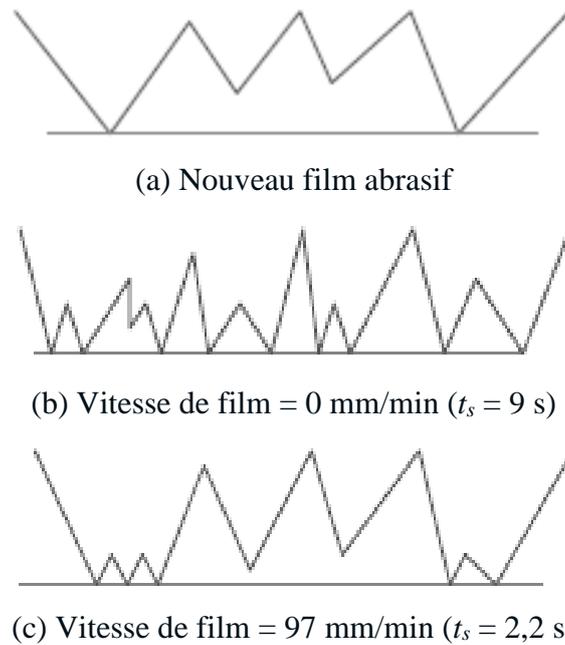
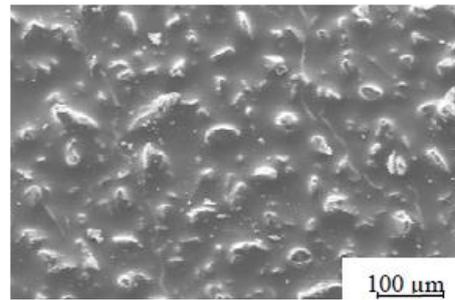


Figure 2.15 : Modélisation de l'usure des grains abrasifs [Khe07b].

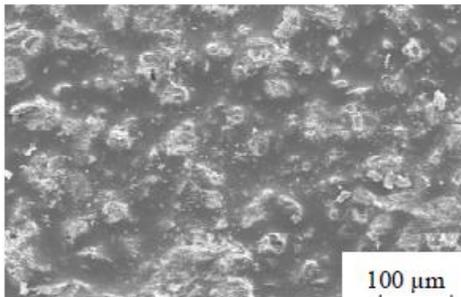
4.4. Lubrification

Comme nous savons, le rôle essentiel de l'application de lubrification au cours des procédés d'usinage par enlèvement de matière est : la diminution du coefficient de frottement et d'usure, l'amélioration de l'état de surface, le refroidissement de l'outil de coupe et l'évacuation des copeaux. Dans notre étude, la lubrification est un troisième corps appliqué par projection sur la surface de contact mécanique entre la pièce finie et la bande abrasive. Khellouki et al [Khe10] ont étudié expérimentalement son influence sur l'outil de coupe de toilage. La bande abrasive est constituée qu'une seule couche des grains d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 de granulométrie moyenne de $30 \mu m$ appliqués sur un support de papier élastique renforcé par des fibres. Les conditions du procédé sont comme suit : la vitesse de rotation de la pièce 900 tr/min (la vitesse tangentielle $V_c = 160$ m/min), la vitesse d'avance de la bande, $V_{a,max} = 100$ mm/min, la force appliquée entre la pièce et le galet, $F_N = 310$ N, l'oscillation axiale, $n_{osc} = 12$ Hz en fréquence, $a_{osc} = 3$ mm en amplitude, la durée égale 9 s, le galet de dureté 90 Shore A, la pression moyenne macroscopique du contact est de l'ordre de 0,2 MPa et à l'échelle microscopique le contact est localisé dans les pics des grains abrasifs. Ces chercheurs ont indiqué que l'application continue de l'huile minérale doit préserver les grains. Ainsi, ils resteront vifs et tranchants pendant un plus long temps, ce qui maintient justement leur capacité à éliminer les pics de rugosité. La figure 2.16 confirme cette explication. Les images des MEB comparent la bande utilisée avant et après la coupe sèche ou humide indiquant que les bandes appliquées dans le toilage sec sont beaucoup plus endommagées, les

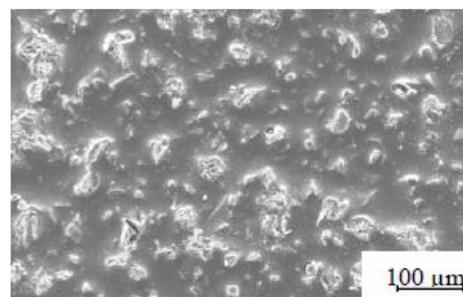
grains abrasifs ne sont pas aussi pointus (grains fracturés) et certains d'entre eux ont été extraits de la liaison.



Bande abrasive neuve (30µm)

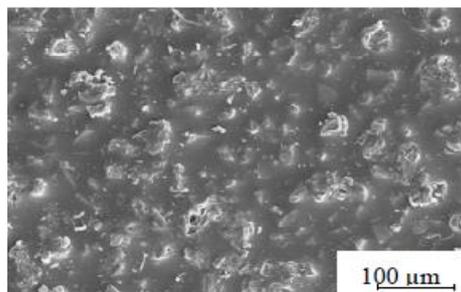


$V_a = 0 \text{ mm/min}$

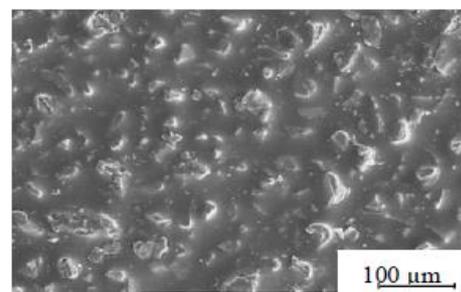


$V_a = 100 \text{ mm/min}$

A- Bande abrasive utilisée dans le toilage à sec.



$V_a = 0 \text{ mm/min}$



$V_a = 100 \text{ mm/min}$

B- Bande abrasive utilisée avec lubrification conventionnelle.

Figure 2.16 : Images en MEB des bandes abrasives neuves et utilisées dans des conditions sec et avec lubrification [Khe10].

Les grains abrasifs des bandes appliquées dans le toilage sec sont plus endommagés quand la vitesse est faible. Cette dernière mène à une plus longue durée de contact entre un grain abrasif et le matériau toilé suivant les indications de la figure 2.17. Dans ce cas, la bande devient presque plate et aucun grain abrasif ne peut se tenir plus haut que la liaison. Au contraire, les bandes appliquées dans la coupe humide sont beaucoup plus préservées. Particulièrement pour la haute vitesse, la bande paraît presque nouvelle. Naturellement, pour la faible vitesse, les bandes sont plus usées, mais rien de comparable avec la coupe sec.

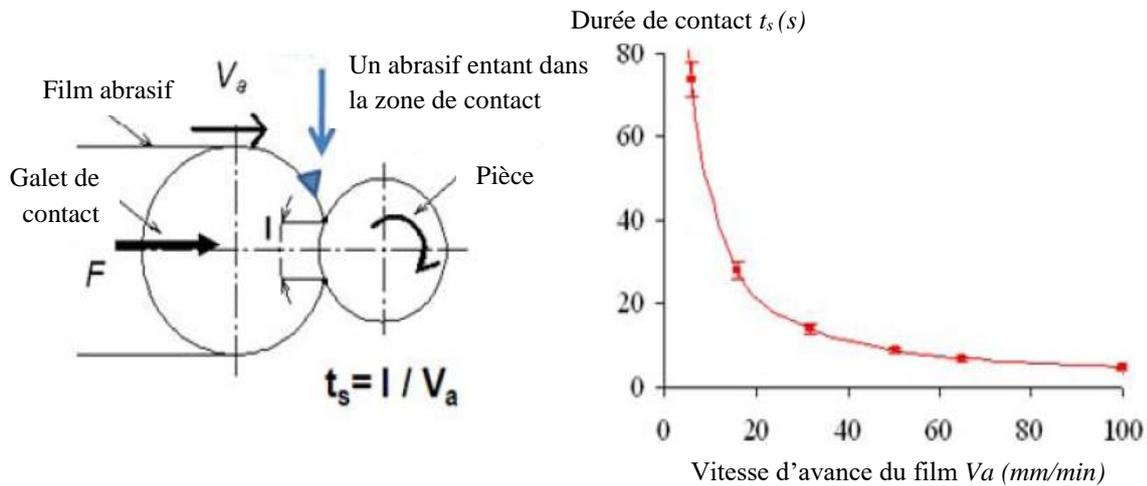


Figure 2.17 : Estimation de la durée de contact entre un grain abrasif et la pièce pour différentes vitesses de la bande abrasive [Khe10].

Les mêmes chercheurs ont analysé des bandes abrasives (figure 2.18), Ils s'avèrent que dans des conditions humides, la bande abrasive utilisée est très propre, puisque l'huile minérale ne permet pas aux copeaux d'adhérer à la bande. Au contraire, dans des conditions de *MQL*, ils ont observé une suspension noire cohérente sur la bande abrasive utilisée. L'examen de cette suspension prouve qu'il est constitué des grains abrasifs libres + micro-copeaux + l'huile. Cette suspension reste dans le contact et n'est pas éliminée par la vitesse de la bande.

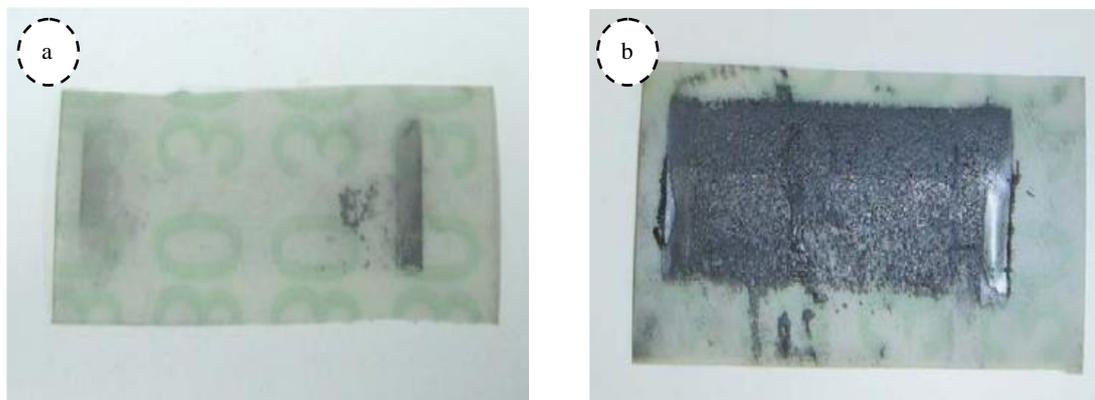
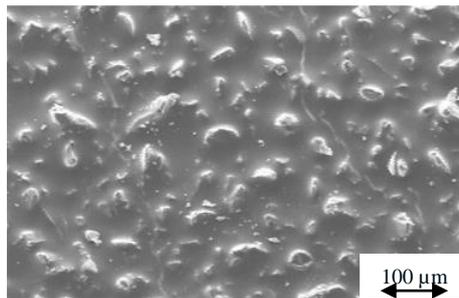


Figure 2.18 : Photographie de bande abrasive utilisée après le toilage dans la lubrification conventionnelle (a) et de quantité minimale (b) [Khe10].

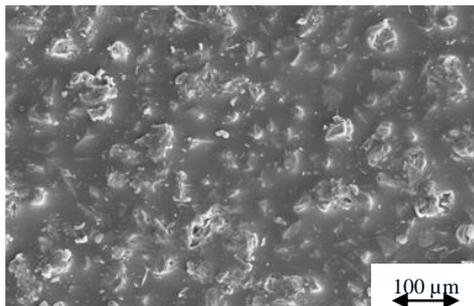
Quand les conditions de *MQL* sont utilisées, la bande abrasive observée par MEB de la figure 2.19, montre une détérioration grave comparée à la lubrification conventionnelle. Particulièrement, pour une faible vitesse de bande, les grains abrasifs sont complètement usés ou retirés de la liaison. Même la résine est endommagée. En effet, la suspension fortement abrasive affecte non seulement la surface de la pièce toilée, mais aussi la bande abrasive devient usée. D'ailleurs, ils ont indiqué que la suspension est créée par l'extraction ou la

fracturation des grains abrasifs dans le contact. Dans ce cas, la bande abrasive a été probablement détruite après quelques minutes ou heures de travail [khe10].

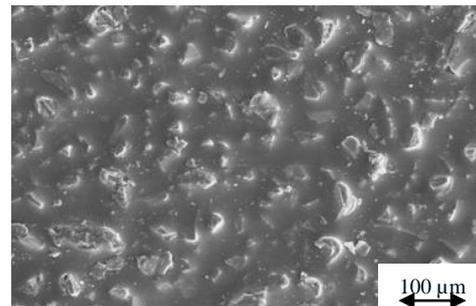
L'analyse de la bande abrasive utilisée peut également être faite pour la grande vitesse de bande. Les chercheurs en question ont observé des phénomènes similaires, mais avec une grandeur beaucoup plus inférieure. Les grains abrasifs et la liaison sont plus affectés sous la *MQL* que sous la lubrification conventionnelle. L'application de *MQL* au lieu de la lubrification conventionnelle peut apporter un avantage environnemental significatif [khe10].



Bande abrasive neuve (30 μm)

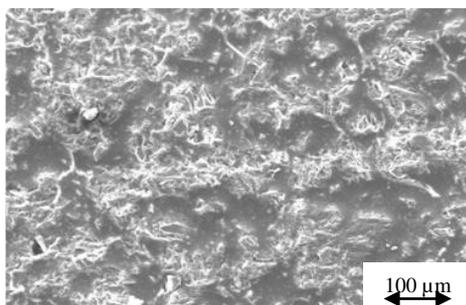


$V_a = 0 \text{ mm/min}$

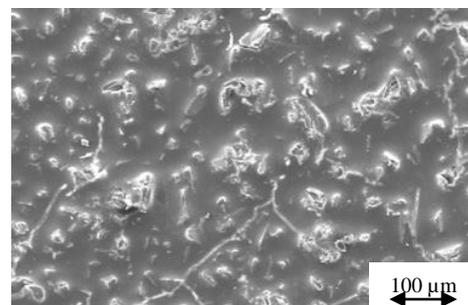


$V_a = 0 \text{ mm/min}$

A- Bande abrasive utilisée avec lubrification conventionnelle.



$V_a = 0 \text{ mm/min}$



$V_a = 0 \text{ mm/min}$

B- Bande abrasive utilisée avec lubrification de quantité minimale.

Figure 2.19 : Images en MEB des bandes abrasives utilisées dans des conditions de lubrification conventionnelle et avec lubrification de quantité minimale [Khe10].

4.5. Structure de la bande

La superfinition des tourillons et des manetons de vilebrequin sont généralement obtenues par traitement de trois ou plusieurs étapes de toilage tout en diminuant successivement la taille des grains, ce qui implique des coûts de fabrication et des investissements substantiels [Ser15a, Ser15b]. Récemment, une nouvelle génération des bandes abrasives (abrasifs appliqués) des grains agglomérés structurés et façonnés est devenue disponible dans le commerce [Ser15a, Ser15b], comme présenté dans la figure 2.20.

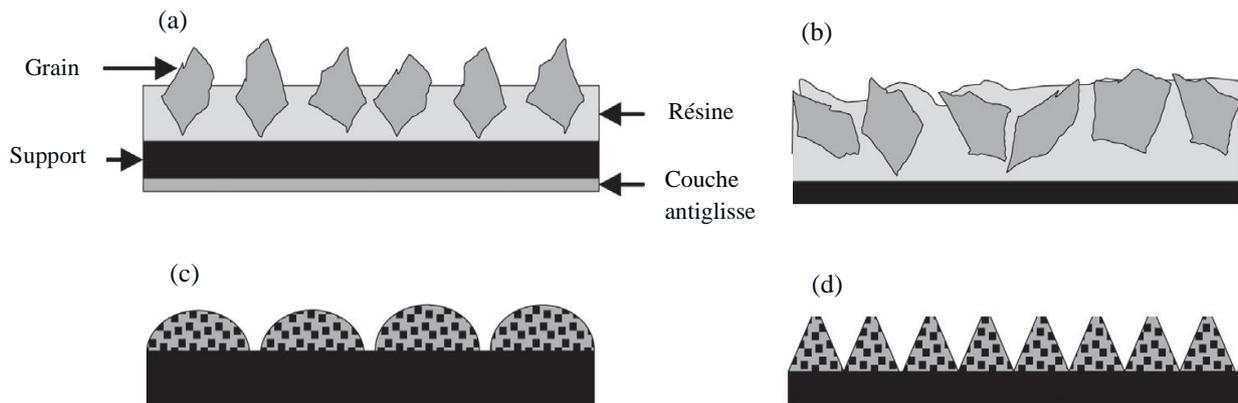


Figure 2.20 : Quatre structures des bandes abrasives : 5902, 372L et 272L (a), 261X (b), 2970 (c), et 253FA (d) [Ser15a].

Donc, quatre types de bandes abrasives structurées avec la même gamme de taille des grains (environ $30\ \mu\text{m}$) sont étudiés par Serpin et al [Ser15a] et trois de ces bandes ont été étudiés par le même chercheur (sauf la bande de type III) dans un autre article publié dans la même année [Ser15b]. Les différentes structures de ces bandes sont :

- **Type I :** Une structure commune souvent utilisée pour la superfinition des tourillons et des manetons de vilebrequin (voir figure 2.20 (a)). La bande abrasive est constituée d'une grande quantité des grains calibrés et déposés par procédé de poudrage électrostatisme sur un support de polyester retenu par une couche de résine synthétique ou à base d'eau. Avec ce procédé de dépôt, les grains sont orientés perpendiculairement au support et leur arête de coupe offre une importante capacité d'enlèvement de matière. En outre, ce type de bande peut avoir une couche antidérapante à l'arrière, ce qui permet une meilleure tenue pendant les opérations de toilage [Ser15a, Ser15b]. Trois modèles de bande avec cette structure sont considérés comme (5902, 372L et 272L) [Ser15a].
- **Type II :** Une structure composée des grains poudrés par laminage (voir figure 2.20 (b)). La bande abrasive est constituée par des grains partiellement ou complètement couverts

par la résine. Les arêtes de coupe sont aplaties, bien orientée, et moins agressives [Ser15a, Ser15b].

- **Type III** : Une structure profilée constituée d'un support de grande épaisseur sur lequel sont déposés les agglomérats de demi-sphérique (figure 2.20 (c)). La densité des grains est très élevée par rapport aux autres structures. De plus, ce type de bande présente une petite zone de contact entre la structure abrasive et la surface de la pièce [Ser15a].
- **Type IV** : Une structure profilée constituée d'un support de toile plastifié sur lequel des agglomérats pyramidaux sont déposés (voir figure 2.20 (d)). Chaque pyramide a une base carrée. Elle est constituée des grains abrasifs de 30 μm liés ensemble par une résine synthétique. Comme pour les bandes de type III, seuls les sommets sont en contact avec la pièce finie [Ser15a, Ser15b].

Le tableau suivant présente les caractéristiques des quatre bandes précédentes.

Tableau 2.3 : Caractéristiques des bandes abrasives [Ser15a].

Type	Taille des grains	Modèle	Fournisseur	Grains	Déposition par	Support
I	$\approx 30 \mu\text{m}$	5902	SIA	Al_2O_3	Electrostatisme	Polyester
I	$\approx 30 \mu\text{m}$	372L	3M	Al_2O_3	Electrostatisme	Polyester
I	$\approx 30 \mu\text{m}$	272L	3M	Al_2O_3	Electrostatisme	Polyester
II	$\approx 30 \mu\text{m}$	261X	3M	Al_2O_3	Laminage	Polyester
III	$\approx 30 \mu\text{m}$	2970	SIA	Al_2O_3	Aplatissement	Toile
IV	$\approx 30 \mu\text{m}$	253FA	3M	Al_2O_3	Laminage	Toile

La figure 2.21 illustre l'analyse comparative par MEB de cette nouvelle génération des bandes après nettoyage par un bain à ultrasons. Dans l'ensemble, la taille totale de grain est différente de la taille de grain visible. Ceci est principalement dû au procédé de dépôt, par lequel les grains sont plus ou moins insérés dans la résine. Même sur la même bande, la partie exposée des grains peut varier considérablement. Par exemple, des différences ont été observées dans l'apparence des grains entre les bandes initiales de type I (5902, 372L et 272L). Le modèle 5902 a des gros grains et leurs arêtes de coupe moins pointues que dans les modèles 372L et 272L. En plus, ces chercheurs ont noté que la densité de 5902 est la plus élevée par rapport aux modèles de type I. L'orientation des grains est également différente.

Les grains abrasifs de la bande 272L sont plus répartis et plus uniformes sur le support tandis que les grains de 372L ont des arêtes de coupe plus pointues [Ser15a].

La micrographie initiale de la bande de type II (261X) montre une structure avec des grains partiellement ou complètement recouverts par la résine. Globalement, les grains de 261X offrent des arêtes de coupe inclinées. Cette orientation est également observée sur la bande de type III (2970). Concernant ce dernier, la résine n'est pas visible et le maillage de grain apparaît très compact [Ser15a].

Finalement, les formes pyramidales de la bande de type IV (253FA) sont observées sur la dernière micrographie. La base carrée de chaque pyramide est d'environ $500 \mu\text{m}^2$. En outre, ils ont remarqué que la taille visible des grains constituant les structures pyramidales est très variable et varie de plusieurs μm à environ $30 \mu\text{m}$ [Ser15a, Ser15b].

Les chercheurs en question ont analysé l'état des bandes après le toilage. Ils ont observé que l'usure des bandes de type I conduit à un détachement partiel ou total des grains les plus importants. Ce phénomène dépend des caractéristiques des grains (profondeur de pénétration, l'orientation, l'angle des arêtes de coupe, volume,...etc) et les forces appliquées [Ser15a, Ser15b]. Un œil attentif remarquera la présence des petites fissures à l'interface gains/résine. Cela représente sans aucun doute la première étape de détachement des grains. Qualitativement, après une analyse d'une grande zone de la bande, le mécanisme de détachement est plus marqué pour les bandes 5902 et 372L que pour la 272L. Ceci peut être lié à la haute densité des grains avec des arêtes de coupes moins actives [Ser15a].

L'abrasion provoque un enlèvement important de la résine de la bande abrasive de type II. Ils ont remarqué l'aplatissement de la résine et l'apparition des nouvelles arêtes de coupe qui ont été initialement recouvertes totalement. En outre, aucune extrusion de grain abrasif n'est observé [Ser15a].

Concernant la bande de type III, la génération du copeau est complètement logée entre les grains, malgré l'opération de nettoyage préliminaire. Les arêtes de coupe des grains sont entièrement recouvertes par les copeaux métalliques. Cela indique que la densité des grains a empêché les copeaux de se loger. La capacité de coupe de la bande à détériorée. De plus, il n'y a pas d'extrusion de grain [Ser15a].

Relativement à la bande de type IV, ils ont démontré que seuls les sommets ont été endommagés. Grâce à sa structure, l'abrasion renouvelle les grains de la bande en créant de

nouvelles arêtes de coupe et en préservant la capacité de coupe. Ce type de bande offre ainsi une meilleure durabilité que les bandes classiques (type I), dont les grains sont détachés rapidement et/ou les arêtes vives deviennent rapidement arrondies [Ser15a, Ser15b].

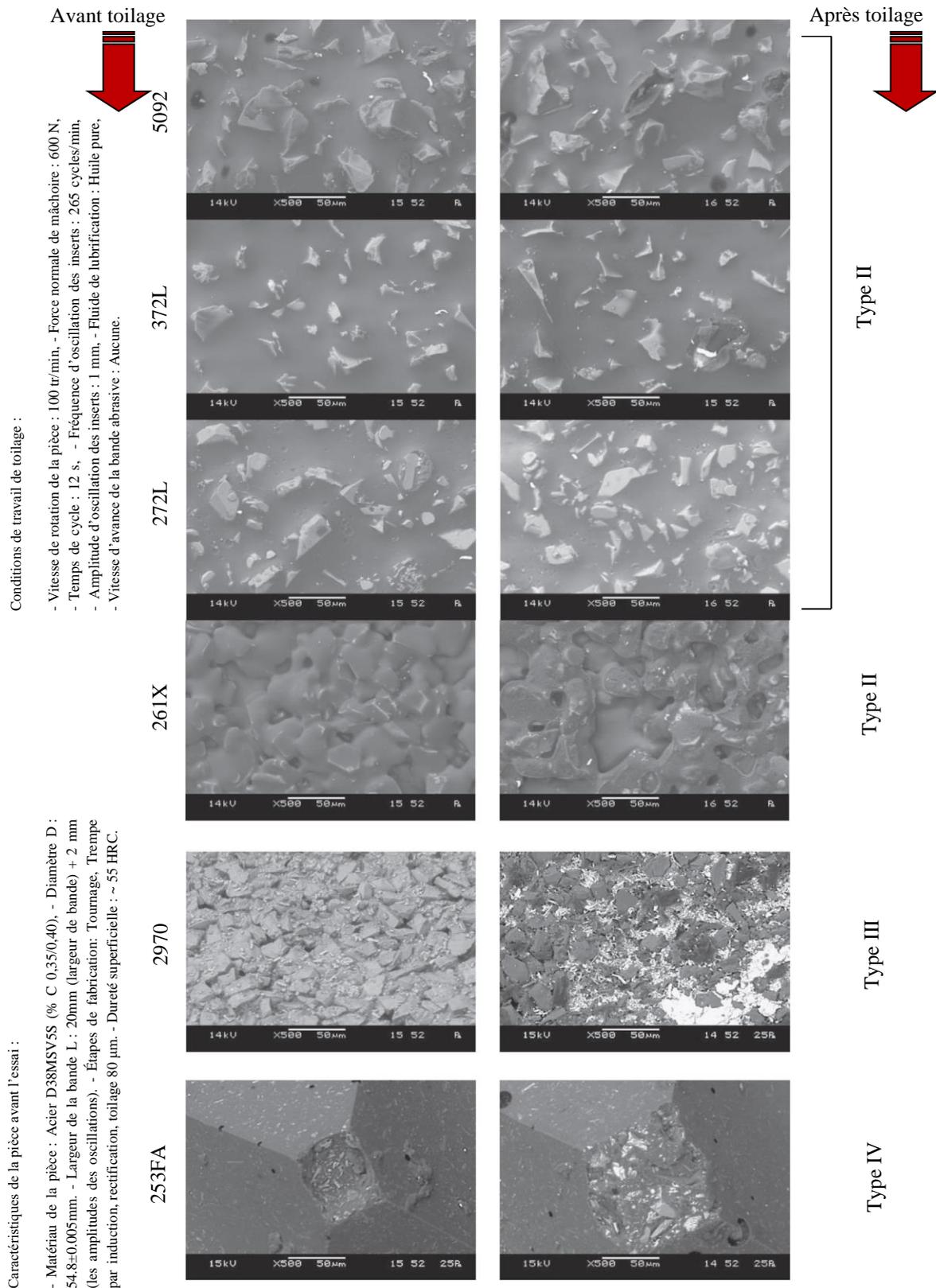


Figure 2.21 : Micrographies MEB des bandes abrasives initiales et usées [Ser15a].

La méthode utilisée par Serpin et al [Ser15a] pour décrire simplement l'efficacité globale de chaque structure abrasive est de calculer leur pertinence en fonction de trois critères:

- Le gain fonctionnel de la surface obtenue, qui est transcrite ici par un paramètre global évalué à partir de l'équation (2.3). Ils ont noté que dans un contact lubrifié tel que dans des tourillons de vilebrequin, la rugosité recherchée par la finition doit offrir la plus petite crête (R_{pk}) et la plus petite hauteur de cœur (R_k), afin d'éviter le contact solide entre la rugosité de la pièce antagoniste, tout en offrant les vallées les plus profondes (R_{vk}) pour maintenir le contact lubrifiant (en particulier dans un régime de lubrification limite et mixte). Donc, le gain fonctionnel est élevé. Par conséquent, la surface fonctionnelle est pertinente.

$$\text{Gain fonctionnel} = \frac{\left(\frac{R_{pk}^{initial} + R_k^{initial}}{R_{vk}^{initial}}\right) - \left(\frac{R_{pk}^{final} + R_k^{final}}{R_{vk}^{final}}\right)}{\left(\frac{R_{pk}^{initial} + R_k^{initial}}{R_{vk}^{initial}}\right)} \dots\dots\dots(2.3)$$

- Les critères de reproductibilité qui représentent l'écart type du gain fonctionnel.
- L'énergie spécifique moyenne calculée.

Ceci est illustré dans la figure 2.22. La structure la bande de type II (261X) conduit à une bonne fonctionnalité, tout en ayant l'une des erreurs de reproductibilité les plus faibles. Cette tendance permet de réduire les aspérités de la rugosité sans diminuer les profondeurs des vallées. De ce point de vue, les bandes de type I et de type IV semblent être moins efficaces, et donc elles sont incapables de préserver la profondeur des vallées.

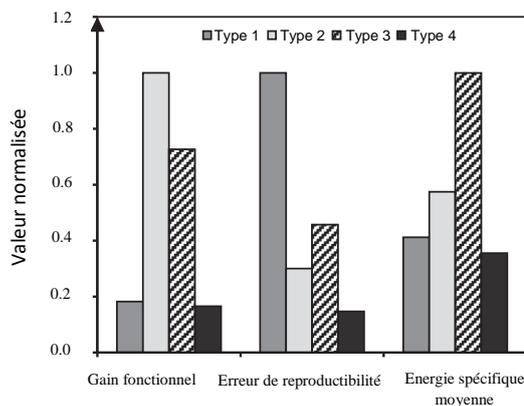


Figure 2.22 : Structure de la bande pertinence en fonction des critères de fonctionnalité [Ser15a].

D'après ces résultats [Ser15a], ils ont conclut que la structure de la bande joue un rôle essentiel dans l'usure de la bande abrasive et dans l'efficacité de processus de toilage. Ils ont constaté que la bande de type III constituée des agglomérats en forme demi-sphériques

pourrait limiter le travail de la bande entre les deux agglomérats demi-sphériques successives, et ceci est dû principalement à l'orientation de sa structure sur le support (figure 2.23).

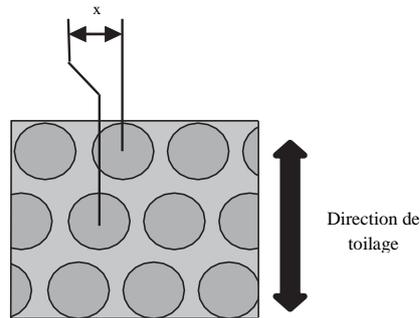
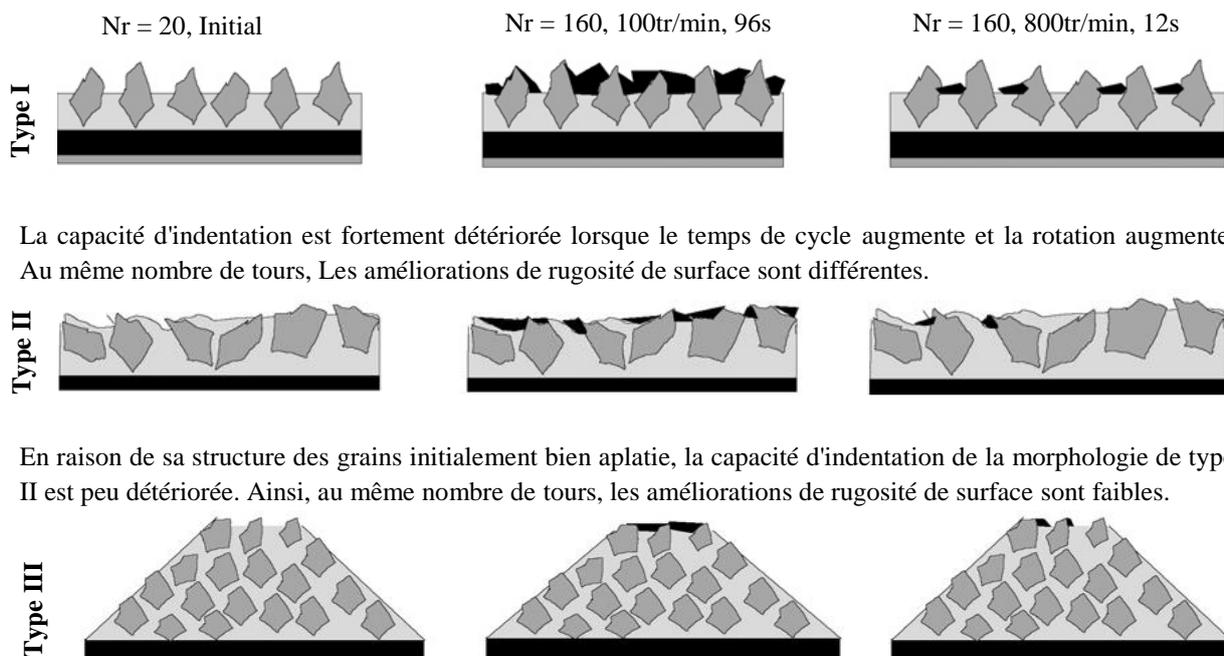


Figure 2.23 : Espacement transversal de la bande 2970.

Serpin et al [Ser15b] ont trouvé qu'avec une vitesse de rotation élevée, le débit d'enlèvement de matière est plus élevé que d'habitude. Ainsi la puissance mécanique moyenne transmise de la pièce à chaque grain est très importante. En fonction de leurs formes, tailles et orientations sur le support de la bande, des fissures peuvent apparaître à l'intérieur des grains ou se développer à partir de l'interface grain/résine, et enfin, la rupture se produit. En effet, la moyenne de ces ruptures du grain augmente lorsque la vitesse de rotation augmente : 29 ruptures/mm² (800 tr/min, 12 s), 15 ruptures/mm² (100 tr/min, 96 s) et 7 ruptures/mm² (100 tr/min, 12 s). En principe, plus la capacité d'indentation initiale de l'abrasif est élevée, plus l'effet du choix de la méthode pour augmenter le nombre de tours est important sur l'amélioration de la rugosité de surface. Ce point est illustré et présenté pour chaque type de bande dans la figure 2.24.



La capacité d'indentation est fortement détériorée lorsque le temps de cycle augmente et la rotation augmente. Au même nombre de tours, les améliorations de rugosité de surface sont différentes.

En raison de sa structure des grains initialement bien aplatie, la capacité d'indentation de la morphologie de type II est peu détériorée. Ainsi, au même nombre de tours, les améliorations de rugosité de surface sont faibles.

Figure 2.24 : Effet de la saturation des copeaux en fonction de type la bande [Ser15b].

4.6. Modélisation des mécanismes d'usure des grains abrasifs

Les mécanismes d'usure des grains abrasifs de l'outil de toilage sont des phénomènes très complexes, parce que les grains abrasifs ont des formes très irrégulières et une répartition aléatoire sur la bande. Ainsi, la connaissance exacte de la zone de contact reste très difficile à déterminer. Cependant, il est possible d'obtenir certaines informations qualitatives à travers d'un modèle de base présenté à la figure 2.25.

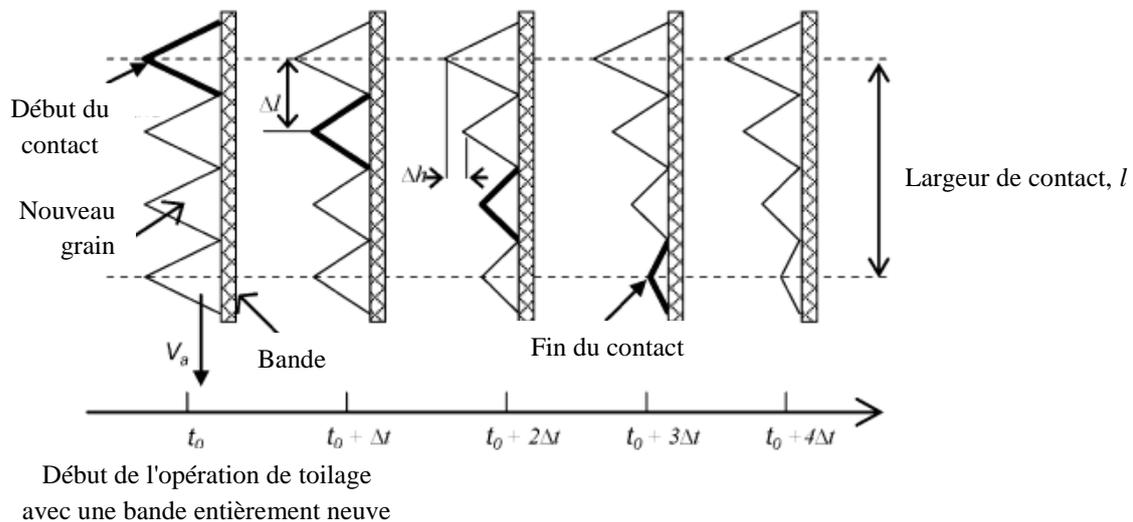


Figure 2.25 : Modélisation de l'usure des grains abrasifs dans la zone de contact [Khe07a, Khe07b].

La modélisation est faite selon les hypothèses suivantes [Khe07a, Khe07b] :

1. Les grains abrasifs sont modélisés comme des cônes.
2. L'usure d'un grain dans une fraction de temps Δt correspond à une réduction en hauteur des cônes de Δh .
3. Dans chaque fraction de temps Δt , le film abrasif se déplace sur une distance Δl en raison de la vitesse d'avance du film.

Les grains abrasifs se déplacent à une vitesse constante V_a (figure 2.25). Selon les hypothèses précédentes, le grain tracé en gras traverse le contact dans $3\Delta t$ s. Ainsi, $3\Delta t$ est la durée de contact effective entre les grains actifs et la surface usinée, ce qui correspond à t_s . Après $3\Delta t$, l'état de l'usure du film abrasif au contact de la pièce reste constant même si le toilage continue, car les grains actifs sont toujours remplacés par des nouveaux. Afin de représenter l'évolution de l'usure dans ce modèle de base, on suppose que le taux d'usure est constant pendant toute la durée de toilage (figure 2.26).

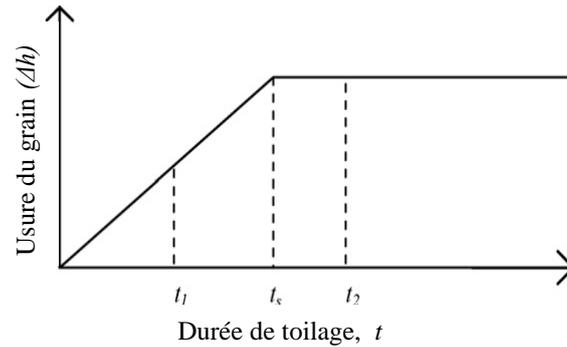


Figure 2.26 : Relation entre la durée de toilage et l'usure du grain [Khe07a, Khe07b].

Deux configurations doivent être distinguées (figure 2.26).

1. La durée de toilage est inférieure à t_s (exemple: t_1). Dans ce contexte, le niveau d'usure après le fonctionnement de la bande dépend de la durée de la bande.
2. La durée de toilage est supérieure à t_s (exemple: t_2). Dans ce contexte, le niveau d'usure après le fonctionnement de la bande est maximal et ne dépend pas de la durée de la bande. Cela signifie que, sur une durée minimale de la bande t_s , la capacité de coupe reste constante.

NB: la capacité de coupe peut être définie comme la capacité d'un grain abrasif à enlever une quantité de matière en considérant sa forme (le matériau du grain est constant et sa force de liaison sur la bande est constante).

Cette modélisation des conditions de contact élastique entre le couple galet-bande d'une part et la pièce d'autre part a montré que l'action des grains et leurs mécanismes d'usure sont principalement influencés par trois paramètres de toilage: la pression de contact moyenne, la durée de contact effective entre un grain abrasif et la surface, et le nombre de grains actifs dans le contact. Ces paramètres locaux sont directement déterminés par les paramètres habituels : la force appliquée, la durée de toilage, la dureté du galet et la vitesse d'avance du film [Khe07a, Khe07b]. Ainsi, l'usure des grains abrasifs est plus élevée pour un galet plus dur que pour un galet plus souple comme représenté dans la figure 2.27.

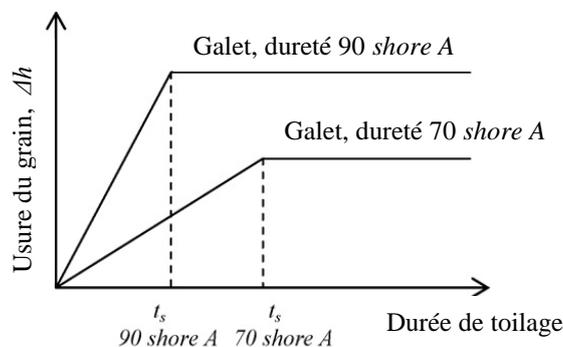


Figure 2.27 : Evolution de l'usure du grain abrasif en fonction de la durée de toilage pour un galet dur et souple [Khe07a].

5. Morphologie des micro-copeaux

Les premiers chercheurs ayant étudiés la morphologie de micro-copeaux obtenue par le procédé de toilage sont Ghidossi et al [Ghi05]. Pour caractériser cette morphologie, une technique de préparation de la toile abrasive a été adoptée. Celle-ci consiste à appliquer un adhésif sur la bande abrasive en fin de toilage afin de décoller la couche ultime de micro-copeaux. Cela permet d'accéder aux micro-copeaux primaires, c'est à dire ceux formés en début de toilage. Ils ont montré que la composante de coupe en toilage se manifeste essentiellement dans les premiers instants (figure 2.28 (a)) et les micro-copeaux générés en début de toilage sont logés dans l'espace inter-grains. Ils sont relativement importants. A l'opposé, en fin de toilage, les micro-copeaux sont fins, courts et agglomérés (figure 2.28 (b)).



(a) début de toilage.



(b) à 9 secondes de toilage.

Figure 2.28 : Morphologie évolutive des micro-copeaux avec la durée de toilage ($N = 100$ tours/min, $f = 150$ oscillations par minute) [Ghi05].

Serpin et al [Ser15b] ont étudié les copeaux générés par trois différents types des bandes abrasives après leur nettoyage par un bain à ultrasons et des copeaux récupérés par l'intermédiaire d'un filtre. Le tableau suivant illustre les caractéristiques de ces bandes.

Tableau 2.4 : Caractéristiques de trois bandes abrasives [Ser15b].

Type	Taille des grains	Modèle	Fournisseur	Grains	Support
I	$\approx 30 \mu\text{m}$	372L	3M	Al_2O_3	Polyester
II	$\approx 30 \mu\text{m}$	261X	3M	Al_2O_3	Polyester
III	$\approx 30 \mu\text{m}$	253FA	3M	Al_2O_3	Polyester

Le tableau 2.5 illustre les caractéristiques de la pièce avant l'essai de toilage.

Tableau 2.5 : Caractéristiques de la pièce avant l'essai de toilage [Ser15b].

Matériau de la pièce	Acier : D38MSV5S (%C 0.35/0.40)
Diamètre D	54.8 ± 0.005 mm
Largeur de la bande	20 mm (largeur de la bande) + 2 mm (amplitudes des oscillations)
Etapas de fabrication	Tournage, cémentation et trempe, rectification, toilage par $60 \mu\text{m}$
Dureté superficielle	≈ 55 HRC
Rugosité initiale	R_{pk} moyenne : $0,515 \mu\text{m}$ ($\pm 0,099 \mu\text{m}$)
	R_k moyenne : $1,964 \mu\text{m}$ ($\pm 0,257 \mu\text{m}$)
	R_{vk} moyenne : $1,449 \mu\text{m}$ ($\pm 0,152 \mu\text{m}$)

Les copeaux générés par la micro-coupe des grains actifs de la bande abrasive de type I sur la surface des pièces apparaissent surtout bien cassés. L'épaisseur et la longueur des copeaux visibles varient considérablement (leurs épaisseurs varient d'environ 1 à 5 μm , tandis que leurs longueurs varient à partir de plusieurs μm à quelques dizaines de μm) (voir figure 2.29).

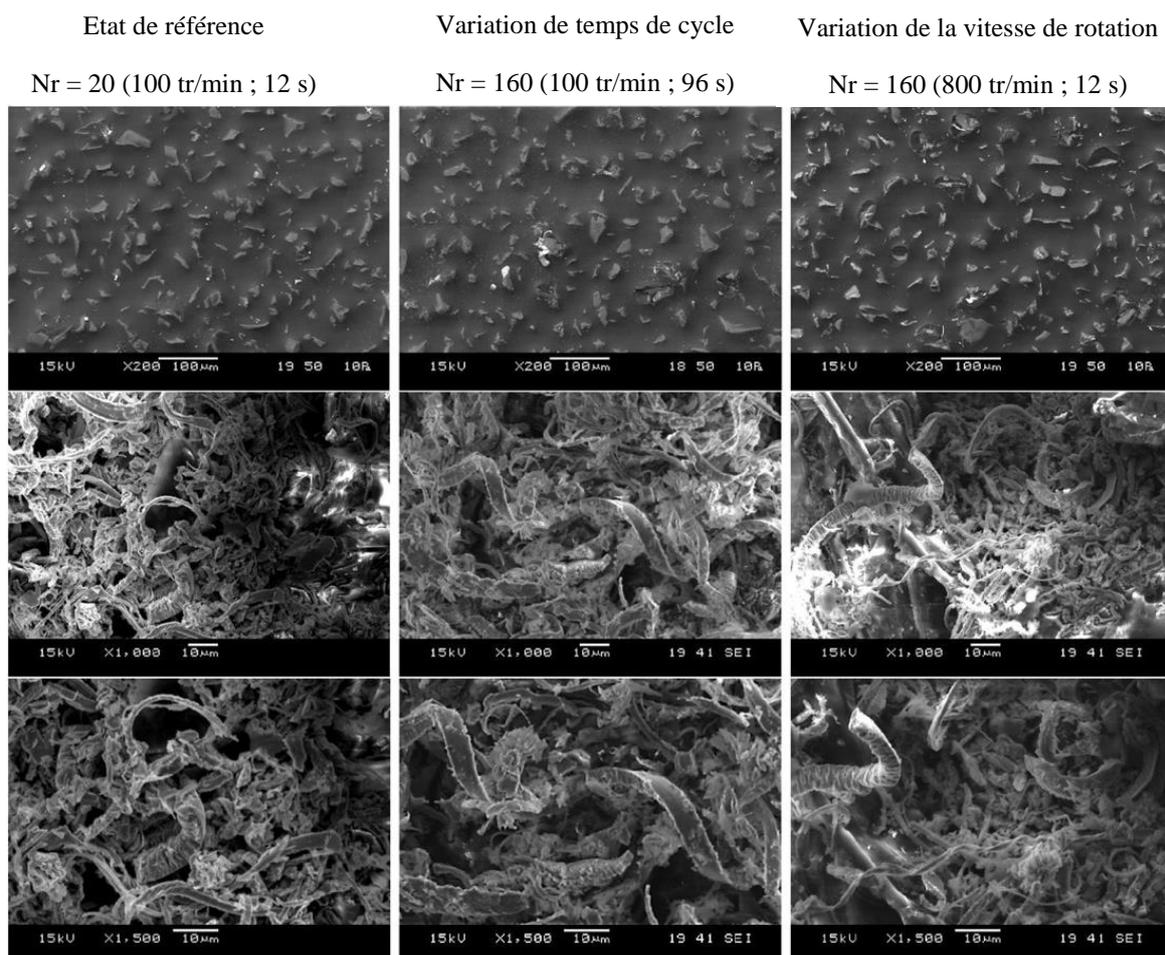


Figure 2.29 : Micrographies MEB montrant l'usure de la bande abrasive de type I et les copeaux générés [Ser15b].

Les copeaux créés par la bande de type II sont globalement très minces (environ 1 μm) et longs (plusieurs dizaines de μm). La rupture des copeaux apparaît lorsque le nombre de tours augmente, surtout à vitesse de rotation élevée. En outre, il y a quelques copeaux frisés. Dans l'ensemble, la rupture des copeaux est inférieure que celle de la bande de type I, mais ils sont plus uniforme (voir figure 2.30).

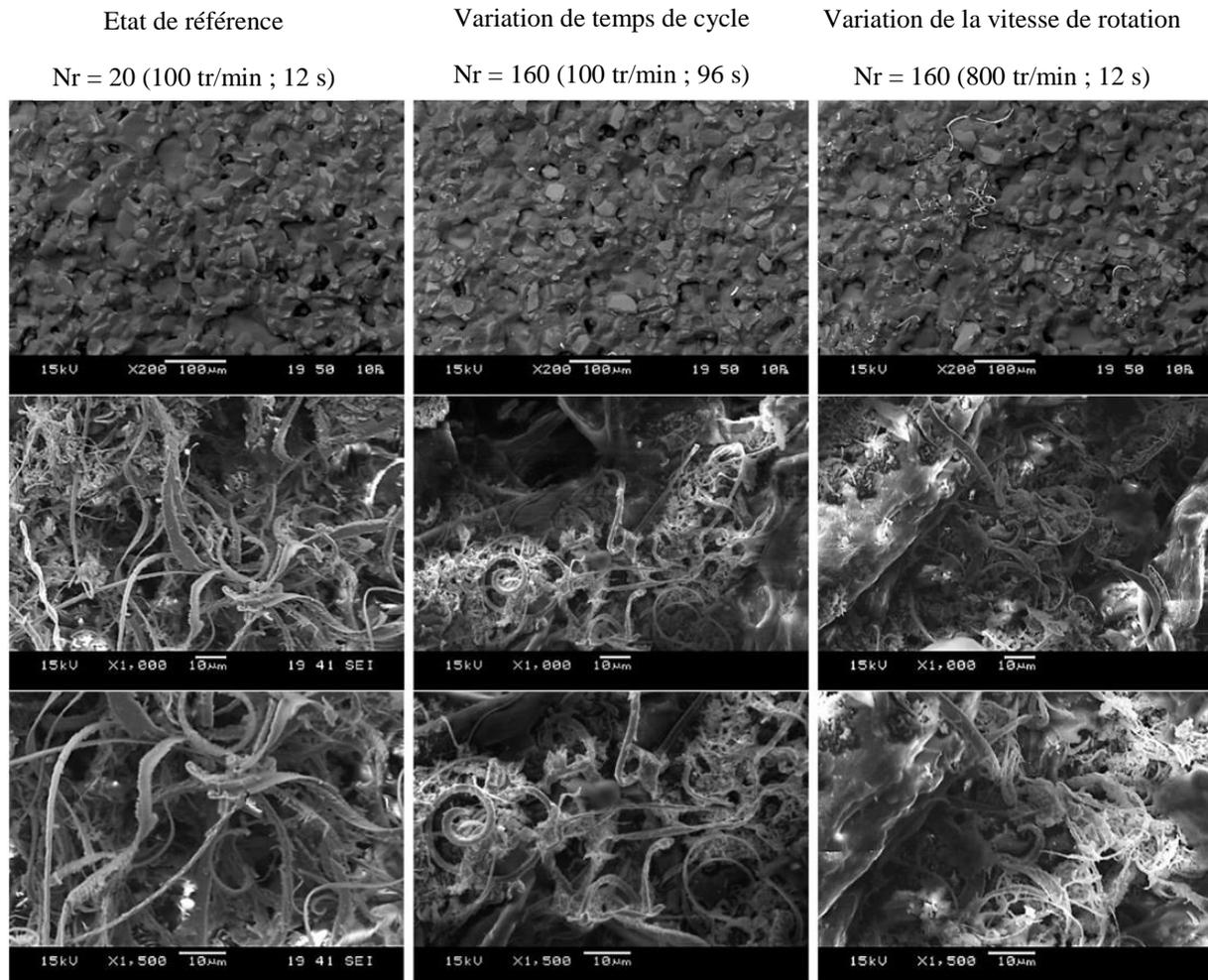


Figure 2.30 : Micrographies MEB montrant l'usure de la bande abrasive de type II et les copeaux générés [Ser15b].

Concernant le troisième type des bandes abrasives étudiées, il a été constaté que leur épaisseur et leur longueur varient considérablement (allant de moins de 1 à environ 5 μm concernant leur épaisseur et de gamme de 1 μm à environ 50 μm concernant leur longueur). Ils apparaissent légèrement ondulés et la rupture des copeaux est inférieure que la bande abrasive de type I (voir figure 2.31).

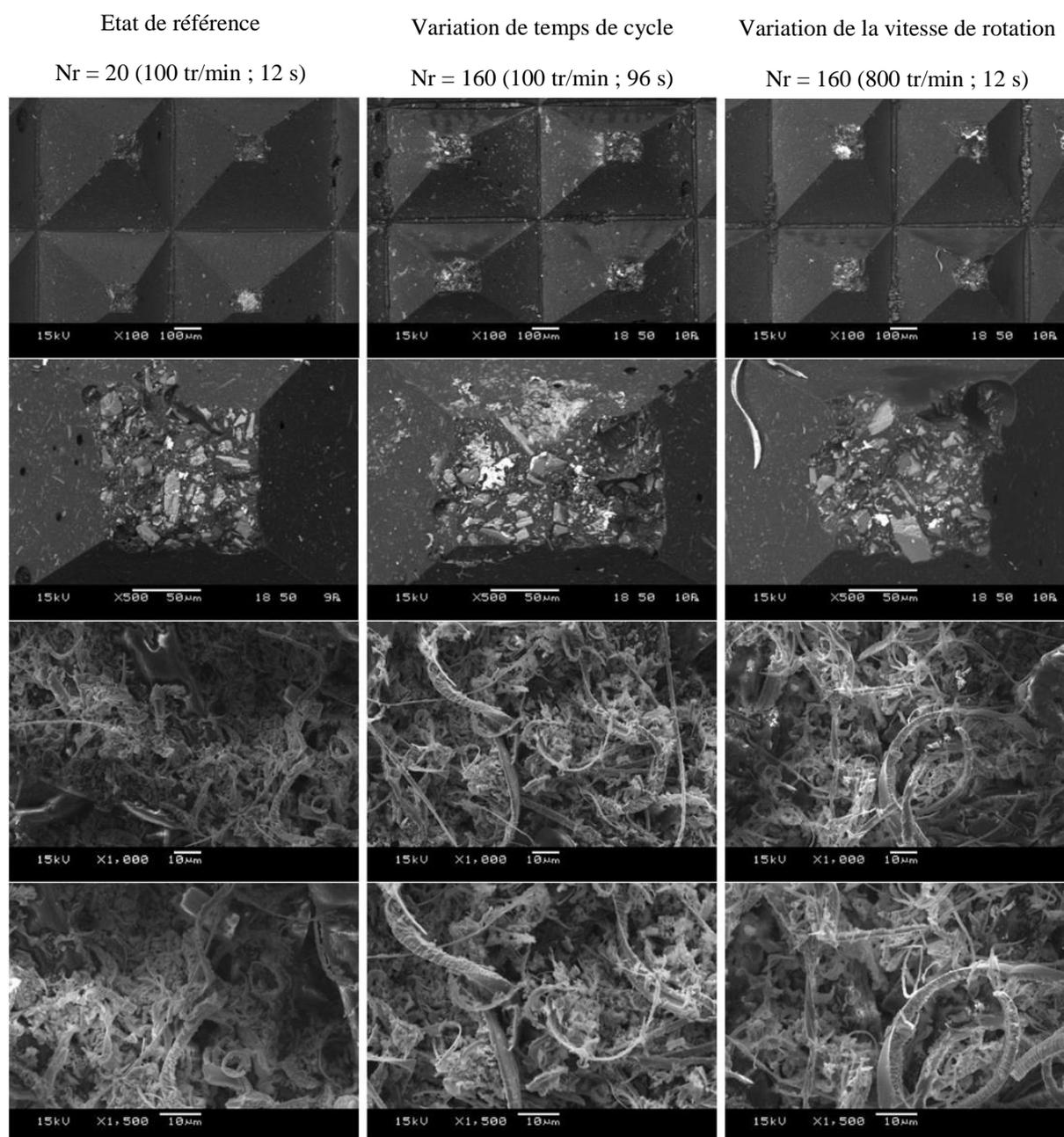


Figure 2.31 : Micrographies MEB montrant l'usure de la bande abrasive de type III et les copeaux générés [Ser15b].

CHAPITRE 3

Paramètres du processus de toilage

1. Introduction.....	70
2. Procédure expérimentale.....	70
2.1. Matériau usiné.....	70
2.2. Moyens utilisés.....	71
2.2.1. Dispositif de toilage.....	71
2.2.2. Bandes abrasives.....	73
2.2.3. Profilomètres.....	73
2.2.4. Microscope électronique à balayage MEB.....	74
2.2.5. Microscope à force atomique AFM.....	75
2.3. Paramètres mesurés de la texture de surface.....	75
2.3.1. Paramètres de la rugosité de surface.....	75
2.3.2. Paramètres fonctionnels.....	78
3. Résultats et discussions.....	80
3.1. Effet du temps de toilage.....	80
3.1.1. Perte en masse.....	80
3.1.2. Perte en épaisseur.....	80
3.1.3. Rugosité de surface.....	82
3.1.4. Taux de portance.....	86
3.2. Effet de la grosseur des grains abrasifs.....	87
3.2.1. Perte en masse.....	88
3.2.2. Perte en épaisseur.....	88
3.2.3. Rugosité de surface.....	90
3.2.4. Taux de portance.....	91
3.3. Effet de la vitesse de rotation de la pièce.....	94
3.4. Variation de l'état de la bande.....	95
3.5. Effet de la grosseur décroissante des grains abrasifs.....	96
3.5.1. Perte en masse.....	96
3.5.2. Perte en épaisseur.....	97
3.5.3. Rugosité de surface.....	98
3.5.4. Taux de portance.....	102

1. Introduction

Le processus de super finition par toilage est un procédé d'usinage complexe vu plusieurs paramètres pouvant l'influencer son fonctionnement. Dans ce chapitre, le travail se compose de trois parties essentielles. Dans la première partie, on présente le matériau usiné les moyens utilisés (le dispositif de toilage, les bandes abrasives et les appareils de caractérisation de la texture de surface "profilomètres, MEB et AFM") et les paramètres mesurés de la texture de surface. Concernant la deuxième partie, on étudie l'évolution de la texture de surface toilée en fonction de différents paramètres de pilotage du processus comme : le temps de toilage, la taille des grains abrasifs et la vitesse de rotation de la pièce. Enfin, dans la dernière partie, on va aborder l'influence de la taille décroissante des grains sur la texture de la surface toilée.

Les paramètres de toilage constants maintenus pendant toute cette étude expérimentale sont :

- Force appliquée: $F_n = 100$ N,
- Vitesse d'avance de la bande: $V_a = 44$ tr/min,
- Amplitude d'oscillation : $a_{osc} = 0$ mm.
- Fréquence d'oscillation : $n_{osc} = 0$ mm.
- Mode de lubrification (microlubrification): lubrification de quantités minimales par l'huile Tasfalout 22^M diluée à 1/10.

2. Procédure expérimentale

2.1. Matériau usiné

Le matériau étudié est un acier faiblement allié de cémentation 16MC4 (%C 0.14/0.18), cémenté et trempé. La trempe se fait à l'huile à une température 860 °C, suivi d'un revenu à 200 °C. Sa dureté superficielle après revenu est de 52 HRC. L'acier 16MC4 destiné à la cémentation est préconisé surtout pour la fabrication des pièces soumises à des efforts élevés comme par exemple : les arbres à cames, les roues dentées, les engrenages de la boîte de vitesse, ... etc.

Le tableau 3.1 présente la composition chimique d'acier 16MC4.

Tableau 3.1 : Composition chimique de l'acier 16MC4.

% en masse	% C	% Cr	% S	% Si	% Mn	% Mo
Valeur mesurée	0,16	0,03	0,015	0,23	0,72	0,01

Les pièces sont usinées par chariotage (tournage dur "TD" de la partie cylindrique de la pièce étudiée de diamètre 20 mm) avec un outil en céramique ayant une bonne tenue de coupe, une

forte ténacité et une grande résistance à l'usure. Sa désignation selon la norme ISO est : SNGN 12 08 08. Toutefois, la désignation du porte-outil utilisé est : CSSNR3225 P12. Les conditions de tournage dur sont : $V_c = 63$ m/min, $V_a = 0,1$ mm/tr, $a_p = 0,3$ mm.

La figure 3.1 montre la forme des pièces utilisées.

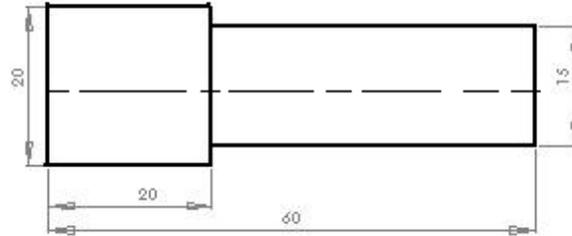


Figure 3.1 : Dessin des pièces d'essais en acier de cémentation 16MC4.

2.2. Moyens utilisés

2.2.1. Dispositif de toilage

Le dispositif de toilage est conçu et réalisé dans notre laboratoire et au niveau de l'unité d'Almoules qui se trouve dans la zone industrielle de Sâif, Algérie. Il est composé des éléments suivants : 1. Support, 2. Porte glissière (Porte moteur), 3. Glissière (tendeur), 4. Porte galet, 5. Galet, 6. Guides, 7. Arbre guidage, 8. Arbre moteur, 9. Roulements, 10. Boîtier, 11. Vis de fixation de tendeur, 12. Vis de fixation (figure 3.2).

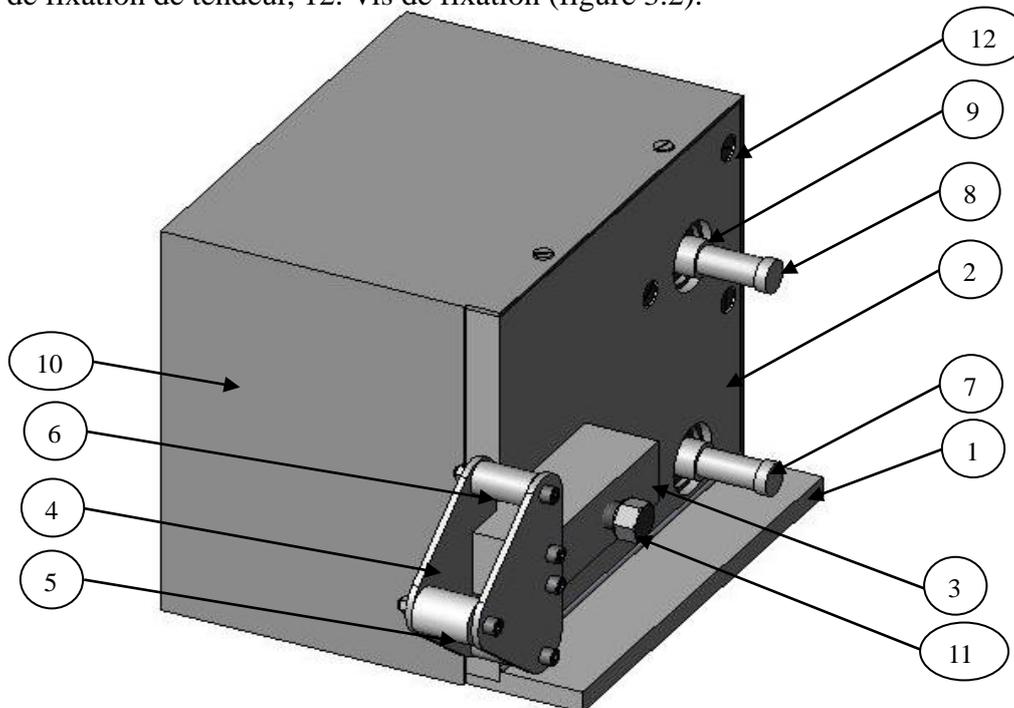
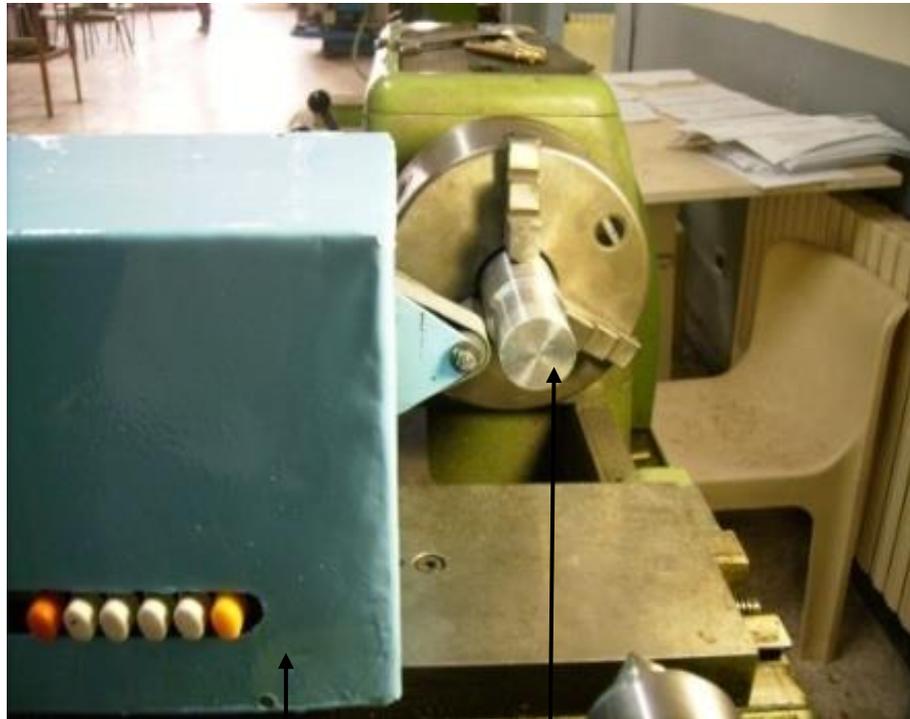


Figure 3.2 : Dispositif de toilage dessiné par SolidWorks.

Ce dispositif est monté sur un tour conventionnel à la place de la tourelle porte-outil (voir figure 3.3) [Ham11, Ham15]. Le tour permet la mise en position et la mise en rotation de la pièce cylindrique. Le système de toilage est modulable. Il permet la finition par toilage soit par galet presseur ou un bras d'usinage.



Dispositif de toilage

Pièce

Tour

Bande abrasive

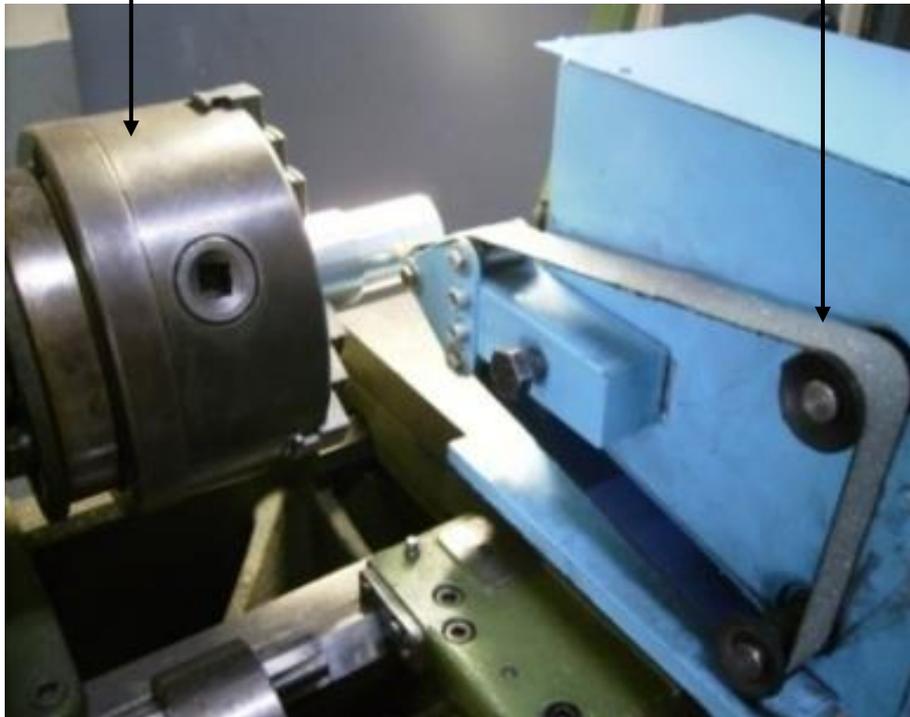


Figure 3.3 : Montage de dispositif de toilage sur un tour conventionnel.

2.2.2. Bandes abrasives

Dans cette étude expérimentale, les bandes abrasives utilisées dans les essais de procédé de toilage sont constituées d'une toile souple, de résine et d'une seule couche des grains abrasifs de l'oxyde d'aluminium avec différentes grosseurs : 60 μm , 40 μm , 30 μm , 20 μm , 15 μm et 9 μm (voir figure 3.4).

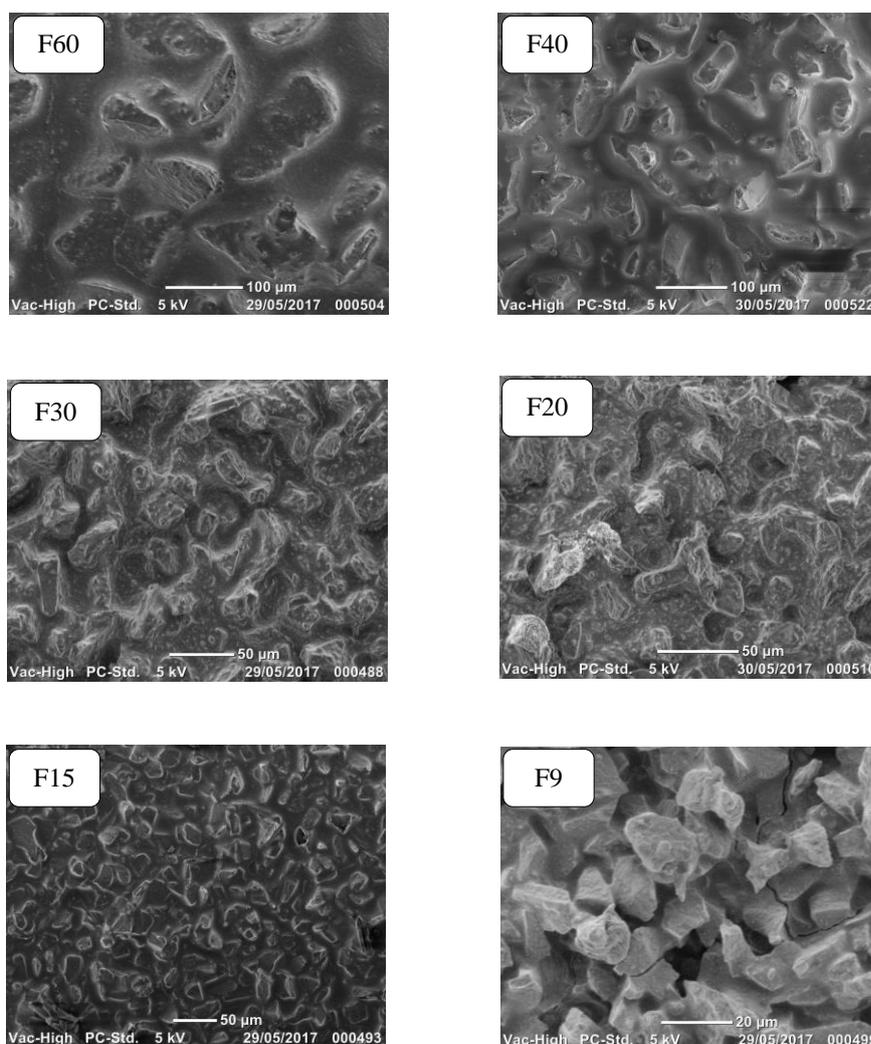


Figure 3.4 : Images MEB des bandes abrasives neuves.

Le tableau 3.2 présente la grosseur des grains abrasifs des bandes abrasives utilisées.

Tableau 3.2 : Grosseur des grains abrasifs utilisés.

Fraction	F60	F40	F30	F20	F15	F9
Taille moyenne des grains [μm]	~ 60	~ 40	~ 30	~ 20	~ 15	~ 9

2.2.3. Profilomètres

Les mesures de la rugosité sont faites par le profilomètre 2D TAYLOR HOBSON doté d'un palpeur avec une pointe en diamant de rayon de courbure 2 μm (PRECISION

MEASUREMENT SYSTEM FORM TALYSURF 120) (voir figure 3.5), utilisant un filtre Gaussien et une longueur d'onde de coupure $\lambda_c = 0,8$ mm. Les profils de rugosité sont mesurés sur une longueur d'évaluation $L_n = 4,8$ mm, selon les normes ISO 4288 et ISO 13565-2. Chaque surface a été caractérisée par trois mesures sur trois endroits différents.



Figure 3.5 : Profilomètre de type 2D Taylor Hobson 120.

Les images 2D et 3D sont obtenues par profilomètre AltiSurf 500 (figure 3.6), la surface a été échantillonnée en $0,5 \times 0,5$ mm².



Figure 3.6 : Plateforme de métrologie de surface : AltiSurf 500.

2.2.4. Microscopie électronique à balayage MEB

Afin d'évaluer l'usure des grains abrasifs constituant la bande abrasive, nous avons utilisé la microscopie électronique à balayage MEB (voir figure 3.7). Elle permet l'observation directe d'échantillons conducteurs ou isolants.



Figure 3.7 : Microscope électronique à balayage MEB.

2.2.5. Microscope à force atomique AFM

Le microscope à force atomique AFM est utilisé pour prendre des images 3D de la rugosité de surface toilée (voir figure 3.8).

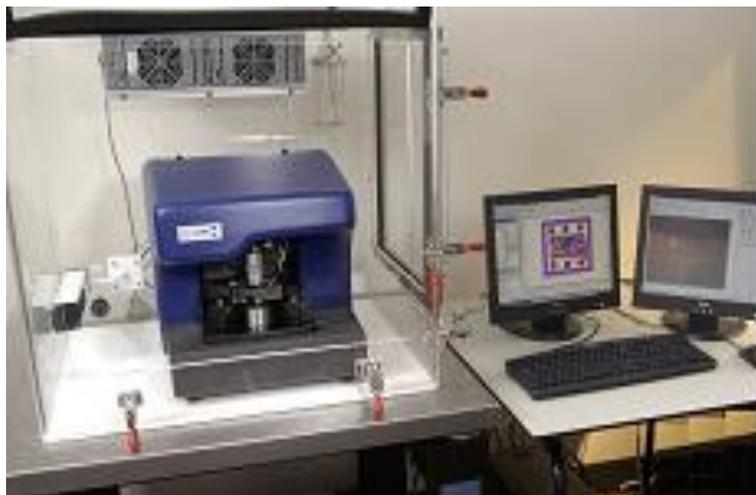


Figure 3.8 : Microscope à force atomique AFM.

2.3. Paramètres mesurés de la texture de surface

Les paramètres mesurés de la texture de surface pendant tous les essais de tournage dur (TD) ou de superfinition par toilage sont les paramètres les plus couramment utilisés pour caractériser une texture de surface : on utilise des paramètres de rugosité de surface et d'autres paramètres fonctionnels qui se déterminent à partir de la courbe du taux de portance ou courbe d'Abbott-Firestone.

2.3.1. Paramètres de la rugosité de surface

Les paramètres de la rugosité de surface sélectionnés dans cette étude sont :

- ⊙ R_a [μm] : Rugosité moyenne arithmétique du profil, (ISO 4287) : c'est le paramètre de la rugosité le plus utilisé. Il s'agit de la moyenne arithmétique des valeurs absolues des

ordonnés (des hauteurs) $z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base. L'élaboration de la valeur Ra est illustrée dans la figure 3.9.

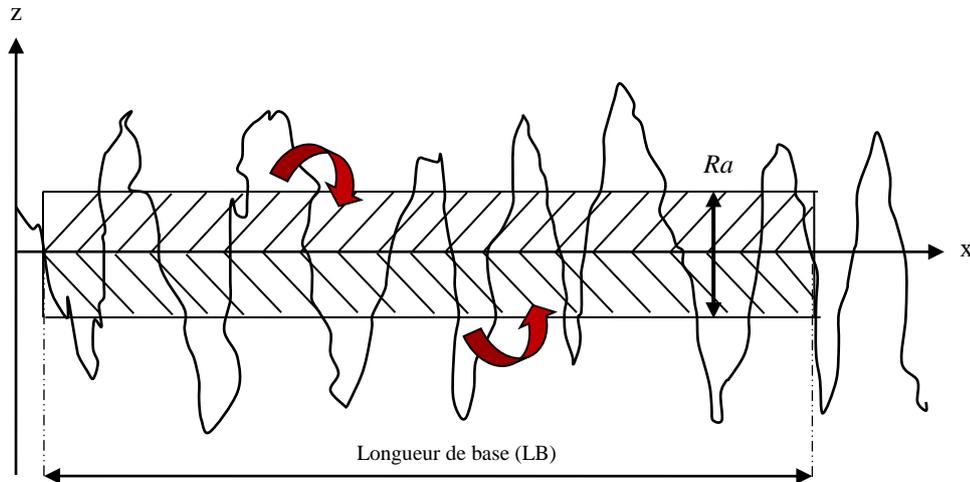


Figure 3.9 : Paramètre de rugosité moyenne arithmétique Ra .

- ⊙ R_z [μm] : Amplitude maximale du profil, (ISO 4287) (μm) : c'est la somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, à l'intérieur d'une longueur de base (voir figure 3.10).

$$R_z = R_p + R_v \text{ avec :}$$

- ❖ R_p [μm] : Hauteur maximale des saillies (des pics : peak) du profil : plus grande des hauteurs de saillie du profil, à l'intérieur d'une longueur de base.
- ❖ R_v [μm] : Profondeur maximale du creux (vallées : valley) du profil : plus grande des profondeurs de creux du profil, à l'intérieur d'une longueur de base.

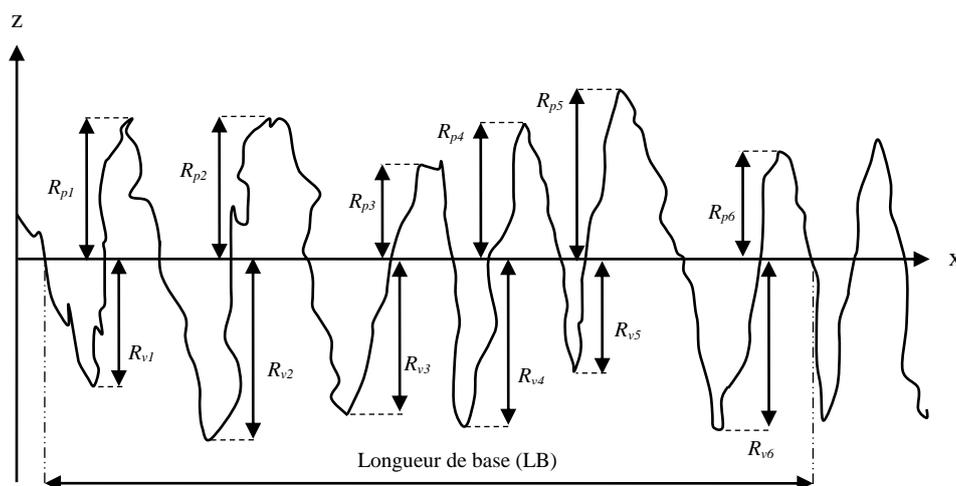


Figure 3.10 : Hauteur maximale du profil R_z .

- ⊙ *Rsk* : Skewness : c'est la somme de l'asymétrie de la courbe de distribution d'amplitude à l'intérieur d'une longueur de base. Plus la valeur de paramètre skewness est négative ($Rsk < 0$), plus la portance de la surface est plus grande (voir figure 3.11).

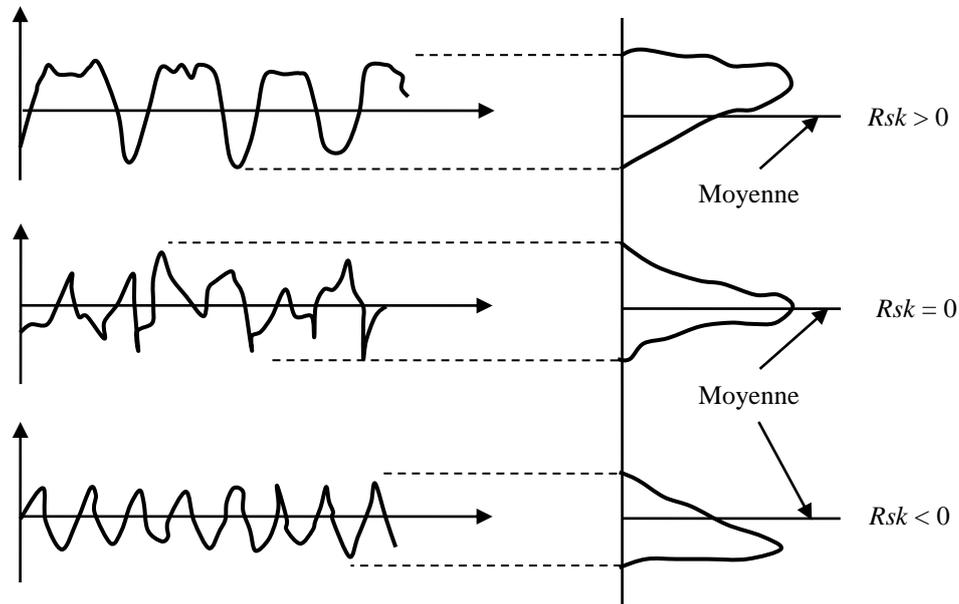


Figure 3.11 : Facteur d'asymétrie du profil évalué (skewness) *Rsk*.

- ⊙ *Rku* : Kurtosis : c'est la somme de l'aplatissement de la courbe de distribution d'amplitude à l'intérieur d'une longueur de base. Une distribution gaussienne caractérisée par *Rku* est égal à 3 (voir figure 3.12).

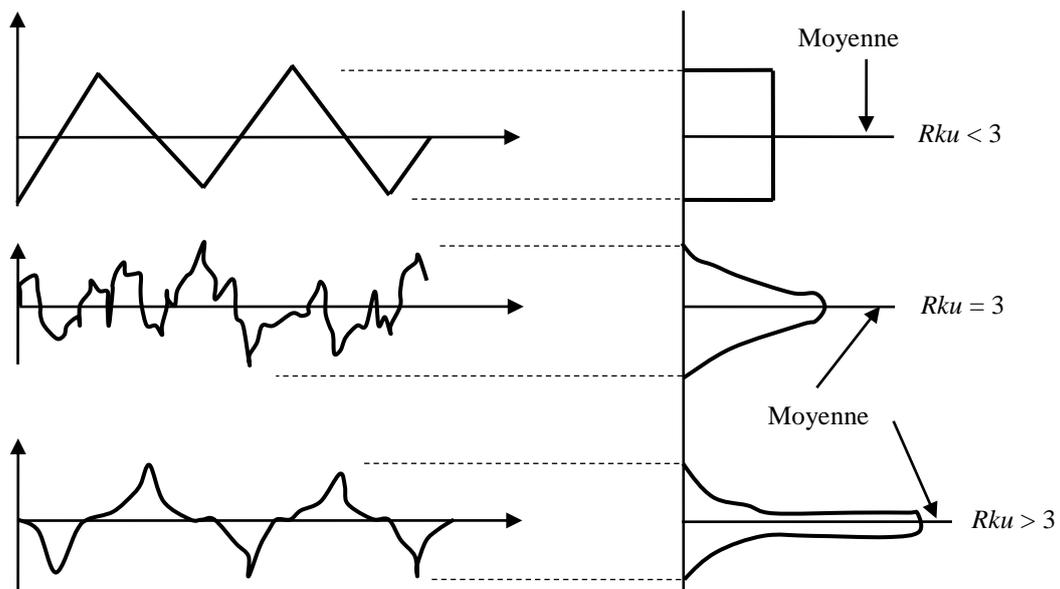


Figure 3.12 : Facteur d'aplatissement du profil évalué (kurtosis) *Rku*.

- ⊙ Rsm [μm] : Largeur moyenne des éléments du profil : c'est la largeur d'une saillie et d'un creux consécutif. Il s'agit de la valeur moyenne des largeurs des éléments du profil, à l'intérieur d'une longueur de base (voir figure 3.13).

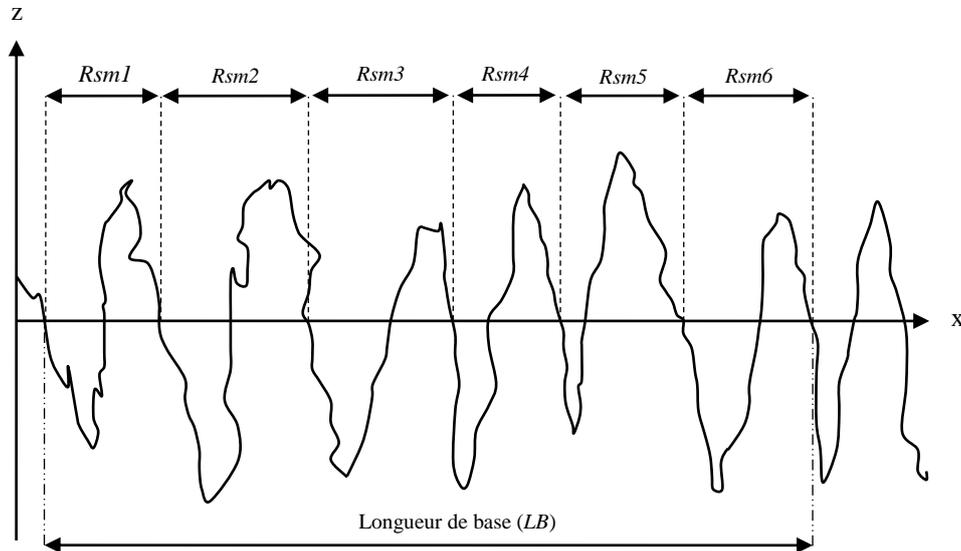


Figure 3.13 : Largeur moyenne des éléments du profil Rsm .

- ⊙ Rdq ou $R\Delta q$ [$^\circ$] : Pente moyenne quadratique du profil : c'est la valeur quadratique moyenne des pentes locales, à l'intérieure d'une longueur de base (voir figure 3.14).

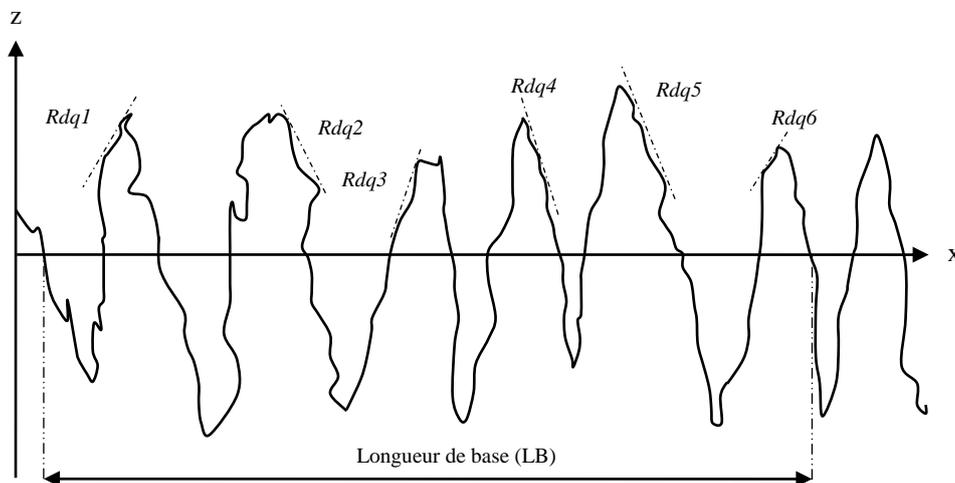


Figure 3.14 : Pente quadratique moyenne du profil évalué Rdq .

2.3.2. Paramètres fonctionnels

Jusqu'à maintenant, la caractérisation de la texture des surfaces toilées par la norme ISO 13565 standard occupe une place importante vis-à-vis des constructeurs automobiles. Cette méthode est basée sur l'analyse des paramètres de la courbe du taux de longueur portante ou courbe d'Abbott-Firestone des profils de rugosité

Le taux de longueur portante est le rapport entre la somme des longueurs portantes du profil à une profondeur donné C , et la longueur d'évaluation L_n .

La courbe de portance ou courbe d'Abbott-Firestone décrit la variation du taux de longueur portante en fonction de l'augmentation de la profondeur du profil de rugosité.

Les paramètres fonctionnels R_{PK} , R_K , R_{VK} , $Mr1$ et $Mr2$ se déterminent à partir de la courbe d'Abbott Firestone "courbe du taux de portance" (voir figure 3.15).

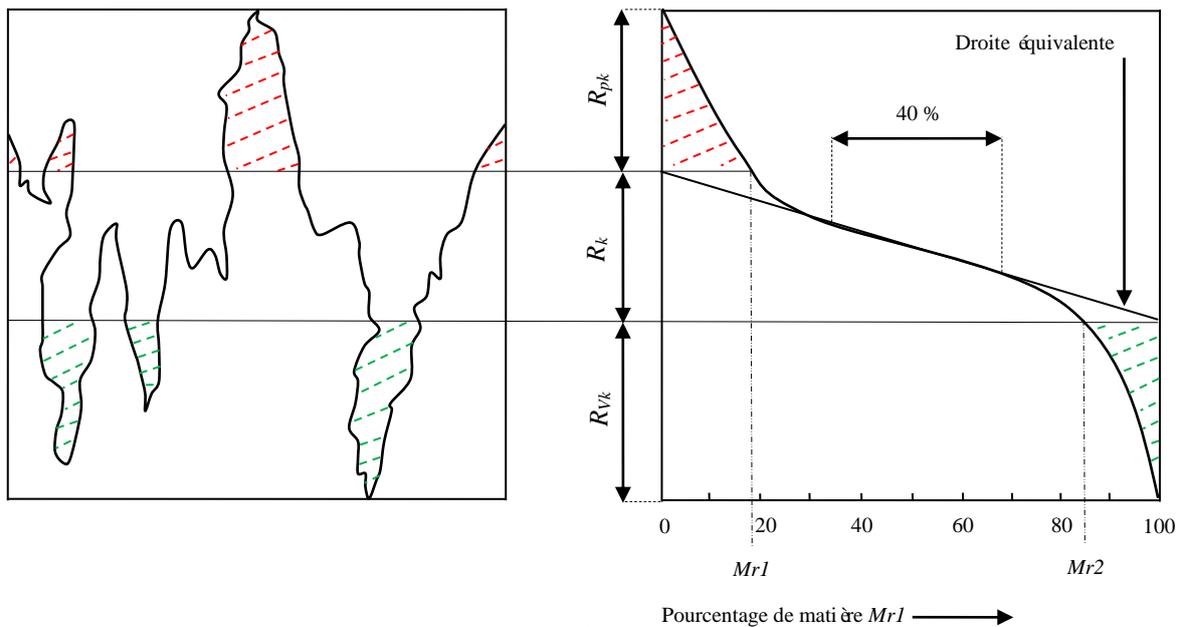


Figure 3.15 : Courbe du taux de portance (Courbe d'Abbott Firestone).

Les paramètres calculés à partir de cette courbe sont :

R_{PK} : Hauteur des pics saillants, (ISO 13565 standard) (μm) : ce paramètre va être éliminé et usé au cours de la phase de rodage de la surface d'une pièce mécanique de précision.

R_K : Profondeur de rugosité du cœur, (ISO 13565 standard) (μm) : ce paramètre de noyau de rugosité représente la partie de matière qui supporte l'usure de la surface d'une pièce mécanique pendant son fonctionnement.

R_{VK} : Profondeur des creux profonds, (ISO 13565 standard) (μm) : ce paramètre caractérise les vallées disponibles et toujours utiles pour retenir un lubrifiant. Donc, il représente la zone de lubrification.

$Mr1$: Partie de matériau correspondant à la position limite supérieure du profil de noyau de rugosité "partie de matériau 1" (norme ISO 13565 standard) (%).

$Mr2$: Partie de matériau correspondant à la position limite inférieure du profil de noyau de rugosité "partie de matériau 2" (norme ISO 13565 standard) (%).

3. Résultats et discussions

3.1. Effet du temps de toilage

Dans cette étape, on prend la bande abrasive de grosseur des grains abrasifs 20 µm et la vitesse de rotation de la pièce 900 tr/min. Après l'opération de toilage, on détermine la perte en masse, la perte en épaisseur et la texture de surface (rugosité de surface et taux de portance) en fonction du temps de toilage sans et avec lubrification.

3.1.1. Perte en masse

Pour déterminer la quantité de la matière enlevée après le toilage, on a pesé l'échantillon avant l'opération de toilage (m_i) et après l'opération de toilage (m_f).

La perte en masse Δm est donné par la relation suivante :

$$\Delta m = m_i - m_f \dots\dots\dots(3.1)$$

La figure 3.16 illustre la variation de la perte en masse et de la vitesse d'enlèvement de la matière en fonction du temps de toilage sans et avec lubrification de quantités minimales.

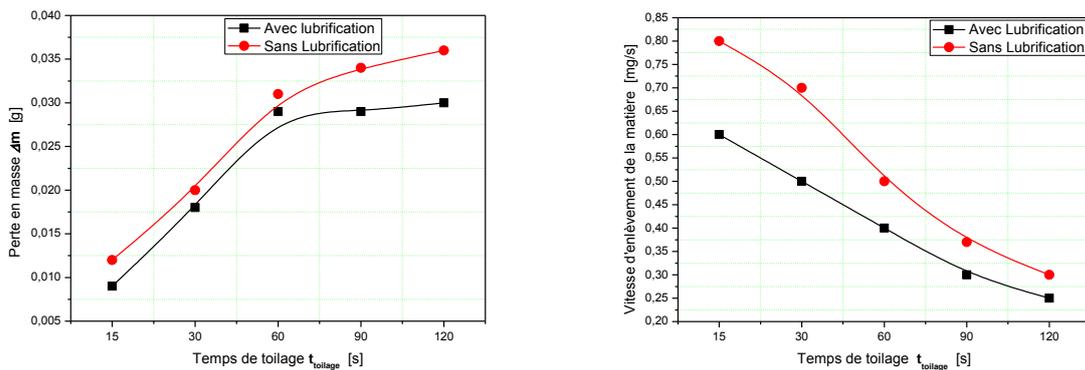


Figure 3.16 : Perte en masse et vitesse d'enlèvement de matière en fonction du temps de toilage sans et avec lubrification (MQL).

3.1.2. Perte en épaisseur

La perte en épaisseur est mesuré par le microscope horizontal vertical de précision 0,1 µm. La vitesse d'enlèvement de la couche laissé par le procédé de tournage dur (TD) est donné par la relation suivante :

$$V_{enl\grave{e}} = \frac{\Delta e}{t_{toilage}} \dots\dots\dots(3.2)$$

La figure 3.17 représente l'évolution de la perte en épaisseur en fonction du temps de toilage sans et avec lubrification.

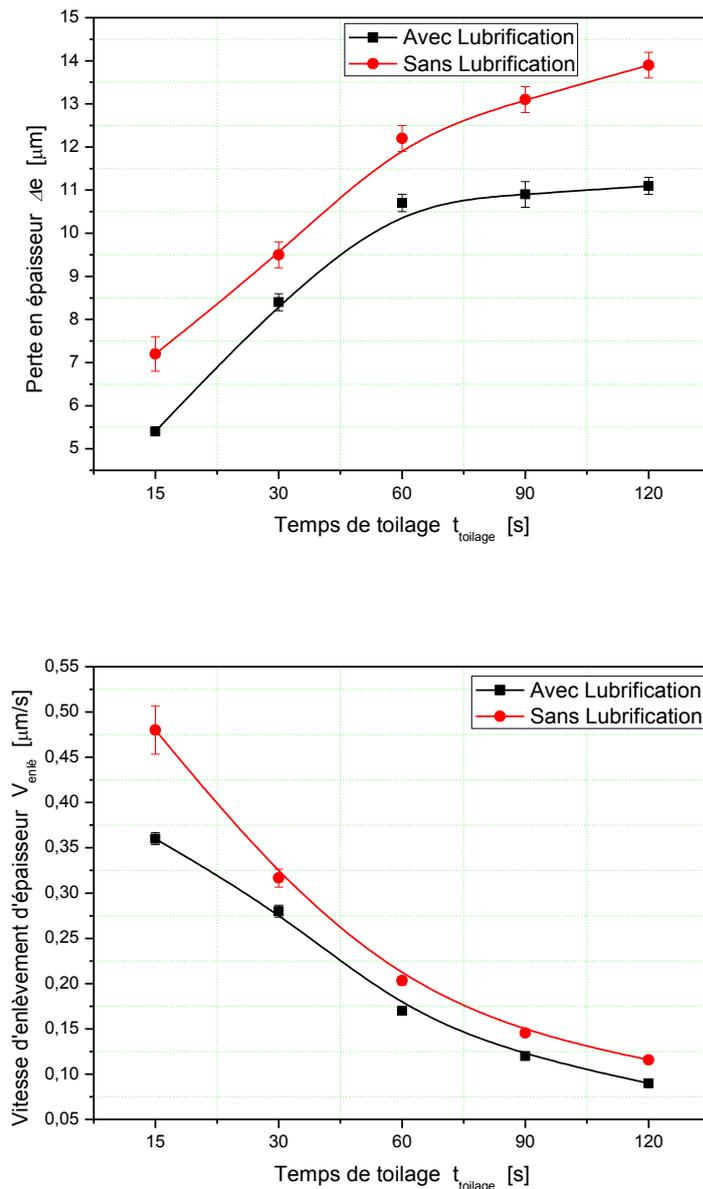


Figure 3.17 : Variation de la perte en épaisseur et la vitesse d'enlèvement d'épaisseur en fonction du temps de toilage sans et avec lubrification.

D'après les figures 3.16 et 3.17, on remarque que l'allure des deux courbes de toilage sans et avec lubrification est identique à savoir : une partie transitoire où l'enlèvement de matière est très important, puis une stabilité à partir de $t_{toilage} = 60$ secondes. En effet, le toilage enlève et diminue les défauts laissés par le tournage dur (TD). Par ailleurs, ce processus présente deux régimes. Le premier régime de toilage est entre $t_{toilage} = 0$ et $t_{toilage} = 60$ secondes ; la perte en masse et la perte en épaisseur augmentent (leur vitesse d'enlèvement de matière et d'épaisseur diminue) lorsque le temps du processus augmente, ce qui confirme que le phénomène de coupe est prédominant. Le second régime de toilage $t_{toilage} > 60$ secondes ; les deux pertes (en

masse et en épaisseur) se stabilisent et leurs vitesses d'enlèvement de matière diminuent lentement lorsque le temps du processus augmente, ce qui implique que le phénomène de frottement est prédominant. Cela peut être expliqué par l'écrasement des grains abrasifs et le stockage des micro-copeaux entre les grains au cours du processus. Ceci va diminuer le pouvoir de coupe de la bande abrasive et ne permettent plus d'accélérer l'action de coupe.

3.1.3. Rugosité de surface

La figure suivante représente la variation des deux paramètres de rugosité de hauteur (R_a et R_z) en fonction du temps de toilage sans et avec lubrification de quantités minimales.

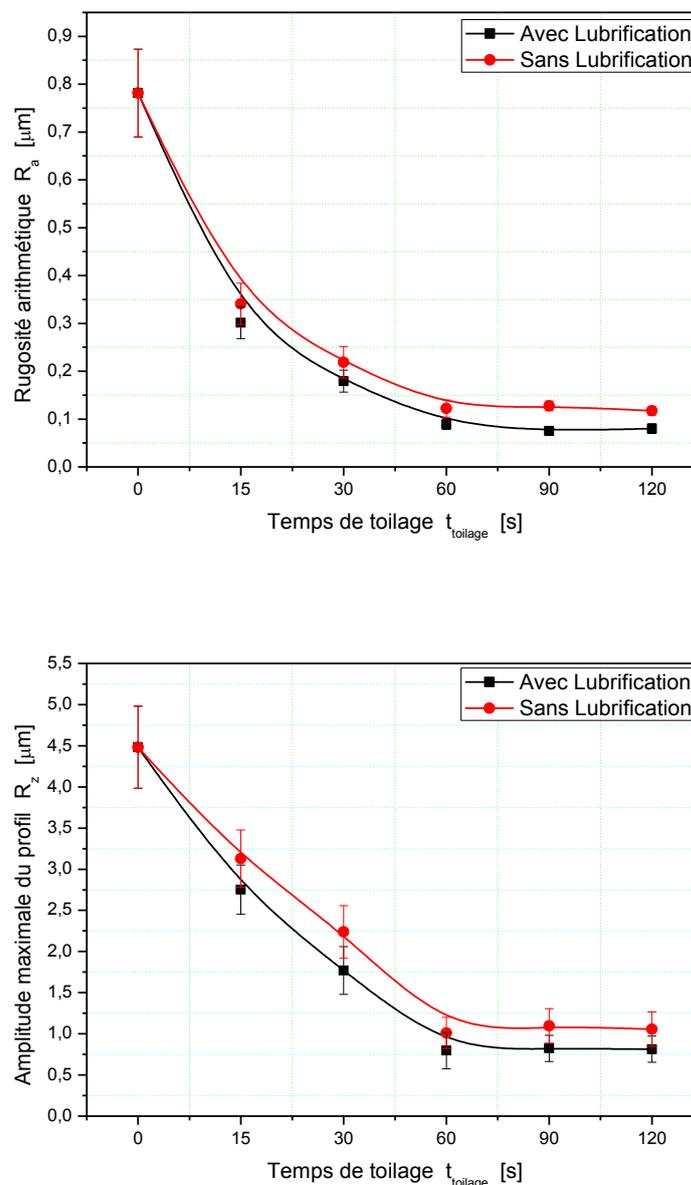


Figure 3.18 : Paramètres d'amplitude R_a et R_z en fonction du temps de toilage sans et avec lubrification (MQL).

La figure 3.18 montre que l'état de surface d'acier dur 16MC4 s'améliore considérablement avec le temps de toilage sans ou avec lubrification. En effet, les deux courbes de la rugosité moyenne arithmétique Ra et de la hauteur maximale du profil Rz sont une fonction décroissante jusqu'à le temps de toilage $t_{toilage} = 60$ secondes. Après ce temps, on note une stabilisation. Le toilage est un processus de finition qui s'attaque aux crêtes des profils sans améliorer les creux engendrés par le tournage dur. La figure 3.19 montre le profil creux avant le toilage qui résiste peu à l'usure et le profil plein après le toilage qui résiste mieux à l'usure.

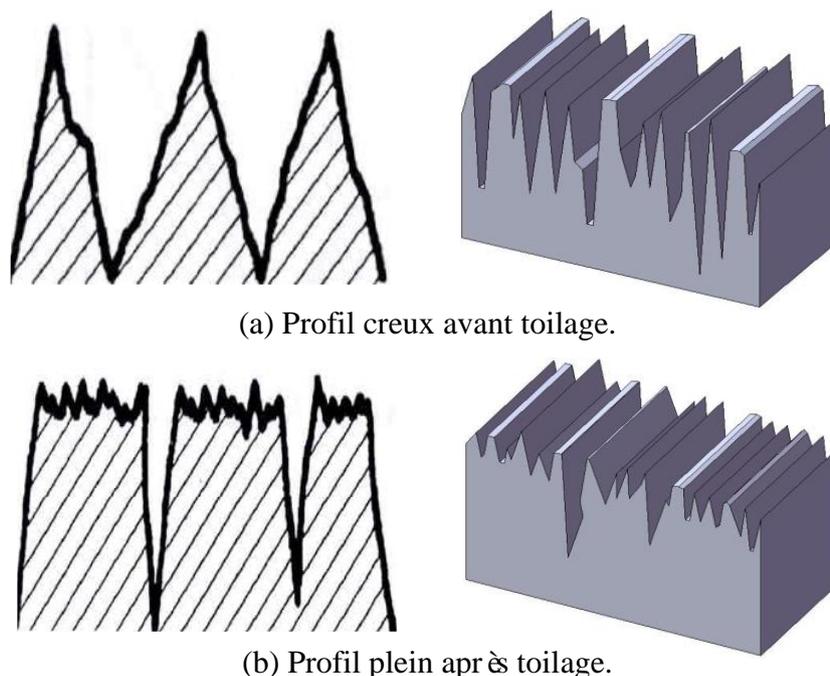
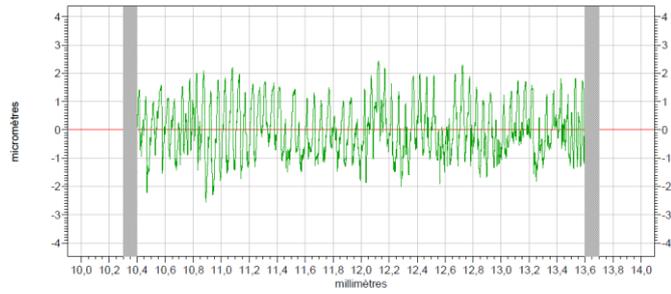
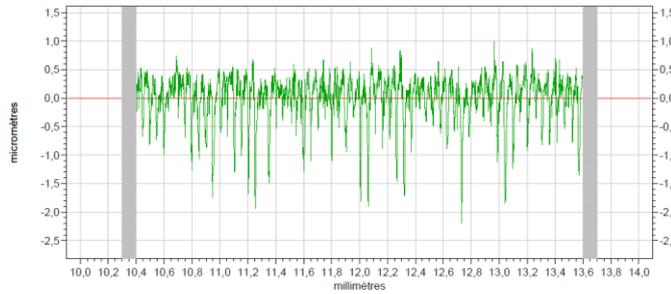
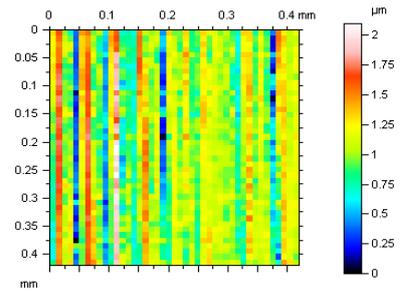


Figure 3.19 : Profil d'une pièce avant et après toilage.

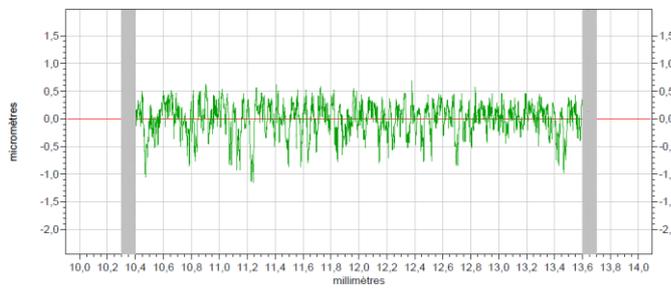
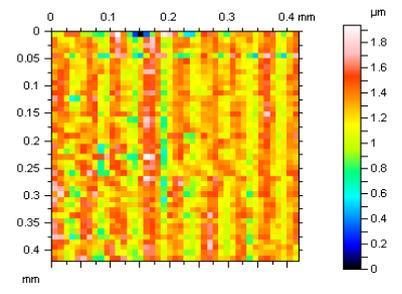
Les figures 3.20 et 3.21 confirment les résultats de la rugosité de surface d'acier dur 16MC4 obtenus par les deux profilomètres TAYLOR HOBSON et AltiSurf 500. En effet, la rugosité moyenne arithmétique de toilage avec lubrification passe de $Ra = 0,7815 \pm 0,0916 \mu\text{m}$ à $Ra = 0,0823 \pm 0,011 \mu\text{m}$ après 60 secondes. Cependant, dans le deuxième cas (toilage sec), la rugosité moyenne arithmétique passe de $Ra = 0,7815 \pm 0,0916 \mu\text{m}$ à $Ra = 0,1074 \pm 0,009 \mu\text{m}$ après le même temps de super finition. Donc, on peut dire que dans les conditions utilisés, le temps optimal du toilage par nos dispositif est $t_{toilage} = 60$ secondes. Par ailleurs, on remarque que la rugosité obtenue par toilage avec lubrification est toujours meilleure par rapport au toilage sans lubrification, mais le changement est faible durant toute la phase de toilage en fonction du temps. On sait également que la lubrification réduit la rugosité de surface. Ceci est valable également pour le toilage.



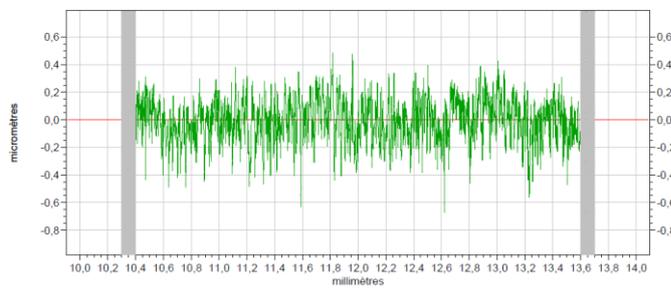
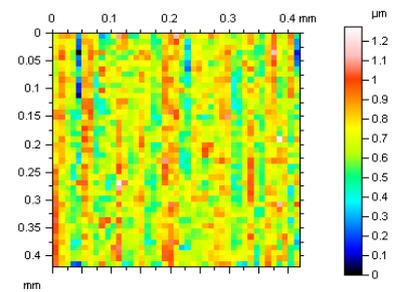
(a) Après tournage dur.



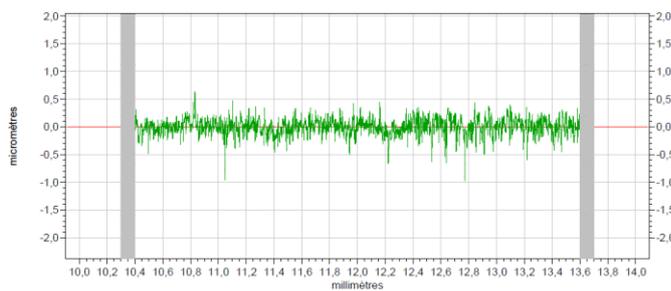
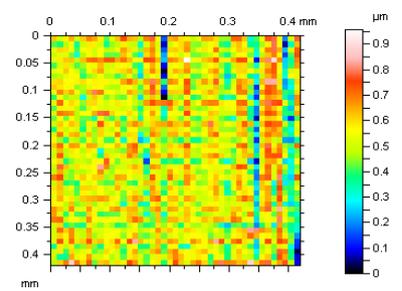
(b) Temps de toilage $t_{toilage} = 15$ s.



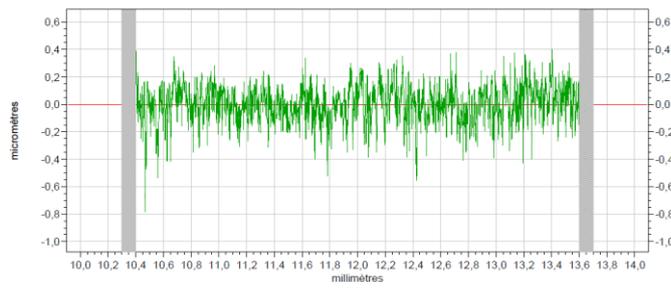
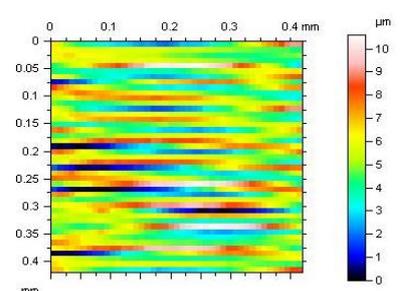
(c) Temps de toilage $t_{toilage} = 30$ s.



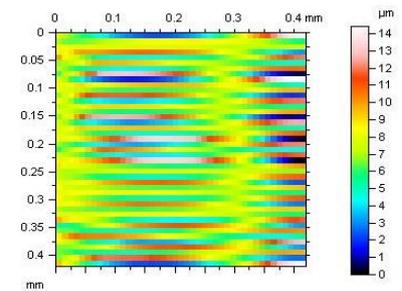
(d) Temps de toilage $t_{toilage} = 60$ s.



(e) Temps de toilage $t_{toilage} = 90$ s.



(f) Temps de toilage $t_{toilage} = 120$ s.



(a1) Toilage sans lubrification.

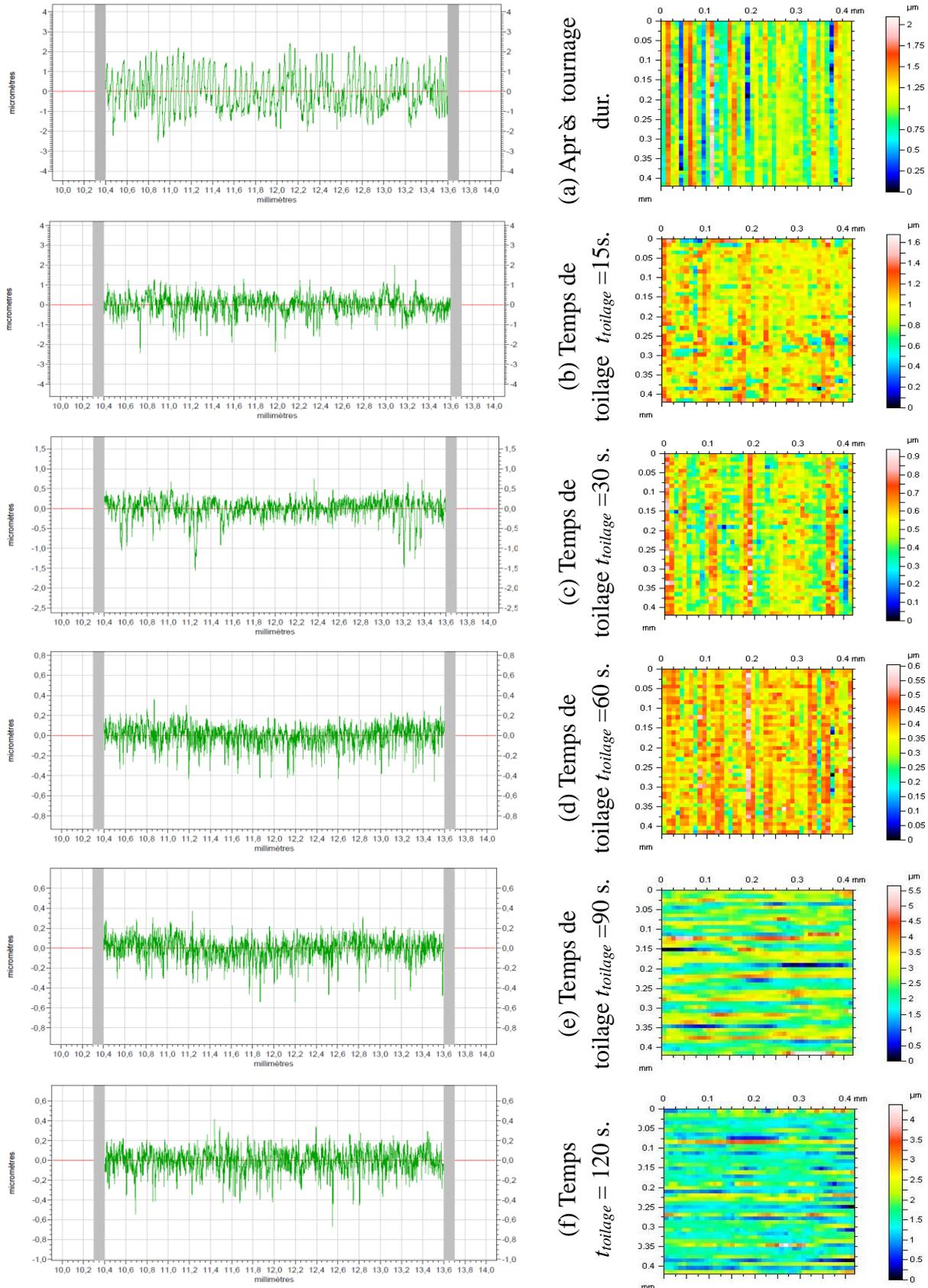


Figure 3.20 : Profil d'état de surface : (a) Apr ès tournage dur, (a1) Apr ès toilage sans lubrification, (a2) Apr ès toilage avec lubrification.

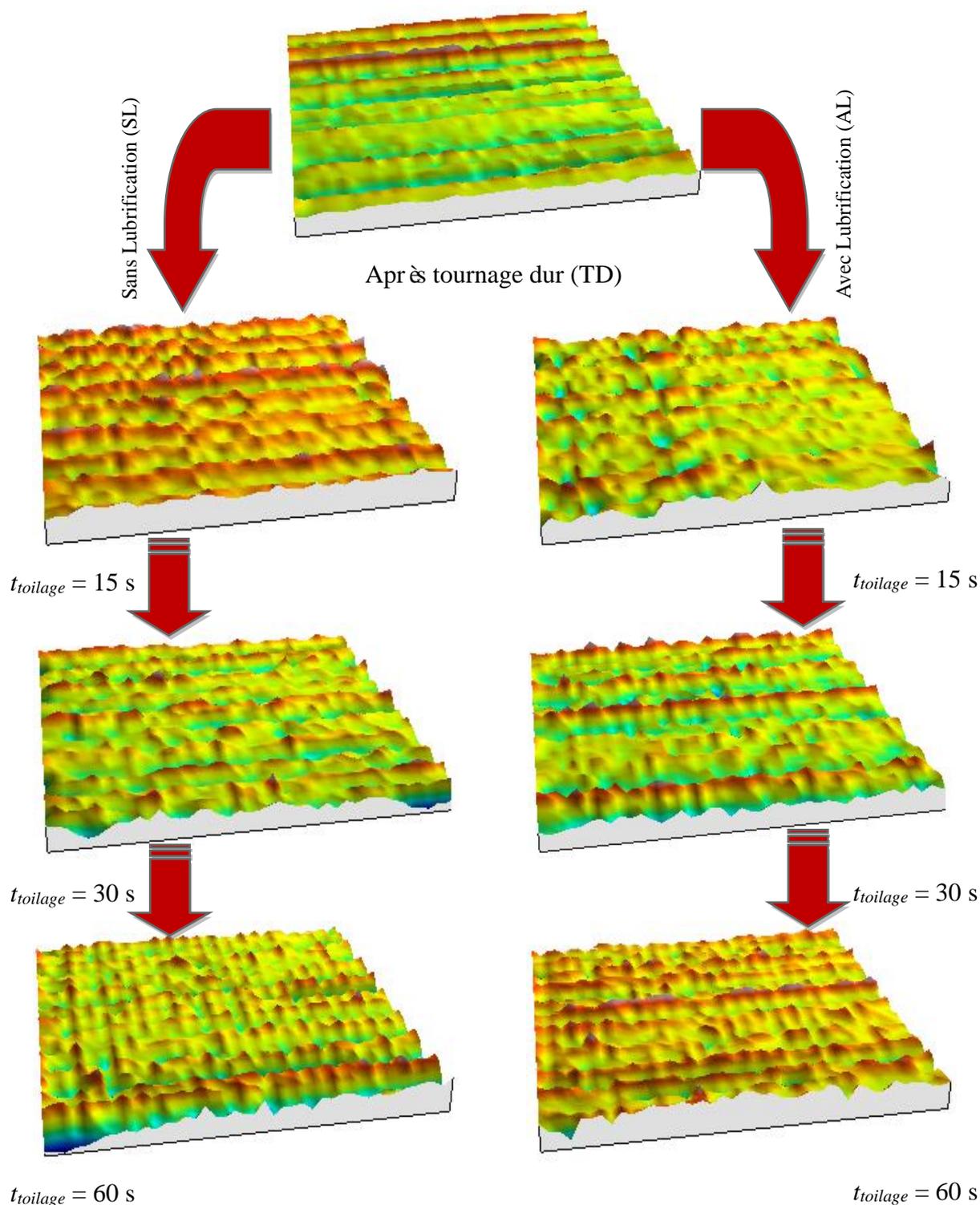


Figure 3.21 : Topographie de surface en fonction du temps de toilage sans et avec lubrification.

3.1.4. Taux de portance

La figure 3.22 montre la différence entre les courbes du taux de portance obtenues avant et après l'opération de toilage d'acier dur 16MC4.

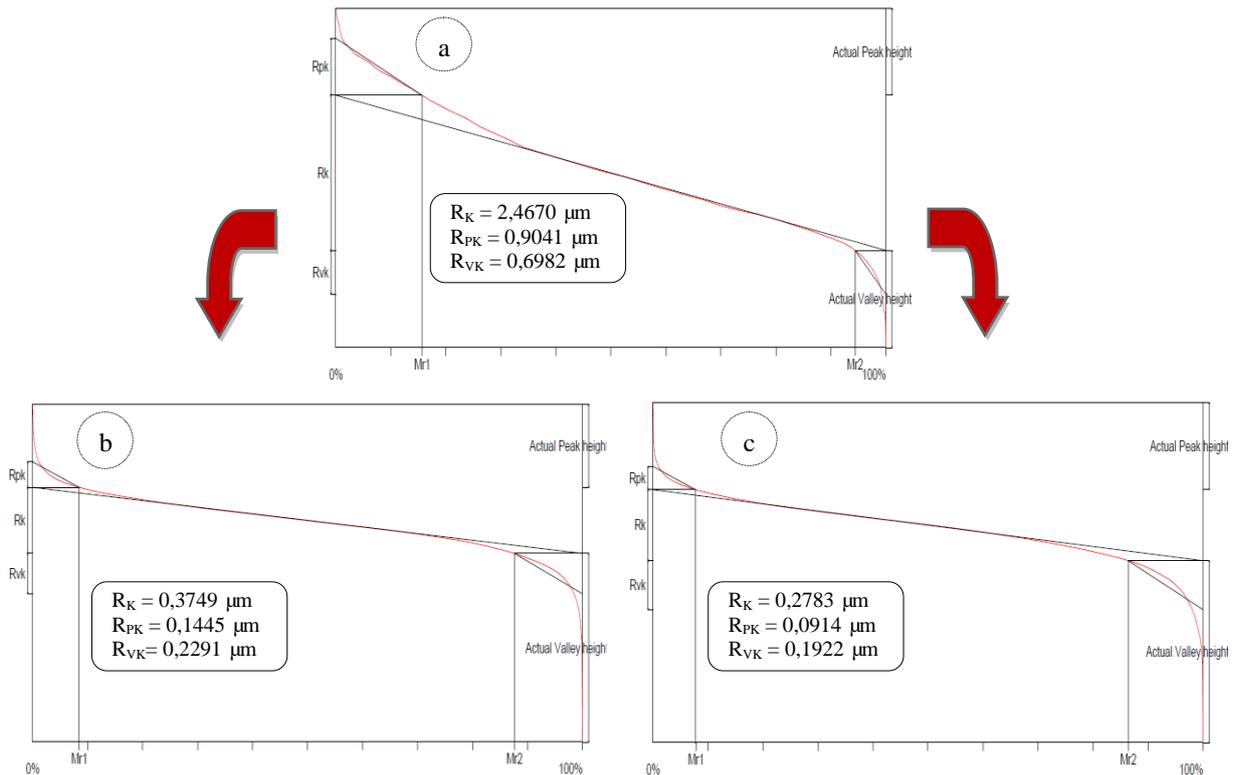


Figure 3.22 : Evolution du profil du taux de portance : (a) Avant toilage, (b) Après toilage sec, (c) Après toilage lubrifié (Conditions: $t_{\text{toilage}} = 60 \text{ s}$, $\varnothing = 20 \mu\text{m}$, $N = 900 \text{ tr/min}$).

A partir de cette figure des courbes d'Abbott-Firestone, on remarque que le procédé de toilage améliore l'allure de la courbe obtenue par tournage dur dans les deux cas ; sans et avec lubrification. L'opération de toilage modifie la pente de la courbe ; d'où une diminution de la hauteur moyenne des pics saillants, situés au-dessus du profil écristé (R_{PK} de toilage sec passe de $0,9041 \mu\text{m}$ à $0,1445 \mu\text{m}$ et $0,9041 \mu\text{m}$ à $0,0914 \mu\text{m}$ de toilage lubrifié), cette diminution limite le temps de rodage de moteur. La partie médiane représente la section qui assurera la fonction de la surface (la profondeur définie sur le profil de rugosité écristé R_K). La pente la plus faible (figure 3.22.c) est obtenue par le toilage lubrifié plus cette pente est faible, plus le moteur fonctionnera longtemps. La dernière partie représente la profondeur moyenne des creux, situés au-dessous du profil écristé R_{VK} qui ne sera jamais usé pour retenir un lubrifiant (réserve à l'huile). On observe dans les deux cas une petite amélioration, ce qui limite la possibilité de grippage de moteur. Cette opération permet de réaliser un pré-rodage de la surface fonctionnelle avant sa mise en service.

3.2. Effet de la grosseur des grains abrasifs

Dans cette partie, on fixe la vitesse de rotation de la pièce à 900 tr/min et le temps de toilage 60 secondes. Après, on détermine la perte en masse, la perte en épaisseur et la texture de surface en fonction de la grosseur des grains abrasifs.

3.2.1. Perte en masse

La figure 3.23 représente la variation de la perte en masse de toilage sec et avec lubrification en fonction de la grosseur des grains abrasifs.

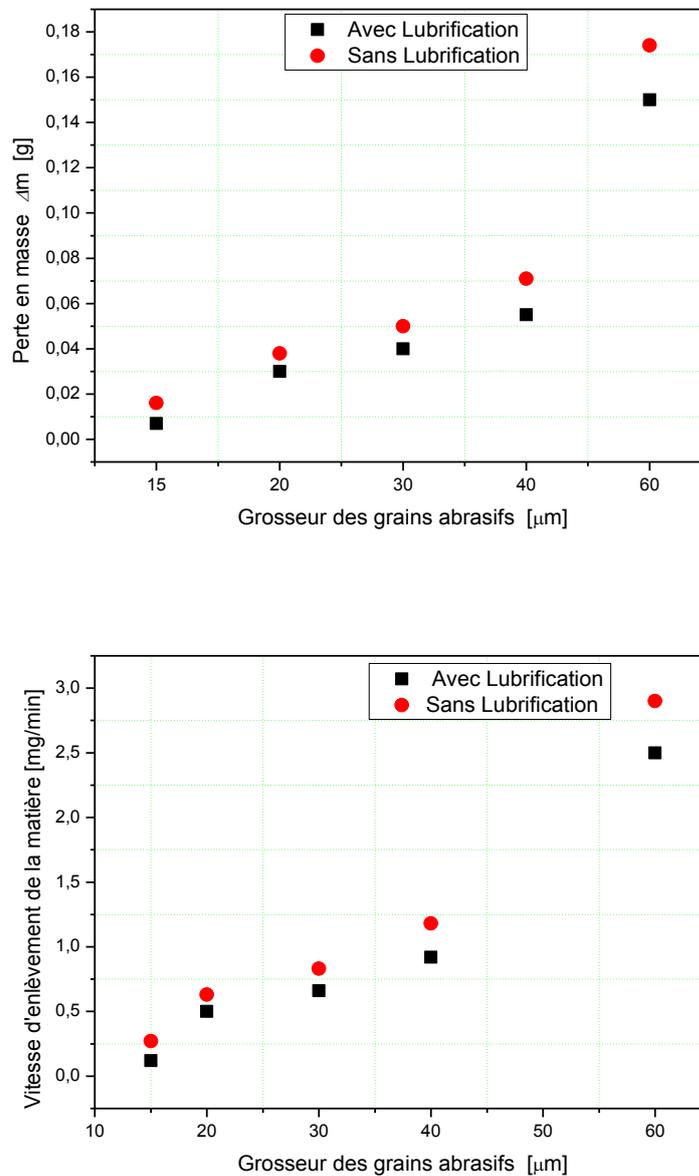


Figure 3.23 : Perte en masse et sa vitesse d'enlèvement de matière du toilage sec et avec lubrification en fonction de la taille des grains abrasifs.

3.2.2. Perte en épaisseur

La figure 3.24 illustre la perte en épaisseur des deux cas de toilage (sec et avec lubrification) en fonction de la grosseur des grains abrasifs.

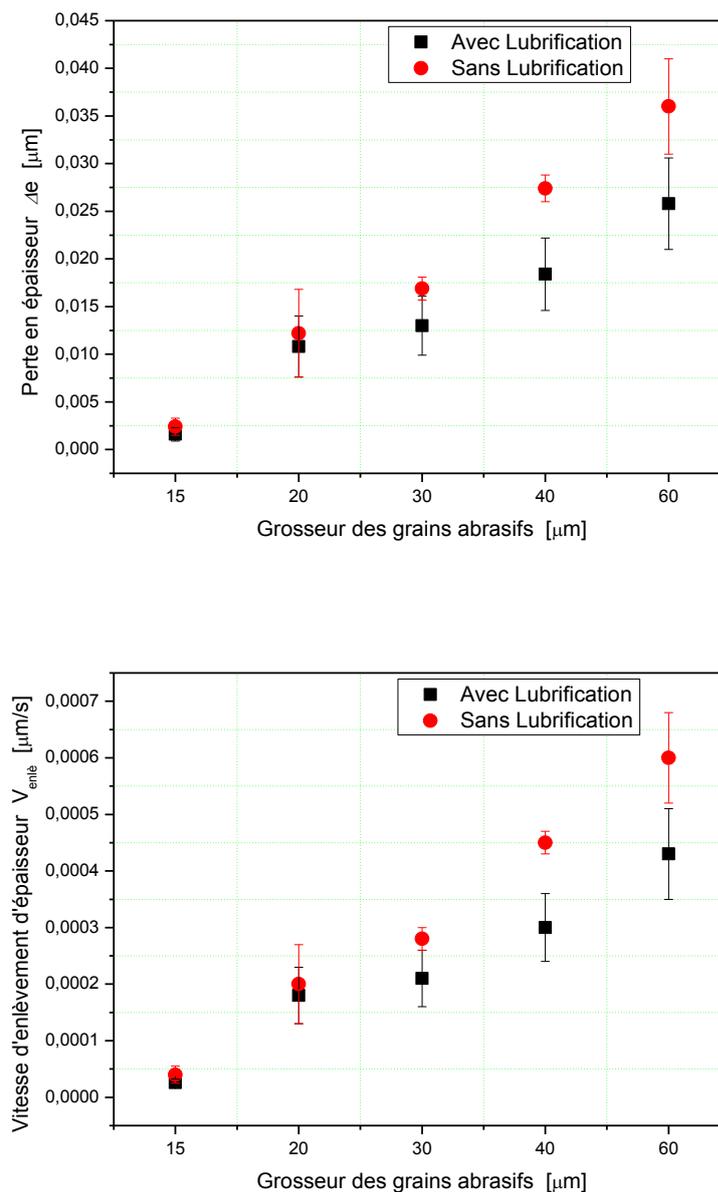


Figure 3.24 : Perte en épaisseur et la vitesse d'enlèvement d'épaisseur en fonction de la grosseur des grains abrasifs.

Les deux figures précédentes (3.23 et 3.24) montrent que les deux pertes (en masse et en épaisseur) augmentent lorsque la taille des grains abrasifs augmente. Les pertes les plus grandes sont faites par la bande abrasive de 60 μm et les pertes les plus faibles sont faites par la bande abrasive de 15 μm . Ceci peut être dû à l'effet de la surface de contact entre la surface toilée et les grains abrasifs. En effet, lorsque les gros grains abrasifs sont utilisés, la surface de contact est importante, ce qui favorise plus l'enlèvement de matière. Quand les grains fins sont employés, la surface de contact est moins importante, ce qui engendre un faible enlèvement de matière. On peut conclure que la surface de contact entre la bande

abrasive utilisée et l'état de surface initiale de l'échantillon toilé a un impact direct sur le taux de la perte en masse ou de la perte en épaisseur.

3.2.3. Rugosité de surface

La figure 3.25 illustre la variation de la rugosité arithmétique R_a et l'amplitude maximale du profil R_z en fonction de la grosseur des grains abrasifs d'oxyde d'aluminium.

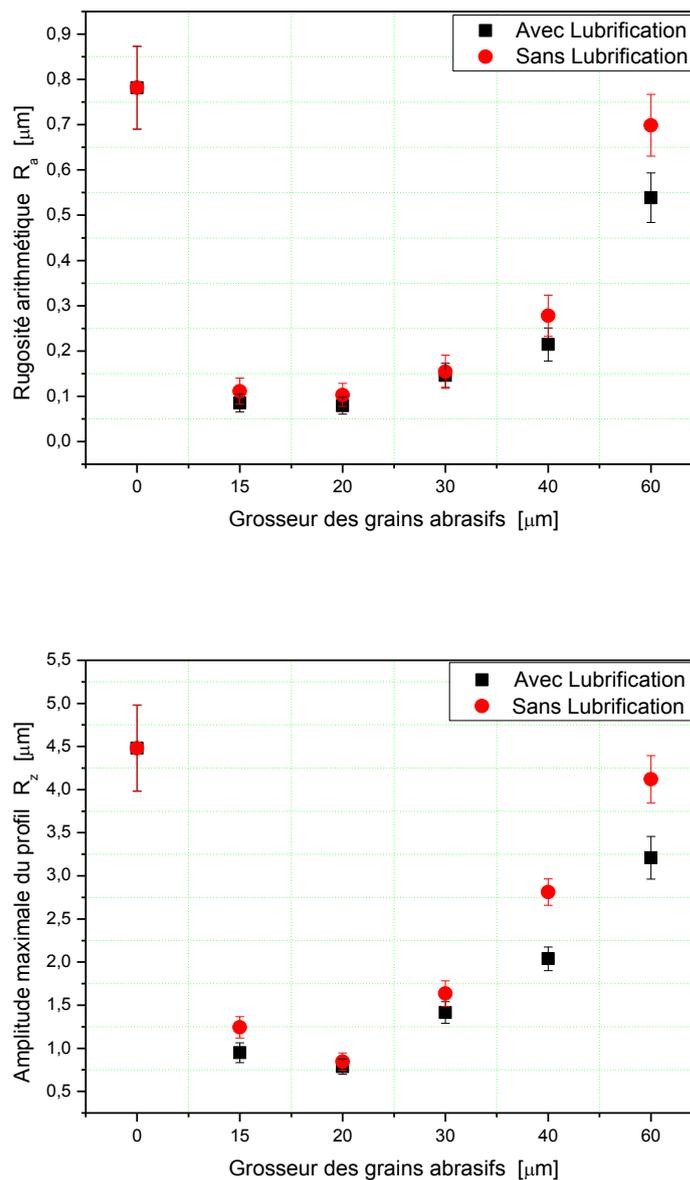


Figure 3.25 : Variation des paramètres de la rugosité de hauteur R_a et R_z en fonction de la grosseur des grains abrasifs.

Les figures 3.25 et 3.26 montrent que la rugosité de surface des deux cas de toilage (sans et avec lubrification) est presque identique. A partir de ces figures, on constate que les valeurs optimales de rugosité sont obtenues par la grosseur des grains abrasifs 20 µm. Ceci peut être

expliqué par l'adaptation de la morphologie des grains abrasifs et leurs distributions granulométrique avec l'état initial de la surface d'acier obtenu par tournage dur. Par ailleurs, la mauvaise rugosité est obtenue par la bande abrasive de grosseur $60 \mu\text{m}$. Ce résultat peut être expliqué par le fait que lors du gros toilage, la surface de contact entre les grains abrasifs et la surface toilée est plus grande. Par conséquent, les grains enlèvent plus de matière, ce qui engendre des défauts importants par rapport aux grains de diamètre inférieur. Lors du toilage fin ($15 \mu\text{m}$), la capacité de coupe des grains abrasifs de taille inférieure $20 \mu\text{m}$ et leurs capacités d'indentation diminuent, ce qui va produire uniquement l'élimination des irrégularités superficielles d'état de surface initiale.

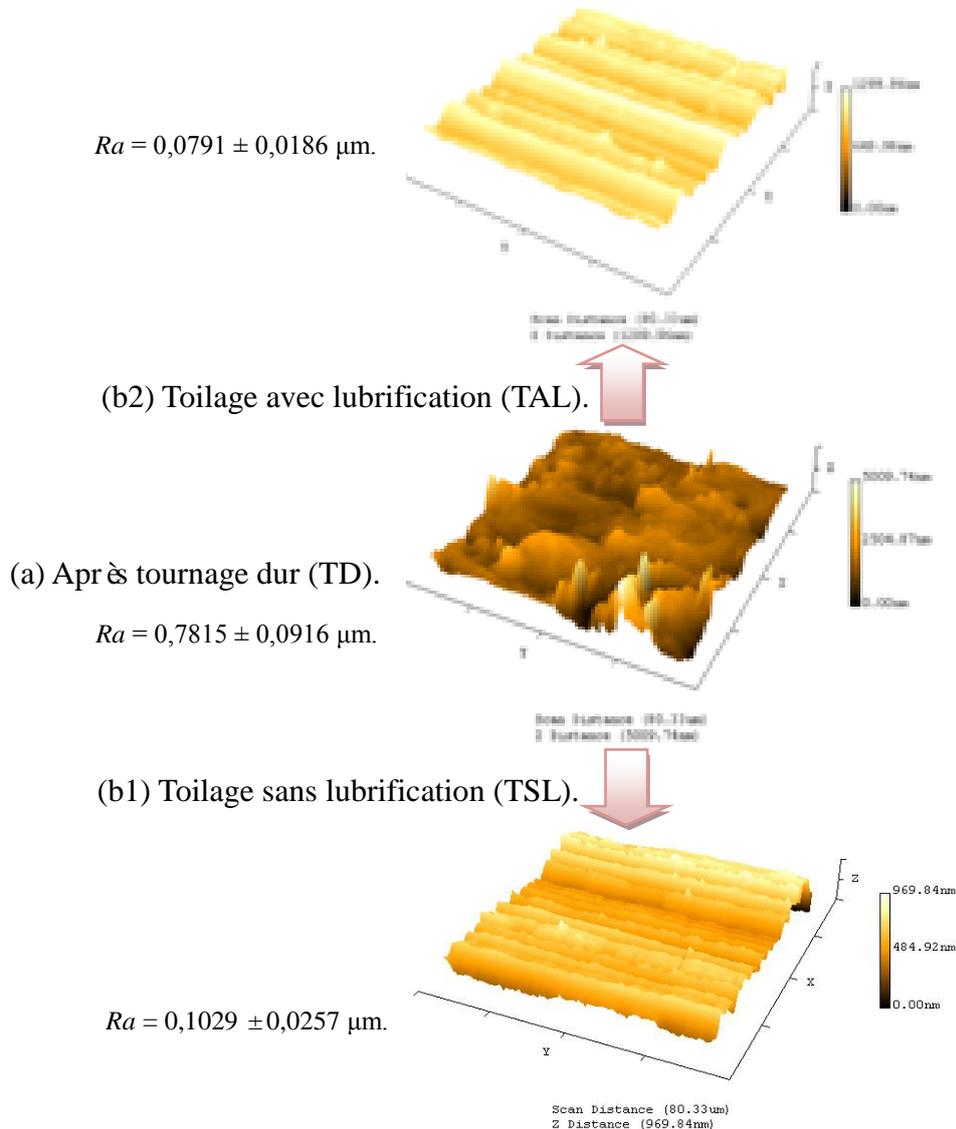


Figure 3.26 : Image microscopique avant et après toilage par la grosseur des grains $20 \mu\text{m}$.

3.2.4. Taux de portance

La figure 3.27 représente la variation des trois paramètres du taux de portance R_{pk} , R_k et R_{vk} en fonction de la grosseur des grains abrasifs.

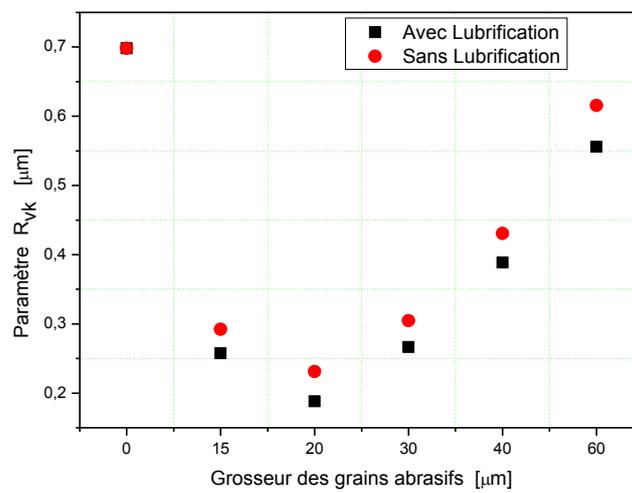
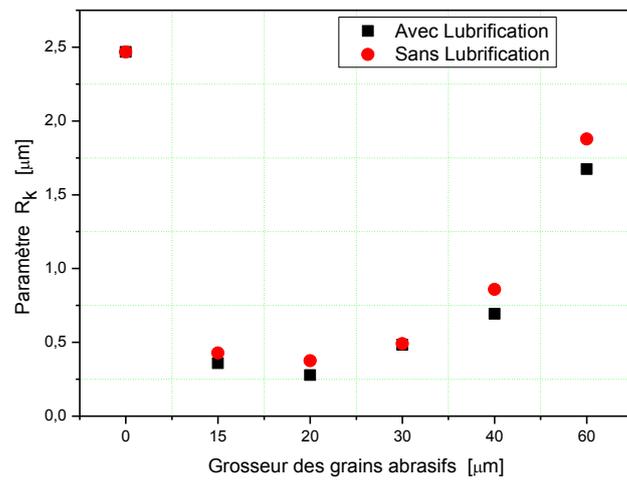
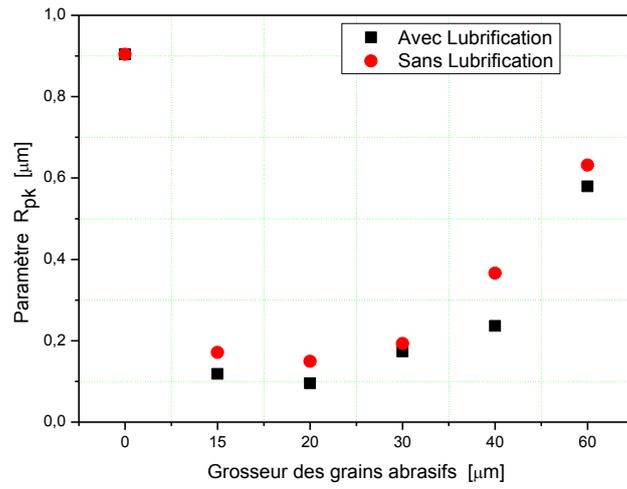


Figure 3.27 : Variation des paramètres R_{pk} , R_k et R_{vk} en fonction de la taille des grains abrasifs.

La figure 3.28 montre le taux de réduction des trois paramètres de la courbe d'Abbott-Firestone R_{pk} , R_k et R_{vk} des surfaces toilées par différentes grosseurs des grains abrasifs. Les paramètres du taux de portance obtenus par toilage sec sont inférieurs par rapport aux paramètres de toilage lubrifié. Le taux de réduction le plus élevé découle de la bande abrasive de taille des grains 20 μm et le plus faible découle de la bande abrasive de taille des grains 60 μm . De plus, le taux de réduction de la bande abrasive de taille des grains 15 μm est plus important en comparaison avec les deux autres bandes (30 μm ou 40 μm).

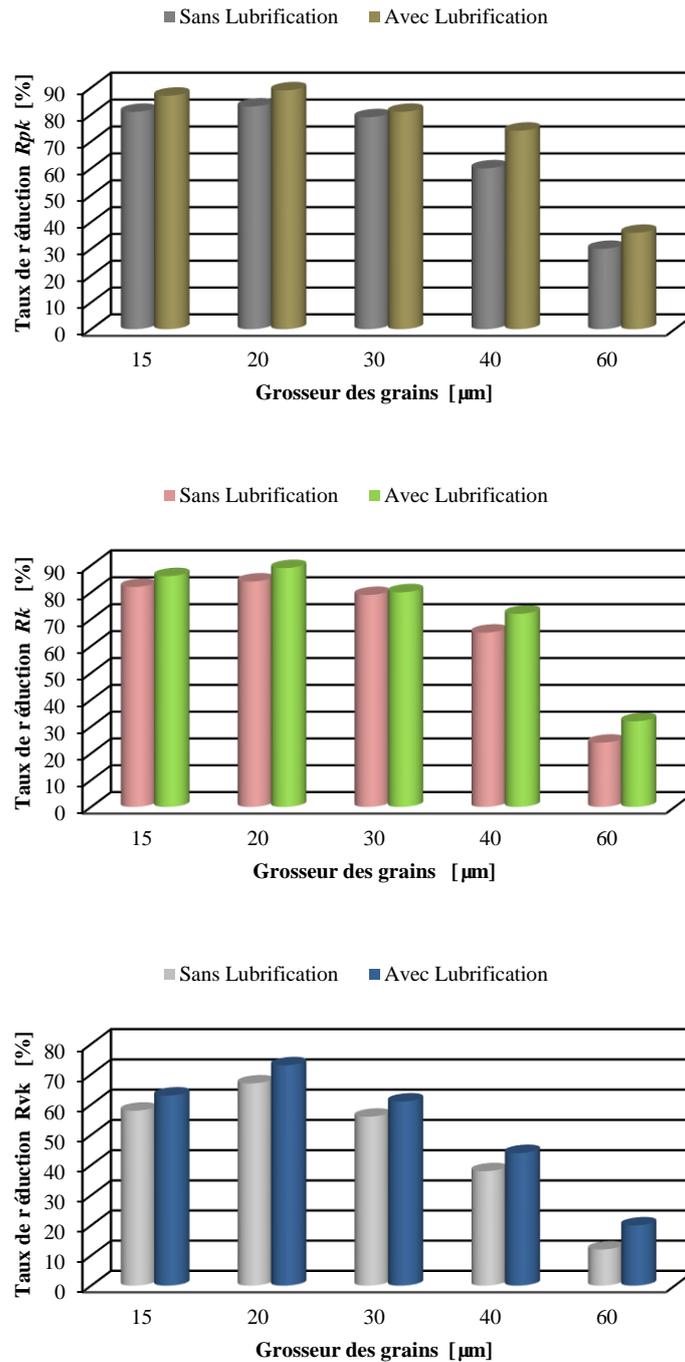


Figure 3.28 : Taux de réduction des R_{pk} , R_k et R_{vk} par différentes grosseur des grains abrasifs.

3.3. Effet de la vitesse de rotation de la pièce

Dans cette partie, on fixe le temps de toilage $t_{toilage} = 60$ secondes, la grosseur des grains abrasifs $20 \mu\text{m}$ et on mesure les paramètres de la texture de surface en fonction de la vitesse de rotation de la pièce.

La figure 3.29 représente la variation de la rugosité moyenne arithmétique R_a et la hauteur maximale du profil R_z en fonction de la vitesse de rotation de la pièce pour les deux cas de toilage sans et avec lubrification.

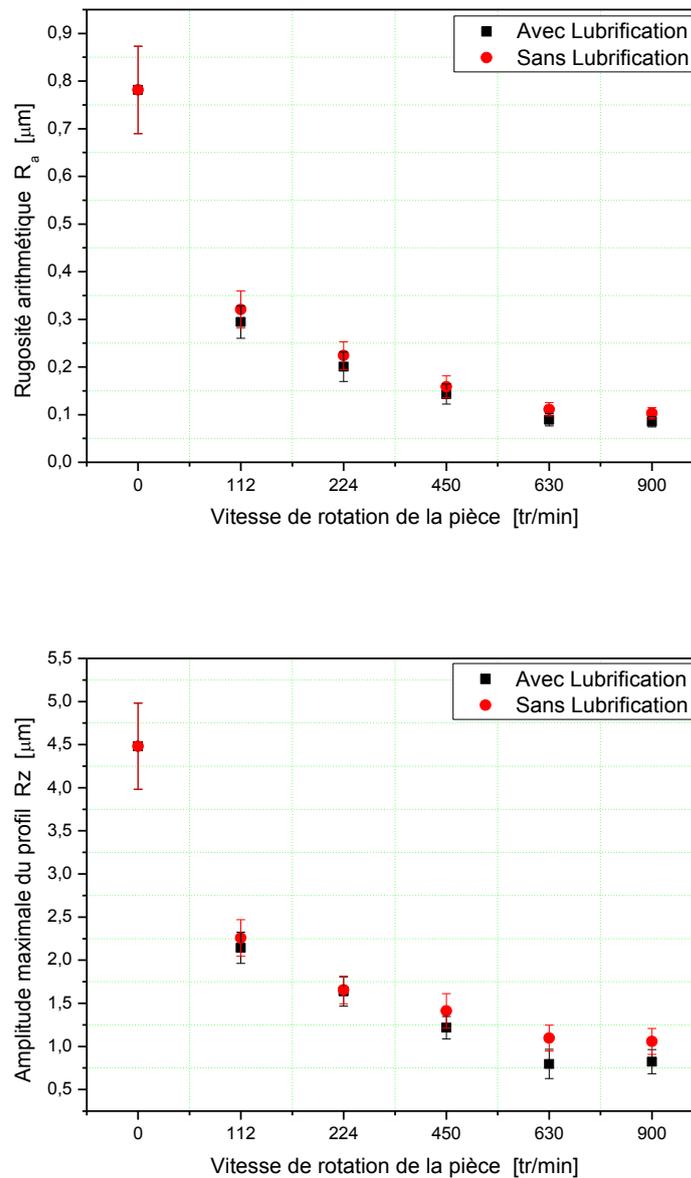


Figure 3.29 : Paramètres d'amplitude de rugosité R_a et R_z en fonction de la vitesse de rotation de la pièce sans et avec lubrification.

La figure 3.29 montre que l'état de surface des deux cas de toilage sans et avec lubrification

d'acier dur s'améliore lorsque la vitesse de rotation augmente. En effet, les courbes de rugosité arithmétique Ra et l'amplitude maximale du profil Rz diminuent jusqu'à la vitesse de rotation de la pièce égale à ~ 600 tr/min, puis semblent se stabiliser relativement. Donc, on peut dire que 900 tr/min est la vitesse de rotation optimale pour les pièces d'acier finies par le procédé de toilage.

3.4. Variation de l'état de la bande

Dans l'usinage par toilage, l'étude de comportement des grains abrasifs est importante après les différentes étapes de toilage, puisque les grains abrasifs sont considérés comme des micro-outils capables d'enlever des micro-copeaux de la surface à toiler. La figure 3.30 montre l'observation microscopique d'un seul grain de la bande 20 μm après le toilage lubrifié

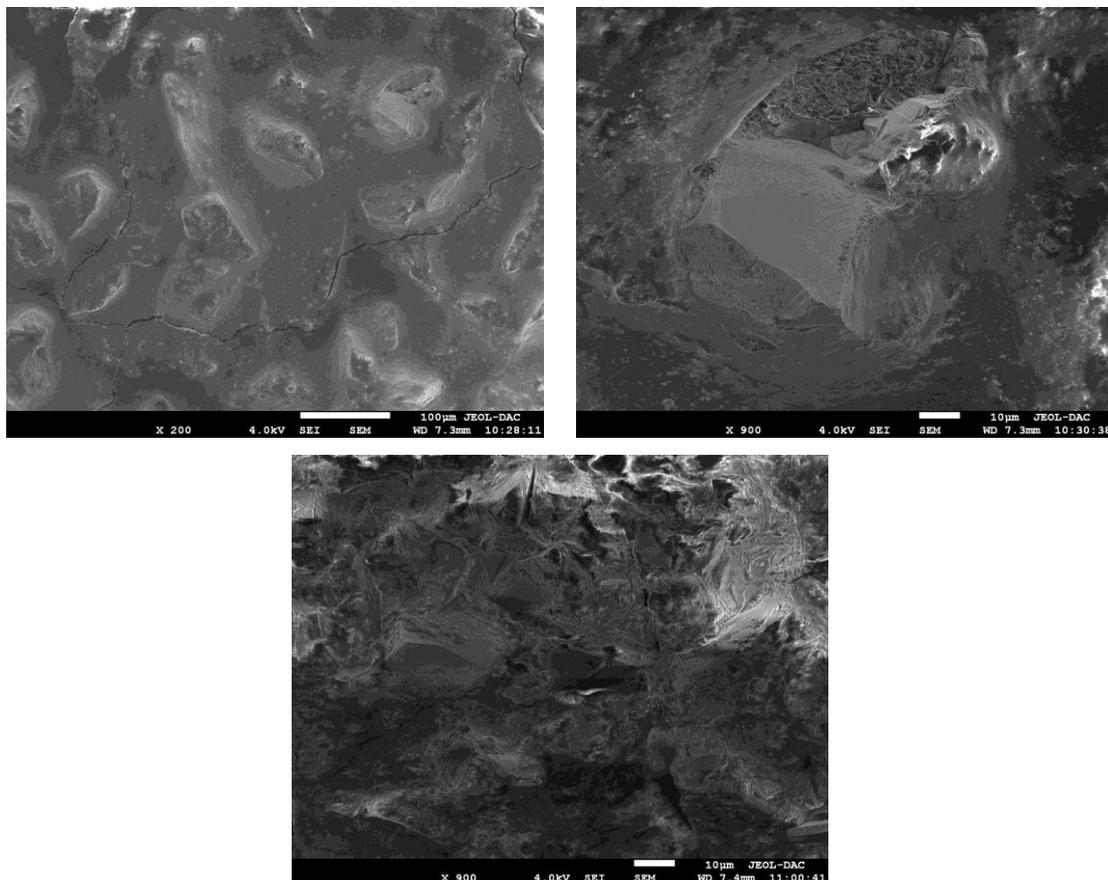


Figure 3.30 : Images MEB de la bande abrasive usée 20 μm après son nettoyage (toilage lubrifié, $t_{\text{toilage}} = 60$ secondes, $N = 900$ tr/min).

D'après les images MEB de la figure 3.30, le mécanisme d'usure des grains abrasifs peut être expliqué de la manière suivante : les grains ont d'abord utilisé leurs arêtes vives, ils se sont ensuite fragmentés par rupture fragile et enfin, les fragments sont encore incrustés dans la matrice liante. De plus, on peut constater le phénomène de détachement partiel ou complet des grains abrasifs à cause des fissures apparus sur la bande abrasive.

3.5. Effet de la grosseur décroissante des grains abrasifs

En mécanique automobile, plusieurs technologies d'usinage de finition sont utilisées pour réduire la friction entre les surfaces des pièces mécaniques constituant le moteur d'automobile, par exemple : la technologie de revêtement antifriction, la technologie de texturation comme dans le processus de rodage, ou plus traditionnellement le principe de réduction de la rugosité des surfaces [Ser15a]. De nos jours, le processus d'usinage à abrasif est largement utilisé dans l'industrie automobile pour la super finition des tourillons et des manetons de vilebrequin, ce qui permet la réduction des irrégularités de surface, l'amélioration de la qualité géométrique, l'augmentation de la résistance à l'usure et à la fatigue. Ce principe se fait généralement par le traitement de trois ou plusieurs étapes de toilage tout en diminuant successivement la taille des grains abrasifs [Ser15a, Ser15b].

Jusqu'à présent, le processus de super finition par toilage sous l'effet de la grosseur décroissante des grains abrasifs (on peut dire : toilage successif) sur l'acier dur n'a pas été étudié. Donc, à travers cette section, nous visons à donner un compte rendu complet de l'influence de la taille décroissante des grains d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 sur la texture de surface toilée (toilage à cinq passes par : 60 μm , 40 μm , 30 μm , 20 μm et 9 μm).

Plus les paramètres de toilage constants dans la partie précédente (voir l'introduction), on fixe dans cette partie deux autres paramètres :

- Vitesse de rotation de la pièce : $N = 900$ tr/min,
- Temps de toilage : $t_{toilage} = 9$ secondes.

3.5.1. Perte en masse

La figure 3.31 montre la variation de la perte en masse de toilage en fonction de la taille décroissante des grains abrasifs avec et sans lubrification.

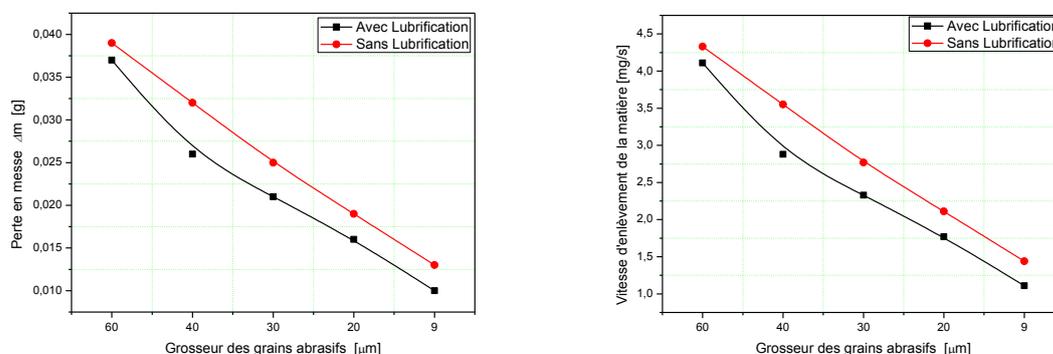


Figure 3.31 : Perte en masse et vitesse d'enlèvement de matière en fonction de la taille décroissante des grains sans et avec lubrification.

D'après cette figure, on remarque que la perte en masse pour les deux cas de toilage (avec et sans lubrification) diminue au fur à mesure que la grosseur des grains abrasifs diminue jusqu'à la fraction des grains 9 μm . La perte la plus importante est réalisée par la grosseur 60 μm et la perte la plus faible est réalisée par la grosseur 9 μm .

3.5.2. Perte en épaisseur

La perte en épaisseur et sa vitesse d'enlèvement de la couche laissée par le procédé de tournage dur est représenté dans la figure 3.32.

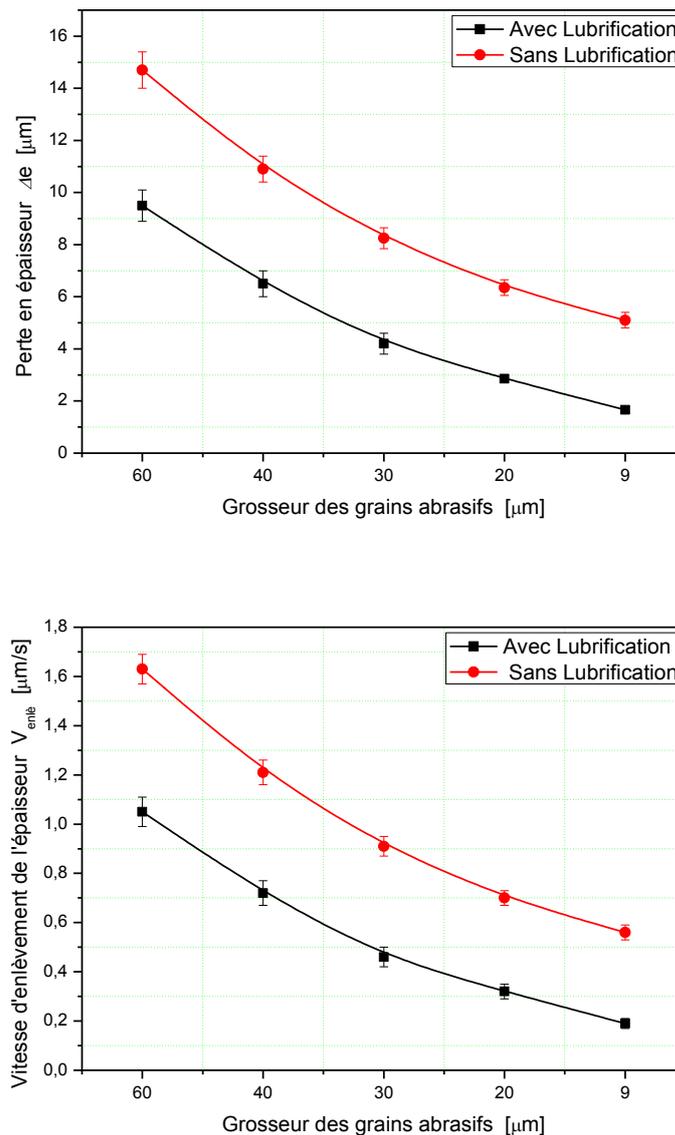


Figure 3.32 : Perte en épaisseur et la vitesse d'enlèvement de l'épaisseur de toilage en fonction de la taille décroissante des grains sans et avec lubrification.

L'allure des deux courbes de toilage en fonction de la taille décroissante des grains abrasifs est presque identique à savoir ; l'enlèvement de l'épaisseur est très important, puis une

diminution à partir de la grosseur des grains abrasifs 30 μm surtout pour le deuxième cas avec lubrification de quantités minimales. Cette différence est liée principalement à l'état de surface d'acier dur et au nombre de contacts avec les grains abrasifs au cours du processus de toilage.

La perte en épaisseur la plus élevée est réalisée par la bande abrasive de grosseur 60 μm et la plus faible par la bande abrasive de grosseur 9 μm . Ce résultat peut être expliqué par le fait que lors du gros toilage (phase d'ébauche), la surface de contact entre les grains et la surface toilée est plus grande et par conséquent les grains enlèvent plus de matière, ce qui engendre une vitesse importante d'enlèvement d'épaisseur (voir figure 3.33). Cependant, les grains fins en contact avec la surface constituent une surface de contact moins importante et par conséquent, la vitesse d'enlèvement est plus faible (phase de finition).

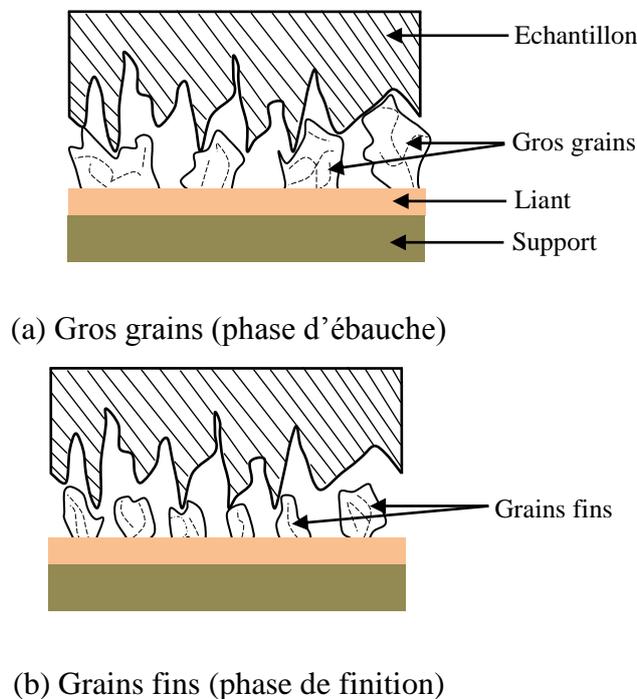


Figure 3.33 : Principe de contact grains/surface.

3.5.3. Rugosité de surface

La rugosité de surface joue un rôle très crucial dans le comportement à la fatigue des pièces mécaniques soumises à des sollicitations variables (cycliques) dans le temps. Ces sollicitations peuvent conduire à la rupture lorsque leurs applications sont répétées un grand nombre de fois ; c'est le processus d'endommagement par fatigue. A cet effet, le processus de super finition par toilage est développé afin de minimiser le maximum la rugosité de surface. La figure suivante représente la variation de la rugosité du toilage successif en fonction de la grosseur des grains abrasifs sans et avec lubrification.

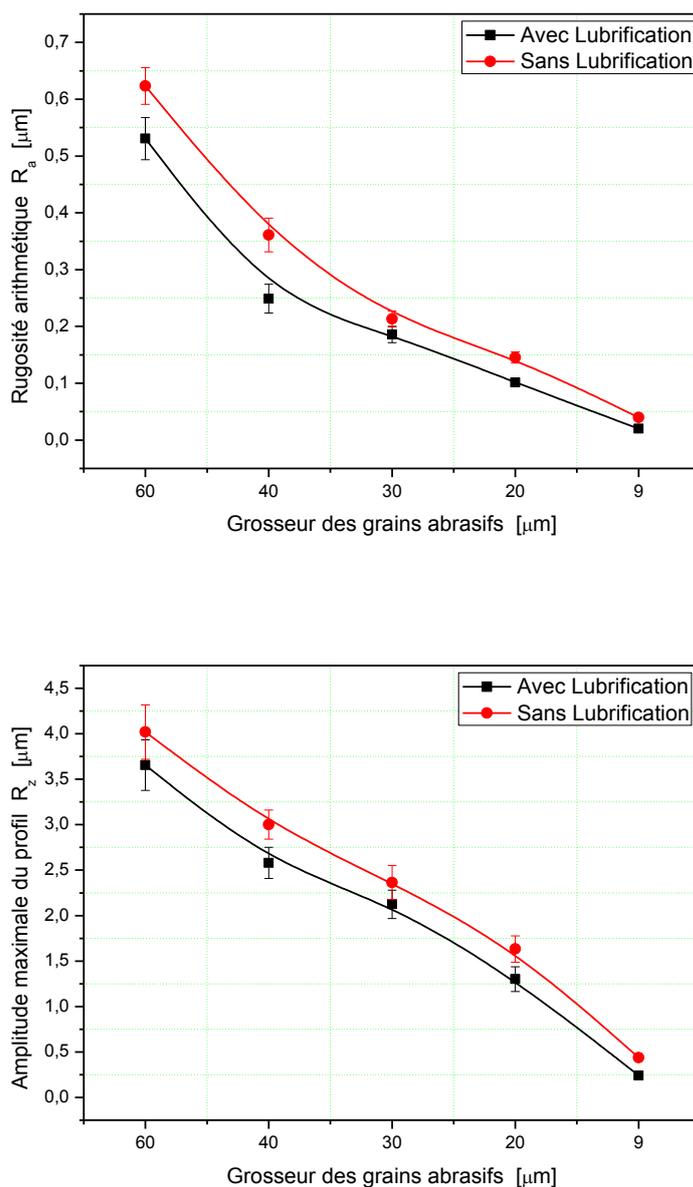


Figure 3.34 : Paramètres d'amplitude R_a , R_z du toilage avec et sans lubrification en fonction de la taille décroissante des grains abrasifs.

De cette figure, l'état de surface représentée par la rugosité moyenne arithmétique R_a et la hauteur maximale du profil R_z (figure 3.34) s'améliorent progressivement au fur et à mesure que la grosseur des grains abrasifs diminue. Ceci explique que les aspérités de la surface d'acier dur ont tendance à décroître sous l'effet de la grosseur des grains. Les deux paramètres de rugosité du profil de tournage dur sont ; $R_a = 0,7815 \pm 0,0916 \mu\text{m}$, $R_z = 4,4811 \pm 0,4987 \mu\text{m}$. Après toilage sans lubrification, jusqu'à la grosseur des grains abrasifs $9 \mu\text{m}$, ils deviennent ; $R_a = 0,0339 \pm 0,0024 \mu\text{m}$, $R_z = 0,4388 \pm 0,0291 \mu\text{m}$. Concernant le deuxième

cas avec lubrification, ils sont bien meilleurs ; $Ra = 0,0208 \pm 0,0007 \mu\text{m}$, $Rz = 0,2421 \pm 0,0206 \mu\text{m}$, pour la même grosseur des grains abrasifs (9 μm).

De plus, les pics obtenus par toilage de grosseur décroissante des grains abrasifs (jusqu'à 9 μm) avec lubrification sont meilleurs en comparaison avec le deuxième cas sans lubrification (voir les figures 3.35 et 3.36). On note que les pics obtenus par toilage de grosseur décroissante des grains abrasifs sans ou avec lubrification sont faibles par rapport aux pics de profil de tournage dur. En effet, ce résultat peut être expliqué par le fait que lors du toilage par les gros grains, la surface de contact entre les grains abrasifs et la surface toilée est plus grande. Par conséquent, les grains enlèvent plus de défauts macro-géométriques et préparent la surface à l'étape suivante des grains moyens ou fins. Cependant, les grains fins en contact avec la surface constituent une surface de contact moins importante et par conséquent enlèvent plus de défauts micro-géométriques. Ceci indique une corrélation entre la qualité de surface et la taille des grains. Par ailleurs, chaque étape de toilage nécessite l'utilisation d'une fraction de grain qui correspond aux défauts de surface à enlever. Ce phénomène est similaire aux travaux de Belkhir et al [Bel07] relatives au polissage du verre optique. Donc, ce processus permet d'écarter les pics de la rugosité laissée par le procédé précédent (TD), ce qui améliore la surface finale d'acier dur 16MC4.

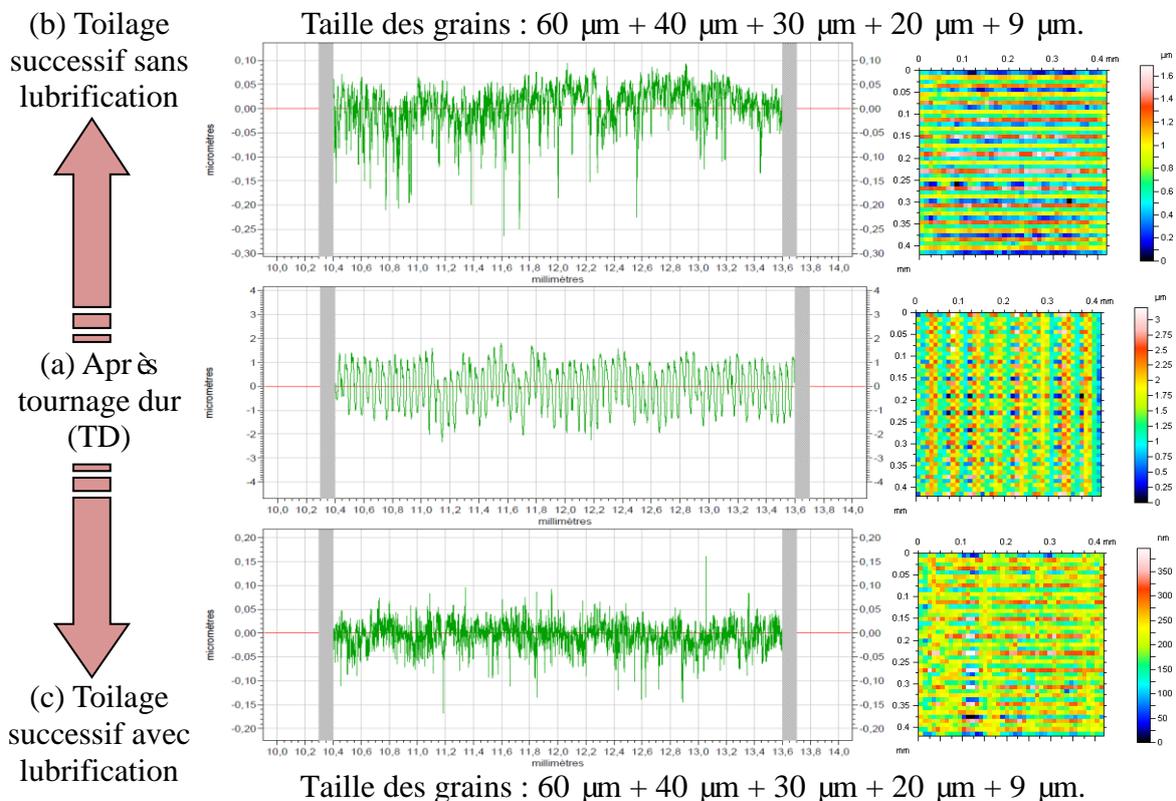


Figure 3.35 : Profil d'état de surface : (a) après tournage dur, (b) toilage successif sans lubrification, (c) toilage successif avec lubrification.

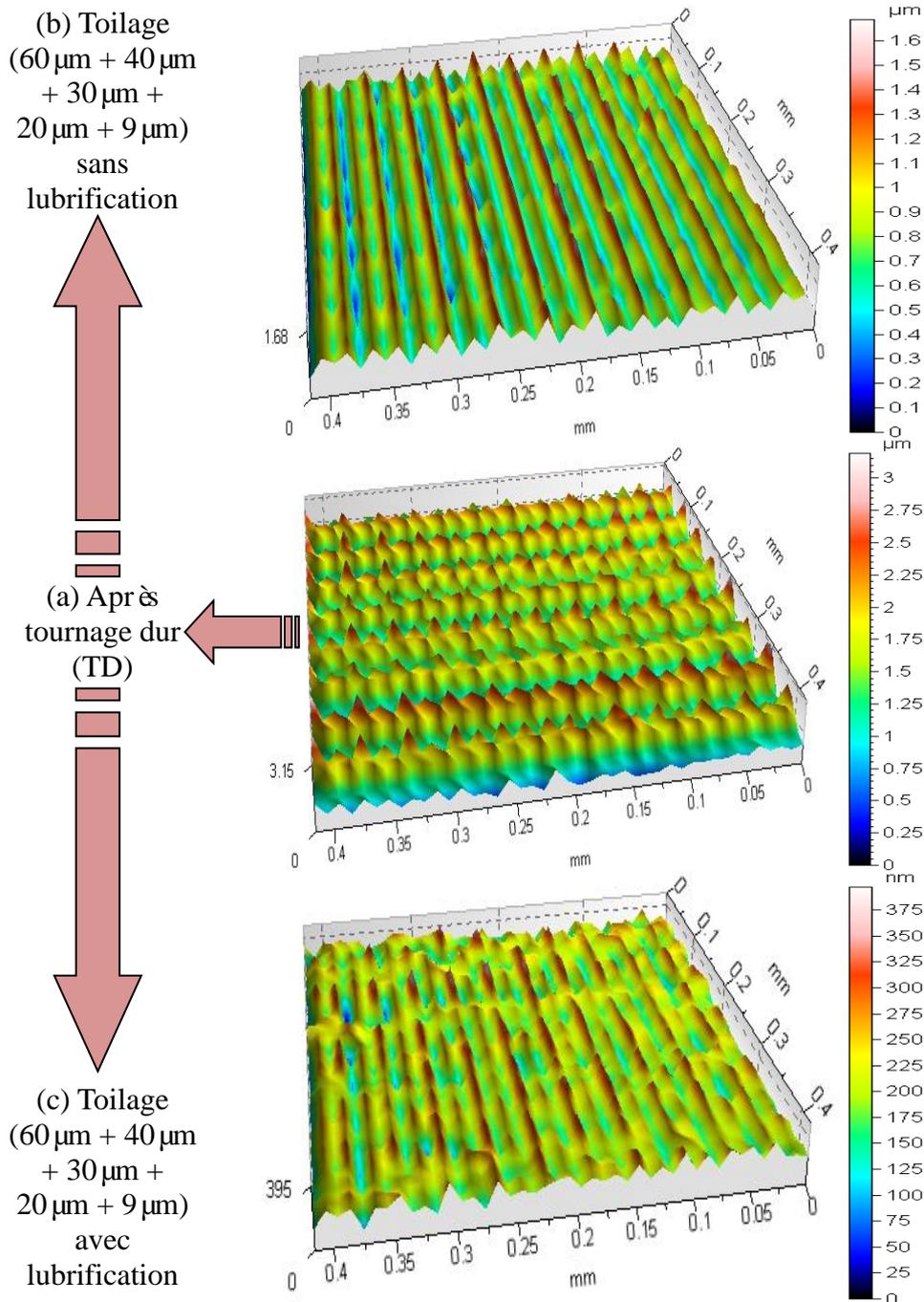


Figure 3.36 : Topographie de surface en 3D de toilage sous l’effet de la taille décroissante des grains abrasifs jusqu’à 9 μm.

On peut conclure que la rugosité de surface est proportionnelle à la diminution de la grosseur des grains abrasifs. Ainsi, l’état de surface obtenue avec lubrification de quantités minimales est meilleur et homogène par rapport au toilage sec. Le toilage est un processus de finition permettant de s’attaquer aux crêtes de profil creux, qui résiste peu à l’usure, et d’engendrer un profil plein qui résiste mieux à l’usure (voir figure 3.19). L’intégrité de la surface peut être complètement modifiée lors de l’application de procédé de toilage lubrifié par rapport à l’état initial de tournage à sec (tournage dur) comme indiqué par Courbon et al [Cou16].

La figure 3.37 présente dans le premier graphe, une comparaison entre la rugosité moyenne arithmétique du profil et la rugosité moyenne arithmétique surfacique, et dans le deuxième graphe, une comparaison entre la hauteur maximale du profil et la hauteur maximale de la surface selon deux cas de toilage : 60 μm + 40 μm et jusqu'à 9 μm .

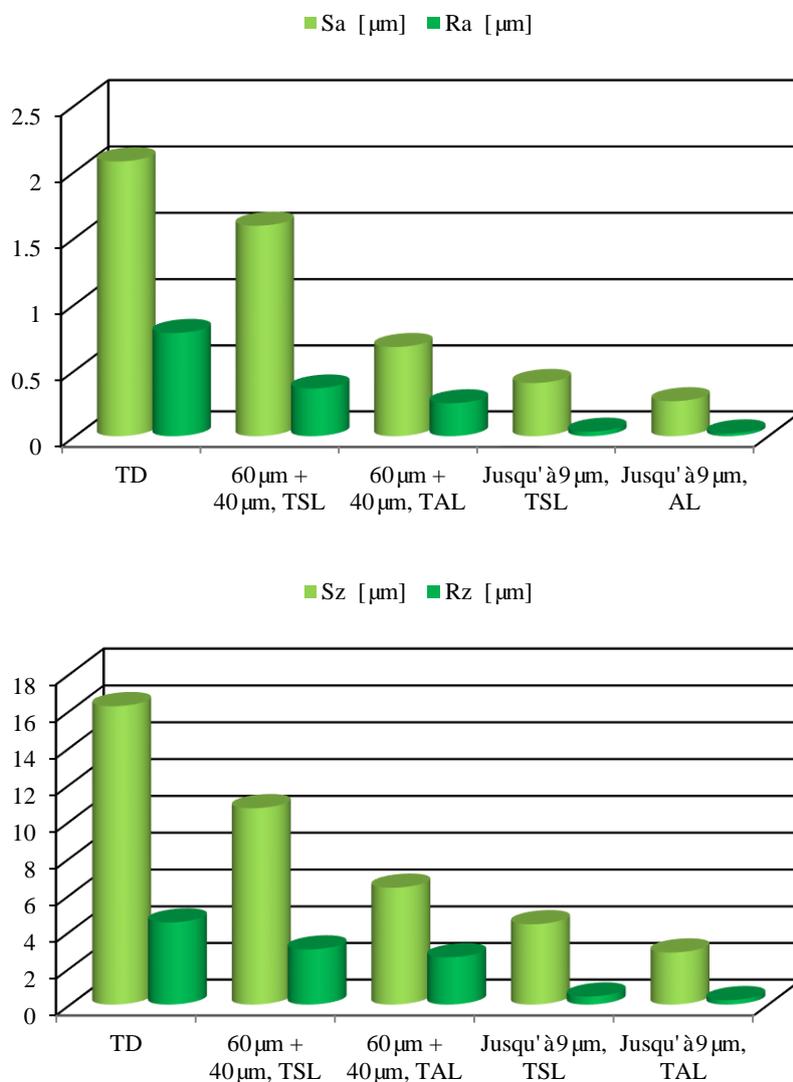


Figure 3.37 : Comparaison entre ($Ra - Sa$) et ($Rz - Sz$) pour trois étapes d'usinage : tournage dur (TD), toilage avec lubrification (TAL) et toilage sans lubrification (TSL).

3.5.4. Taux de portance

Les figures suivantes 3.38, 3.39 et 3.40 illustrent la variation des différents paramètres du taux de portance du toilage successif en fonction de la grosseur des grains abrasifs.

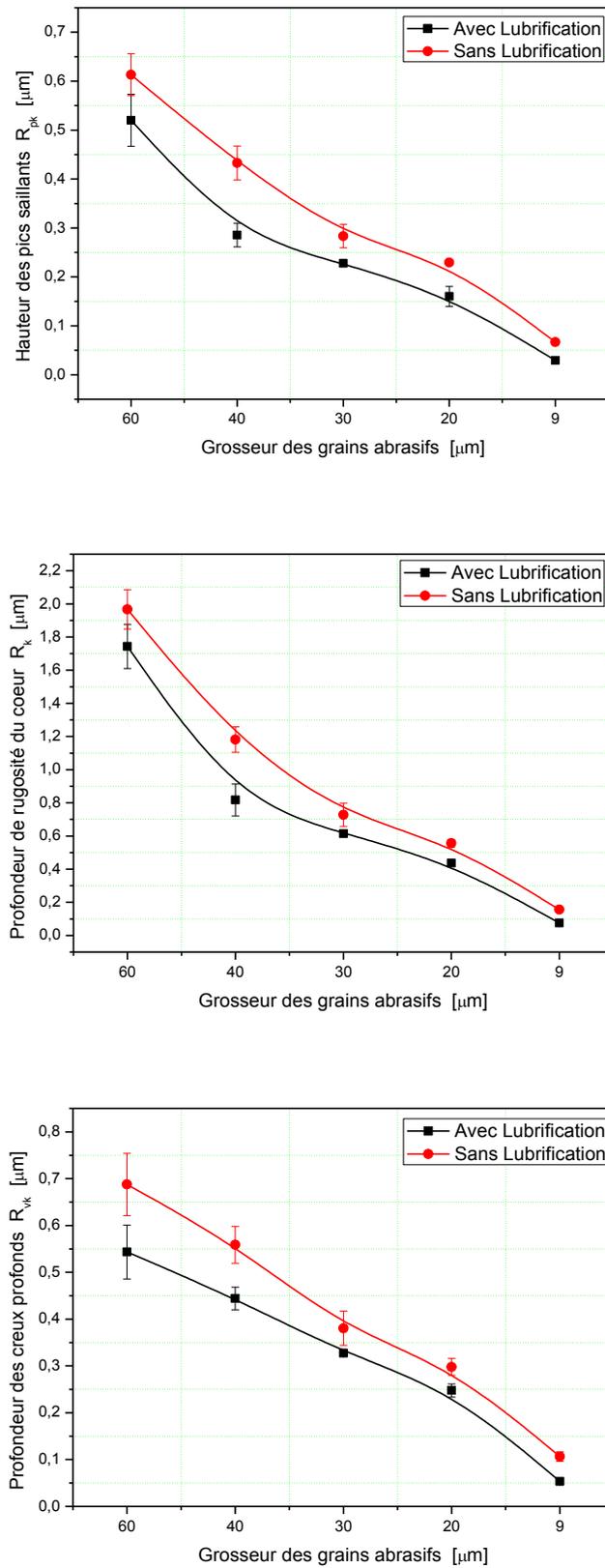


Figure 3.38 : Paramètres de la courbe de portance (R_{pk} , R_k et R_{vk}) de toilage en fonction de la taille décroissante des grains abrasifs.

Ces paramètres sont déterminés à partir de la courbe du taux de longueur portante ou courbe d'Abbott-Firestone par intégration de la distribution des hauteurs sur toute la surface. Ils présentent un intérêt particulier pour caractériser la texture de la surface toilée [Ser15a]. D'après la figure 3.38, on remarque que les trois courbes représentent presque la même tendance. On trouve une proportionnalité entre les trois paramètres et la grosseur des grains abrasifs. Le R_{pk} final de toilage avec lubrification jusqu'à la taille des grains $9 \mu\text{m}$ est d'environ 96 %, inférieur à l'initial R_{pk} . Dans le deuxième cas ; sans lubrification, il est d'environ 94 %. Le pourcentage restant étant de 4 % des aspérités, qui vont être supprimés pendant les premières heures de fonctionnement. Le paramètre R_k final est d'environ 96 %, inférieur à l'initial et 95 % pour le toilage sec. Il représente la quantité de la matière disponible à l'usure pour la durée de vie du moteur. Concernant le troisième paramètre R_{vk} , il est inférieur à l'état initial d'un pourcentage d'environ 93 % et 88 % de toilage sec, ce qui laisse 7 % de creux qui ne seront jamais usés pour retenir le lubrifiant nécessaire au bon fonctionnement. Khellouki et al [Khe05] ont étudié par l'intermédiaire d'une méthode des plans d'expériences, les effets et les interactions des paramètres de toilage sur la texture de surface. Ils ont prouvé que la super finition par toilage améliore considérablement les paramètres de la courbe de portance (R_k passe de $0,9 \mu\text{m}$ à $0,38 \mu\text{m}$, R_{pk} passe de $0,35 \mu\text{m}$ à $0,12 \mu\text{m}$ et R_{vk} passe de $0,12 \mu\text{m}$ à $0,15 \mu\text{m}$).

Pour compléter la caractérisation de la courbe du taux de portance, il reste deux paramètres essentiels. Le premier est le taux de portance délimitant la limite supérieure de la zone du cœur $Mr1$, ce dernier étant égal à 54 % inférieur à l'initial de toilage successif avec lubrification et 52 % de toilage sec. Le deuxième étant le taux de portance délimitant la limite inférieure de la zone du cœur $Mr2$, il est égal à 7 %, obtenu par le toilage successif avec lubrification et 6 % de toilage sec (figure 3.39). Toutefois, la droite équivalente de la courbe de portance (figure 3.40) est très considérable, car elle est en relation avec le taux d'usure de la surface. Donc, on constate que la pente équivalente des deux cas de toilage successif est faible par rapport au tournage dur (la courbe obtenue par tournage dur chute rapidement ; voir figure 3.40 (a)). De plus, la pente de toilage successif avec lubrification de quantités minimales est plus faible par rapport au toilage sec (on constate que la courbe est relativement une droite horizontale dans sa partie intermédiaire ; voir figure 3.40 (c2)). Ce qui confirme le fait que la surface toilée a une forme plateau presque parfaite. Par conséquent, le moteur fonctionnera longtemps. Par comparaison avec le travail de Khellouki et al [Khe07b] sur l'acier à roulement 100Cr6 (AISI 52100) trempé à 62 HRC en fonction de l'augmentation de la force appliquée, ils ont trouvé que la pente de la courbe de portance est réduite et les pics

ont diminué. Ainsi, la surface de toilage approche la configuration qui caractérise une surface plateau. Ce type de surface est nécessaire pour ses bonnes propriétés de portance.

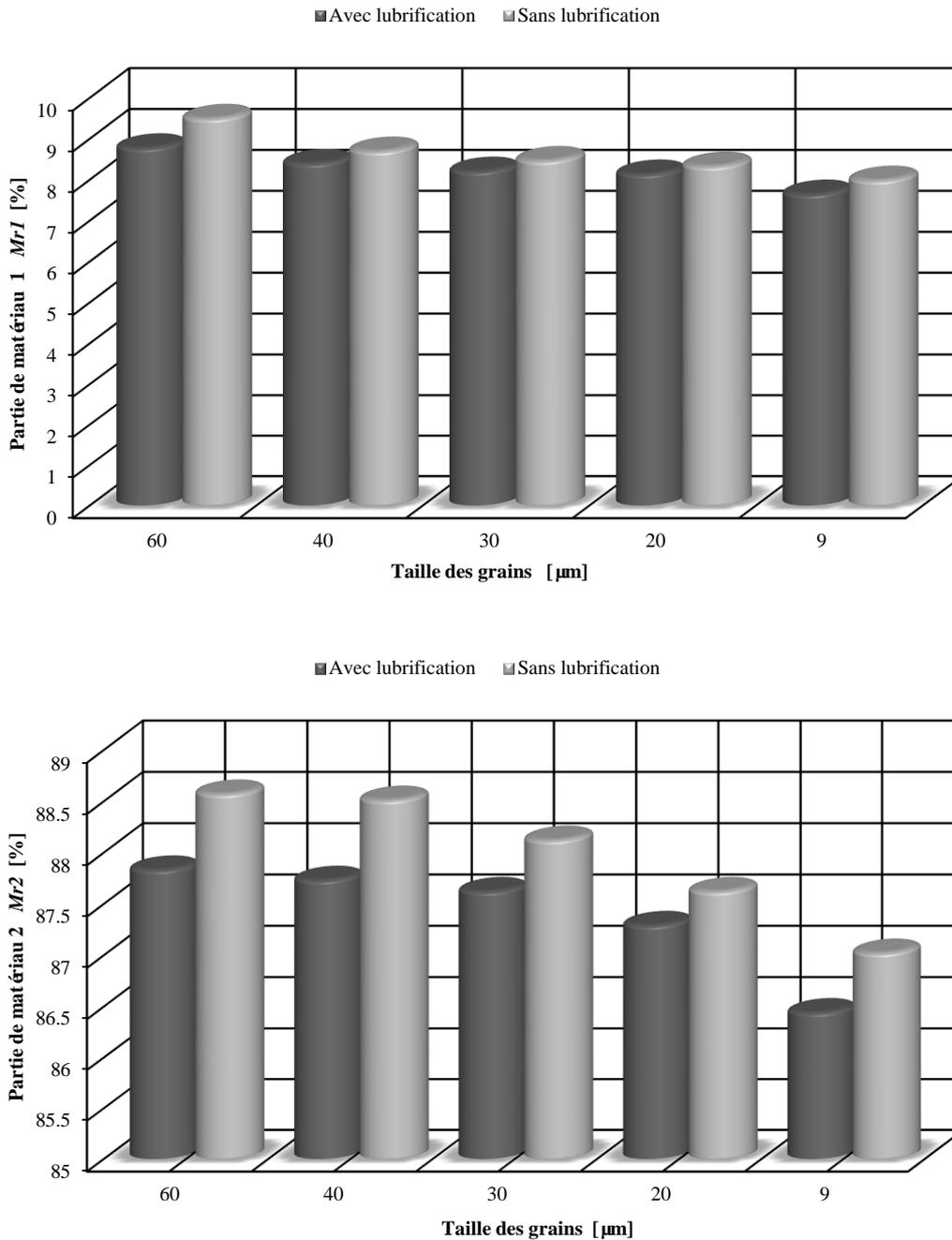


Figure 3.39 : Variation du taux de longueur portante $Mr1$ et $Mr2$ de toilage en fonction de la taille décroissante des grains abrasifs.

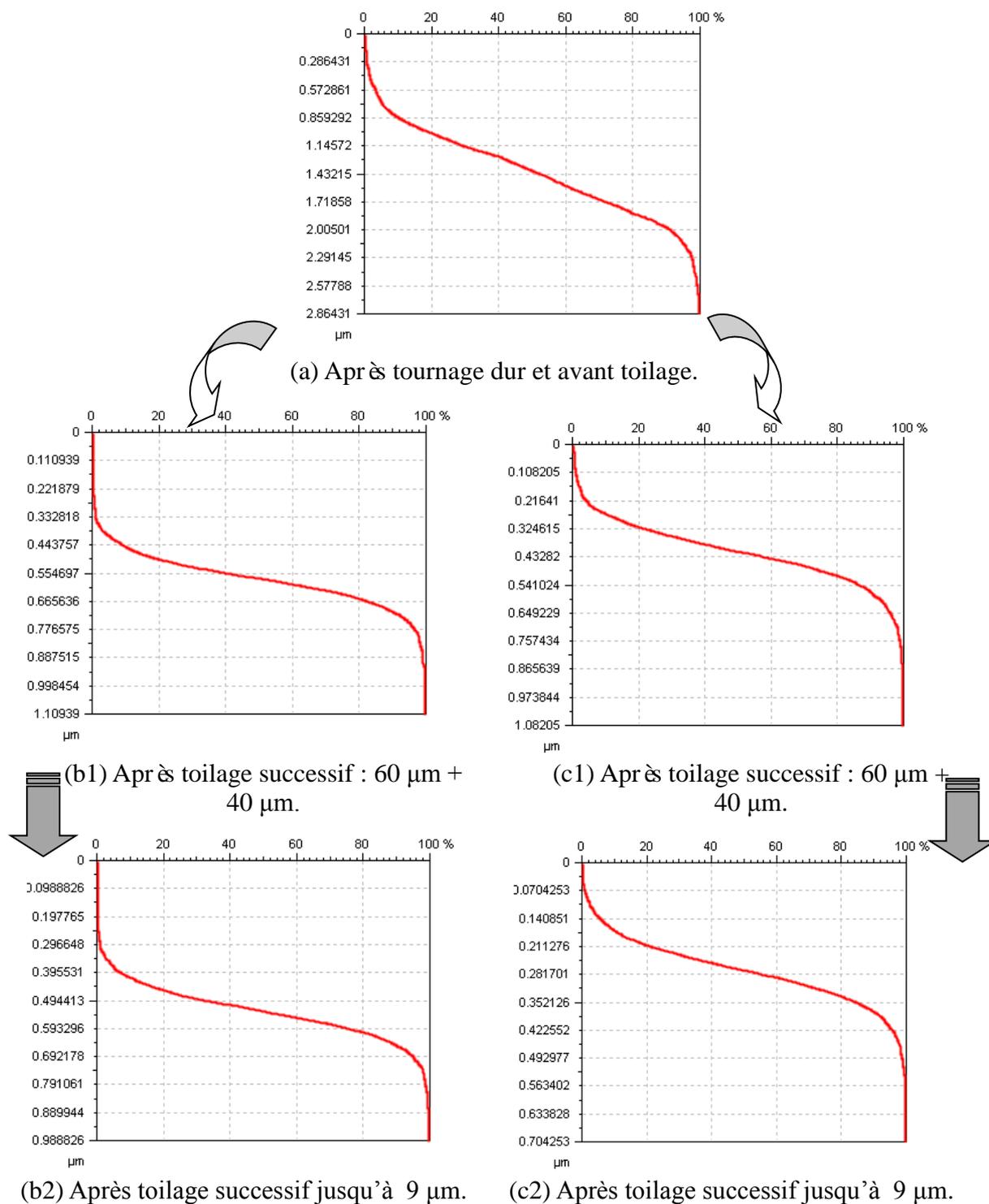


Figure 3.40 : Courbes du taux de portance de toilage sans et avec lubrification en fonction de la taille décroissante des grains abrasifs.

CHAPITRE 4
**Influence des galets de
contact sur la texture de
surface toilée**

1. Introduction.....	108
2. Texture de surface initiale.....	109
2.1. Rugosité de surface initiale.....	110
2.2. Taux de portance initial.....	110
3. Influence des différents galets sur la texture de surface.....	111
3.1. Galets métalliques et alliages métalliques.....	111
3.1.1. Galet en acier (G-AC).....	111
3.1.2. Galet en aluminium (G-AL).....	113
3.1.3. Galet en laiton (G-LA).....	115
3.1.4. Comparaison de la texture de surface générée par les galets métalliques et alliages métalliques.....	118
3.2. Galets polymères.....	123
3.2.1. Galet en polystyrène (G-PS).....	123
3.2.2. Galet en polyoxyméthylène (G-POM C).....	124
3.2.3. Galet en polyamide (G-PA 6).....	126
3.2.4. Galet en polypropylène-copolymère (G-PPC).....	128
3.2.5. Galet en polypropylène-homopolymère (G-PPH)...	131
3.2.6. Galet en polyéthylène haute densité (G-PEHD).....	132
3.2.7. Galet en polyéthylène basse densité (G-PEBD).....	134
3.2.8. Comparaison de la texture de surface générée par les galets polymères.....	137

1. Introduction

Le processus de superfinition par toilage de précision est un procédé de fabrication mécanique complexe vu le grand nombre de paramètres qui peuvent l'influencer tel que : paramètres de l'outil de coupe (bande abrasive : type, grosseur, structure, morphologie aléatoire des grains, distribution et orientation des grains, aussi une seule couche ou deux couches des grains), galet de contact (type et dureté), le matériau toilé (type, dureté,...), vitesse de rotation de la pièce, vitesse de défilement de la bande, la force ou la pression, amplitude et fréquence d'oscillation, avec ou sans lubrification.

Dans ce processus, le galet de contact est un élément clé et ayant un impact direct sur le processus. Il doit posséder la fonction de transmission de la pression aux grains abrasifs sur la pièce toilée. Dès lors la connaissance de ces propriétés essentiellement mécanique est impérative afin d'obtenir une texture de surface optimal des pièces destinées à remplir des fonctions très précises.

Afin de traiter cette problématique, cette question peut être posée :

- Quelles sont les conditions de contact entre la bande abrasive et la pièce pour obtenir une meilleure qualité de la texture de surface ?

Afin de répondre à cette question, on étudie dans ce chapitre l'influence des différents galets de contact sur la texture de surface toilée. Les galets utilisés pendant cette étude expérimentale sont données dans le tableau 4.1. Chaque essai a été répété trois fois pour chaque type de galet de contact.

Tableau 4.1 : Nom, duretés et codes des galets de contact.

Type	N°	Nom de galet	Dureté	Code
Galets métalliques et alliages métalliques	1	Acier	110 HRB	G-AC
	2	Aluminium	90 HRB	G-AL
	3	Laiton	70 HRB	G-LA
Galets polymères	1	Polystyrène	85 Shore D	G-PS
	2	Polyoxyméthylène (polyacétal)	70 Shore D	G-POM C
	3	Polyamide PA 6	60 Shore D	G-PA 6
	4	Polypropylène-copolymère	60 Shore D	G-PPC
	5	Polypropylène-homopolymère	68 Shore D	G-PPH
	6	Polyéthylène haute densité	65 Shore D	G-PEHD
	7	Polyéthylène basse densité	45 Shore D	G-PEBD

La figure 4.1 montre les galets utilisés.



Figure 4.1 : Image des galets utilisés.

2. Texture de surface initiale

Dans ce chapitre, la texture de surface initiale d'acier cylindrique 16MC4 est obtenue par les étapes de fabrication suivante : trempe par induction + tournage dur (TD) par l'outil en céramique + toilage par la bande de taille moyenne des grains $60 \mu\text{m}$ et lubrification de quantités minimales (*MQL*). Sa dureté superficielle est d'environ 52 HRC.

Les conditions de tournage dur sont : $V_c = 63 \text{ m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$.

Les conditions de toilage fixées dans ce chapitre consacré à étude de l'influence de différentes gales de contact sur la texture de surface sont :

- ⊙ Vitesse de rotation de la pièce: $N = 900 \text{ tr/min}$.
- ⊙ Vitesse d'avance de la bande: $V_a = 44 \text{ tr/min}$.
- ⊙ Force appliquée: $F_n = 100 \text{ N}$.
- ⊙ Temps de toilage: $t_s = 60 \text{ secondes}$.
- ⊙ Amplitude d'oscillation: $a_{osc} = 0 \text{ mm}$.
- ⊙ Fréquence d'oscillation: $n_{osc} = 0 \text{ mm}$.
- ⊙ Mode de lubrification (microlubrification): Lubrification de quantités minimales par l'huile Tasfalout 22^M diluée à 1/10.

Pendant toute cette étude expérimentale, les bandes abrasives utilisées dans les essais de toilage sont constituées d'un support souple, de résine et une seule couche des grains d'alumine avec deux grosseurs : $30 \mu\text{m}$ et $20 \mu\text{m}$ (voir figure 3.4).

Pour une caractérisation complète de la texture de surface, on a choisie les paramètres suivants : paramètres de rugosité de hauteur (Ra , Rz , Rp , et Rv), paramètres de distribution de la hauteur du profil (Rsk et Rku), l'espacement (Rsm), l'angle (Rdq) et les paramètres fonctionnels (Rpk , Rk , Rvk , $Mr1$ et $Mr2$) (plus de détails dans la chapitre 3, section 2.3).

2.1. Rugosité de surface initiale

La figure suivante représente un exemple de profil de rugosité de surface initiale et ses paramètres de rugosités sélectionnées.

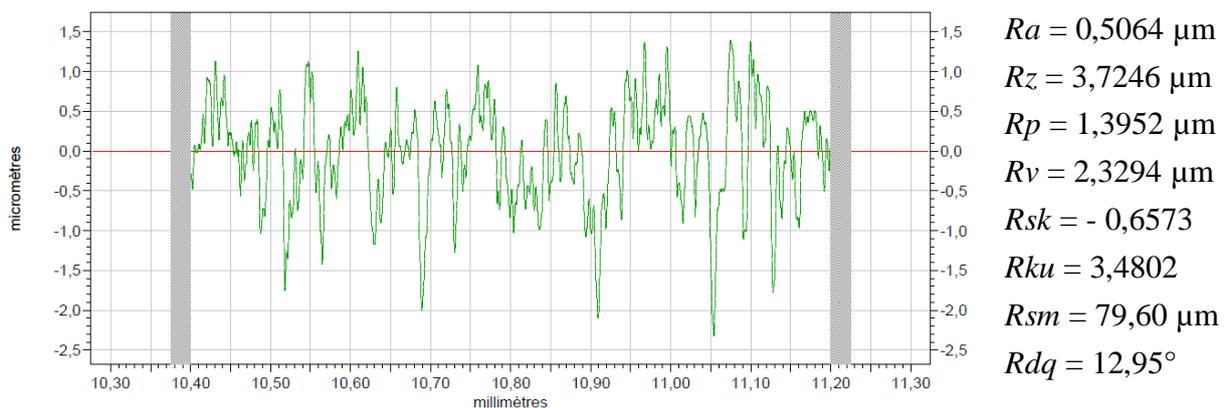


Figure 4.2 : Exemple de Profil d'état de surface initiale et ses paramètres de rugosités Ra , Rz , Rp , Rv , Rsk , Rku , Rsm et Rdq .

2.2. Taux de portance initial

La figure 4.3 illustre un exemple de la courbe d'Abbott-Firestone du profil de rugosité de la pièce en état initial.

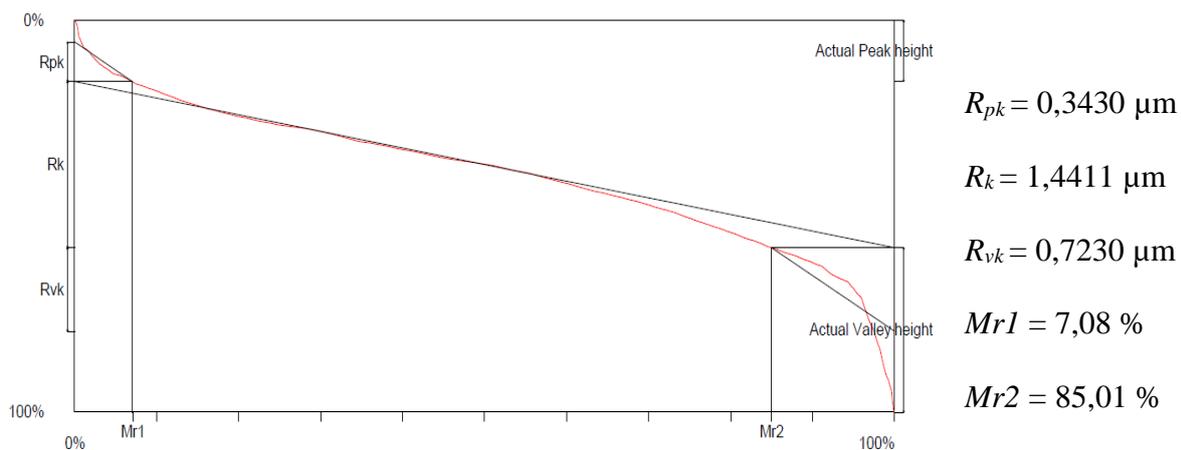


Figure 4.3 : Exemple de la courbe du taux de portance de la surface initiale et ses paramètres fonctionnels Rpk , Rk , Rvk , $Mr1$ et $Mr2$.

3. Influence des différents galets sur la texture de surface

3.1. Galets métalliques et alliages métalliques

3.1.1. Galet en acier (G-AC)

3.1.1.1. Rugosité de surface

La figure 4.4 illustre des exemples de profils de surfaces et ses paramètres de rugosité après les quatre cas de toilage par le galet acier (G-AC) de dureté 110 HRB.

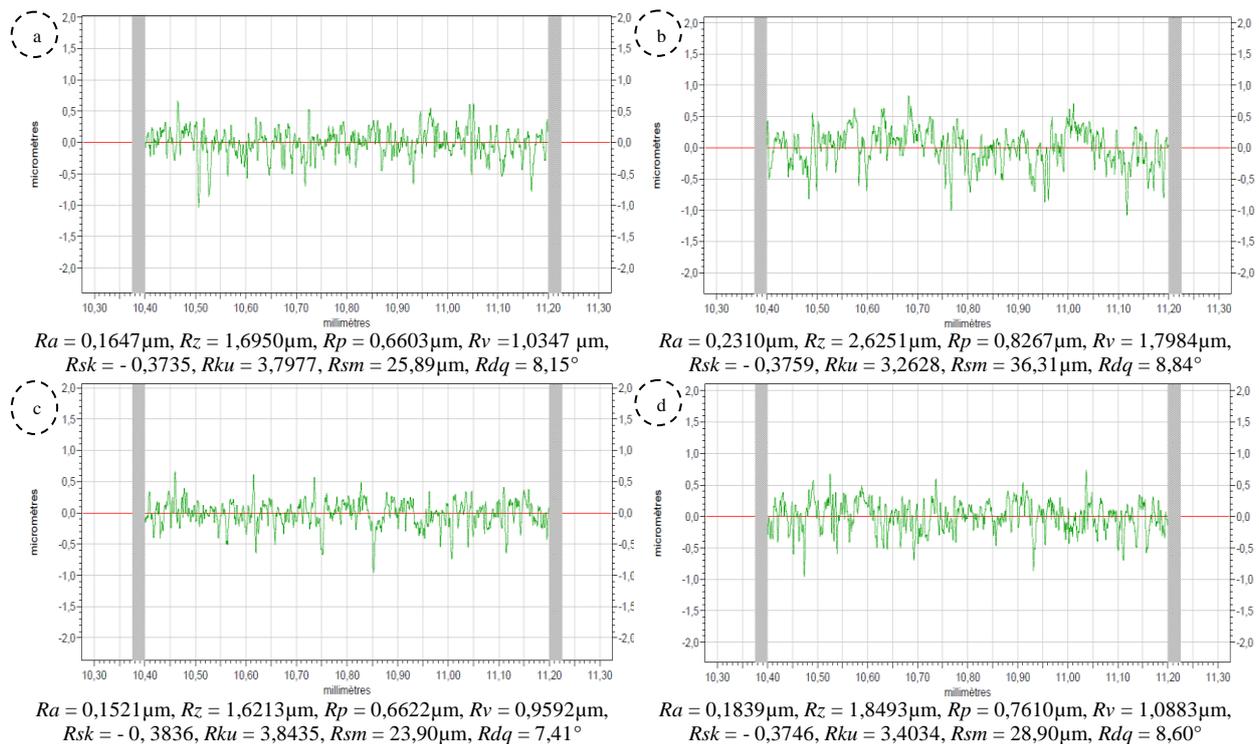


Figure 4.4 : Exemples de profils de rugosité pour le galet acier (G-AC) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

La figure 4.4 montre que le toilage par les deux bandes abrasives (20 μm et 30 μm) utilisant l'acier comme galet de contact améliore un peu la rugosité de surface par rapport à l'état de surface initiale et ceci pour les quatre cas. Il est clair que les paramètres de rugosité obtenus par la bande abrasive de grosseur 20 μm pour les deux cas de toilage (avec ou sans lubrification) sont faibles que les paramètres obtenus par la bande abrasive de taille 30 μm . Par ailleurs, la rugosité de toilage lubrifié est meilleure par rapport à la rugosité de toilage sec. Le tableau 4.2 représente le taux de réduction des paramètres de rugosité de hauteur. Le taux

de réduction le plus important est réalisé à travers le toilage lubrifié par la bande abrasive de taille 20 μm et le plus faible à travers le toilage sec par la bande abrasive de taille 30 μm .

Tableau 4.2 : Taux de réduction des paramètres de hauteur par toilage avec galet acier (G-AC).

	ΔRa [%]	ΔRz [%]	ΔRp [%]	ΔRv [%]
Toilage sec par bande 20 μm	67,48	54,49	52,67	55,58
Toilage sec par bande 30 μm	54,38	29,52	40,74	22,79
Toilage lubrifié par bande 20 μm	69,96	56,47	52,54	58,82
Toilage lubrifié par bande 30 μm	63,68	50,35	22,00	67,33

3.1.1.2. Taux de portance

Les courbes du taux de portance obtenues par les quatre cas de toilage considérées dans cette partie sont présentées par la figure 4.5.

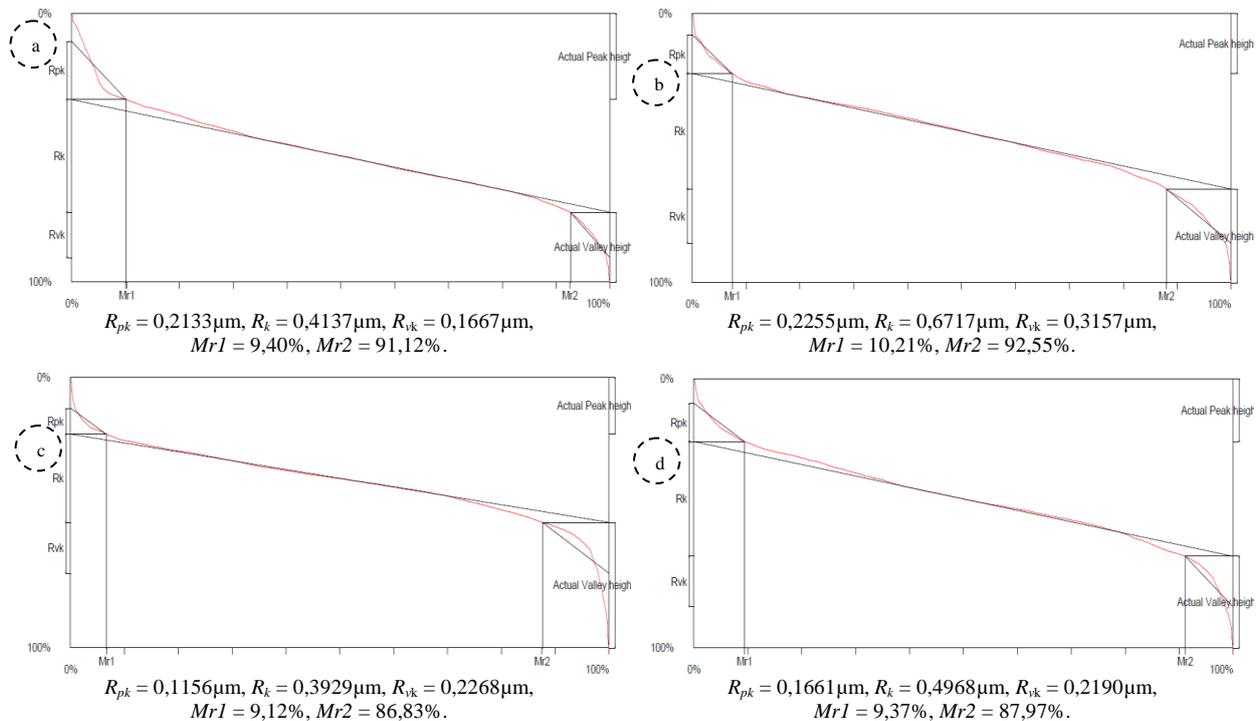


Figure 4.5 : Courbes du taux de portance pour le galet acier (G-AC) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

La figure 4.5 compare les quatre courbes du taux de portance obtenues par les quatre cas de toilage considérées dans cette étude. Pour les quatre cas, on remarque une légère diminution des paramètres R_{pk} , R_k et R_{vk} avec une faible amélioration de la pente équivalente des courbes. Le tableau 4.3 résume le taux de réduction de chaque paramètre de la courbe d'Abbott-Firestone.

Tableau 4.3 : Taux de réduction des paramètres du taux de portance par galet acier (G-AC).

	ΔR_{pk} [%]	ΔR_k [%]	ΔR_{vk} [%]
Toilage sec par bande 20 μm	37,81	71,29	76,94
Toilage sec par bande 30 μm	34,26	53,39	56,33
Toilage lubrifié par bande 20 μm	66,29	72,74	68,63
Toilage lubrifié par bande 30 μm	51,57	65,53	69,70

3.1.2. Galet en aluminium (G-AL)

3.1.2.1. Rugosité de surface

Dans cette partie, le galet de contact utilisé est en aluminium de dureté 90 HRB. La figure 4.6 illustre l'influence de ce galet sur la rugosité de surface.

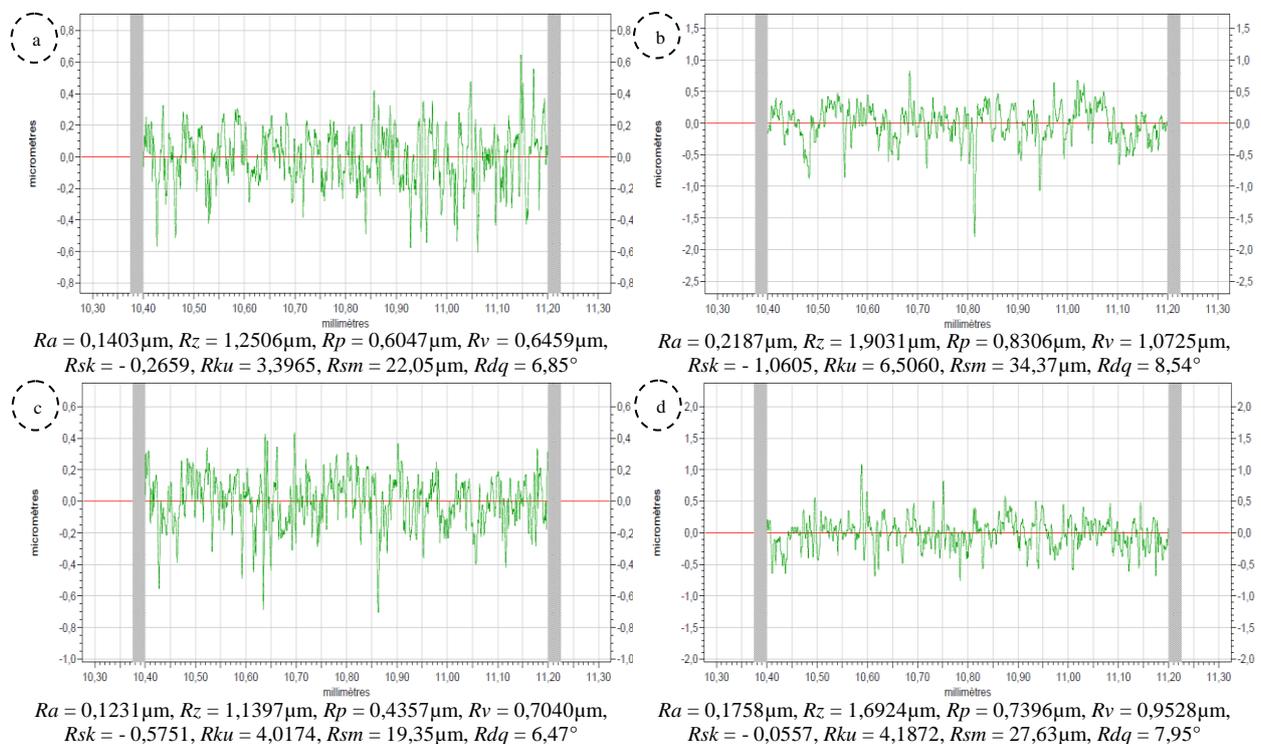


Figure 4.6 : Exemples de profils de rugosité générés par le galet aluminium (G-AL) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

A partir des valeurs mesurées des paramètres Ra , Rz , R_p et R_v de toilage par galet aluminium (G-AL) présentées par la figure 4.6, on peut noter que la rugosité de hauteur obtenue par toilage lubrifié et bande abrasive de grosseur 20 μm (cas n° 3) est inférieure en comparaison avec les autres cas. D'autre part, ces valeurs sont inférieures par rapport aux valeurs de toilage

par galet acier (G-AC). Le taux de réduction de ces paramètres de toilage par bande abrasive 20 µm est résumé par le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Taux de réduction des paramètres de toilage par bande abrasive 20 µm.

	ΔRa [%]	ΔRz [%]	ΔRp [%]	ΔRv [%]
Toilage sec	72,29	66,42	53,70	74,04
Toilage lubrifié	75,69	69,40	68,77	69,77

3.1.2.2. Taux de portance

La figure 4.7 représente l'évolution des paramètres du taux de portance R_{pk} , R_k et R_{vk} pour les quatre cas de toilage par galet en aluminium (G-AL).

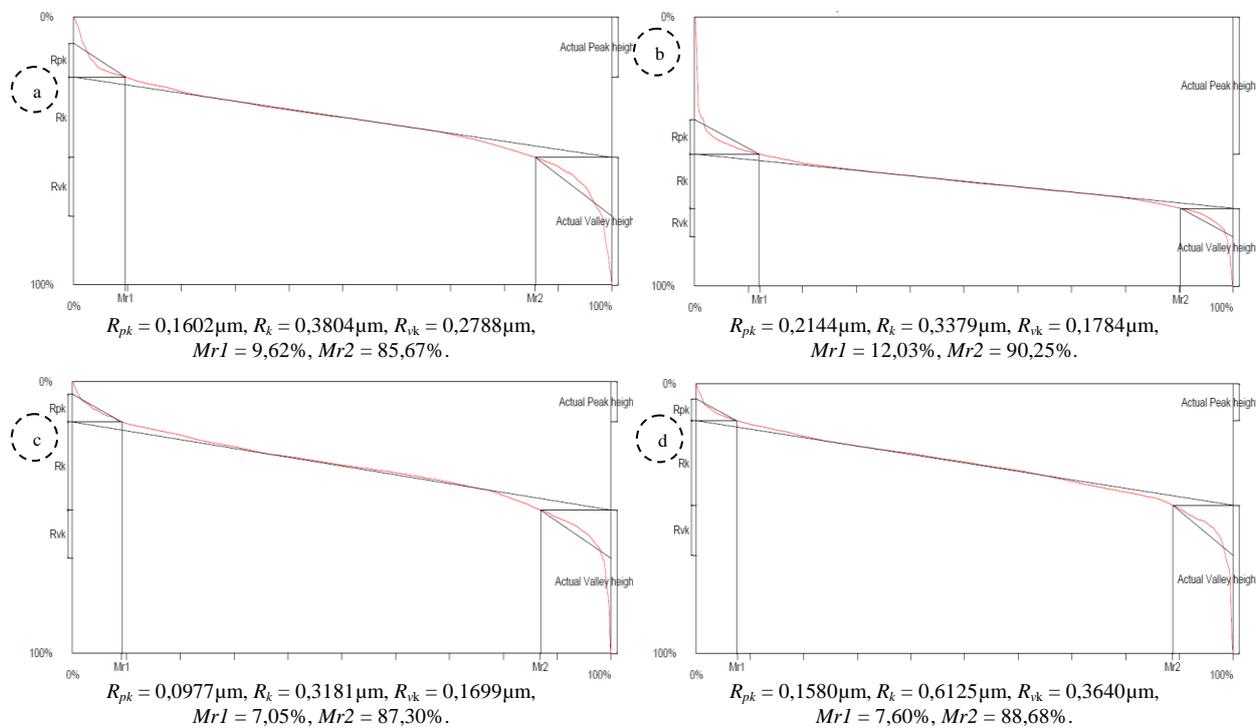


Figure 4.7 : Courbes du taux de portance obtenues par le galet aluminium (G-AL) après :
 (a) Toilage sec par bande 20 µm, (b) Toilage sec par bande 30 µm, (c) Toilage lubrifié par bande 20 µm, (d) Toilage lubrifié par bande 30 µm.

La figure 4.7 présente les formes des courbes d'Abbott-Firestone obtenues pour les opérations de toilage comparées. On remarque que la plus faible valeur de paramètre R_{pk} est réalisée par le toilage lubrifié avec la bande abrasive de taille 20 µm (figure 4.7.c) et la mauvaise valeur est de toilage sec avec la bande abrasive de grosseur 30 µm (figure 4.7.b). Comme montre le tableau 4.5, le taux de réduction des paramètres de la portance (ΔR_{pk} , ΔR_k et ΔR_{vk}) de toilage

lubrifié (cas n° 3) est supérieur que le taux de réduction de toilage sec (cas n° 1). Ces résultats sont en concordance avec les résultats précédents de toilage par le galet en acier (G-AC).

Tableau 4.5 : Taux de réduction des paramètres du taux de portance obtenus par toilage lubrifié et bande de taille des grains 20 μm .

	ΔR_{pk} [%]	ΔR_k [%]	ΔR_{vk} [%]
Toilage sec	53,29	73,60	61,43
Toilage lubrifié	71,52	77,93	76,50

3.1.3. Galet en laiton (G-LA)

3.1.3.1. Rugosité de surface

La figure 4.8 représente l'évolution des profils de surfaces de toilage par le galet en laiton.

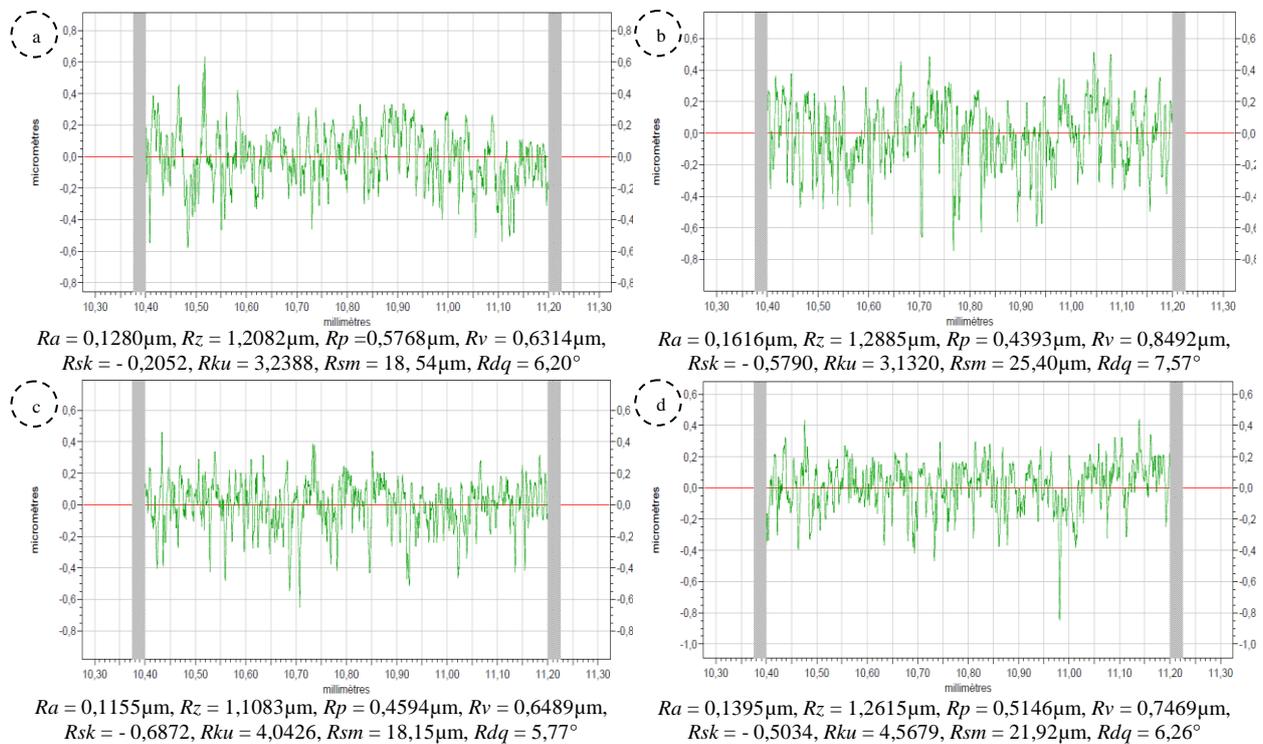


Figure 4.8 : Exemples de profils de rugosité pour le galet laiton (G-LA) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

D'après les quatre profils de rugosité de surface et ses valeurs trouvées, on constate que la meilleure rugosité de surface est de profil 3 (Figure 4.8.c) obtenue par toilage lubrifié et la bande abrasive de grosseur 20 μm (cas n° 3). Dans cette étude de cas, le paramètre Ra égal à 0,1155 μm , le paramètre Rz égal à 1,1083 μm et ses deux composantes Rp égal à 0,4594 μm et Rv égal à 0,6489 μm .

Les valeurs mesurées des paramètres de rugosité de toilage par les trois galets (Acier : G-AC, Aluminium : G-AL et Laiton : G-LA) sont spécifiées dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Données de rugosité générées par trois galets (G-AC, G-AL et G-LA).

			Ra [μm]	Rz [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]	Rsk	Rku	Rsm [μm]	Rdq [$^\circ$]
Galet acier G-AC	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1647	1,6950	0,6603	1,0347	-0,3735	3,7977	25,89	8,15
		Bande 30 μm	0,2310	2,6251	0,8267	1,7984	-0,3759	3,2628	36,31	8,84
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,1521	1,6213	0,6622	0,9592	-0,3836	3,8435	23,90	7,41
		Bande 30 μm	0,1839	1,8493	0,7610	1,0883	-0,3746	3,4034	28,90	8,60
Galet aluminium G-AL	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1403	1,2506	0,6047	0,6459	-0,2659	3,3965	22,05	6,85
		Bande 30 μm	0,2187	1,9031	0,8306	1,0725	-1,0605	6,5060	34,37	8,54
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,1231	1,1397	0,4357	0,7040	-0,5751	4,0174	19,35	6,47
		Bande 30 μm	0,1758	1,6924	0,7396	0,9528	-0,0557	4,1872	27,63	7,95
Galet laiton G-LA	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1280	1,2082	0,5768	0,6314	-0,2052	3,2388	18,54	6,20
		Bande 30 μm	0,1616	1,2885	0,4393	0,8492	-0,5790	3,1320	25,40	7,57
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,1155	1,1083	0,4594	0,6489	-0,6872	4,0426	18,15	5,77
		Bande 30 μm	0,1395	1,2615	0,5146	0,7469	-0,5034	4,5679	21,92	6,26

3.1.3.2. Taux de portance

La figure 4.9 montre l'évolution des courbes du taux de portance et ses paramètres associés de toilage par le galet en laiton (G-LA).

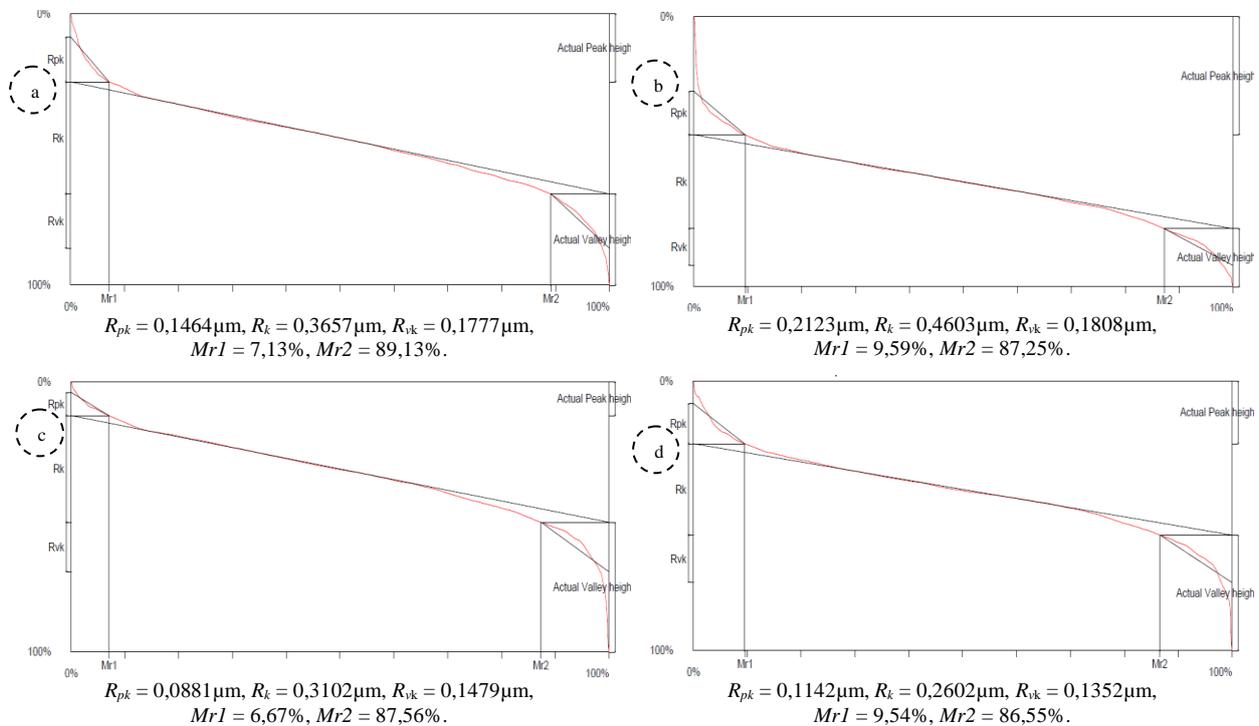


Figure 4.9 : Courbes du taux de portance pour le galet en laiton (G-LA) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

Ces courbes de la figure 4.9 prennent la même allure des courbes de la figure 4.5 et 4.7 ; le toilage lubrifié avec galet laiton et bande de grosseur moyenne des grains abrasifs 20 μm donne des surfaces avec des meilleures propriétés de portance par rapport aux autres cas de toilage.

D'après les figures (4.4 - 4.9) et les deux tableaux (4.6 et 4.7), la texture de surface s'améliore lorsque la dureté des trois galets (G-AC, G-AL et G-LA) diminue. Ceci peut être expliqué par l'effet de la surface de contact entre la pièce toilée et la bande abrasive, car cette surface est réalisée par la déformation élastique du galet sur la pièce usinée (un galet tendre se déforme considérablement et par conséquent génère une surface de contact importante entre l'outil et la pièce ; cette déformation permet aux grains abrasifs de garder un peu plus son intégrité et l'empêche de s'effriter ce qui cause des rayures sur la surface de la pièce). Cela engendre une augmentation du temps de contact entre les grains abrasifs et la pièce finie, ainsi une qualité meilleure de la texture de surface.

Les paramètres du taux de portance mesurés dans cette étude expérimentale sont listés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7: Valeurs mesurées des paramètres du taux de portance de trois galets (G-AC, G-AL et G-LA).

			R_{pk} [μm]	R_k [μm]	R_{vk} [μm]	$Mr1$ [%]	$Mr2$ [%]
Galet acier G-AC	Toilage sec	Bande 20 μm	0,2133	0,4137	0,1667	9,40	91,12
		Bande 30 μm	0,2255	0,6717	0,3157	10,21	92,55
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,1156	0,3929	0,2268	9,12	86,83
		Bande 30 μm	0,1661	0,4968	0,2190	9,37	87,97
Galet aluminium G-AL	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1602	0,3804	0,2788	9,62	85,67
		Bande 30 μm	0,2144	0,3379	0,1784	12,03	90,25
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0977	0,3181	0,1699	7,05	87,30
		Bande 30 μm	0,1580	0,6125	0,3640	7,60	88,68
Galet laiton G-LA	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1464	0,3657	0,1777	7,13	89,13
		Bande 30 μm	0,2123	0,4603	0,1808	9,59	87,25
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0881	0,3102	0,1479	6,67	87,56
		Bande 30 μm	0,1142	0,2602	0,1352	9,54	86,55

D'après l'étude de toilage par les trois galets (G-AC, G-AL et G-LA) et les conditions d'usinage lors des expériences (conditions de tournage dur et de toilage), on peut conclure que la bande abrasive de grosseur moyenne des grains 20 μm est efficace (donne une bonne qualité de texture de surface) pour les deux cas de toilage (sec ou lubrifié) que la bande abrasive de taille de grains 30 μm . Contrairement aux études précédentes [Mez09a, Mez09b], ayant trouvé que la bande abrasive de taille 30 μm permet de donner une meilleure qualité de

surface par rapport aux autres bandes de taille de grains inférieure ou supérieure à cette taille. D'une part, cette différence peut être due à la structure de la bande (type, forme et orientation des grains) ou d'autre part, aux conditions de travail (type et dureté de matériau toilé et leurs conditions d'usinage; de tournage dur ou de toilage).

3.1.4. Comparaison de la texture de surface générée par les galets métalliques et alliages métalliques

Dans cette comparaison, on prend le troisième cas c'est-à-dire le toilage lubrifié avec la bande abrasive de grosseur des grains abrasifs $20\ \mu\text{m}$ et on regroupe les paramètres de rugosité de surface en 4 groupes pour faciliter l'analyse, la comparaison et la discussion des résultats.

3.1.4.1. Paramètres de hauteur

Les paramètres de rugosité de surface appartenant aux paramètres de hauteur Ra , Rz et ses deux composants Rp et Rv sont présentés dans la figure 4.10.

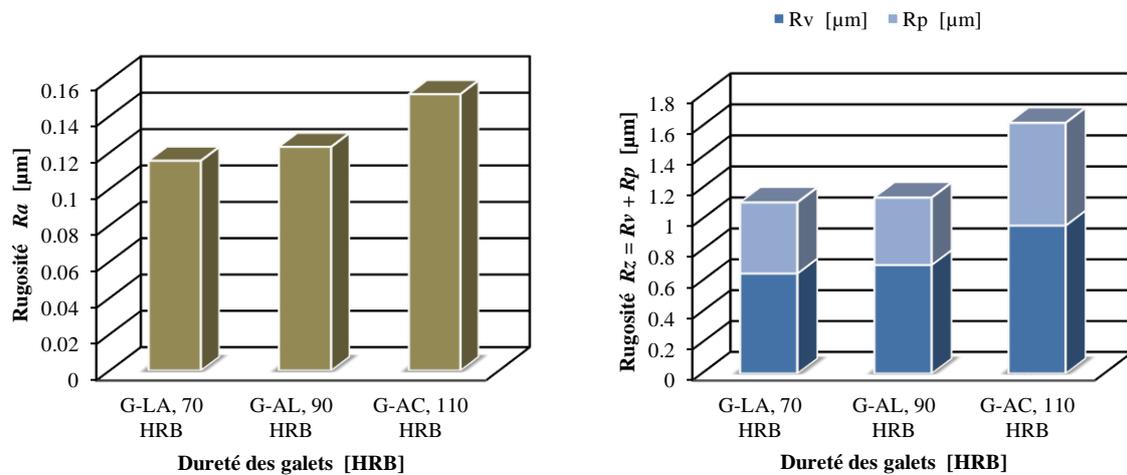


Figure 4.10 : Comparaison des paramètres de rugosité Ra et Rz de toilage lubrifié par la bande abrasive $20\ \mu\text{m}$ et trois galets métalliques et alliages métalliques (acier (G-AC), aluminium (G-AL) et laiton (G-LA)).

Les différences entre les valeurs Ra de la figure 4.10 sont assez considérables. Elles augmentent lorsque la dureté des galets diminue, cette différence est d'environ $0,036\ \mu\text{m}$ entre G-AC et G-LA. La valeur minimale de paramètre Ra ($Ra = 0,1155\ \mu\text{m}$) est observée dans le cas du toilage lubrifié par la bande abrasive $20\ \mu\text{m}$ et le galet en laiton (G-LA).

Il est évident à partir des diagrammes à barres (figure 4.10) que la hauteur totale Rz augmente lorsque la dureté des galets augmente et la participation des vallées dans la hauteur totale est plutôt grand que la participation des pics. Le tableau 4.8 résume le taux de participation des paramètres Rp et Rv pour chaque galet de toilage lubrifié par bande abrasive 20 μm .

Tableau 4.8 : Taux de participation des paramètres Rp et Rv dans la hauteur totale Rz pour les trois galets de toilage lubrifié et bande abrasive de taille 20 μm .

	Rp [%]	Rv [%]
G-AC	40,84	59,16
G-AL	38,23	61,77
G-LA	41,45	58,55

3.1.4.2. Paramètres de distribution d'amplitude

La figure 4.11 montre la parcelle d'aplatissement Rku versus l'asymétrie Rsk pour les trois galets de toilage lubrifié et de l'outil de coupe de grosseur moyenne des grains 20 μm .

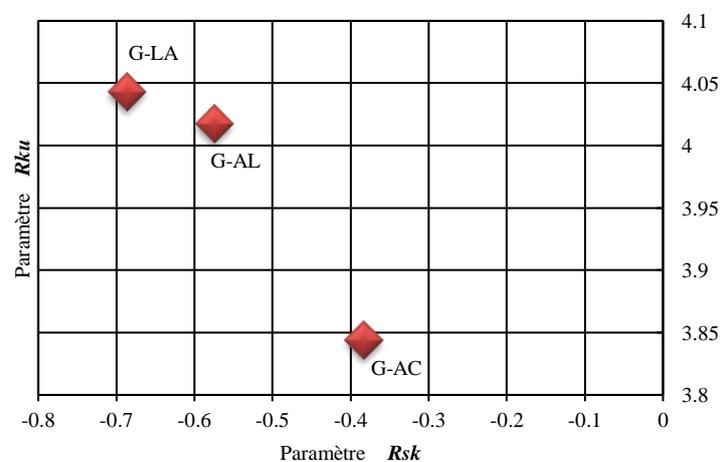


Figure 4.11 : Skewness Rsk versus kurtosis Rku pour les trois galets de toilage lubrifié par la bande abrasive 20 μm .

Comme montre la figure 4.11, les valeurs négatives de paramètre skewness Rsk correspondent aux valeurs de kurtosis Rku supérieures ($Rsk = -0,6872$ versus $Rku = 4,0426$ pour le galet en laiton (G-LA)). De plus, il est évident que le toilage génère des profils de surfaces avec des valeurs négatives de skewness ($Rsk < 0$), ce qui améliore les propriétés de roulement des surfaces [Grz12, Grz08].

3.1.4.3. Paramètres de l'espacement et hybrides

La figure 4.12 illustre les valeurs moyennes des paramètres d'espacement et hybrides générées par le toilage lubrifié avec la bande abrasive de taille des grains $20\ \mu\text{m}$ et trois galets métalliques et alliages métalliques.

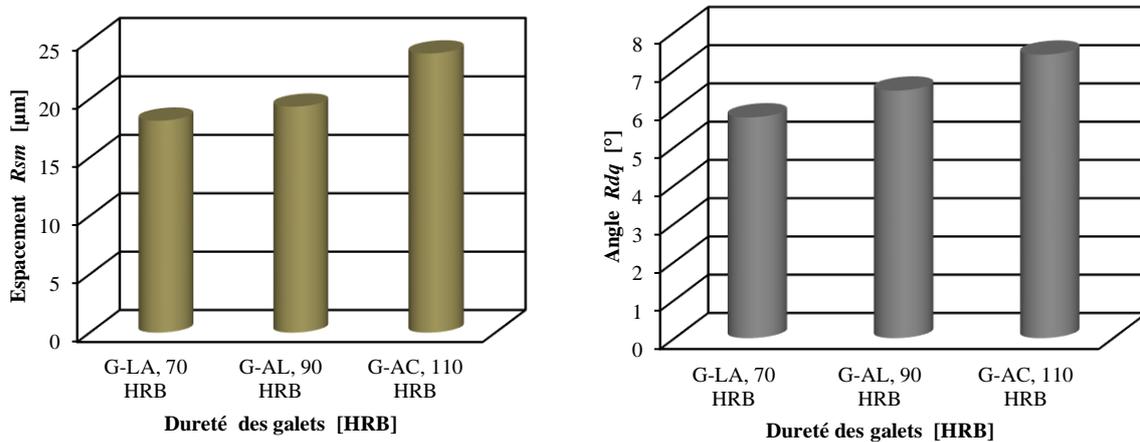


Figure 4.12 : Valeurs moyennes de toilage lubrifié générées par trois galets et la bande abrasive de taille des grains $20\ \mu\text{m}$.

Il est clair à partir des figures (4.4, 4.6 et 4.8) et des barres de la figure 4.12 que le processus de toilage diminue l'espace entre les irrégularités (R_{sm}), ainsi que leur pente moyenne quadratique du profil (R_{dq}). L'espacement la plus faible est obtenu par toilage lubrifié avec le galet en laiton (G-LA) ($R_{sm} = 18,15\ \mu\text{m}$) et la plus grande valeur est de galet acier (G-AC) ($R_{sm} = 23,9\ \mu\text{m}$). D'autre part, la valeur de R_{dq} de toilage avec le galet en acier (G-AC) est d'environ $7,41^\circ$ (grande valeur), ce qui correspond à une surface rugueuse, et sa valeur de toilage avec galet laiton (G-LA) est égale à $5,77^\circ$ (moyenne valeur), ce qui correspond à une surface moins rugueuse.

3.1.4.4. Paramètres du taux de portance

Les changements des paramètres du taux de portance R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$ produits par le processus de toilage lubrifié avec la bande abrasive de taille $20\ \mu\text{m}$ et trois galets précédentes sont successivement présentés dans la figure 4.13 et 4.14.

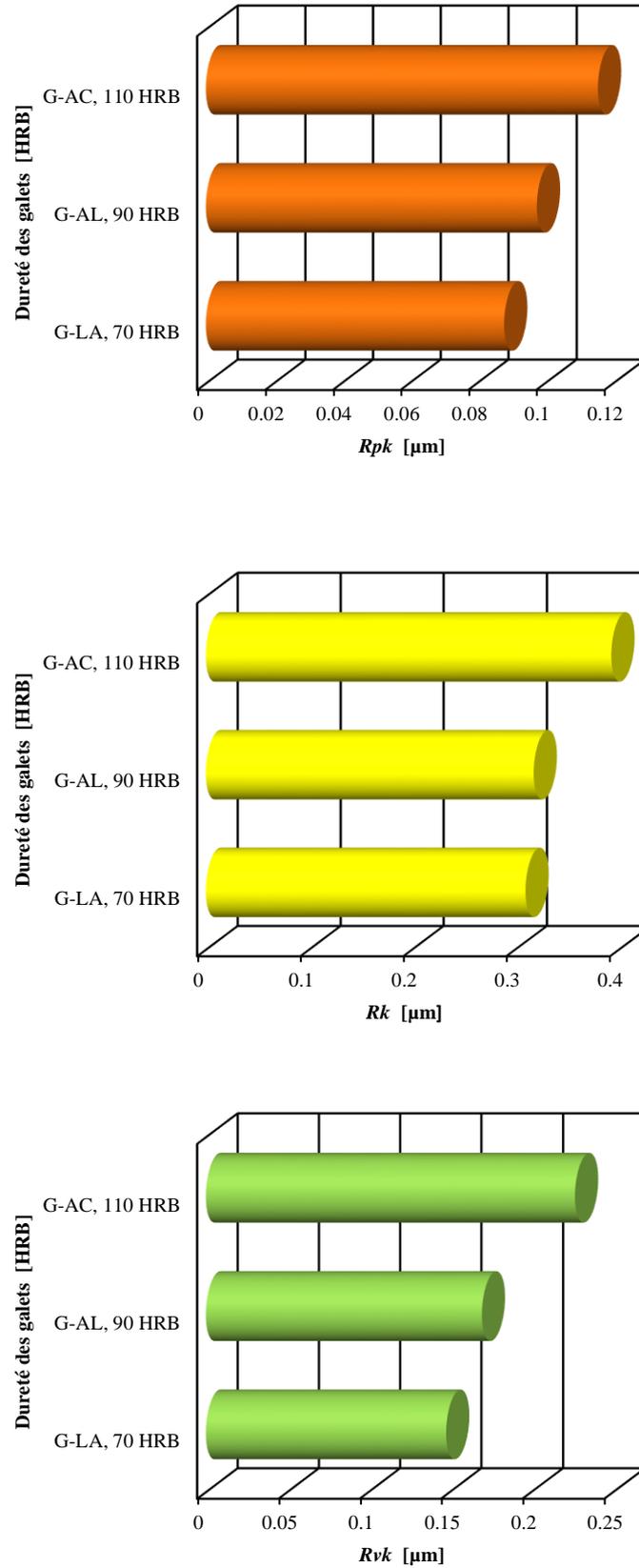


Figure 4.13 : Paramètres du taux de portance R_{pk} , R_k et R_{vk} de trois galets métalliques et alliages métalliques (acier (G-AC), aluminium (G-AL) et laiton (G-LA)).

Sur la base des diagrammes de barre de la figure 4.13 et 4.14, le toileage par galet laiton (G-LA) fournit des valeurs minimales de la hauteur des pics saillants R_{pk} , ainsi, de la partie de matériau correspondant à la position limite supérieure du profil de noyau de rugosité $Mr1$ et des valeurs maximales de la partie de matériau correspondant à la position limite inférieure du profil de noyau de rugosité $Mr2$, ce qui permet de diminuer la portion de surface qui va s'user lors de la phase rodage. D'autre part, concernant le noyau de rugosité (zone de fonctionnement) représenté par la profondeur de rugosité du cœur R_k , la valeur minimale est du galet en laiton (G-LA), mais il est proche de la valeur obtenue par le galet en aluminium (G-AL), ce qui favorise de diminuer la consommation d'huile. En outre, la profondeur réduite des creux R_{vk} responsable de la capacité de rétention de l'huile dans la surface est d'environ $0,15 \mu\text{m}$ ($0,1479 \mu\text{m}$ de galet en laiton (G-LA) par rapport au $0,1699 \mu\text{m}$ de galet en aluminium (G-AL) et $0,2268 \mu\text{m}$ de galet en acier (G-AC)). Ces résultats sont en concordance avec les résultats de toileage en deux passes rapporté par le chercheur Grzesik et al [Grz07].

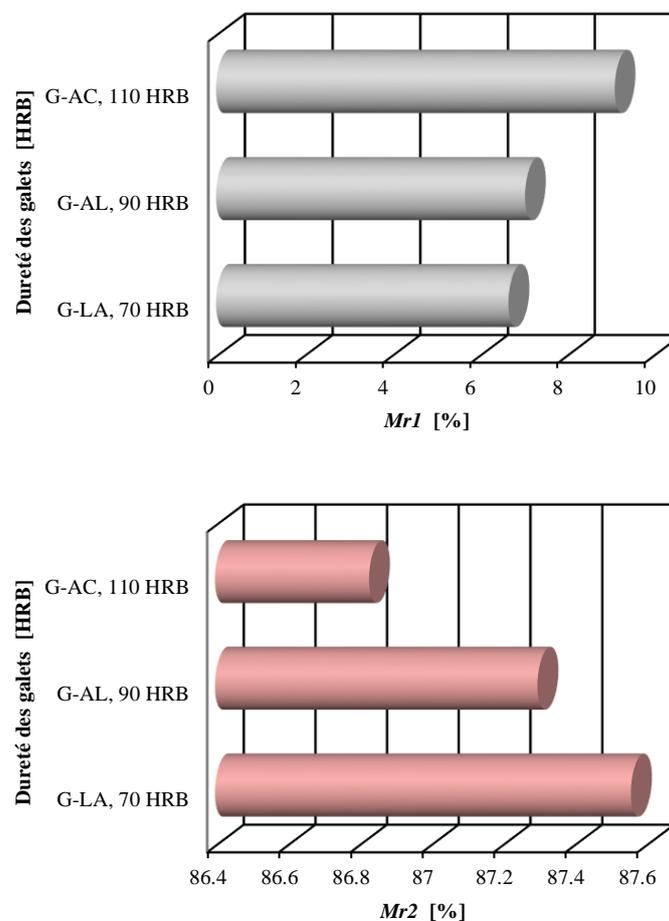


Figure 4.14 : Paramètres du taux de portance $Mr1$ et $Mr2$ de trois galets métalliques et alliages métalliques (acier (G-AC), aluminium (G-AL) et laiton (G-LA)).

D'après cette étude de l'influence de trois galets métalliques et alliages métalliques (acier (G-AC), aluminium (G-AL) et laiton (G-LA)) sur la texture de surface, on conclue que le toilage lubrifié (*MQL*) avec le galet en laiton (G-LA) et la bande abrasive de taille de grains abrasifs 20 μm produit une meilleure texture de surface (réduit la rugosité et produit des surfaces avec de meilleures propriétés de portance) par rapport au toilage de même conditions de lubrification (*MQL*) par les autres galets (acier (G-AC) et aluminium (G-AL)) ou par rapport au toilage sec avec les trois galets et la bande abrasive de taille des grains 20 μm ou la bande de grosseur des grains 30 μm .

3.2. Galets polymères

3.2.1. Galet en polystyrène (G-PS)

3.2.1.1. Rugosité de surface

Les variations des profils de rugosité et ses paramètres obtenus par toilage sec ou lubrifié et le galet en polystyrène (G-PS) sont représentés par la figure 4.15.

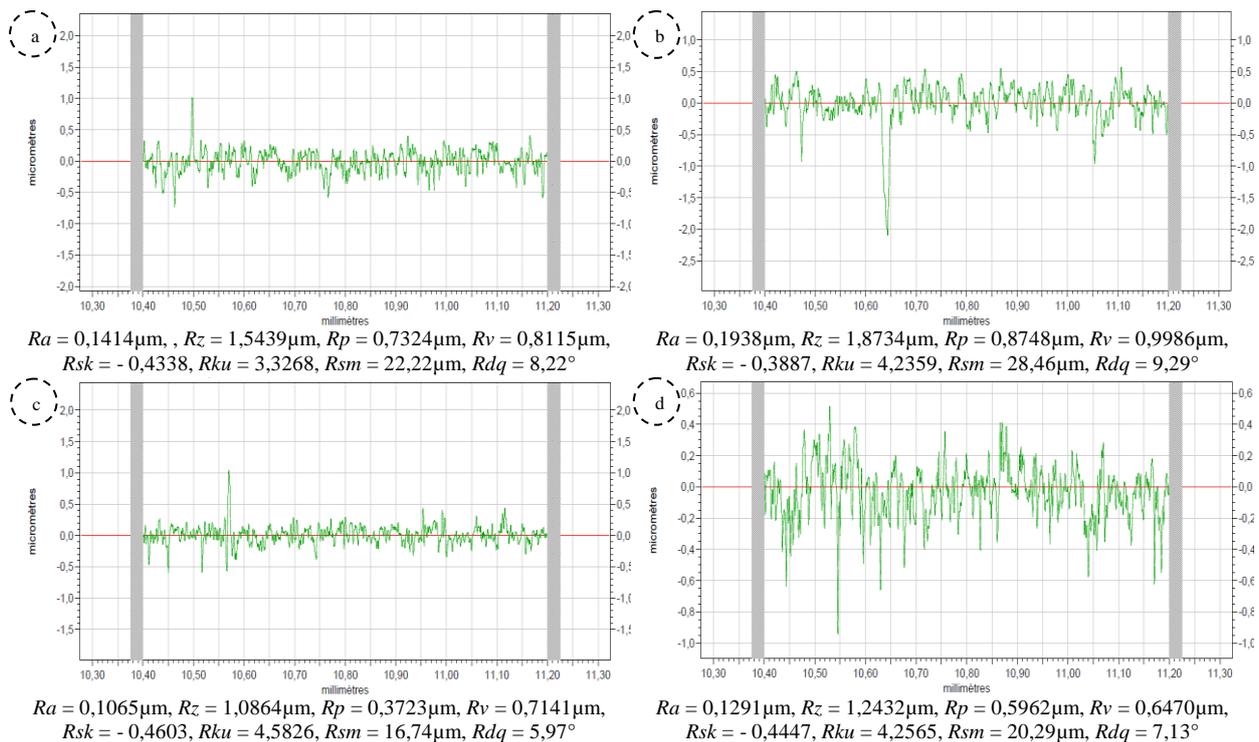


Figure 4.15 : Exemples de profils de rugosité pour le galet polystyrène (G-PS) après :

- (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

3.2.1.2. Taux de portance

L'évolution de profil du taux de portance influencé par le toilage en galet polystyrène (G-PS) est illustrée par la figure 4.16.

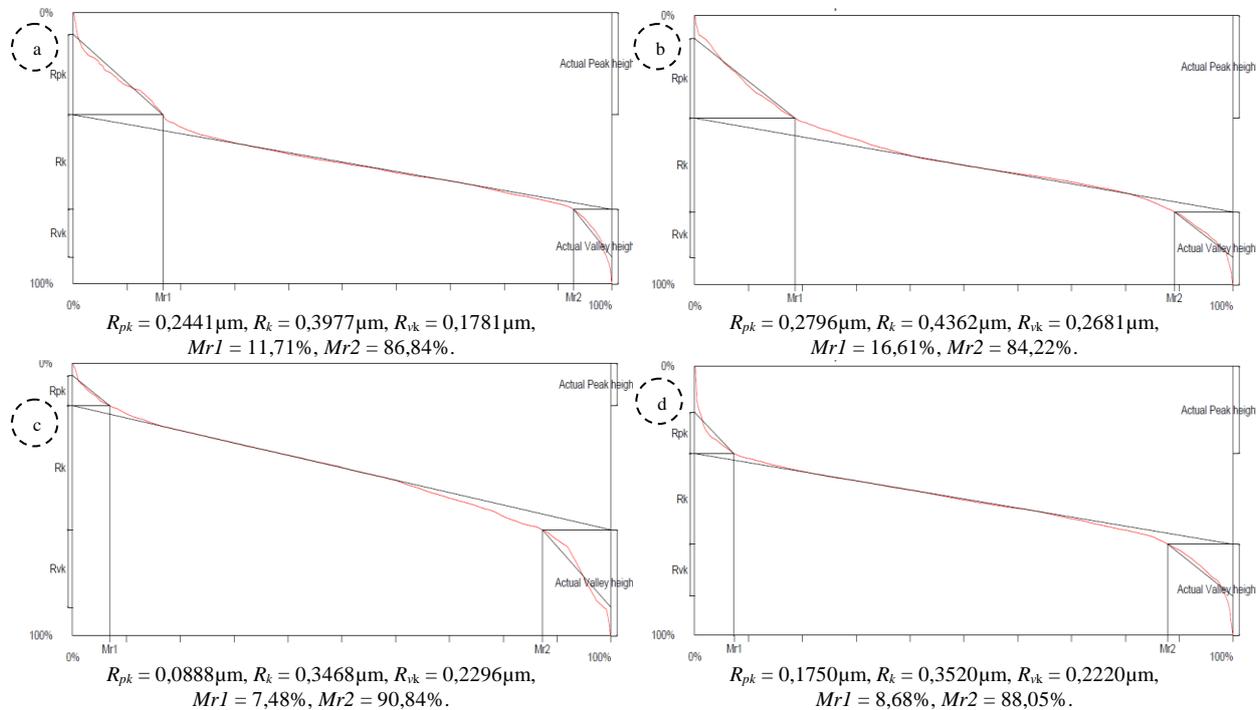


Figure 4.16 : Courbes du taux de portance pour le galet polystyrène (G-PS) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

Les figures (4.15 - 4.16) mettent respectivement en évidence la variation des paramètres de texture de surface (rugosité et taux de portance) produit par le galet en polystyrène (G-PS) et les deux bandes abrasives utilisées. On remarque une petite différence entre les valeurs obtenues par ce galet et les valeurs des galets métalliques ou alliages métalliques (G-AC, G-AL et G-LA). Ainsi, nous remarquons que les profils de rugosité et les courbes du taux de portance ont presque les mêmes allures, ce qui peut être expliqué par la grande dureté de ce galet (égale à 85 Shore D) en comparaison avec les galets métalliques ou alliages métalliques.

3.2.2. Galet en polyoxyméthylène (polyacétal) (G-POM C)

3.2.2.1. Rugosité de surface

Les variations des profils produits par les quatre cas de toilage (sec ou lubrifié, par bande de taille des grains 20 μm ou de taille 30 μm) et le galet en polyoxyméthylène (POM C) sont illustrées dans la figure 4.17. Celle-ci montre que le toilage améliore l'état de surface obtenue

par tournage dur et le toilage lubrifié par bande abrasive de grosseur des grains 60 μm . Toutefois, l'analyse des valeurs des paramètres de rugosité permet de montrer une légère réduction de la rugosité pour les deux cas de toilage sans lubrification (cas n°1 et cas n°2) et une réduction importante de ces paramètres pour les deux cas de toilage avec lubrification (cas n°3 et cas n°4). De plus, les résultats de ces paramètres indiquent que la qualité de surface toilée par la bande abrasive de grosseur des grains abrasifs 20 μm est supérieure à celle de la bande abrasive de grosseur des grains abrasifs 30 μm .

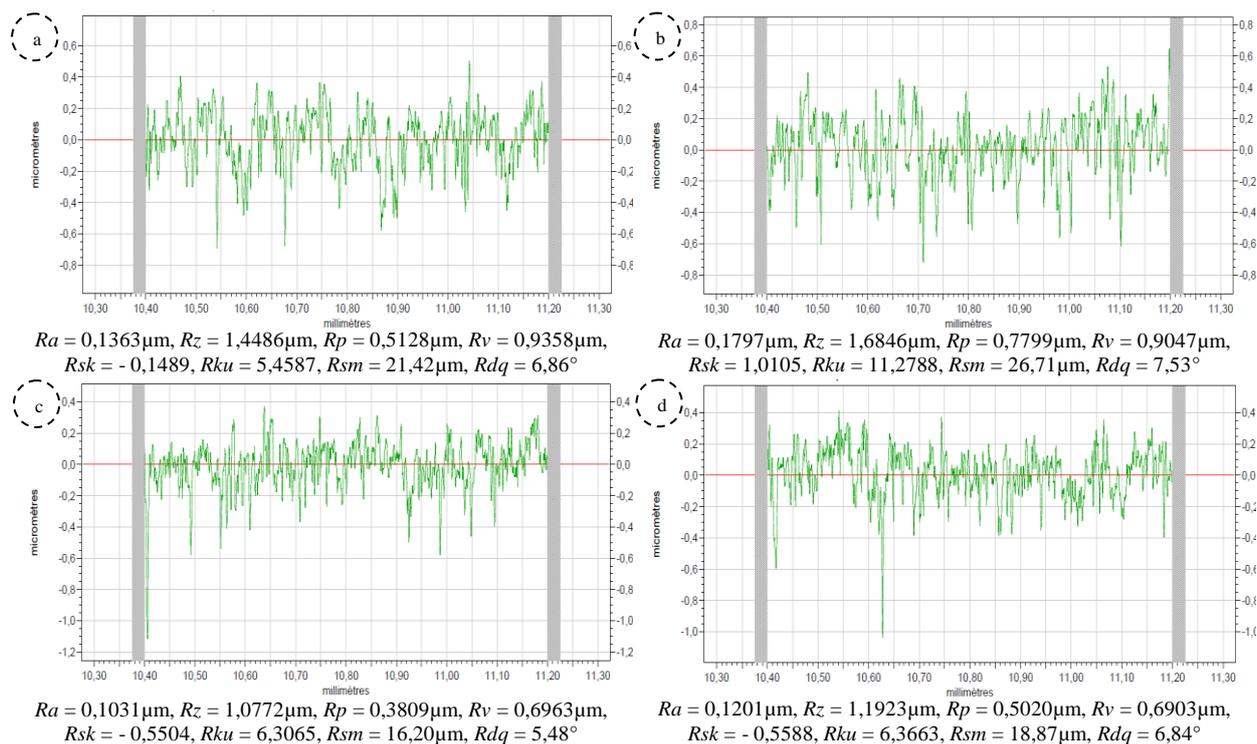


Figure 4.17 : Exemples de profils de rugosité pour le galet polyoxyméthylène (POM C) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

3.2.2.2. Taux de portance

La figure 4.18 représente les quatre cas de la courbe d'Abbott-Firestone du profil de rugosité de la pièce toilée par deux bandes abrasives 20 μm ou 30 μm . A partir de cette figure, on note que les meilleurs résultats des paramètres de cette courbe sont obtenus par le troisième cas de super finition (cas n°3): R_{pk} faible, R_k faible et R_{vk} élevé. Ce qui est conforme avec l'objectif de notre recherche c'est-à-dire diminuer le temps de rodage, diminuer l'usure, augmenter la rétention de lubrifiant nécessaire au bon fonctionnement et ceci afin d'augmenter la durée de vie du moteur.

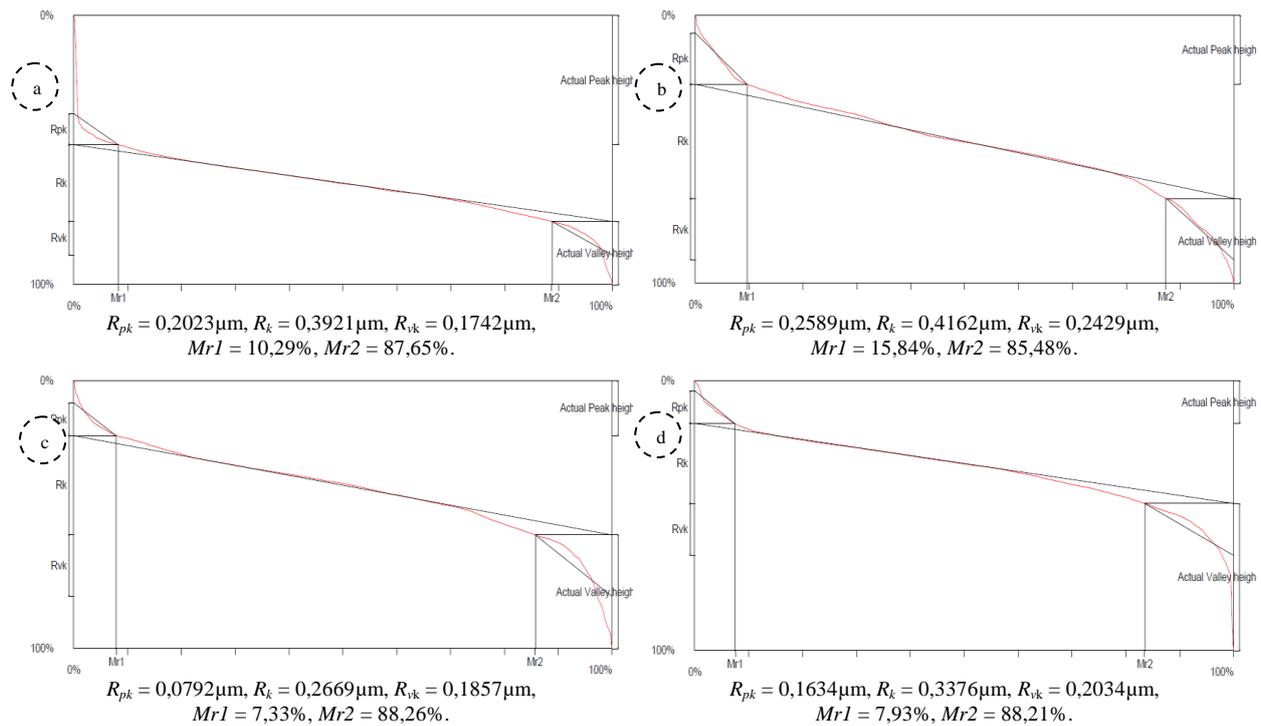


Figure 4.18 : Courbes du taux de portance pour le galet polyacétal (POM C) après :
 (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

3.2.3. Galet en polyamide (G-PA 6)

3.2.3.1. Rugosité de surface

La figure 4.19 illustre des courbes typiques de l'évolution du profil de rugosité générées par le galet polyamide (G-PA 6) pendant toilage d'acier dur dans les quatre cas. La technique de toilage par galet polyamide (G-PA 6) présente une qualité de surface meilleure pour les quatre cas étudiés. Les valeurs de rugosité présentées dans la figure 4.19 atteignent le minimum $Ra = 0,0782 \mu\text{m}$, $Rz = 0,7630 \mu\text{m}$ et ses deux composants $Rp = 0,3614 \mu\text{m}$, $Rv = 0,4016 \mu\text{m}$ pour le troisième cas de toilage (cas n°3). Dans cette étude, on a trouvé le paramètre Rz inférieur à $1 \mu\text{m}$, ce qui permet de classer le procédé de toilage par le galet en polyamide (G-PA 6) parmi les procédés d'usinage de haute précision suivant le critère de qualité de surface ($Rz < 1 \mu\text{m}$) [Grz07, Grz14]. En ce qui concerne les paramètres spatiaux et hybrides étudiés dans ce cas (cas n° 3), la valeur de la largeur moyenne des éléments du profil trouvée est $Rsm = 10,72 \mu\text{m}$ et la valeur de pente moyenne quadratique du profil est $Rdq = 2,99^\circ$. Cette dernière est faible, ce qui correspond à une surface plutôt lisse que rugueuse. Par comparaison avec d'autres résultats, nous pouvons constater qu'elles sont faibles par rapport aux valeurs obtenues par Grzesik et al. [Grz08] après deux passages de toilage par deux bandes abrasives de taille des grains (30 μm + 9 μm) et galet en polymère de dureté 70° Sh ($Rsm = 20,5 \mu\text{m}$, $Rdq = 3,9^\circ$).

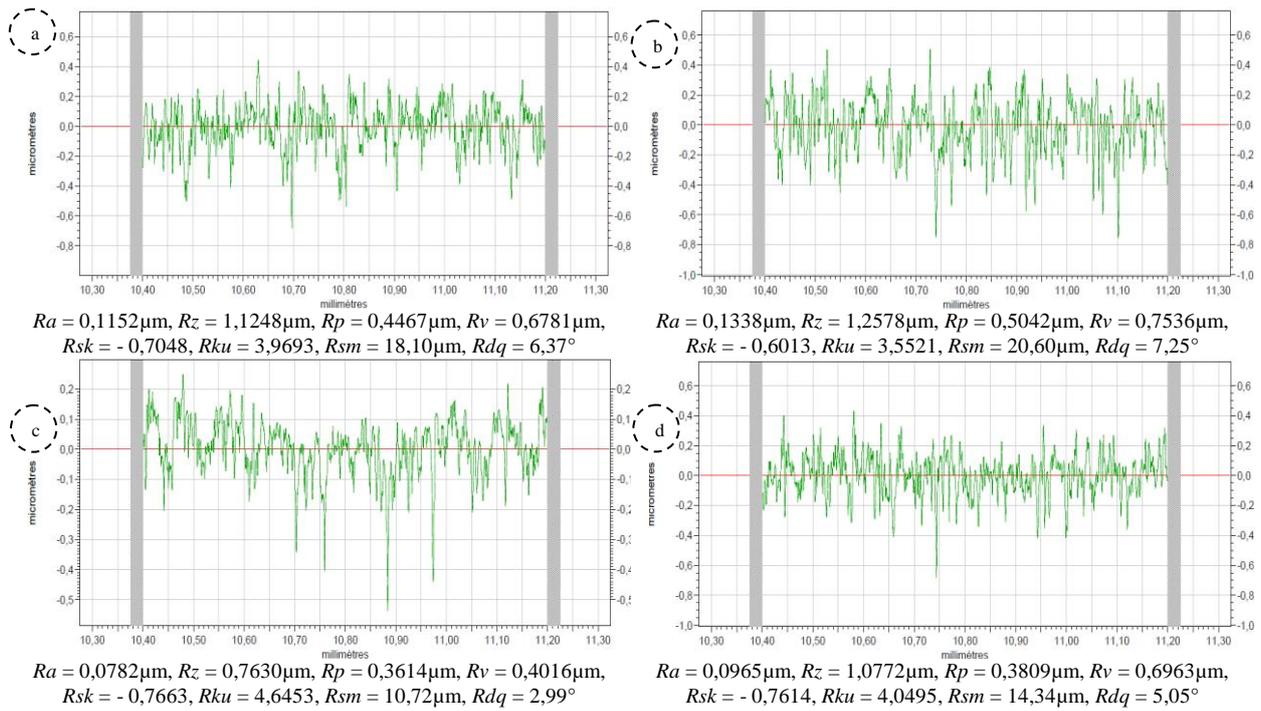


Figure 4.19 : Exemples des profils de rugosité produits par le galet polyamide (G-PA 6)

après : (a) Toilage sec par bande 20 μm, (b) Toilage sec par bande 30 μm, (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm, (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm.

3.2.3.2. Taux de portance

La figure 4.20 montre les courbes d'Abbott-Firestone obtenues par galet polyamide (G-PA 6).

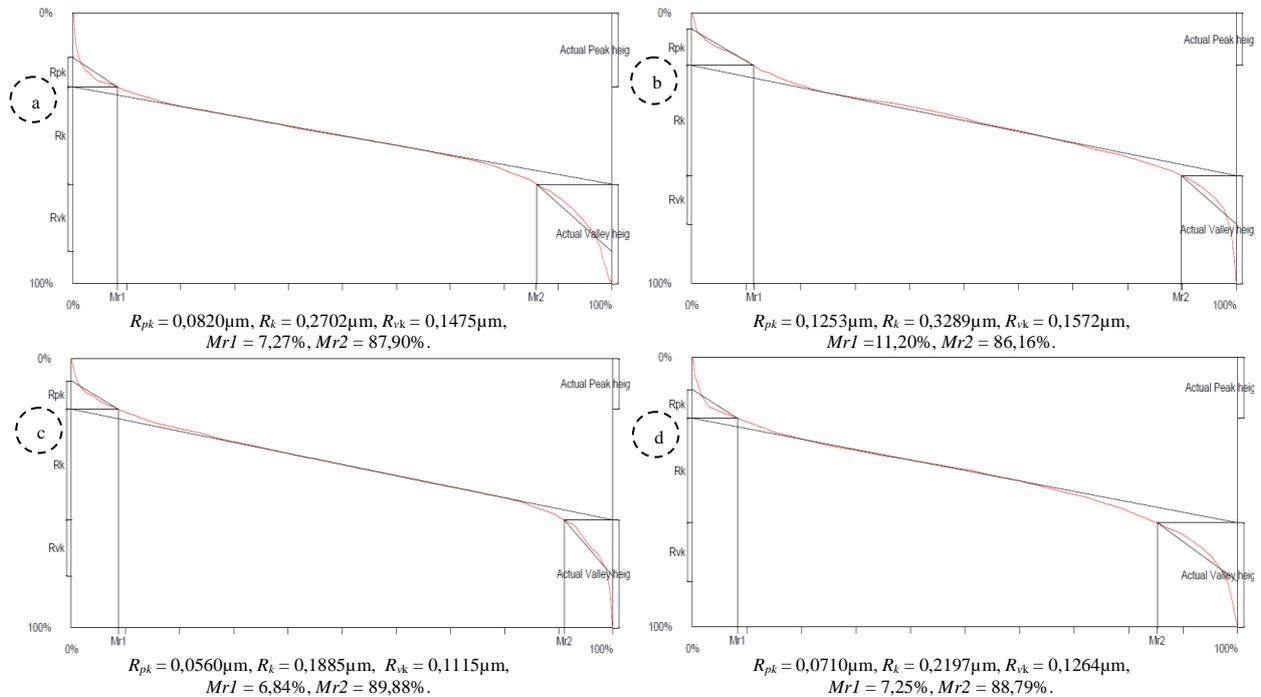


Figure 4.20 : Courbes du taux de portance générées par le galet polyamide (G-PA 6) après :

(a) Toilage sec par bande 20 μm, (b) Toilage sec par bande 30 μm, (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm, (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm.

Cette figure 4.20 montre que la pente équivalente de toilage lubrifié et la bande abrasive de taille 20 μm (cas n°3) est plus faible par rapport aux autres cas. La valeur de R_{pk} final est d'environ 84 % inférieure à la valeur initiale obtenue par tournage dur et toilage lubrifié avec la bande abrasive 60 μm . La valeur de R_k final est d'environ 87 % inférieure à la valeur initiale. Concernant le troisième paramètre du taux de portance, R_{vk} final est d'environ 85 % inférieure à la valeur initiale. Ce qui confirme que la surface toilée ayant une forme plateau presque parfait. Par conséquent, ce type de surface est nécessaire pour les bonnes propriétés de portance comme indiqué Khellouki et al [Khe07b].

3.2.4. Galet en polypropylène-copolymère (G-PPC)

3.2.4.1. Rugosité de surface

Les profils de rugosité obtenus à l'issue de l'opération de toilage en galet polypropylène-copolymère (G-PPC) sont donnés par la figure 4.21.

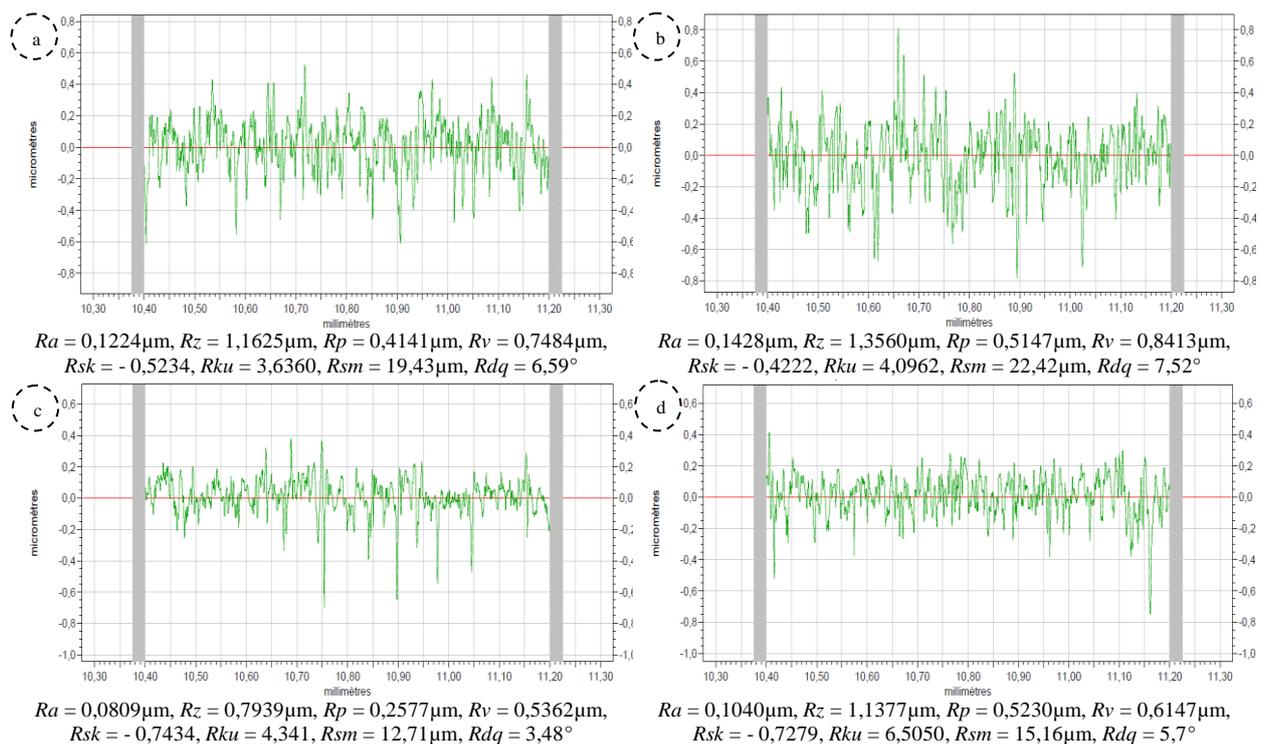


Figure 4.21 : Exemples des profils de rugosité pour le galet polypropylène-copolymère (G-PPC) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

La figure 4.22 montre une comparaison des paramètres de hauteur obtenus par le galet en polyamide (G-PA 6) et le galet en polypropylène-copolymère (G-PPC).

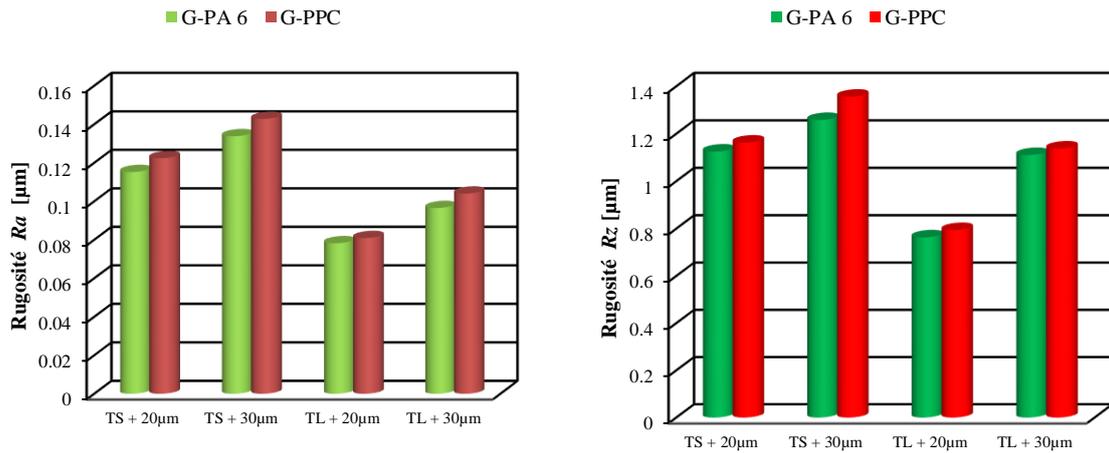


Figure 4.22 : Comparaison des paramètres de hauteur générés par G-PA 6 et G-PPC :
 TS : Toilage sec, TL : Toilage lubrifié, 20 et 30 µm : Taille des grains abrasifs.

3.2.4.2. Taux de portance

La figure 4.23 montre les formes caractéristiques des profils du taux de portance pour l'opération de toilage en galet polypropylène-copolymère (G-PPC) et deux bandes abrasives de grosseur des grains 20 µm ou 30 µm.

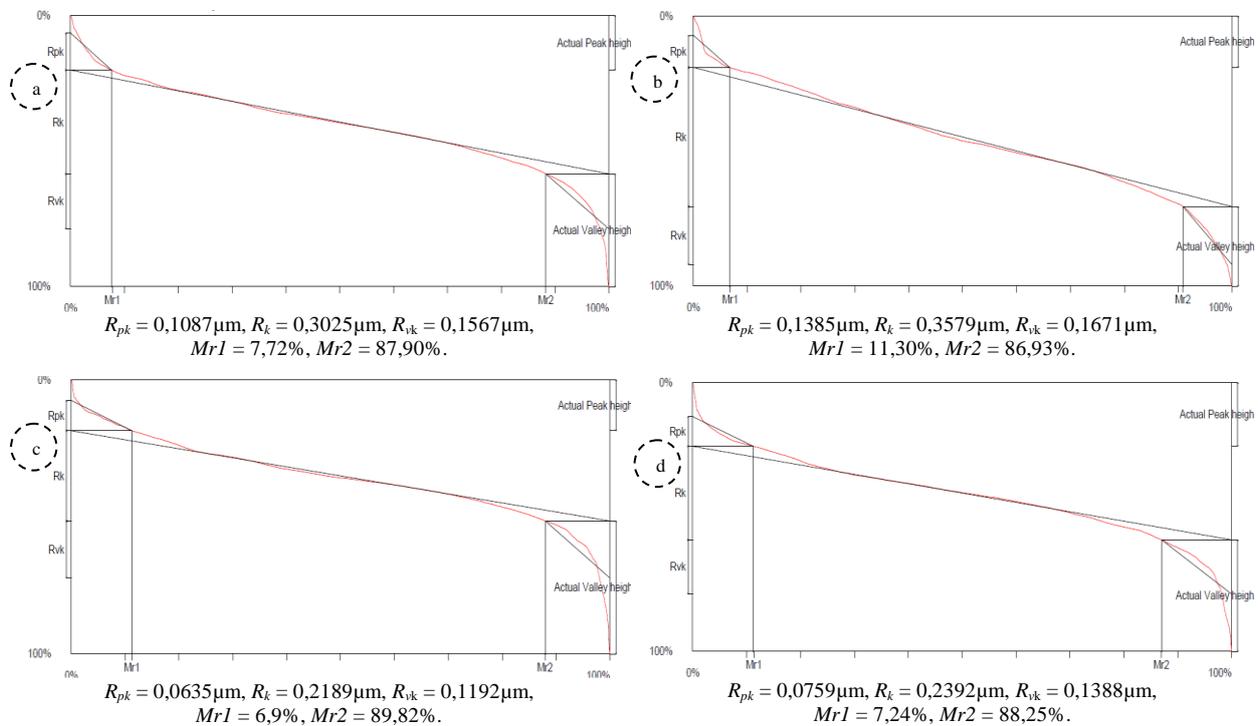


Figure 4.23 : Courbes du taux de portance pour le galet polypropylène-copolymère (G-PPC) après : (a) Toilage sec par bande 20 µm, (b) Toilage sec par bande 30 µm, (c) Toilage lubrifié par bande 20 µm, (d) Toilage lubrifié par bande 30 µm.

En effet, les valeurs de rugosité présentées dans les figures (4.19, 4.21 et 4.22) et du taux de portance présentées dans les figures (4.20, 4.23 et 4.24) semblent presque égaux pour les deux galets de contact (PA 6 et PPC) avec plus de fiabilité de galet PA 6 et ceci notamment pour le toilage lubrifié et la bande abrasive de grosseur des grains 20 μm .

Dans cette étude de cas (cas n°3), les paramètres obtenus sont : $R_a = 0,0782 \mu\text{m}$, $R_z = 0,7630 \mu\text{m}$ pour le galet PA 6 et $R_a = 0,0809 \mu\text{m}$, $R_z = 0,7939 \mu\text{m}$ pour le galet PPC. Concernant les valeurs du taux de portance : $R_{pk} = 0,0560 \mu\text{m}$, $R_k = 0,1885 \mu\text{m}$, $R_{vk} = 0,1115 \mu\text{m}$ pour le galet PA 6 et $R_{pk} = 0,0635 \mu\text{m}$, $R_k = 0,2189 \mu\text{m}$, $R_{vk} = 0,1192 \mu\text{m}$ pour le galet PPC. La corrélation entre les paramètres R_{pk} , R_k , et R_{vk} explique un faible changement des valeurs entre les deux galets (le changement d'un paramètre par la modification de la surface usinée implique directement le changement des autres paramètres).

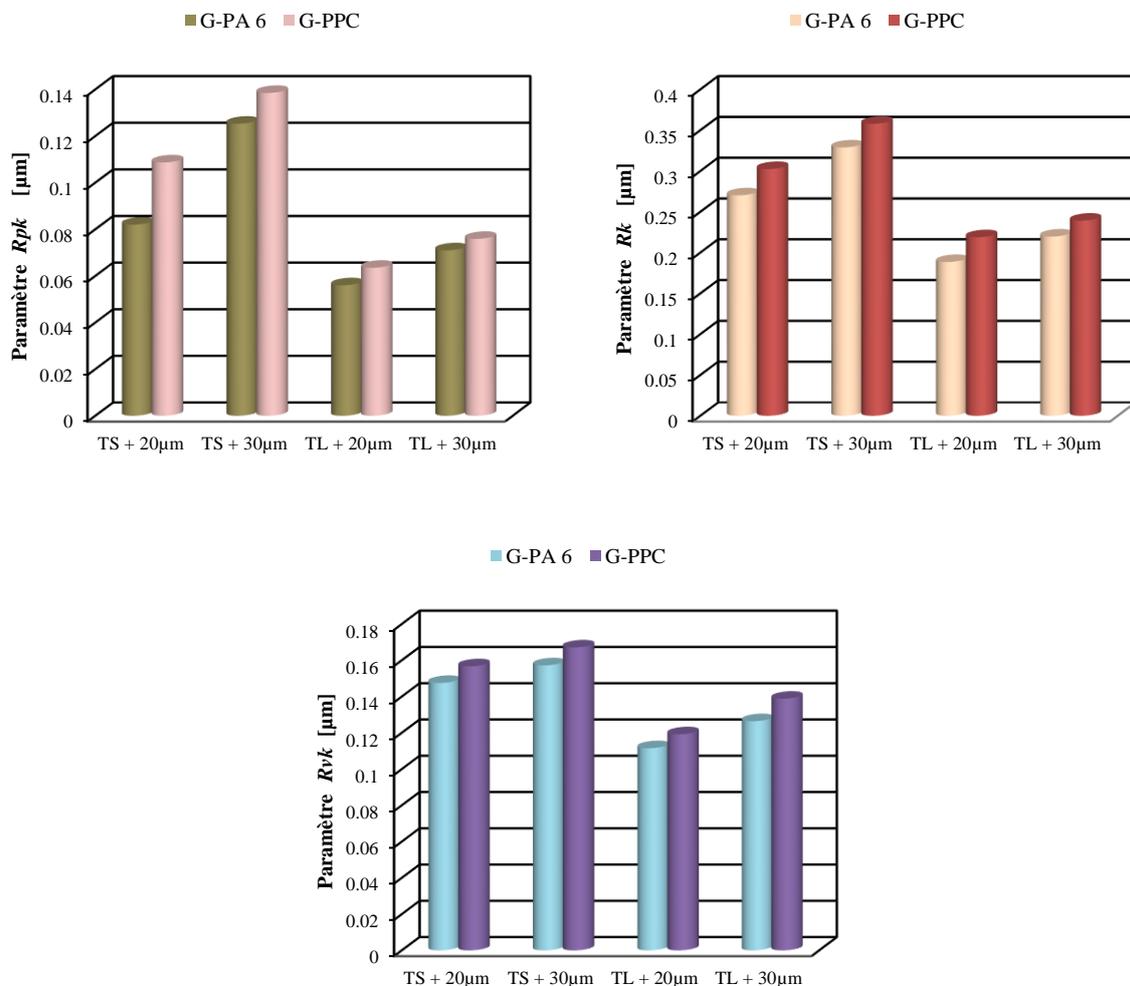


Figure 4.24 : Comparaison des paramètres fonctionnels générés par G-PA 6 et G-PPC :

TS : Toilage sec, TL : Toilage lubrifié, 20 et 30 μm : Taille des grains abrasifs.

3.2.5. Galet en polypropylène-homopolymère (G-PPH)

3.2.5.1. Rugosité de surface

La figure 4.25 montrent certains profils de rugosité de surface toilée par galet polypropylène-copolymère (G-PPH) de dureté 68 Shore D.

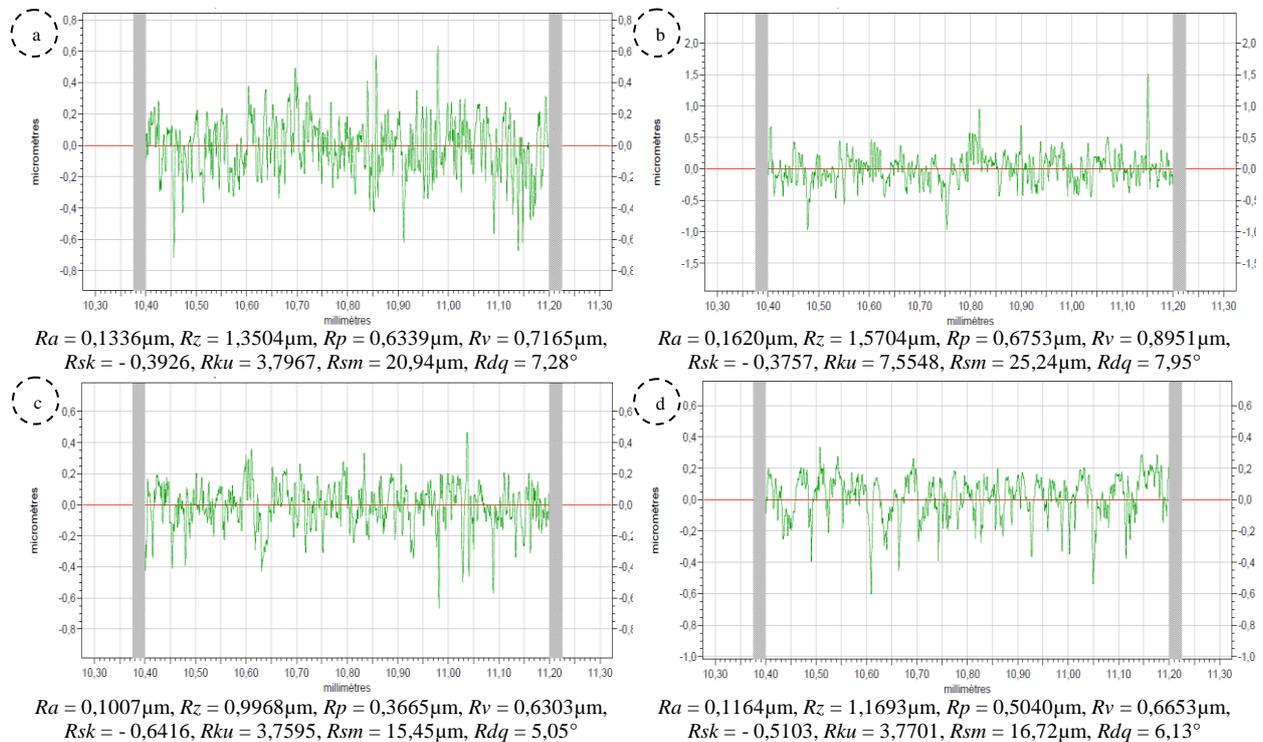


Figure 4.25 : Exemples des profils de rugosité pour le galet polypropylène-homopolymère (G-PPH) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm, (b) Toilage sec par bande 30 μm, (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm, (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm.

La figure 4.26 compare les paramètres de toilage Ra et Rz générés par les galets PPC-PPH.

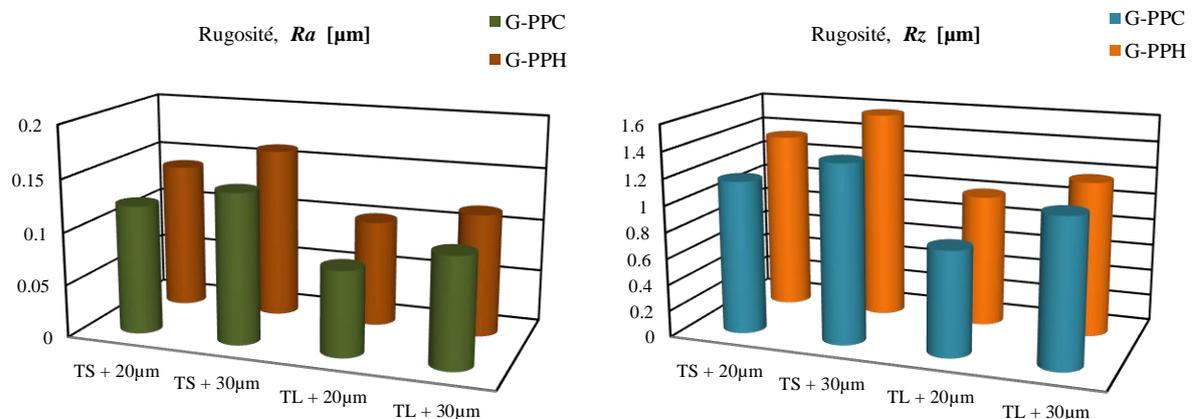


Figure 4.26 : Comparaison des paramètres Ra et Rz générés par les galets PPC-PPH.

3.2.5.2. Taux de portance

La figure 4.27 montre les changements ultérieurs enregistrés sur les courbes du taux de portance des surfaces usinées par toilage sec et lubrifié.

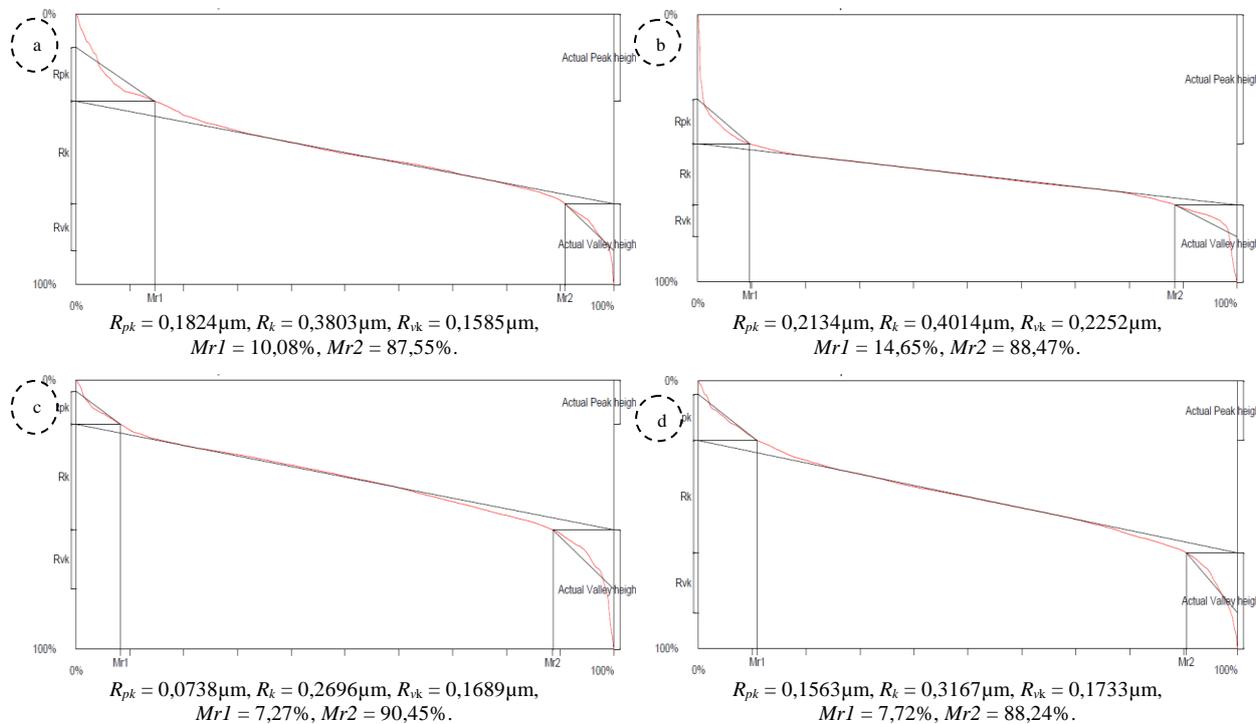


Figure 4.27 : Courbes du taux de portance pour le galet polypropylène-homopolymère (G-PPH) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

Les profils de rugosité de surface et ses paramètres générés par les deux galets PPC ou PPH sont illustrés dans les figures (4.21, 4.25 et 4.26). Ainsi, les courbes d'Abbott-Firestone et ses paramètres sont illustrés dans les figures (4.23 - 4.27). Ces résultats obtenus indiquent que la qualité de la texture de la surface toilée par galet polypropylène-copolymère (G-PPC) de dureté 60 Shore D est supérieure à celle obtenue par galet polypropylène-homopolymère (G-PPH) de dureté 68 Shore D.

3.2.6. Galet en polyéthylène à haute densité (G-PEHD)

3.2.6.1. Rugosité de surface

La figure 4.28 illustre les profils bidimensionnels de rugosité obtenus à l'issue de l'opération de toilage en utilisant le galet en polyéthylène haute densité (G-PEHD) de dureté 65 Shore D.

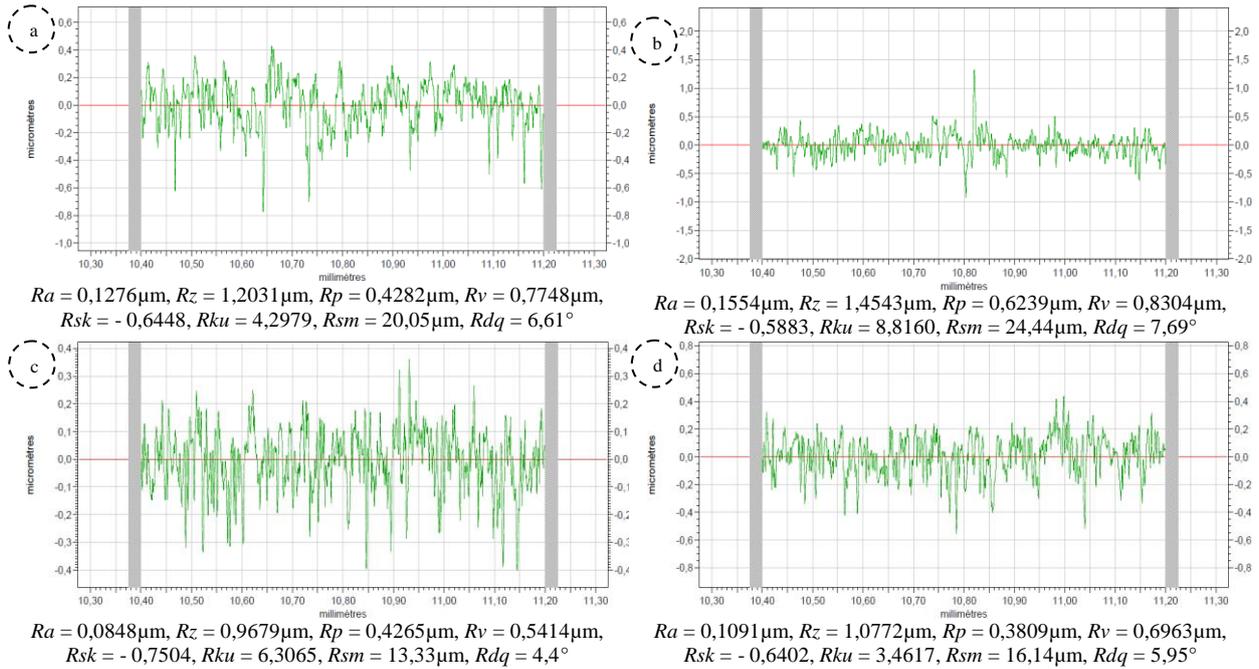


Figure 4.28 : Exemples des profils de rugosité pour le galet polyéthylène haute densité (G-PEHD) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

3.2.6.2. Taux de portance

La figure 4.29 montre la différence entre les courbes de taux de portance obtenues après le toilage en utilisant le galet en polyéthylène à haute densité (G-PEHD) de dureté 65 Shore D.

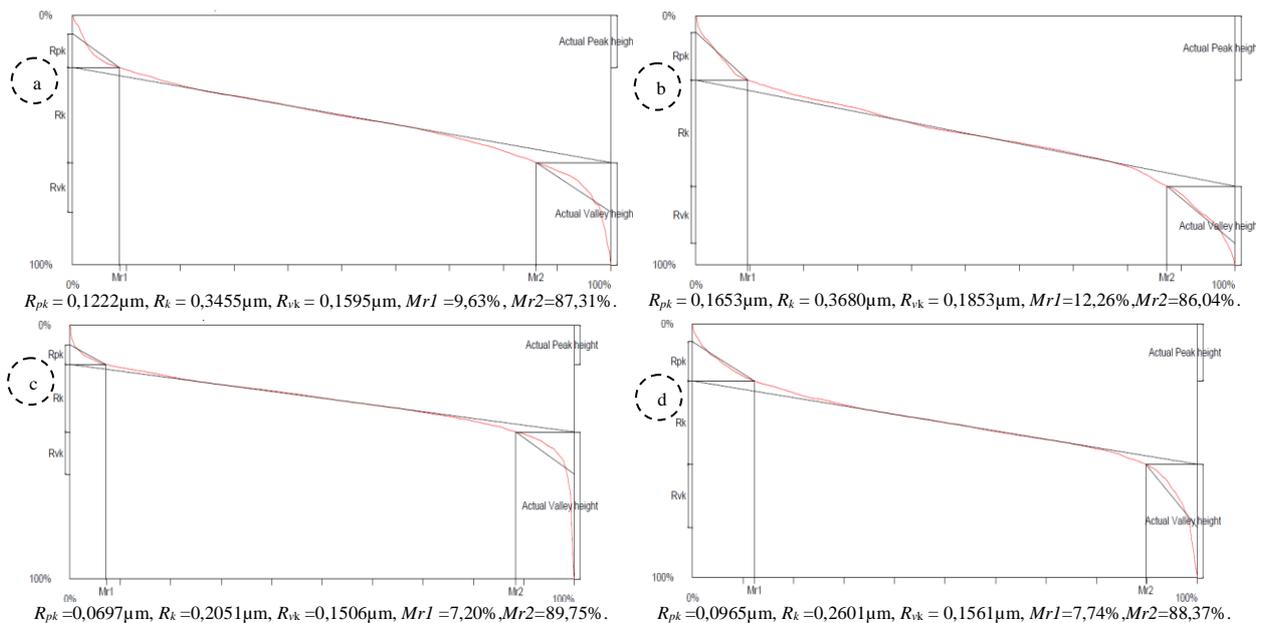


Figure 4.29 : Courbes du taux de portance pour le galet polyéthylène haute densité (G-PEHD) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

3.2.7. Galet en polyéthylène à base densité (G-PEBD)

3.2.7.1. Rugosité de surface

La figure 4.30 représente l'effet du galet en polyéthylène à basse densité (G-PEBD) de dureté 45 Shore D sur les profils des surface usinées par le toilage en bande 20 μm ou 30 μm .

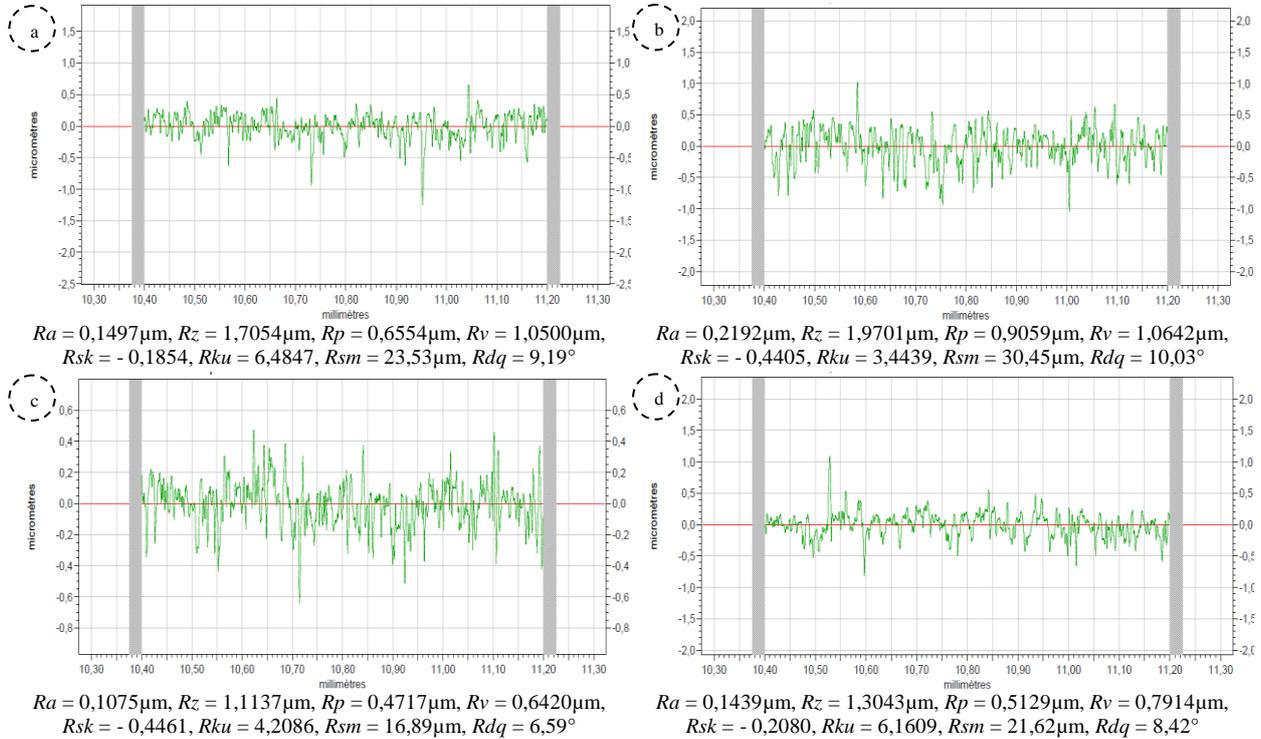


Figure 4.30 : Exemples de profils de rugosité pour le galet polyéthylène base densité (G-PEBD) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

La figure 4.31 illustre une comparaison des paramètres Rsm et Rdq de toilage sec et lubrifié.

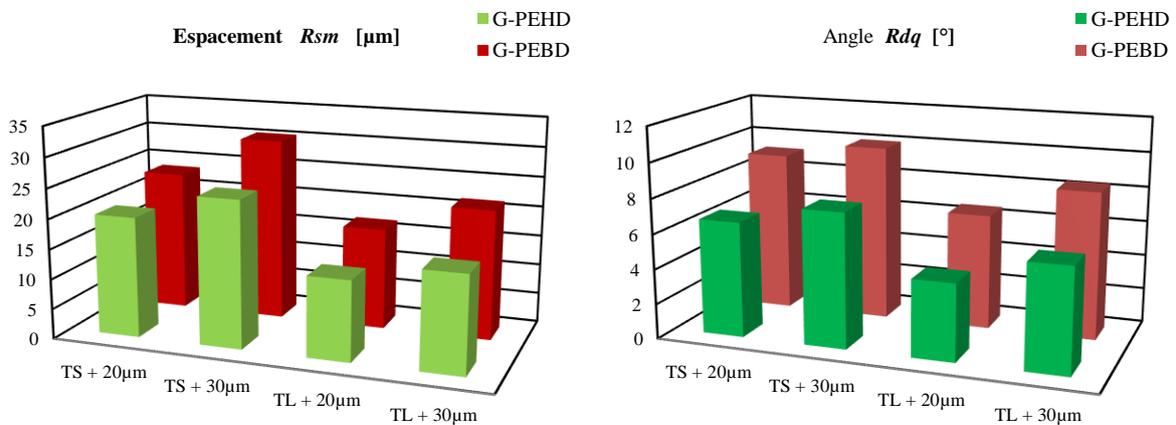


Figure 4.31 : Comparaison des paramètres Rsm et Rdq générés par PEHD – PEBD.

Le tableau 4.9 résume les résultats des essais de toilage sec et lubrifié avec différents galets en polymère (G-PS, G-POM C, G-PA 6, G-PPC, G-PPH, G-PEHD et G-PEBD) en termes de rugosité de surface.

Tableau 4.9 : Résultats des essais de toilage sec et lubrifié par différents galets en polymère (G-PS, G-POM C, G-PA 6, G-PPC, G-PPH, G-PEHD et G-PEBD).

			Ra [μm]	Rz [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]	Rsk	Rku	Rsm [μm]	Rdq [$^\circ$]
Galet polystyrène G-PS	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1414	1,5439	0,7324	0,8115	- 0,4338	3,3268	22,22	8,22
		Bande 30 μm	0,1938	1,8734	0,8748	0,9986	- 0,3887	4,2359	28,46	9,29
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,1065	1,0864	0,3723	0,7141	- 0,4603	4,5826	16,74	5,97
		Bande 30 μm	0,1291	1,2432	0,6470	0,5962	- 0,4447	4,2565	20,29	7,13
Galet polyacétal G-POM C	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1363	1,4486	0,5128	0,9358	- 0,1489	5,4587	21,42	6,86
		Bande 30 μm	0,1797	1,6846	0,7799	0,9047	1,0105	11,2788	26,71	7,53
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,1031	1,0772	0,3809	0,6963	- 0,5504	6,3065	16,20	5,48
		Bande 30 μm	0,1201	1,1923	0,5020	0,6903	- 0,5588	6,3663	18,87	6,84
Galet polyamide G-PA 6	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1152	1,1248	0,4467	0,6781	- 0,7048	3,9693	18,10	6,37
		Bande 30 μm	0,1338	1,2578	0,5042	0,7536	- 0,6013	3,5521	20,60	7,25
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0782	0,7630	0,3614	0,4016	- 0,7663	4,6453	10,72	2,99
		Bande 30 μm	0,0965	1,0772	0,3809	0,6963	- 0,7614	4,0495	14,34	5,05
Galet G-PPC	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1224	1,1625	0,4141	0,7484	- 0,5234	3,6360	19,43	6,59
		Bande 30 μm	0,1428	1,3560	0,5147	0,8413	- 0,4222	4,0962	22,42	7,52
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0809	0,7939	0,2577	0,5362	- 0,7434	4,341	12,71	3,48
		Bande 30 μm	0,1040	1,1101	0,4309	0,6792	- 0,7279	6,5050	15,16	5,7
Galet G-PPH	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1336	1,3504	0,6339	0,7165	- 0,3926	3,7967	20,94	7,28
		Bande 30 μm	0,1620	1,5704	0,6753	0,8951	- 0,3757	7,5548	25,24	7,95
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,1007	0,9968	0,3665	0,6303	- 0,6416	3,7595	15,45	5,05
		Bande 30 μm	0,1164	1,1693	0,5040	0,6653	- 0,5103	3,7701	17,72	6,13
Galet G-PEHD	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1276	1,2031	0,4282	0,7748	- 0,6448	4,2979	20,05	6,61
		Bande 30 μm	0,1554	1,4543	0,6239	0,8304	- 0,5883	8,8160	24,44	7,69
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0848	0,9679	0,4265	0,5414	- 0,7504	6,3065	13,33	4,4
		Bande 30 μm	0,1091	1,1377	0,5230	0,6147	- 0,6402	3,4617	16,14	5,95
Galet G-PEBD	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1497	1,7054	0,6554	1,0500	- 0,1854	6,4847	23,53	9,19
		Bande 30 μm	0,2192	1,9701	0,9059	1,0642	- 0,4405	3,4439	30,45	10,03
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,1075	1,1137	0,4717	0,6420	- 0,4461	4,2086	16,89	6,59
		Bande 30 μm	0,1439	1,3043	0,5129	0,7914	- 0,2080	6,1609	21,62	8,42

3. 2.7.2. Taux de portance

La figure 4.32 illustre l'influence du galet en polyéthylène à base densité (G-PEBD) de dureté 45 Shore D sur les paramètres fonctionnels de la courbe d'Abbott-Firestone de toilage sec ou lubrifié.

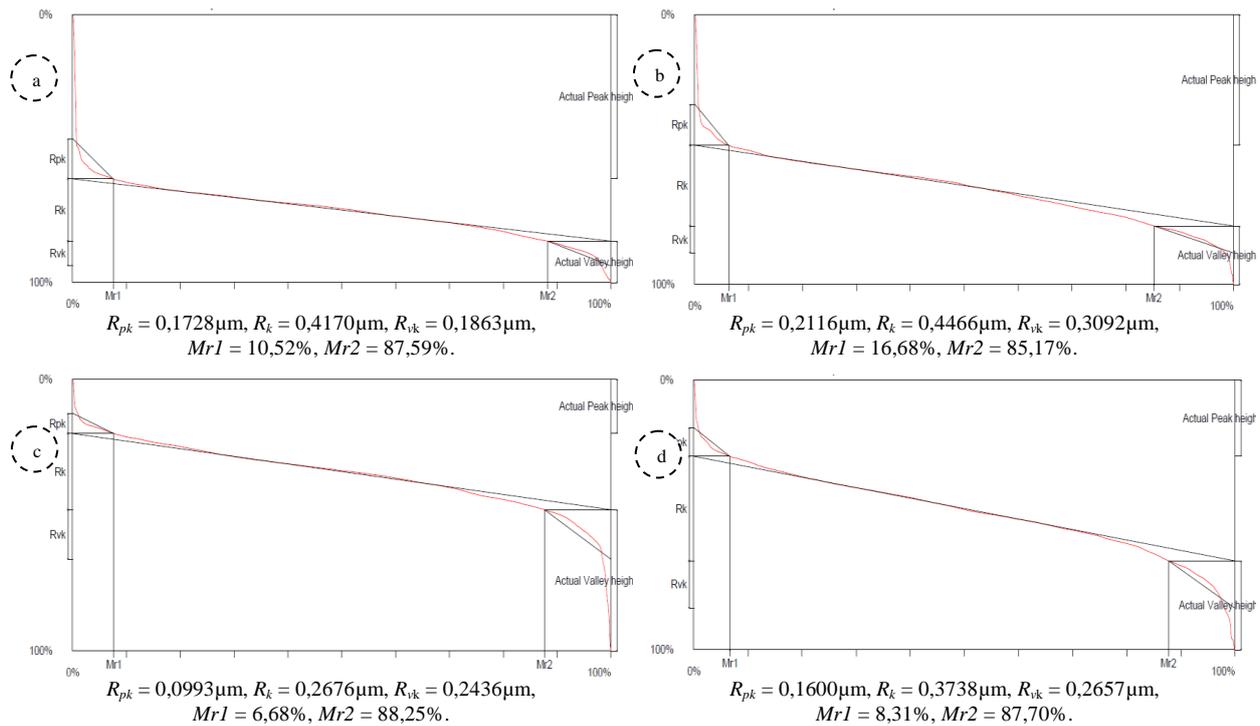


Figure 4.32 : Courbes du taux de portance pour le galet polyéthylène base densité (G-PEBD) après : (a) Toilage sec par bande 20 μm , (b) Toilage sec par bande 30 μm , (c) Toilage lubrifié par bande 20 μm , (d) Toilage lubrifié par bande 30 μm .

Dans ce paragraphe, on compare l'impact de deux galets en polyéthylène à haute et basse densité (G-PEHD et G-PEBD) sur la texture de surface toilée. Les résultats des paramètres de rugosité présentés par les figures (4.28, 4.30 et 4.30) et les paramètres de la courbe du taux de portance illustrés par les figures (4.29 et 4.32) indiquent que la qualité de la texture de surface du toilage par galet PEBD de dureté 45 Shore D est inférieure à celle du toilage par galet PEHD de dureté 65 Shore D. En effet, lors de l'utilisation de galet PEBD, la rugosité R_a comprise entre 0,1 et 0,22 μm , alors qu'elle est entre 0,08 et 0,16 μm avec l'utilisation de galet PEHD. Concernant les paramètres de portance, on prend par exemple le paramètre R_{pk} , il est compris entre 0,09 et 0,22 μm lors de l'utilisation de galet PEBD, alors qu'elle est entre 0,06 et 0,17 μm avec l'utilisation de galet PEHD.

Le tableau 4.10 illustre les variations dans les résultats des paramètres de la courbe du taux de portance R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$ obtenus par toilage sec et lubrifié avec l'utilisation de sept galets en polymère (G-PS, G-POM C, G-PA 6, G-PPC, G-PPH, G-PEHD et G-PEBD).

Tableau 4.10 : Paramètres R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$ générés par les sept galets en polymère.

			R_{pk} [μm]	R_k [μm]	R_{vk} [μm]	$Mr1$ [%]	$Mr2$ [%]
Galet polystyrène G-PS	Toilage sec	Bande 20 μm	0,2441	0,3977	0,1781	11,71	86,84
		Bande 30 μm	0,2796	0,4362	0,2681	16,61	84,22
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0888	0,3468	0,2296	7,48	90,84
		Bande 30 μm	0,1750	0,3520	0,2220	8,68	88,05
Galet polyacétal G-POM C	Toilage sec	Bande 20 μm	0,2023	0,3921	0,1742	10,29	87,65
		Bande 30 μm	0,2589	0,4162	0,2429	15,84	85,48
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0792	0,2669	0,1857	7,33	88,26
		Bande 30 μm	0,1634	0,3376	0,2034	7,93	88,21
Galet polyamide G-PA 6	Toilage sec	Bande 20 μm	0,0820	0,2702	0,1475	7,27	87,90
		Bande 30 μm	0,1253	0,3289	0,1572	11,20	86,16
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0560	0,1885	0,1115	6,84	89,88
		Bande 30 μm	0,0710	0,2197	0,1264	7,25	88,79
Galet G-PPC	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1087	0,3025	0,1567	7,72	87,90
		Bande 30 μm	0,1385	0,3579	0,1671	11,30	86,93
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0635	0,2189	0,1192	6,9	89,82
		Bande 30 μm	0,0759	0,2392	0,1388	7,24	88,25
Galet G-PPH	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1824	0,3803	0,1585	10,08	87,55
		Bande 30 μm	0,2134	0,4014	0,2252	14,65	88,47
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0738	0,2696	0,1689	7,27	90,45
		Bande 30 μm	0,1563	0,3167	0,1733	7,72	88,24
Galet G-PEHD	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1222	0,3455	0,1595	9,63	87,31
		Bande 30 μm	0,1653	0,3680	0,1853	12,26	86,04
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0697	0,2051	0,1506	7,20	89,75
		Bande 30 μm	0,0965	0,2601	0,1561	7,74	88,37
Galet G-PEBD	Toilage sec	Bande 20 μm	0,1728	0,4170	0,1863	10,52	87,59
		Bande 30 μm	0,2116	0,4466	0,3092	16,68	85,17
	Toilage lubrifié	Bande 20 μm	0,0993	0,2676	0,2436	6,68	88,25
		Bande 30 μm	0,1600	0,3738	0,2657	8,31	87,70

3.2.8. Comparaison de la texture de surface générée par les galets polymères

Dans cette comparaison, on prend le troisième cas ; toilage lubrifié + la bande abrasive de grosseur des grains 20 μm et on regroupe les paramètres de rugosité de surface en 4 groupes afin de faciliter l'analyse, la comparaison et la discussion des résultats.

3.2.8.1. Paramètres de hauteur

La figure 4.33 met respectivement en évidence la variation des paramètres de hauteur R_a , R_z et ses deux composants R_p et R_v pour les sept galets en polymères et la bande abrasive de taille moyenne des grains 20 μm . En effet, les résultats indiquent que la qualité de surface obtenue par le galet en polyamide (G-PA 6) de dureté 60 Shore D est meilleure que celle obtenue par les autres galets, viendra ensuite le galet en polypropylène-copolymère (G-PPC)

de dureté 60 Shore D. Par ailleurs, la qualité de surface du toilage par galet polyéthylène à basse densité (G-PEBD) de dureté 45 Shore D est inférieure à celle du toilage par les autres galets, viendra ensuite le galet polystyrène (G-PS) de dureté 85 Shore D. Cela peut être lié à la dureté des galets de contact. Dans le premier cas, une grande dureté du galet de contact apporte une faible déformation élastique contre la pièce toilée (faible zone ou section de contact), la grande pression ($P = \frac{F}{S}$) localisée sur un nombre des grains abrasifs limité, ce qui facilite son effritement avant même d'enlever les copeaux. Dans le deuxième cas, une faible dureté du galet de contact crée une déformation élastique importante contre la pièce usinée (zone ou section de contact importante). Par conséquent, la faible pression entre la pièce toilée et la bande abrasive localisée sur un grand nombre des grains abrasifs. Ces derniers touchent seulement les sommets (les pics) de surface sans enlèvement des copeaux. Toutefois, il existe une pression moyenne optimale entre la bande abrasive et la pièce toilée pour permettre aux grains abrasifs de conserver leur forme et d'enlever les copeaux en même temps. Cette pression est en fonction du type et de la dureté de la pièce toilée d'une part, de la dureté du galet de contact et de la force appliquée d'autre part.

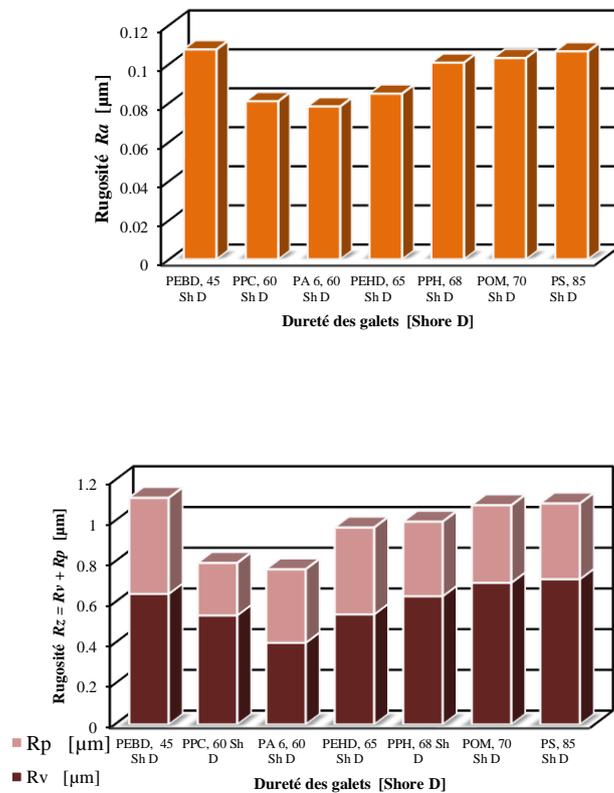


Figure 4.33 : Comparaison des paramètres Ra et Rz de toilage lubrifié par la bande 20 μm et sept galets polymères (G-PEBD, G-PPC, G-PA 6, G-PEHD, G-PPH, G-POM C et G-PS).

Il est à noter qu'une bande abrasive modifie les pics que les vallées de surface et le profil résistera bien à l'usure ($R_p < R_v$). Donc, l'obtention de l'état de surface final est réalisée par écrêtage des pics d'usinage sans arriver au fond des creux, ce qui permet d'éliminer les défauts d'aspects et de forme afin de conserver les paramètres initiaux. En outre, la valeur de paramètre de rugosité R_z de toilage par les quatre galets (PPC, PA 6, PEHD et PPH) est inférieure à $1 \mu\text{m}$, sachant qu'il s'agit d'un usinage à haute précision des aciers trempés de dureté qui varie entre 45 et 60 HRC ($R_z < 1 \mu\text{m}$) [Grz07, Grz15a, b].

3.2.8.2. Paramètres de distribution d'amplitude

La figure 4.34 représente l'aplatissement (Kurtosis) Rku versus l'asymétrie (Skewness) Rsk de toilage lubrifié pour les sept galets en polymères et de la bande abrasive de grosseur des grains abrasifs $20 \mu\text{m}$. D'une part, cette figure nous indique clairement que les valeurs d'asymétries Rsk de toilage lubrifié pour tous les galets en polymères utilisés dans cette étude sont légèrement négatives. Le galet PA 6 produit la plus petite valeur de skewness négative $Rsk = -0,7663$ tandis que le galet PEBD génère la plus grande valeur de skewness négative $Rsk = -0,4461$. Autrement dit, la surface portante est satisfaisante et la distribution montre une belle gaussienne légèrement décalé vers le haut à cause de quelques stries fines plus profondes ($Rsk < 0$). D'autre part, la distribution est ainsi droite d'où les valeurs d'aplatissement Rku relativement élevés. De ce fait, la technique de toilage produit un profil de surface plein et serré ($Rsk < 0$ et $Rku > 3$) qui résistera bien à l'usure. Ces surfaces sont de meilleures propriétés de portance comme il a indiqué Grzesik et al [Grz07].

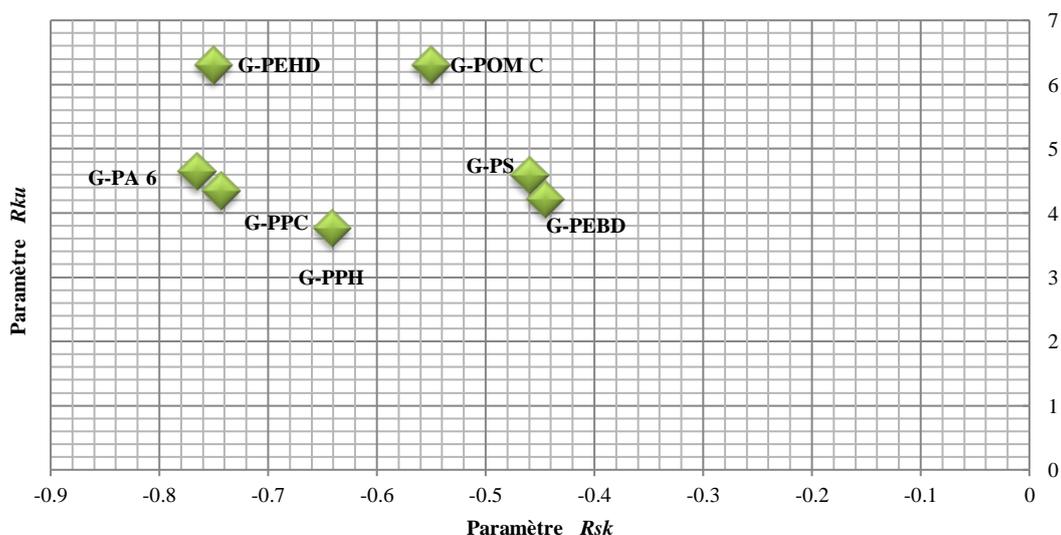


Figure 4.34 : Rku versus Rsk de toilage lubrifié par bande $20 \mu\text{m}$ et sept galets en polymère.

3.2.8.3. Paramètres de l'espacement et hybrides

La figure 4.35 illustre les valeurs moyennes d'espacement (Rsm) et hybrides (Rdq) générées par l'opération de toilage lubrifié avec la bande abrasive de taille des grains 20 μm et sept galets en polymères.

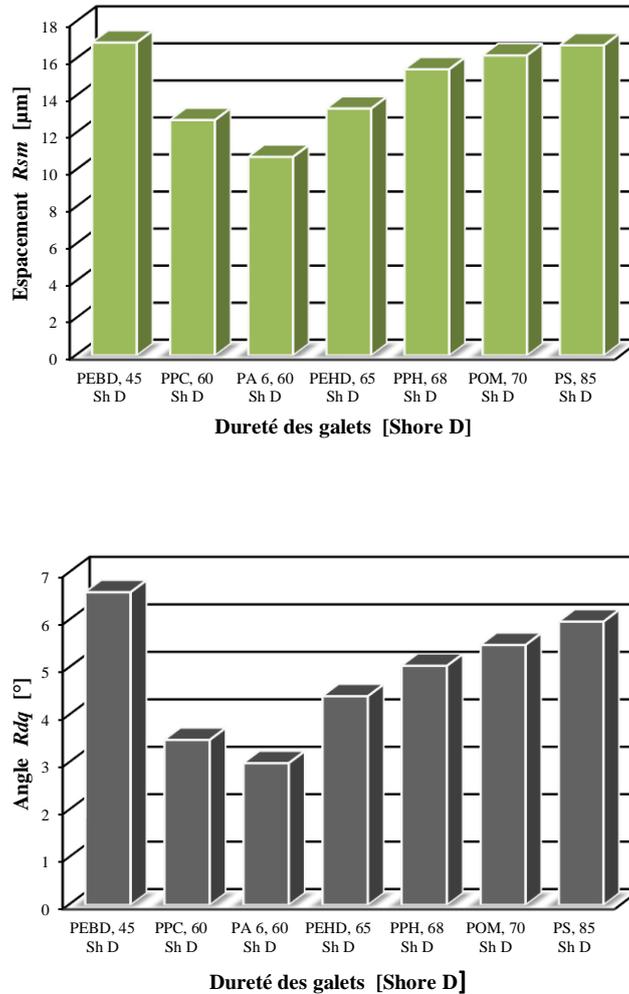


Figure 4.35 : Valeurs moyennes de toilage lubrifié générées par les sept galets en polymère.

A partir des diagrammes de barre de la figure 4.35, on note que les résultats les plus bas de la largeur moyenne des éléments du profil Rsm et de la pente moyenne quadratique du profil Rdq sont produits respectivement par les galets : PA 6 de dureté 60 Shore D, PPC de dureté 60 Shore D et PEHD de dureté 65 Shore D. Par ailleurs, les résultats les plus élevés sont dus : PS de dureté 85 Shore D, PEBD de dureté 45 Shore D, POM C de dureté 70 Shore D et PPH de dureté 68 Shore D. La technologie d'usinage par toilage réduit l'espace entre les irrégularités, ainsi que leur pente, ce qui correspond à une surface plutôt lisse.

3.2.8.4. Paramètres du taux de portance

Les paramètres R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$ produits par le toileage lubrifié avec la bande de taille 20 μm et les sept galets en polymère sont successivement présentés dans la figure 4.36.

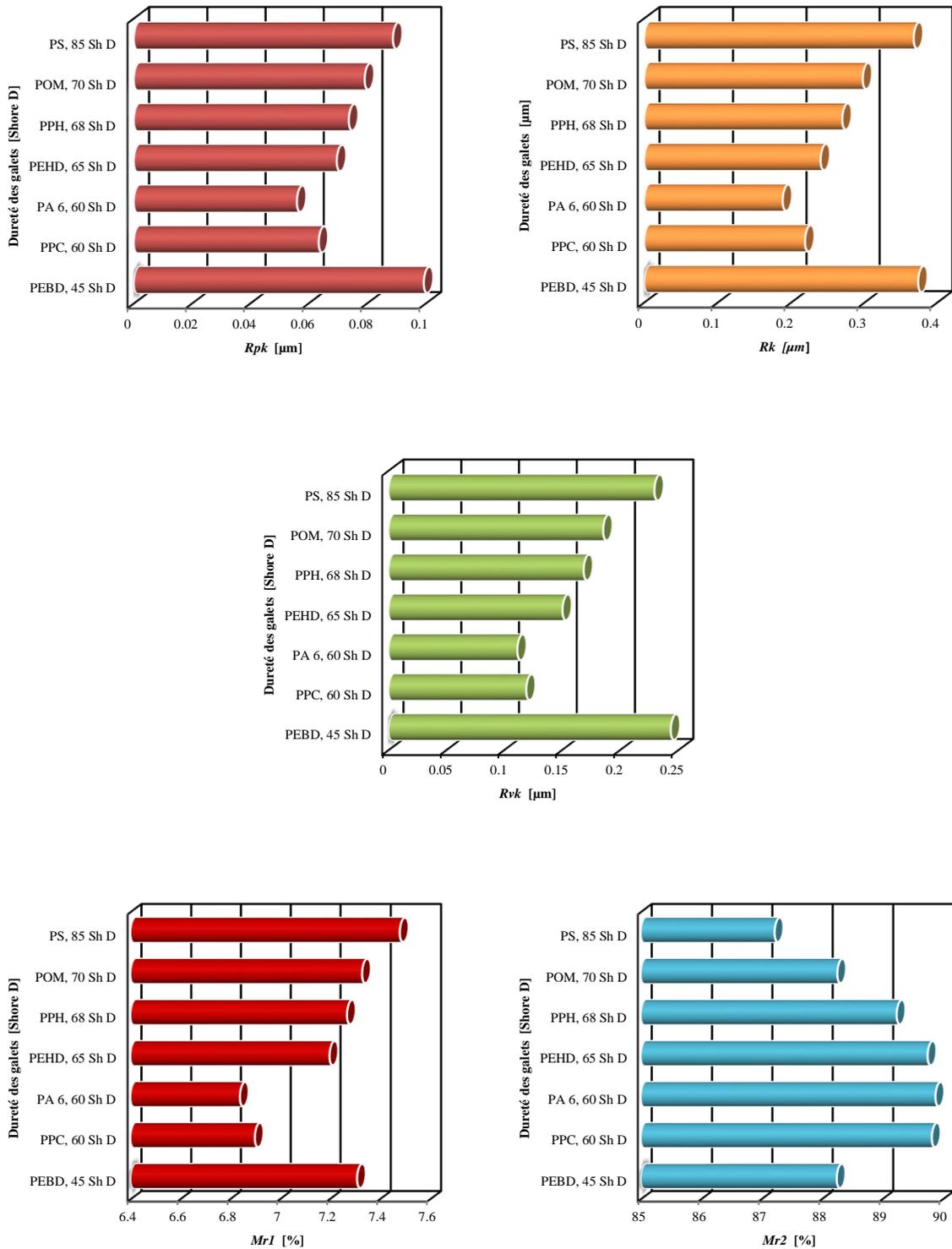


Figure 4.36 : Paramètres du taux de portance de sept galets polymères.

De cette figure, la plus faible valeur de hauteur des pics éliminés R_{pk} d'environ $0,05 \mu\text{m}$, ainsi que le taux de portance minimum du profil central de rugosité $Mr1$ d'environ $6,8 \%$ sont produits par toilage en galet polyamide PA 6, ce qui va limiter le temps de rodage pendant les premières heures de fonctionnement. Alors, la période de rodage peut être raccourcie autant que possible [Grz07, Grz12]. De plus, la valeur de paramètre R_k est également faible, ce qui va diminuer la consommation d'huile. Les deux derniers paramètres restants de la courbe de portance, $R_{vk} = 0,1115 \mu\text{m}$ et $Mr2 = 89,88 \%$ caractérisent le stockage et l'alimentation d'huile de la surface de contact. Il convient de noter que le toilage avec galet PA 6 produit des surfaces avec de meilleures propriétés de portance en comparaison avec l'utilisation des autres galets. Sur la base des résultats précédents, le toilage des surfaces des pièces mécaniques de précision peuvent nettement améliorer les paramètres de la courbe de portance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail de recherche, nous avons étudié le procédé de super finition par toilage d'acier traité thermiquement d'une dureté superficielle d'environ 52 HRC. A partir des résultats de notre enquête, nous pouvons en conclure que le processus de toilage peut être facilement utilisé en pratique. Ce processus est très efficace et sa nouveauté dans le monde socio-économique consiste à monter le dispositif d'usinage sur un tour conventionnel. Par conséquent, il ne nécessite pas de gros investissements dans la machine ou même au niveau de l'infrastructure.

Le toilage est un procédé de super finition permettant d'obtenir une très faible rugosité en surface de pièce et un état "poli miroir". La super finition permet à l'utilisateur d'obtenir la qualité et le polissage de surface souhaité, étant donné que cette méthode n'enlève que les pointes de rugosité. Donc, la forme de la pièce à usiner n'est pas modifiée. Les rugosités de l'ordre de $Ra = 0,08 \mu\text{m}$ et $Rz = 0,8 \mu\text{m}$ ont été observées, ce qui a permis de déterminer les paramètres technologiques optimums d'usinage, cela dépend uniquement de la grosseur des grains abrasifs et de leurs granulométries d'une part, ainsi, de l'efficacité des traitements de l'acier utilisé d'autre part.

Ce procédé ne permet pas d'éliminer les surépaisseurs telles que les surépaisseurs de rectification. Le toilage n'introduit pas d'échauffement notable, contrairement à la rectification qui induit à une modification de la microstructure de la couche en surface de pièce. De plus, contrairement aux surfaces rectifiées, les caractéristiques des surfaces superfinies sont tout à fait constantes, aussi bien sur la pièce elle-même que sur toutes les pièces d'une série. Ce procédé permet à l'utilisateur d'obtenir des qualités de surface élevées et reproductibles sur des pièces à symétrie de révolution, pour presque tous les matériaux durs. Il permet d'améliorer la structure de la surface dans la plage de quelques micromètres jusqu'à quelques dizaines de nanomètres.

A travers les essais expérimentaux de toilage de haute précision, les résultats trouvés et la l'étude théorique, on peut tirer les conclusions principales suivantes :

- L'obtention de l'état de surface final est réalisée par écrêtage des pics d'usinage sans arriver au fond des creux, ce qui permet d'éliminer les défauts d'aspects et de forme afin de conserver les paramètres initiaux.
- La réduction de la taille des grains abrasifs est proportionnelle à la diminution de la rugosité de surface. Ce procédé permettant d'obtenir une très faible rugosité en surface de pièce dans la gamme de micromètres jusqu'à quelques dizaines de

nanomètres, des rugosités de surface de l'ordre de; $Ra = 0,02 \mu\text{m}$ et $Rz = 0,24 \mu\text{m}$ ont été trouvées. Donc, le toilage permet d'obtenir une surface brillante.

- La bande abrasive de grosseur moyenne des grains abrasifs $20 \mu\text{m}$ avec lubrification de quantité minimale (*MQL*) montre une grande efficacité et une meilleure qualité de surface. Elle permet d'obtenir une rugosité de surface satisfaisante comparée à celle des autres cas.
- La texture de la surface toilée est réalisée par écrêtage des pics de tournage dur sans arriver au fond des creux ($R_{sk} < 0$), ce qui engendre un profil plein et serré (surface en plateau).
- Le contact élastique par galet a un rôle primordial dans le processus de super finition par bande abrasive, ce qui permet de transmettre la pression aux grains abrasifs pour enlever les copeaux de la pièce toilée.
- Le galet en polyamide (G-PA 6) de dureté 60 Shore D montre une bonne reproductibilité, procurant une texture de surface meilleure comparée à celle obtenue avec les autres galets de même dureté ou de dureté différente. Dans cette étude de cas, la valeur de hauteur des pics éliminés R_{pk} est d'environ $0,05 \mu\text{m}$, ce qui va limiter la période de rodage.
- Pendant le processus de toilage, une certaine pression moyenne optimale entre la pièce toilée et la bande abrasive s'avère indispensable. Ceci va permettre d'enlever les copeaux sans écraser les grains abrasifs de l'outil de toilage.

Enfin, on peut dire que le toilage est un procédé de finition prometteur. Plusieurs voies existent pour le perfectionner et augmenter son efficacité. Sur la base des résultats et dans certains cas, le toilage à sec est également possible selon la demande d'application.

Bibliographie

- [Bel07] N. Belkhir, D. Bouzid, and V. Herold: Correlation between the surface quality and the abrasive grains wear in optical glass lapping. *Tribology International* 40, **2007**, 498–502.
- [Ben07] S. Benchiheb, L. Boulanouar : Influence des paramètres de coupe sur la tenue du CBN 7020 lors du tournage dur. 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 03-04 November **2007**.
- [Cha08] S. Chang, T. N. Farris, S. Chandrasekar: Experimental analysis on evolution of superfinished surface texture. *Journal Of Materials Processing Technology* 203 (**2008**), pp. 365-371.
- [Cou16] C. Courbon, C. F. Valiorgue, C. Claudin, M. Jacquier, F. Dumont, J. Rech: Influence of some Superfinishing Processes on Surface Integrity in Automotive Industry. *Procedia CIRP* 45, **2016**, pp. 99–102.
- [Elm07] M. El Mansori, E. Sura, P. Ghidossi, S. Deblaise, T. Dal Negro, H. Khanfir: Toward physical description of form and finish performance in dry belt finishing process by a tribo-energetic approach. *Journal Of Materials Processing Technology* 182 (1-3) (**2007**), pp.498-511.
- [Ghi05] P. Ghidossi, M. El Mansori, E. Sura, R. Geoffroy, S. Deblaise : Procédé de super finition par toilage : analyse énergétique des variables "process" - temps de cycle et fréquence d'oscillation. Actes de la conférence 'Conception et Production Intégrées'. Casablanca, Maroc, **2005**.
- [Grz12] W. Grzesik, K. Żak: Modification of surface finish produced by hard turning using superfinishing and burnishing operations. *Journal of Materials Processing Technology* 212, **2012**, 315–322.
- [Grz05] W. Grzesik, T. Wanat: Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 169 (**2005**) 364–371.
- [Grz08] W. Grzesik, J. Rech, T. Wanat: Surface integrity on hardened steel parts produced by hybrid machining sequences. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol31, Issue2, **2008a**, pp.654-661.
- [Grz07] W. Grzesik, J. Rech, T. Wanat: Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, **2007**, pp. 255–262.
- [Grz14] W. Grzesik, K. Żak, P. Kiszka: Comparison of surface textures generated in hard turning and grinding operations. *Procedia CIRP* 13, **2014**, pp. 84–89.
- [Grz15a] W. Grzesik, J. Rech, K. Żak: High-Precision Finishing Hard Steel Surfaces Using Cutting, Abrasive and Burnishing Operations. *Procedia Manufacturing*, Volume 1, **2015a**, Pages. 619–627.
- [Grz15b] W. Grzesik, J. Rech, K. Żak: Characterization of surface textures generated on hardened steel parts in high-precision machining operations, *Int J Adv Manuf Technol* 78: **2015b**, 2049–2056.
- [Hab06] M. Habak: Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6. Thèse de doctorat. Ecole doctorale n° 432: Sciences des Métiers de l'Ingénieur, 2006 ENAM 57, **2006**.
- [Ham05] H. Hamdi, J. Rech, G. Kermouche, J. Arthaud, H. Zahouani: Modélisation des contraintes résiduelles induites par le toilage. 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, Septembre **2005**.

- [Ham03] H. Hamdi, M. Dursapt, H. Zahouani: Characterization of abrasive grain's behaviour and wear mechanisms, *Wear* 254 (**2003**), pp.1294–1298.
- [Ham11] A. Hamdi: Superfinition des surfaces par le procédé de toilage. Mémoire de magister, IOMP, Université Sétif 1, 2011.
- [Ham15] A. Hamdi, T. Aliouane, D. Bouzid: Influence of technological parameters of belt finishing process of 100C6 tempered steel. 1st International Conference on Tribology, TURKEYTRIB'15, **2015**, Yıldız Technical University, Istanbul, TURKEY
- [Jou05] A. Jourani, M. Dursapt, H. Hamdi, J. Rech, H. Zahouani: Effect of the belt grinding on the surface texture: Modeling of the contact and abrasive wear. *Wear* 259 (**2005**), pp.1137–1143.
- [Khe10] A. Khellouki, J. Rech, H. Zahouani: The effect of lubrication conditions on belt finishing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **2010**.
- [Khe13] A. Khellouki, J. Rech, H. Zahouani: Micro-scale investigation on belt finishing cutting mechanisms by scratch tests. *Wear* 308, **2013**, pp. 17–28.
- [Khe07a] A. Khellouki, J. Rech, H. Zahouani: The effect of abrasive grain's wear and contact conditions on surface texture in belt finishing. *Wear* 263, **2007a**, pp. 81–87.
- [Khe07b] A. Khellouki, J. Rech, H. Zahouani: Influence of the belt-finishing process on the surface texture obtained by hard turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* 221 (7), **2007b**, pp. 1129-1137.
- [Khe05] A. Khellouki, H. Maiz, J. Rech, H. Zahouani : Application de la méthode des plans d'expériences à la caractérisation du procédé de toilage de superfinition. Actes de la conférence 'Conception et Production Intégrées'. Casablanca, Maroc, **2005**.
- [Kis99] H.A. Kishawy, M. A. Elbestawi : Effect of process parameters on material side flow during Hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, **1999**, pp.1017-1030.
- [Klo05] F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert: Capability profile of hard cutting and grinding processes. *CIRP Annals* 54, **2005**.
- [Mez09a] S. Mezghani, M. El Mansori, H. Zahouani: New criterion of grain size choice for optimal surface texture and tolerance in belt finishing production. *Wear* 266 (**2009a**), pp.578-580.
- [Mez09b] S. Mezghani, M. El Mansori, E. Sura: Wear mechanism maps for the belt finishing of steel and cast iron. *Wear* 267 (**2009b**), pp.86-91.
- [Mez08a] S. Mezghani, M. El Mansori, A. Massa, P. Ghidossi: Correlation between surface topography and tribological mechanisms of the belt-finishing process using multiscale finishing process signature. *C. R. Mecanique* 336 (**2008b**) 794–799.
- [Mez08b] S. Mezghani, M. El Mansori: Abrasiveness properties assessment of coated abrasives for precision belt grinding. *Surface & Coatings Technology* 203 (**2008a**), pp.786/789.
- [Pag03] C. Pagès: Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. Thèse de doctorat, école centrale de Lyon, année **2003**.
- [Klo05] F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert: Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. *CIRP Ann.* 54 (2) **2005**, 557–580.
- [Rec09] J. Rech: Superfinition des pièces par toilage et pierrage. ENISE, LTDS, 21-22 octobre **2009**, Cluses.
- [Rec03a] J. Rech, A. Moisan: Le toilage : un moyen d'optimisation de l'intégrité des surfaces usinées. 16^{ème} Congrès Français de Mécanique, Nice, 1-5 septembre **2003a**.
- [Rec03b] J. Rech, A. Moisan : Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 43, Issue 5, **2003b**,

- pp.543-550.
- [Rec03c] J. Rech, A. Moisan: Belt grinding: a way to optimize the surface integrity of cut Surfaces. Actes de la conférence internationale MMSS, 23-26 septembre **2003c**, Krakow, poland, ISBN 83-912887-5-7, pp.125-132.
- [Rec08] J. Rech, G. Kermouche, W. Grzesik, C. Garcia-Rosales, A. Khellouki, V. Garcia-Navas : Characterization and modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel. Journal of materials processing technology 208 (**2008**), pp.187-195.
- [Rem01] M. Remadna : Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (nitrure de bore cubique). Thèse de doctorat, N° d'ordre 01 ISAL OO 22, Institut national des sciences appliquées de Lyon, **2001**.
- [Ser15a] K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori: Multiscale assessment of structured coated abrasive grits in belt finishing process. Wear 332-333, **2015a**, pp. 780–787.
- [Ser15b] K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori: Wear study of structured coated belts in advanced abrasive belt finishing. Surface & Coatings Technology 284, **2015b**, pp. 365–376.
- [Sur07] E. Sura: Analyse tribo-énergétique du procédé de toilage des portées Cylindriques en acier traité et fonte à graphite sphéroïdal. Thèse de doctorat, N°: 2007 ENAM 0043, **2007**.
- [Van10] A. Van Gorp, M. Bigerelle, M. El Mansori, P. Ghidossi, A. Iost: Effects of working parameters on the surface roughness in belt grinding process: the size-scale estimation influence. Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 38, No. 1, **2010**, pp.16–34.

Abstract

The superfinishing study of the mechanical parts is motivated by multiple interests related on the one hand to the needs of increase of the performances and the reliability of the mechanical systems solicited more and more severely. On the other hand, the savings of increasing the service life and improving the efficiency of these mechanical parts. The belt grinding is a superfinishing process more and more used in the automotive industry, in addition to hard turning. The belt grinding is advanced finishing process variant whose particularity lies in its thermal neutrality. This is a recent finishing process, so that the working mechanisms of this process and its influence on the integrity and functionality of the surfaces remains a vague domain. Indeed, it gives good quality surfaces with geometric tolerances more precise. These advantages interest more and more the industrialists. The belt grinding of complicated shapes begins to replace other processes such as grinding. This study establishes the belt grinding performance compared to other methods because it keeps the surface condition in stable condition and improved whatever the surface state from conventional methods.

Key words: belt grinding, superfinishing, hard turning, surface integrity, abrasive film, roughness.

ملخص

يتم تحفيز دراسة التحسين الفائق لسطح القطع الميكانيكية من خلال اهتمامات متعددة تتعلق من ناحية باحتياجات زيادة الأداء وموثوقية الأنظمة الميكانيكية المطلوبة أكثر فأكثر. من ناحية أخرى، التوفير في زيادة عمر الخدمة وتحسين كفاءة هذه القطع الميكانيكية. التجليخ بالحزام هو عملية تحسين سطح المستخدمة أكثر فأكثر في مجال صناعة السيارات، تأتي في الغالب بعد الخراطة الصلبة. التجليخ بالحزام هو نوع من عملية التحسين المتقدمة التي تكمن خصوصيتها في حيادها من حيث الحرارة. هذه عملية التحسين جديدة من حيث المبدأ، بحيث تظل آليات العمل لهذه العملية وتأثيرها على تحسين الأسطح ووظائفها مجالاً غامضاً. في الواقع، تمنح أسطح ذات جودة عالية مع التفاوتات الهندسية أكثر وأكثر دقة. هذه المزايا هي ذات أهمية أكثر وأكثر لصناعيين. التجليخ بالحزام للقطع ذات الأشكال المعقدة بدأ يحل محل العمليات الأخرى مثل التجليخ. هذه الدراسة تسمح لنا بتحديد موقع أداء التجليخ بالحزام مقارنة بالطرق الأخرى لأنها تحافظ على الحالة السطحية في حالة مستقرة وتحسنها مهما كانت الحالة السطحية الناتجة عن العمليات التقليدية.

الكلمات الرئيسية: تجليخ بالحزام، تحسين فائق، خراطة صلبة، نسيج السطح، فيلم جلخ، خشونة.