

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF-
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à l'institut d'optique et de mécanique de précision

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En optique et mécanique de précision

Option : Mécanique appliquée

Par

Mr : HAMDY AMINE

Thème

Superfinition des surfaces par le procédé de toilage

Soutenu le : 09/03/2011.

Devant la commission d'examen :

Mr : Djamel Bouzid	Professeur	UFASétif	Président
Mr : Toufik Aliouane	Maître de conférence	UFASétif	Rapporteur
Mr : Rabah Zegadi	Professeur	UFASétif	Examineur
Mr : Ferhat Djeddou	Maître de conférence	UFASétif	Examineur

Remerciements

Je voudrais dans le présent travail remercier tous ceux qui m'ont aidé à finir cette modeste étude de près ou de loin.

Je remercie en premier lieu Dr : Aliouane Toufik pour son encadrement, son guide et ses conseils fournis tout le long de ce travail.

De même Nous tenons à remercier le Directeur de l'unité ALMOULES et l'ingénieur responsable à l'atelier de technologie Mr : Chouki pour son aide.

Mon respect et sincère remerciement à tous les enseignants qui ont assuré ma formation, les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter ce travail.

Enfin, je remercie toute ma famille qui m'a motivé et m'a encouragé tout le long de ce travail.

.....AMINE.

RESUME

L'usinage de précision de surfaces fonctionnelles de pièces mécaniques, c'est-à-dire l'obtention de pièces sans défaut sur le plan géométrique, uniquement par le biais des procédés de pré-usinage (tournage et rectification) nécessite un effort technico économique considérable. Ces procédés sont par conséquent complétés par des procédés d'abrasion avancés, dits de super finition, tels que la rectification, le rodage, le toilage...l'objectif est de réduire voir supprimer les imperfections sur la surface de la pièce et dans la structure du matériau dues au procédé de pré-usinage. Le toilage est une variante de ces procédés de finition avancés dont la particularité réside dans sa neutralité sur le plan thermique. C'est un procédé de finition très 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. 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. Ce projet permet de situer les performances du toilage par rapport aux autres procédés conventionnels comme le tournage, fraisage etc...parce qu'il maintient l'état de surface à un état stable et amélioré quel que soit l'état de surface issu des procédés conventionnels.

Mots clés : Procédé de toilage, rugosité, intégrité de la surface, super finition.

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I	
Procédés de finition des surfaces	
par abrasion	
I.1. Usinage par abrasion	4
I.2. Procédés de finition par abrasion	5
I.2.1. Rectification	5
1. Procédés de rectification	7
a- Rectification plane	7
b- Rectification cylindrique	8
2. Topographie de meule	8
3. Facteurs influençant l'état de surface	9
I.2.2. Superfinition	10
1. Principe	10
2. Avantages de la superfinition	11
3. Différence entre la superfinition et la rectification	11
I.2.3. Doucissage	13
1. Doucissage par abrasifs libres	13
2. Doucissage par abrasifs liés	13
3. Facteurs influençant le procédé de rodage	14
I.2.4. Polissage	15
1. Mécanisme de polissage du verre optique	16
2. Classification des processus de polissage	17
a- Polissage des métaux	17
b- Polissage mécanique	17
c- Polissage du verre	19
3. Facteurs influençant le procédé de polissage	19
I.3. Généralités sur les outils d'abrasion	20
I.3.1. Abrasifs	20
I.3.2. Grains abrasifs	20
a- Abrasifs naturels	20
b- Abrasifs synthétiques	21
I.3.3. Différentes applications d'abrasif	23
I.3.4. Abrasifs appliqués	23

CHAPITRE II

Procédé de toilage

II.1. Définition de toilage	25
II.2. Principe de toilage	27
II.3. Paramètres influençant le procédé de toilage	28
II.3.1 Galet de contact	28
II.3.2. Vitesse d'avance de la toile	28
II.3.3. Durée de toilage	30
II.3.4. Taille des grains abrasifs	31
II.3.5. Fréquence d'oscillation	32
II.3.6. Pression de contact	32
II.4. Caractérisation des surfaces toilées	33
II.4.1. Influence du toilage sur la topographie de surface	33
II.4.2. Influence du toilage sur les contraintes résiduelles	36
II.4.3. Influence du toilage sur la microstructure métallurgique	38
II.4.4. Morphologie du micro copeaux	40
II.5. Dispositifs à bande abrasive	40
II.5.1. Appareils de superfinitions rapportées : Série 204/208	40
II.5.2. Dispositif ALL-JOB	41
II.5.3. Dispositif à bande T25	41
II.5.4. Surfaceuse à bande abrasive	42
II.5.5. Lime abrasive	42
II.6. Bandes abrasives	43
II.6.1. Types des bandes abrasives	47
a- Bandes abrasives sur support papier	47
b- Bandes abrasives sur support toile	47
II.6.2. Paramètres des bandes abrasives	48
a- Densité des pics	48
b- Hauteur moyenne des grains abrasifs	49
c- Angle au sommet des pics de rugosité	49

CHAPITRE III

Mécanisme d'usure

III.1. Mécanisme d'usure	52
III.1.1. Usure abrasive	52

a- Usure abrasive à deux corps	54
b- Usure abrasive à trois corps	57
III.1.2. Usure adhésive	58
III.1.3. Usure érosive	58
III.1.4. Usure par fatigue	59
III.1.5. Autres types d'usure	60
III.2. Effet de quelques paramètres sur l'usure abrasive	61
III.2.1. Influence de la charge	61
III.2.2. Influence de la vitesse	61
III.2.3. Influence de la dureté	62
III.2.4. Effet de la taille des particules abrasives	63
III.2.5. Influence de lubrification	63
III.3. Mécanismes physiques d'abrasion	64
III.3.1. Action d'un grain	64
III.3.2. Action de plusieurs grains	65

CHAPITRE IV

Matériaux et dispositifs utilisés

IV.1. Matériaux et techniques expérimentales	71
IV.1.1. Matériaux utilisés	71
IV.1.2. Moyens utilisés	72
1. Four électrique	72
2. Microscope AXIOVERT 40 MAT	73
3. Rugosimètre	74
IV.1.3. Bandes abrasives utilisées	74
IV.1.4. Condition de travail	76
IV.2. Réalisation du dispositif de toilage	77
IV.2.1. Dispositif de toilage	77
IV.2.2. Composition du dispositif	77
IV.2.3. Dessin de définition des différentes pièces de dispositif	79
IV.2.4. Fixation du dispositif	89
IV.2.5. Elaboration des outils à abrasifs appliquées	90

CHAPITRE V

Etude expérimentale

V.1. Variation de la rugosité en fonction de temps	92
V.1.1. Sans lubrification	92
V.1.2. Avec lubrification	95
V.2. Variation de la rugosité en fonction de la vitesse de rotation de la pièce	98
V.2.1. Sans lubrification	98
V.2.2. Avec lubrification	99
V.3. Variation de la rugosité en fonction de la grosseur des grains	100
V.3.1. Sans lubrification	101
V.3.2. Avec lubrification	102
V.4. Variation de la rugosité en fonction des grains successifs	103
V.4.1. Sans lubrification	103
V.4.2. Avec lubrification	105
V.5. Variation de l'état de l'abrasif	106
V.6. Conclusion	109
Conclusion générale	111
Bibliographie	112

Introduction générale

Depuis longtemps et jusqu'à présent, les industries cherchent à gagner du temps et à diminuer les coûts de fabrication tout en respectant l'environnement, en dépit de ces considérations, la qualité de service et la durée de vie des moteurs du véhicule ainsi que celles des machines sont fonction, non seulement, de l'étude de conception et des conditions d'exploitation mais aussi des conditions de fabrication des pièces mécaniques qui les constituent.

La finalité d'un usinage des pièces mécaniques nécessite des moyens de grande précision dans les procédés de super finition, plusieurs techniques modernes sont apparues (la rectification à traits croisés, le pierrage, **le toilage**, ...) pour la super finition de ces pièces de plus en plus précise à cause des exigences technologiques croissantes.

Le toilage est un procédé de finition par abrasion, cette abrasion étant réalisée par le frottement d'une toile sur une pièce sur laquelle on imprime un mouvement d'oscillation et de rotation. Les toiles sont constituées d'un support (toile, papier ou film synthétique) sur lesquelles est déposée une couche des grains abrasifs calibrés. Cette super finition permet de réduire ou d'éliminer les défauts d'intégrité de surface (texture de la surface ; rugosité et défauts de surface, contraintes résiduelles, couches blanches...) engendrés par les procédés de pré-usinage ; tournage et rectification, comme les contraintes résiduelles de traction, ainsi que des modifications métallurgiques ; couches blanches, la détérioration de la topographie de surface due à l'apparition de refoulements de matière, ce qui détériore la tenue en fatigue. Ces avantages intéressent de plus en plus les industriels surtout dans le domaine de l'industrie automobile (finition de : vilebrequin, arbre à cames, les soupapes...etc.). Mais sa maîtrise sur le plan industriel est loin d'être acquise. Ainsi, la mise au point d'une gamme de toilage reste

encore empirique et les mécanismes de travail de ce procédé et son influence exacte sur l'intégrité et la fonctionnalité des surfaces restent un domaine vague.

Dans ce mémoire, on essaye de mettre en évidence l'influence des paramètres de coupe ou de finition, tel que ; le temps de toilage, la vitesse de rotation de la pièce, la taille des grains abrasifs et la lubrification sur l'intégrité de la surface d'un acier 100C6. Pour cela, on divise le travail en deux grandes parties : la première partie se compose de trois chapitres théoriques. Le premier est consacré aux généralités sur les procédés de finition des surfaces par abrasion, le deuxième décrit le procédé de toilage et le troisième chapitre présente les mécanismes d'usure. Quant à la partie pratique ; elle comporte deux chapitres. Le premier présente le matériau et dispositifs utilisés. Le deuxième consacré à l'étude expérimentale, et on termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Procédés de finition des surfaces par abrasion

I.1. Usinage par abrasif	4
I.2. Procédés de finition par abrasion	5
I.2.1. Rectification	5
1. Procédés de rectification	7
a- Rectification plane	7
b- Rectification cylindrique	8
2. Topographie de meule	8
3. Facteurs influençant l'état de surface	9
I.2.2. Superfinition	10
1. Principe	10
2. Avantages de la superfinition	11
3. Différence entre la superfinition et la rectification	11
I.2.3. Doucissage	13
1. Doucissage par abrasifs libres	13
2. Doucissage par abrasifs liés	13
3. Facteurs influençant le procédé de rodage	14
I.2.4. Polissage	15
1. Mécanisme de polissage du verre optique	16
2. Classification des processus de polissage	17
a- Polissage des métaux	17
b- Polissage mécanique	17
c- Polissage du verre	19
3. Facteurs influençant le procédé de polissage	19
I.3. Généralités sur les outils d'abrasion	20
I.3.1. Abrasifs	20
I.3.2. Grains abrasifs	20
a- Abrasifs naturels	20
b- Abrasifs synthétiques	21
I.3.3. Différentes applications d'abrasif	23
I.3.4. Abrasifs appliqués	23

I.1. Usinage par abrasif :

Le processus d'abrasion est défini comme un mécanisme complexe où un matériau à dureté élevée raye une surface antagoniste constituée par un matériau moins dur, engendrant une modification plastique de sa surface. Sa principale caractéristique est l'irréversibilité. Usinage par abrasion basé sur l'utilisation de grains abrasifs libres ou liés entre eux (meules) ou à un support (bandes, papier), l'usinage par abrasion est une technique très ancienne, qui a précédé l'usinage par outils de coupe. Bien que le travail par abrasion conduise en général à des débits de matière plus faibles que l'usinage par outil de coupe, le travail par abrasion est la seule possibilité économique pour [Fel09, Nop09] :

- Usiner les matériaux de très hautes dureté et/ou de haute fragilité : les aciers traités, les alliages réfractaires, les carbures métalliques, les verres, les céramiques.
- Réaliser les très faibles rugosités (de l'ordre du nm) indispensables à certaines applications.
- L'enlèvement de très faibles passes : il est possible de finir des surfaces avec précision par abrasion grâce à la finesse du copeau coupé. Les états de surface s'en trouvent améliorés. Ainsi l'abrasion conduit à la haute qualité mécanique. On peut couramment respecter sur les machines à rectifier des tolérances de deux microns, soit 10 fois plus petites que celles observées sur les machines à outils coupants métalliques.

Le mécanisme d'enlèvement de matière est ici plus difficile à appréhender pour le praticien puisqu'il s'effectue à l'échelle microscopique des grains. Le matériau est soumis par les grains d'abrasifs à une action similaire à celle des outils tranchants de la coupe, mais dans le domaine des très faibles avances et avec une distribution d'angles de coupe s'étendant vers des valeurs fortement négatives. En outre, le frottement parasite sur la face en dépouille et l'arrondi ne sont plus négligeables [Mez05].

L'opération d'usinage par abrasion a un rendement énergétique très inférieur à celui d'une coupe courante. Elle est donc réservée aux opérations de finition, notamment sur les matériaux de haute dureté. Dans de telles opérations d'abrasion à trois corps, les degrés de liberté des grains d'abrasif sont beaucoup plus importants et réduisent la capacité des grains à enlever de la matière. Ces procédés sont donc réservés à la finition des pièces ductiles (polissage, ébavurage) ou/et à l'usinage de matériaux fragiles [Mez05].

Les performances des procédés d'usinage par abrasion ne cessent de s'améliorer du fait des besoins industriels croissants. Toutefois, malgré leur grande importance économique, les procédés d'usinage à l'abrasif restent largement méconnus et leurs aspects scientifiques mal compris et mystérieux [Fel09].

Les procédés d'usinage par abrasion diffèrent par le mode d'application de l'abrasif. On y distingue les configurations que voici [Fel09, Nop09] :

- Usinage par grains d'abrasif libres (polissage,...).
- Usinage par grains d'abrasif agglomérés (rectification, pierrage,...).
- Usinage par grains d'abrasif appliqués (ponçage, toilage,...).
- Usinage par grains d'abrasif incorporés (brossage,...).

I.2. Procédés de finition par abrasion:

Les principales techniques d'abrasion mécanique sont [Nop09, Mez05]:

- La rectification.
- La super finition.
- Le rodage.
- Le polissage.
- Le toilage.

I.2.1. Rectification :

La rectification est un processus de finition où la mise en forme se fait par enlèvement de matière par un phénomène d'abrasion (au moyen d'une meule), Cette opération lui confère sa côte définitive (le plus souvent exprimé en microns). Contrairement à l'usinage traditionnel (enlèvement de copeaux par outils coupants), la rectification permet l'usinage de précision dimensionnelle élevé grâce aux principes de l'abrasion. L'analyse du processus de rectification peut se décomposer en différentes approches, issues des trois sous-systèmes pouvant être isolés dans l'environnement du procédé : la meule, la pièce et les grains (voir figure I.1) [Bar05].

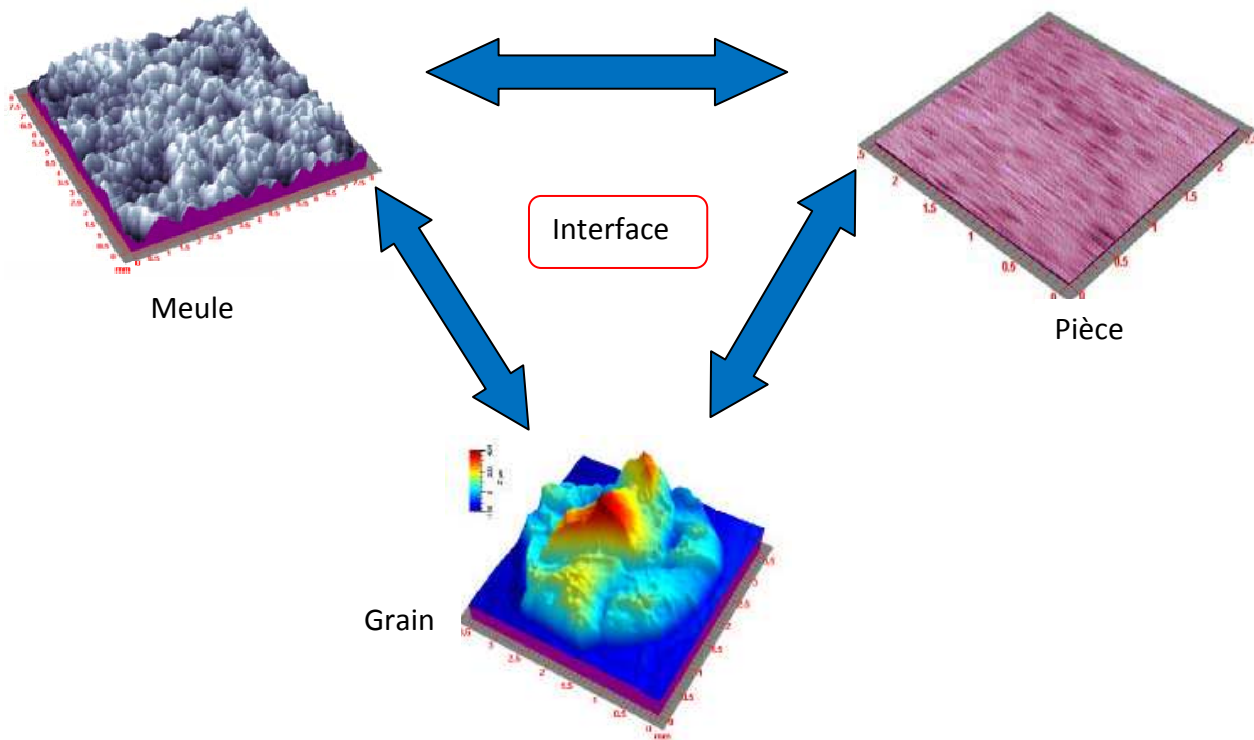


Figure I.1 : Environnement du processus d'abrasion en rectification [Bar05].

La rectification s'effectue sur une machine outil conçue à cet effet : la rectifieuse. Il s'agit de rectifier donc, d'uniformiser la surface volume de façon à éliminer la friction quelle pourrait engendrer en entrant en contact avec une autre pièce.

Dans la rectification, la pièce est mise en contact avec une meule en rotation, dans ce procédé on n'a pas une seul arête qui enlève des copeaux, mais un nombre normalement non défini d'arêtes individuels travaillant en même temps. La déformation de la surface sous l'action de la particule abrasive dépend en effet de plusieurs variables [Bar05] :

- La nature des matériaux antagonistes (outil/pièce).
- La forme, la taille et l'orientation de l'outil.
- Les forces agissant sur l'outil.
- Les trajectoires et vitesses imposées.
- La nature de l'interface outil/pièce.

1. Procédés de rectification :

Les propriétés caractéristiques du procédé de rectification sont le type de surface à produire, la cinématique de l'opération d'usinage, la forme et les profils de la meule. En conséquence, il y a deux types de rectification [Kra80, Die06] :

- La rectification plane.
- La rectification cylindrique.

a- Rectification plane :

La rectification plane est l'expression technique qui rapporte à l'usinage des surfaces planes, profilées ou asymétriques d'une pièce tenue en place sur un plateau magnétique de la table, et qui passe et repasse sur la meule en rotation, elle consiste en un meulage horizontal de façon à éliminer à plusieurs reprises des couches de matériaux allant de 20 à 40 micromètres.

Plusieurs méthodes de rectification plane sont adaptées et utilisées, pour produire des surfaces caractérisées par des éléments en ligne parallèles droites et en angles. Naturellement, on peut obtenir des surfaces de précision qui peuvent consister en des pièces longues et droites à différents angles (comme les guides d'un chariot d'un tour, des lames de tous genres et outils par exemple).

Le principe de rectification plane est représenté par la figure I.2.

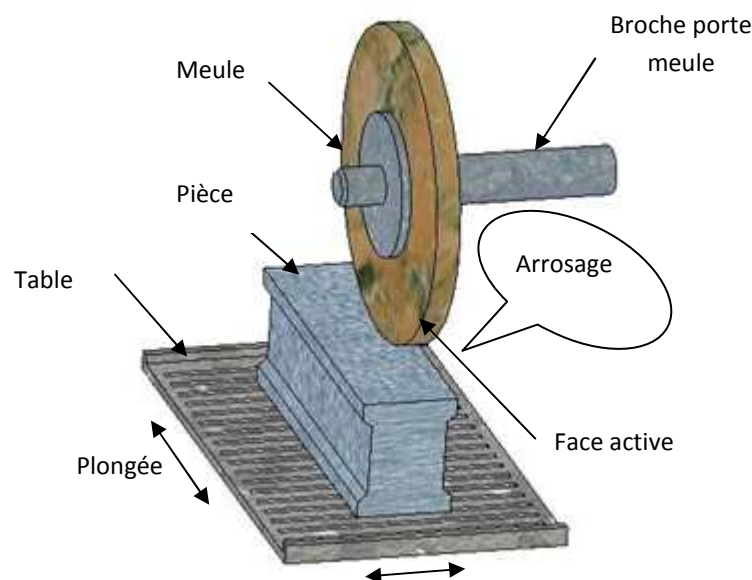


Figure I.2 : Principe de rectification plane et table à mouvement alternatif [Kra80].

b- Rectification cylindrique :

Elle sert à rectifier les surfaces cylindriques. Lorsqu'il faut rectifier la périphérie d'une pièce à fin d'obtenir des dimensions précises et un fini de qualité, on fait appel à la rectifieuse cylindrique (voir figure I.3). Il y a deux genres de machines qui conviennent pour la rectification cylindrique:

- Rectifieuse à points.
- Rectifieuse sans points.

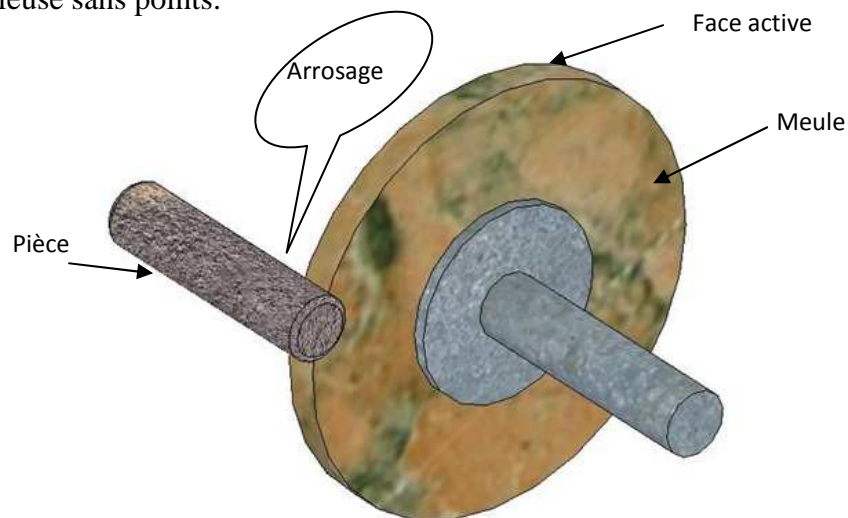


Figure I.3 : Principe de la rectification cylindrique [Kra80].

2. Topographie de meule :

La topographie de la meule agit directement sur les performances de coupe et sur la rugosité de la surface obtenue. La composition de la meule, la taille des grains, la granulométrie, le liant, la porosité, la densité de grain ainsi que les conditions de dressage ont un effet important sur la topographie de la surface [Ina96, Sal89]. Une meule est alors considérée comme l'ensemble d'un très grand nombre de petits outils (cristaux abrasifs) répartis au sein d'une matrice formant le support, assurant l'enlèvement d'une petite quantité de matière. Le mode d'action de la meule sur la pièce usinée peut être décrit comme une succession d'actions de grains abrasifs sur une surface [Bar05]. Ce procédé présente par contre des caractères spécifiques, notamment dus à :

- l'orientation et la répartition aléatoire des grains constituant les outils élémentaires de faibles dimensions.
- les vitesses de coupe très élevées, la grande énergie spécifique, et souvent les hautes valeurs instantanées des températures locales de coupe.

3. Facteurs influençant l'état de surface :

L'état de surface obtenu par rectification est de prime importance. Aussi, il faut tenir compte de tous les facteurs qui entrent en jeu. La surface de certaines pièces qui subissent la rectification ne doit pas être superfinie.

Parmi les facteurs qui influent sur l'état de surface, on cite [Kra80] :

- **Matière en voie d'être rectifiée :**

Les matières douces telles que le laiton et l'aluminium ne se prêtent pas aussi bien à la super finition que les matières dures. Il est plus facile d'obtenir une surface extra-douce sur des pièces en acier trempé que sur celles en acier doux ou en fonte.

- **Quantité de matière à enlever :**

S'il s'agit d'enlever une quantité considérable de matière. On utilise une meule à gros grain et à structure large. On ne peut donc s'attendre à obtenir un fini aussi doux qu'avec une meule à structure serrée et à grain fin.

- **Choix de la meule :**

Une meule faite de grains friables ou qui se dégagent facilement donnera un meilleur fini qu'une meule à grains durs. Une meule à grains fins et à structure serrée donne une surface plus douce qu'une meule à gros grains et à structure large. La meule qui se désagrège et libère facilement ses grains verra ces derniers se glisser entre la meule et la pièce, avec le résultat que la pièce en sortira avec une surface fortement striée.

- **Dressage de la meule :**

Une meule mal dressée donne une surface striée. Pendant le dressage il faut avant tout veiller à passer lentement le diamant sur la face active de la meule. Il faut ensuite s'assurer que cette même face est suffisamment dressée pour exposer des grains ravivés, qu'elle n'est pas lustrée et qu'elle n'est pas incrustée de matières étrangères. Les meules neuves, mal équilibrées et mal équerrées, laisseront des traces de broutement à la surface de la pièce.

I.2.2. Superfinition :

La superfinition est une action d'usinage qui vise à obtenir des pièces de très haute qualité, au-delà des capacités de la rectification. Elle opère sur deux caractères :

- La forme de la surface obtenue est définitive :
L'usinage à l'outil laisse sur la surface un certain nombre de raies ou de stries (que le rodage masque partiellement).
- La structure superficielle du métal usiné :
L'usinage à l'outil conduit à de grandes élévations de température pouvant atteindre 1000C° à l'extrémité de l'outil ; celui-ci arrache, d'autre part, des éléments de copeaux, il en résulte une détérioration superficielle due à la fusion de particules de métal qui se ressoldent ensuite.

À cela s'ajoute l'agglutination de corps étrangers : lubrifiant, qui contribuent à former une structure superficielle fragile et peu homogène, appelée couche de Beilby. La superfinition consiste à enlever cette dernière, de manière à faire disparaître les stries et les défauts géométriques.

1. Principe :

Les outils de superfinition dont le grain, le liant et la dureté sont adaptés au but recherché, oscillent axialement par rapport à la pièce mise en rotation, la pression d'appui est réglable en continu. En fonction de la longueur de la surface à usiner, l'outil travaille en plongée ou par déplacement. Il faut que la surface de contact importante entre l'outil de superfinition et la pièce. Les défauts de forme tels que l'ondulation, les stries qui créent par l'avance de la pièce, faux rond et traces de broutage (figure I.4).



Figure I.4 : Principe de la superfinition [www1].

2. Avantages de la super finition :

Parmi les avantages de la super finition, on cite plus particulièrement [www1] :

- ✓ Faible coûts d'outils.
- ✓ Faible coûts d'investissement.
- ✓ Faible dépenses d'énergie.
- ✓ Grande flexibilité.
- ✓ Temps d'usinage courts.
- ✓ Peu de frottement.
- ✓ Peu d'usure.
- ✓ Sécurité d'utilisation.

3. Différence entre la super finition et la rectification :

La différence essentielle entre la super finition et la rectification porte sur le mouvement de coupe de l'abrasif. L'action très rapide de la meule (des vitesses périphériques de meule allant de 10 à 150 m/s) est remplacée par celui d'une pierre abrasive à mouvement rectiligne alternatif. Ce mouvement de vibration a une fréquence d'environ 25 coups par minute et une amplitude de 1 à 5 mm. L'abrasif travaille à faible vitesse (10 à 20 m/min).

Le tournage dur permet d'obtenir un bon état de surface ($R_a = 0,38 \mu\text{m}$ à $1,04 \mu\text{m}$) compris dans les limites de la rugosité obtenue par la rectification ($R_a = 0,2 \mu\text{m}$ à $1,1 \mu\text{m}$) (voir figure I.5) [Ben07a].

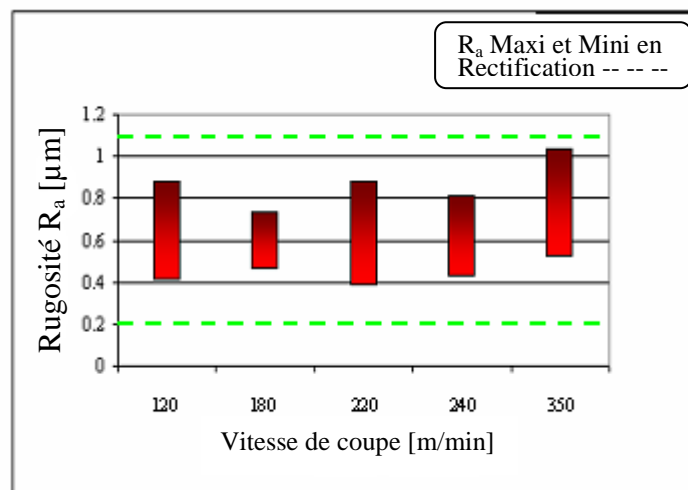


Figure I.5 : Comparaison de l'état de surface obtenu à différentes vitesses de coupe entre le tournage dur et la rectification [Ben07a].

Les expériences menées sur des aciers à roulement montrent que les pistes usinées en tournage dur et en super finition sont plus résistantes en fatigue que celles obtenues en rectification et super finition [Rem01].

La figure I.6 présente quelques applications de la super finition, elle sert à l'amélioration des états de surface des pièces usinées par le tournage et la rectification. Les mouvements lents et de faible amplitude des grains abrasifs provoquent la formation de coupeaux microscopiques. Cela permet d'obtenir en très peu de temps, une très haute qualité de surface.















Paramètres	Tournage/rectification	Superfinition
Planéité		
Cylindricité		
Rectitude		
Circularité		
Facette		
Taux de portance		
Profondeur de rugosité		

Figure I.6 : Différentes applications de la super finition [Zah07].

Le tableau I.1 donne une comparaison de procédés d'abrasion en termes d'état de surface et taux de portance.

Procédé d'abrasion	R_a	Capacité de charge portante relative
Superfinition (toilage ou rodage)	$0,05 \mu m$	73,5%
Rectification ultrafine	$0,1 \mu m$	69,6%
Rectification finition	$0,16 \mu m$	55,7%
Rectification classique	$0,35 \mu m$	45,2%
Usinage à l'outil coupant	$0,5 \mu m$	37,5%

Tableau I.1 : Performances comparées de procédés d'abrasion en termes d'état de surface et de taux de portance [Sur07].

I.2.3. Doucissage :

Le rodage ou le doucissage est un processus pour finir les surfaces métalliques ou non métalliques avec des outils agglomérés ou des abrasifs en suspension.

1. Doucissage par abrasifs libres :

Il y a longtemps, le doucissage des surfaces se faisait exclusivement en utilisant les matériaux avec des abrasifs en poudre. La poudre abrasive est mélangée avec l'eau pour former l'agent de rodage et l'opération est exécutée sur un rodoir généralement en acier ou en bronze, l'agent de doucissage est appliqué entre l'outil de doucissage et l'échantillon de matériaux [Kar04]. Les grains individuels de l'agent roulent de long en large entre l'échantillon et l'outil, cela permet aux arêtes tranchantes des grains abrasifs de pénétrer à l'intérieur de la surface, ce processus mène à des fractures locales de la couche superficielle du matériau et donc à un enlèvement de minuscules copeaux [Jac99].

2. Doucissage par abrasifs liés :

C'est à partir des années cinquante que le doucissage par des abrasifs fixes a commencé à être utilisé pour le surfacage des pièces destinées à remplir des fonctions dans des appareils mécaniques, qui sont devenus de plus en plus performants. Le doucissage à abrasifs fixes est une technique qui utilise des outils métalliques plans ou sphériques, dont la surface utile contient des grains abrasifs, où l'eau est utilisée pour refroidir l'outil, dégager les débris et aider la circulation des particules entre l'échantillon et l'outil. [Rup72] a étudié l'action de ces outils sur l'état de surface d'un dioptre en verre, il a montré que le mode d'action d'un abrasif fixe est plus compliqué que celui d'un abrasif libre. Si l'outil est neuf ou ravivé, les grains pénètrent profondément dans le verre et produisent des petites écailles et fêlures. Le rodage à abrasifs fixes est un processus pendant lequel l'orientation des grains abrasifs vers la surface de l'échantillon est constante. Le fluide de rodage ne contient pas d'abrasifs, et a pour seule fonction le refroidissement de l'outil et de l'échantillon. Le lubrifiant doit évacuer les débris à l'extérieur de la zone d'usinage.

La figure I.7 montre le principe de rodage par abrasif libres et liés.

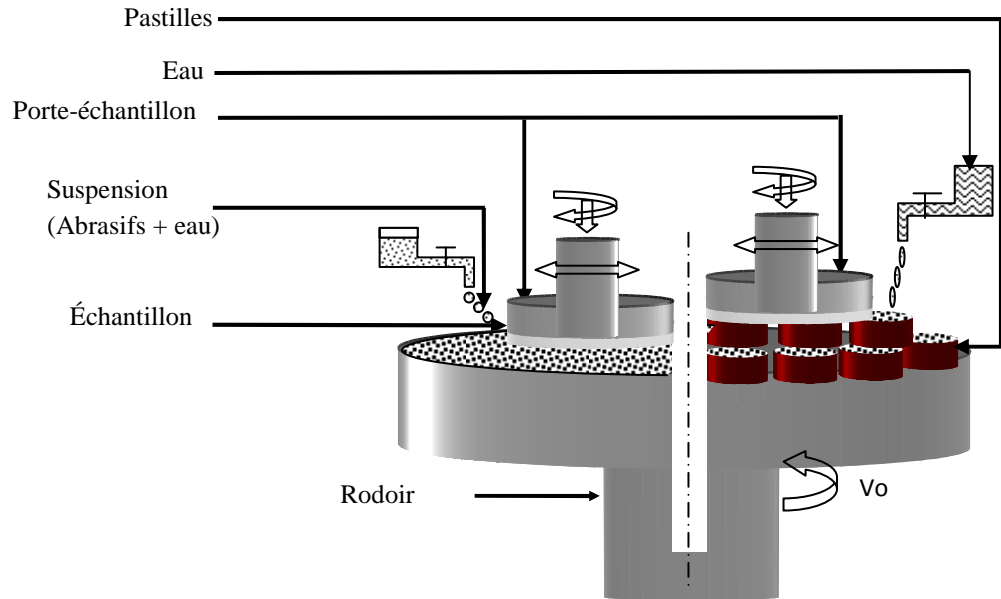


Figure I.7 : Principe de rodage par abrasif en suspension et par pastille.

3. Facteurs influençant le procédé de rodage :

La quantité de copeaux enlevée par unité de temps et la rugosité de surface sont influencées par plusieurs facteurs représentés par la figure I.8 :

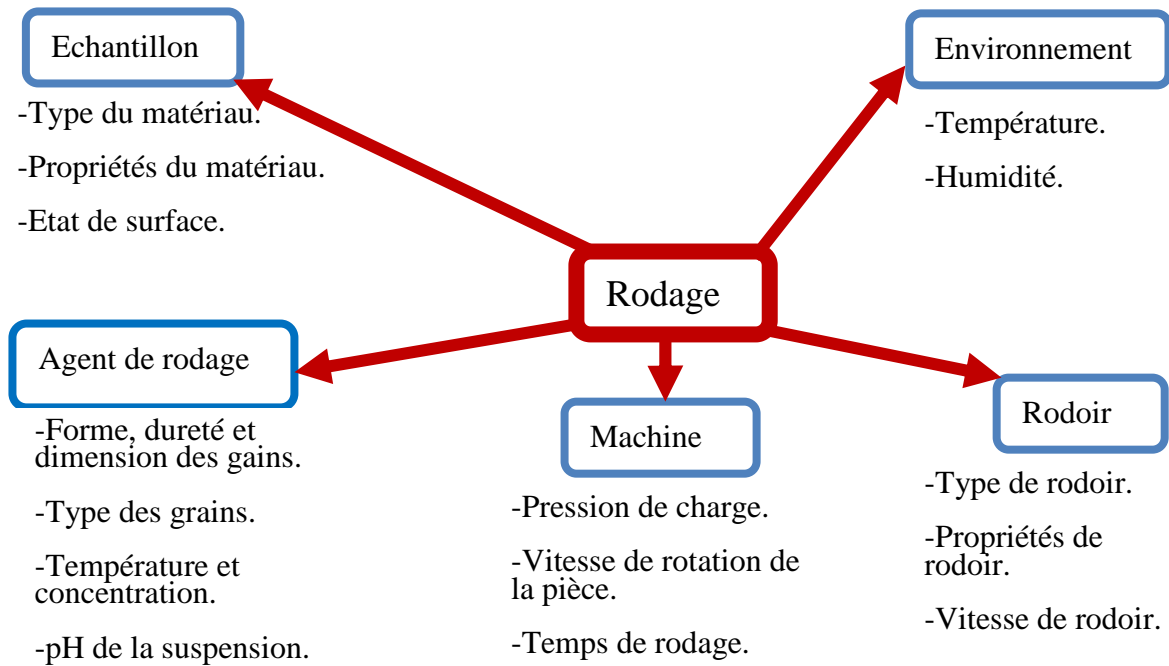


Figure I.8 : Les facteurs influençant sur le procédé de rodage [Bou01].

I.2.4. Polissage :

Le polissage est la dernière opération de finition des surfaces, elle s'effectue selon le même principe que le douçissage sauf qu'on emploie un polissoir plus doux et des grains abrasifs plus fins. Le but de polissage est d'enlever tout l'endommagement de la sub-surface créée par le douçissage et réduire la rugosité de la surface [Mar00].

Le polissage se caractérise par la génération d'une rugosité minimale de la surface avec un faible taux d'enlèvement. Des grains abrasifs de taille micrométriques et des polissoirs relativement doux sont utilisés généralement. Cependant, la transition entre le douçissage et le polissage est restreinte puisque, sous certaines conditions, le douçissage peut aussi être utilisé comme processus final [Bri06].

Le principe de polissage est montré dans la figure I.9, le disque portant le polissoir est en rotation par contre le porte échantillon est en rotation et en translation.

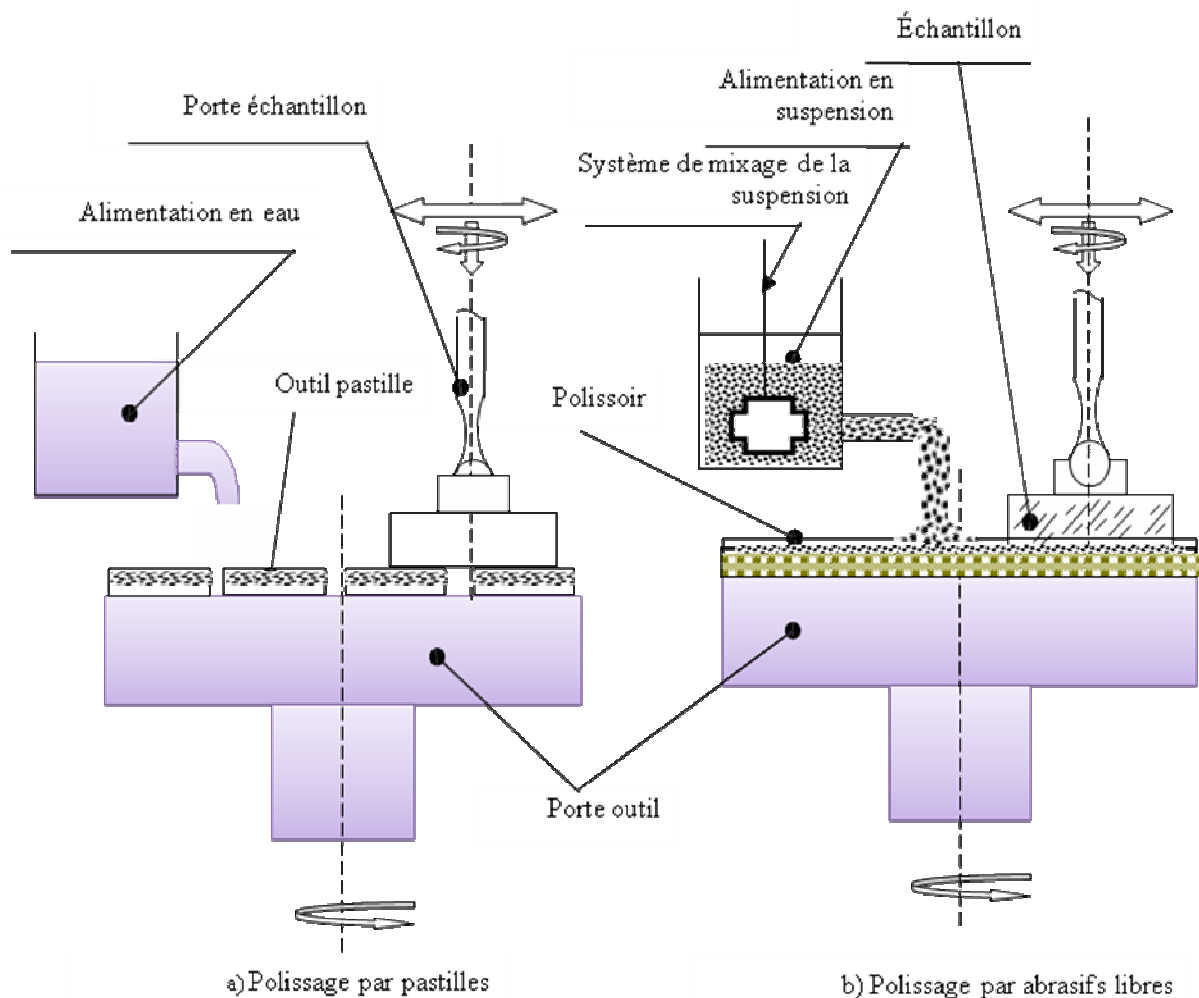


Figure I.9 : Principe de polissage.

1. Mécanisme de polissage du verre optique :

Le polissage du verre optique est un procédé très complexe vu le grand nombre de paramètres qui l'influence, le mécanisme d'enlèvement de la matière a été expliquée par quatre hypothèses principales, voir figure I.10.

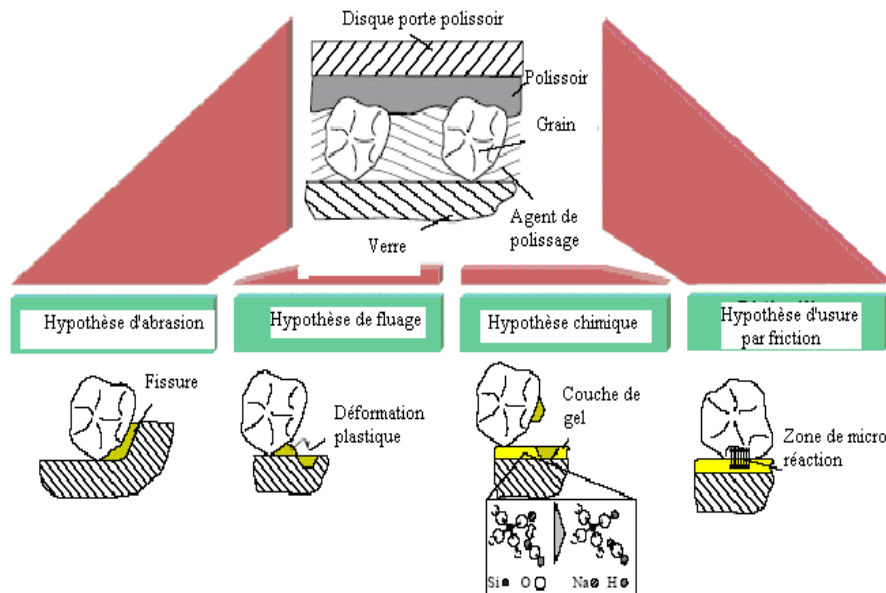


Figure I.10 : Les quatre hypothèses d'enlèvement de matière [Eva04].

- **Théorie de micro-abrasion :**

L'abrasion est basée sur un usinage mécanique, l'opération est semblable au rodage. L'enlèvement de matière est accompli en créant des fissures très fines. Généralement, l'hypothèse d'abrasion est appliquée seulement en tout premier lieu de la phase du processus de polissage. La matière est sévèrement fissurée et les sommets fournissent une surface de contact excellente pour le grain polissant. L'enlèvement de matière est basé sur le processus de fracture mécanique [Ali07].

- **Théorie de fluage thermique superficiel :**

L'hypothèse du fluage entraîne un déplacement plastique matériel avec adoucissement local dû au chauffage à friction. Ces effets peuvent être observés, en tenant compte des caractéristiques viscoélastiques du verre chimiquement modifié de la sub-surface, même quand il y a seulement une légère augmentation dans la température [Ali07].

- **Théorie chimique :**

Dans l'hypothèse chimique, l'enlèvement de matière est attribué à la formation et à l'enlèvement d'une couche de gel. Cette couche est produite par l'incorporation de l'eau dans la sub-surface du verre. Plusieurs formes d'interaction entre les composants du verre et l'agent polissant ont été observées. Ceux-ci dépendent de la composition, des propriétés d'agent polissant et des caractéristiques du verre [Ali07].

- **Théorie d'action combinée (hybride) :**

Les trois hypothèses présentées se concentrent sur de possibles interactions différentes des composants dans le processus. Le polissage réel évoluera à travers une combinaison de mécanismes d'enlèvement de matière, dépendant des conditions de travail. En outre, personne n'a réussi à développer un modèle quantifiable d'enlèvement de matière à cette date. Par conséquent les hypothèses hybrides, utilisées dans certains mécanismes [Ali07].

2. Classification des processus de polissage :

a- Polissage des métaux :

Les miroirs métalliques tels que les miroirs en cuivre, en nickel ou en acier..., sont de plus en plus utilisés comme composants optiques, c'est pourquoi leurs états de surface jouent un rôle très important, parmi les méthodes permettant l'amélioration de l'état de surface des métaux on cite [Bel97].

- Le polissage à diamant
- La finition par abrasifs électrolytiques
- La finition ultra- fine

Le polissage de certains cristaux ou métaux se fait toujours sur des tissus synthétique ou naturels étudiés par des établissements spécialisés.

b- Polissage mécanique :

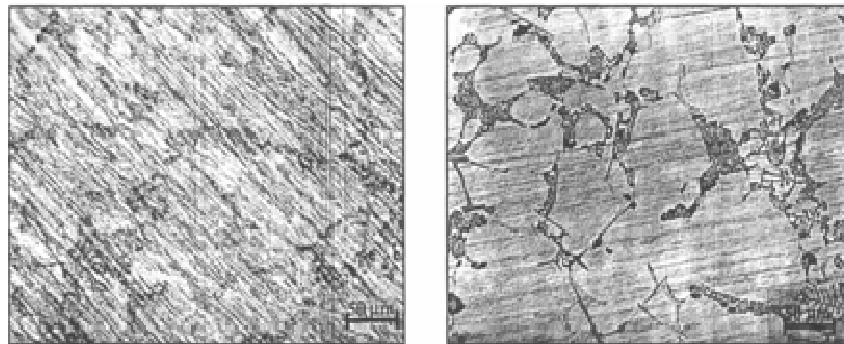
Pour le polissage mécanique, on utilise des papiers avec des particules abrasives, sorte de toile émeri, de papier de verre, mais avec une taille de particules plus fine, en général en carbure de

silicium (SiC) ou en aluminium (Al_2O_3). Si la surface est rugueuse, on commence par un papier à gros grain, puis passe successivement à des papiers à grain plus fin. Puis, on utilise une toile sur laquelle on dépose des diamants artificiels de taille fin ($6\ \mu m$, $3\ \mu m$ et $1\ \mu m$), soit en pulvérisant un aérosol, soit en étalant une pâte.

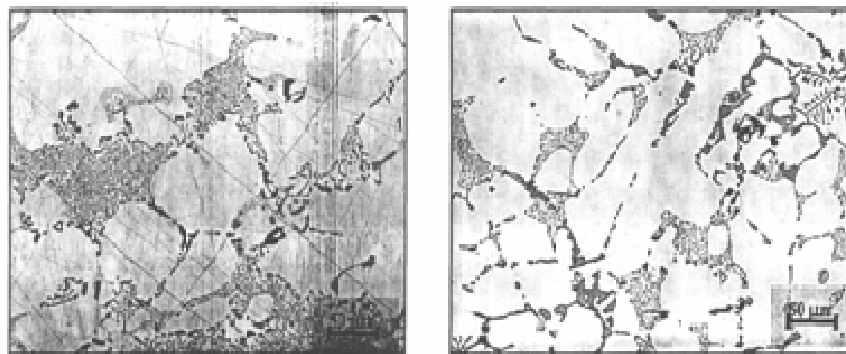
Les matériaux très durs sont longs à polir et usent beaucoup de consommable (papiers, pâte ou aérosol diamantés).

Les matériaux très mous (comme le cuivre) sont difficiles à polir car on crée facilement des facettes, et les particules abrasives s'incrudent plus facilement ; on ne peut de fait pas utiliser de polissage diamant.

En bref, les traitements de polissage mécanique par abrasion produisent des surfaces extrêmement lisses (voir figure I.11) mais déformées et leurs applications sont restreintes aux surfaces planes [Gui98].



-Fin de pré polissage sur papier SiC P100. -Après polissage au diamant $4\ \mu m$.



-Après polissage au diamant $2\ \mu m$. -Après finition avec une solution Colloïdal abrasive.

Figure. I.11 : Exemple de l'état de surface aux différentes étapes du polissage d'un alliage d'aluminium AlSi5Cu3 [Gui98].

c- Polissage du verre :

Il existe plusieurs méthodes de polissage du verre, parmi lesquelles on présente :

1. Polissage à abrasifs en suspension :

La technique de polissage du verre optique par des abrasifs en suspension est la technique la plus utilisée dans l'industrie optique, surtout depuis l'apparition des polissoirs en polyuréthane et de l'oxyde de cérium de grosseur inférieure au micromètre. Cette technique met en œuvre quatre éléments essentiels ; le polissoir qui sert de porteur de grains abrasifs, l'agent de polissage, le verre ainsi que la machine utilisée [Bou01].

L'inconvénient majeur de cette méthode est l'influence d'un grand nombre de paramètres technologiques sur le résultat de polissage.

2. Polissage par des abrasifs liés :

Le polissage à abrasifs fixes a été introduit dans l'industrie optique à partir de 1980 comme un procédé de polissage rapide. En effet, le temps de polissage est très court par rapport à la technique conventionnelle. Il s'avère particulièrement convenable pour la fabrication en série des lentilles de qualité moyenne. Les outils-pastilles, sont arrosées avec de l'eau pure qui est utilisée uniquement comme lubrifiant. Nous constatons, dans ce procédé, que les pastilles remplissent à la fois les fonctions de polissoir et l'agent de polissage. L'avantage de cette technique sur le polissage par polyuréthane est qu'aucune suspension chimiquement peu fiable n'est nécessaire [Bou01].

Ce procédé peut être amélioré et appliqué à la finition des surfaces de haute précision et peut remplacer dans l'avenir le procédé de polissage à abrasifs libres vu ses nombreux avantages.

3. Facteurs influençant le procédé de polissage :

Les facteurs influençant le procédé de polissage sont les mêmes que ceux du rodage (échantillon, machine, environnement, moyen de polissage et polissoir). Le polissoir utilisé au lissage de la surface du verre, on peut classer, les polissoirs en trois grandes catégories [Ben05] :

- polissoirs à déformation plastique permanente (poix, polyuréthane fondu).
- polissoirs souples et facilement déformables (drap ou tissu spécial, feutre naturel).

- polissoirs rigides difficilement déformables (feutre durci, mousse de polyuréthane chargé).

I.3. Généralités sur les outils d'abrasion :

Les techniques d'abrasion mécanique permettent des usinages de précision grâce aux principes d'abrasion, elles consistent à enlever la matière à l'aide des outils abrasifs performants. La forme la plus courante des outils abrasifs est la meule, les toiles et les papiers abrasifs, permettent d'obtenir, un meilleur état de surface.

I.3.1. Abrasifs :

Les grains abrasifs sont des particules (corps) durs qui, par action mécanique sur des corps moins durs, sont capables de les usiner. Dans le cas de la meule (abrasifs agglomérés) et des toiles et papiers abrasifs (abrasifs appliqués), les grains abrasifs répartis sur la surface travaillent à la façon d'un outil de coupe, par enlèvement de matière que cet enlèvement de matière dépendra de divers paramètres: dureté de l'abrasif, grosseur du grain, forme du grain, capacité de régénération des arêtes vives, nature du liant maintenant les grains abrasifs.

L'abrasif doit posséder certaines qualités :

- Il doit être plus dur que la matière à usiner.
- Il doit être suffisamment robuste pour résister aux efforts de meulage.
- Il doit résister à la chaleur afin de ne pas s'émousser sous l'effet de hautes températures.
- Il doit être friable de manière que lorsque leurs arêtes s'émoussent, ils laissent de nouvelles arêtes vives pour poursuivre le travail.

I.3.2. Grains abrasifs :

Un abrasif est un corps cristallisé dur qui sert à usiner un corps moins dur, plusieurs types d'abrasif sont utilisés, ce sont généralement des abrasifs naturels ou artificiels.

a- Abrasifs naturels :

Les premiers abrasifs utilisés en fabrication mécanique étaient d'origine naturelle. Les poudres d'Émeri, de Corindon et de Grenat ont été les seuls abrasifs disponibles jusqu'à l'introduction du premier produit synthétique. Les abrasifs en diamant naturel ont été aussi utilisés pour plusieurs années.

Parce que ces abrasifs sont d'origine naturelle, il est important de savoir l'emplacement de laquelle la matière première était extraite de la terre pour la convertir en abrasifs utiles.

Chaque source de la matière brute a ses caractéristiques spécifiques qui donnent les qualités désirables ou indésirables à l'abrasif. Même les abrasifs de la même source n'étaient pas exactement uniformes d'un lot à un autre à cause de la différence de composition de la roche du quelle ils ont été minés. Il pourrait y avoir une grande quantité de variable que le fabricant avait à reconnaître pendant les premières phases d'usinage et à ajuster en conséquence à la méthode du rodage (douceissage et polissage).

Avec la disponibilité des abrasifs synthétiques d'excellentes qualités et uniformités, le rôle des abrasifs naturels dans l'industrie a nettement diminué [Bel08].

b- Abrasifs synthétiques :

Les abrasifs synthétiques ont été produits depuis plus de 50 ans. Les méthodes de fabrication ont été perfectionnées durant ce temps à une telle ampleur que presque tous les abrasifs utilisés en fabrication mécanique aujourd'hui sont synthétiques. Ils sont typiquement d'une uniformité excellente et une pureté élevée. Ils sont également plus précisément triés et classés que les abrasifs naturels. Les plus largement utilisés des abrasifs sont les poudres d'oxyde d'aluminium. Ils varient du bronze au blanc pur en couleur, selon les impuretés résiduelles. Deux autres abrasifs synthétiques important sont le carbure de silicium (SiC) et le carbure de bore (B₄C). Les deux abrasifs sont très durs avec la dureté du carbure de bore proche de celle du diamant [Kar04].

1. Abrasifs d'oxyde d'aluminium synthétique :

L'oxyde d'aluminium Al₂O₃ (Alumine) est l'un des oxydes qui sont extrêmement importantes pour la fabrication.

La couleur de la poudre abrasive de l'oxyde d'aluminium apporte une indication de la pureté du matériau. L'alumine de presque 100% de pureté est de couleur blanche pure. La couleur blanche cassée indique la présence d'impuretés de résidu minéral, et la poudre abrasive de couleur bronze contient un pourcentage appréciable de ces minéraux [Kar04].

2. Carbure de silicium :

Le carbure de silicium est un matériau abrasif synthétique très dur qui a plusieurs applications en industrie. Aucune forme naturelle de ce minéral n'a été trouvée.

Les deux types de carbure du silicium sont différents par leurs couleur, densité et dureté. L'un est noir ou gris foncé et l'autre est vert. Le carbure de silicium noir est plus tenace et légèrement plus dur que le carbure de silicium vert. La raison de cette différence est que le

carbure de silicium noir a une structure moins poreuse qui lui donne une densité plus élevée que celui vert. Cependant, puisque les paramètres physiques des deux types sont presque identiques, il est peu probable l'existence d'une différence réelle dans leurs efficacité de rodage dans les conditions normales de l'opération.

Le carbure de silicium est largement utilisé dans les meules abrasives pour le rodage précis des métaux et autres matériaux durs et fragiles. Cependant, Les meules en carbure de silicium sont rarement employées dans la fabrication optique puisque la plus part des outils liés utilisés dans ce domaine sont en diamant [Bel08].

3. Diamant :

Les abrasifs en diamant jouent un rôle toujours croissant dans la fabrication mécanique, et des semi-conducteurs. Ils sont utilisés sous forme de poudre comme une suspension en diamant, ou ils sont liés dans une matrice métallique ou organique pour les utiliser sous plusieurs formes d'outils en diamant. L'utilisation de la suspension de diamant a été limitée jusqu'à maintenant au doucissage et au polissage de matériaux durs et difficile à travailler tels que quelques métaux et les céramiques.

- Diamant naturel :

Les diamants naturels été formés à une température très élevée et sous des pressions énormes profondes à l'intérieur de cape de la terre. Ils se trouvent dans plusieurs endroits sur la planète, mais l'Afrique du sud reste la localité la plus importante de diamant naturel au monde.

La bonne qualité de diamants naturels a un nombre de caractéristiques uniques sans pareil par une autre substance connu par l'être humain. La plus importante de ses caractéristiques est la dureté du matériau. Elle est de l'ordre de 10 sur l'échelle de Mohs (par définition) et la dureté Knoop correspondante est supérieure à 8000 kg/mm².

La structure basique du diamant est le carbone élémentaire qui se cristallise en orientation cubique. Le diamant naturel à une couleur claire brillante [Kar04].

- Diamant synthétique :

Le diamant synthétique a été produit plus de 30 ans par plusieurs processus qui ont été développés pour répondre à la provision incertaine et le coût élevé du diamant naturel « diamant bort ». Actuellement beaucoup d'outils diamantés sont fabriqués exclusivement de poudre de diamant synthétique. Différents mélanges de diamant synthétique et naturel, que ce soit vierge ou recyclé sont aussi souvent utilisé pour l'élaboration des outils.

La majorité des outils diamantés constitué de variétés de diamant synthétiques ou des mélanges et liés par des liants résinoïdes. Les outils liés par métaux sont faits par la liaison des grains de diamants dans une matrice métallique par le processus de frittage à haute température. Les abrasifs de diamant peuvent exister en commerce sous la forme sec, mais presque tous les abrasifs en diamant sont vendus comme suspension ou pâte diamanté [Bel08].

La figure I.12 montre Quelques formes de grains abrasifs en diamant synthétique.

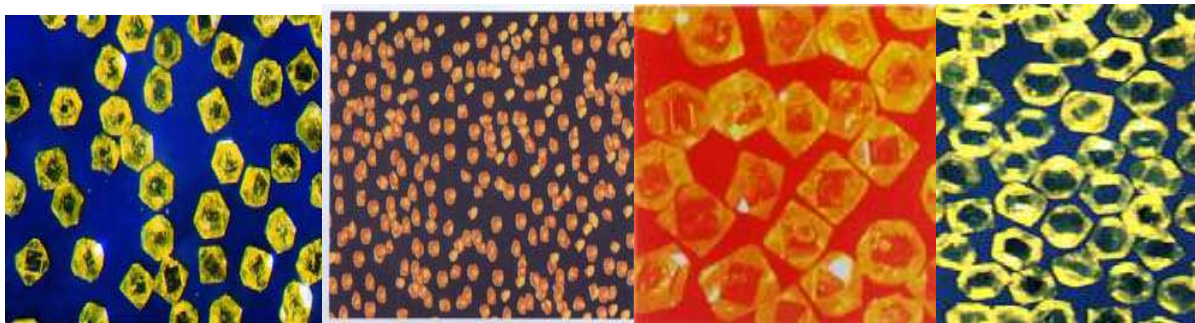


Figure I.12 : Quelques types de grains abrasifs en diamant synthétique [Bel08].

I.3.3. Différentes applications d'abrasif :

Les abrasifs sont classés en trois catégories principales, et que dans chacune des ces catégories on trouve divers types et dimensions.

- Les abrasifs agglomérés : les meules et les disques de meuleuse.
- Les abrasifs appliqués : les papiers abrasifs, les bandes abrasives, les rouleaux abrasifs et les disques abrasifs.
- Le troisième type concerne de l'utilisation des grains en suspension sur un support (toile, tissu...etc.), comme par exemple les polissoirs chargés en abrasifs.

I.3.4. Abrasifs appliqués :

Les abrasifs appliqués sont constitués de grains d'oxyde d'aluminium, d'oxyde de Zirconium ou de carbure de silicium collés par un liant (ou adhésif) sur un support qui peut être soit du papier, soit de la toile (toile de coton ou toile de polyester), soit de la fibre. Ils sont présents sous forme de bandes, disques, rouleaux ou feuilles, pour le ponçage et le polissage.

CHAPITRE II

Procédé de toilage

II.1. Définition de toilage	25
II.2. Principe de toilage	27
II.3. Paramètres influençant le procédé de toilage	28
II.3.1. Galet de contact	28
II.3.2. Vitesse d'avance de la toile	28
II.3.3. Durée de toilage	30
II.3.4. Taille des grains abrasifs	31
II.3.5. Fréquence d'oscillation	32
II.3.6. Pression de contact	32
II.4. Caractérisation des surfaces toilées	33
II.4.1. Influence du toilage sur la topographie de surface	33
II.4.2. Influence du toilage sur les contraintes résiduelles	36
II.4.3. Influence du toilage sur la microstructure métallurgique	38
II.4.4. Morphologie du micro copeaux	40
II.5. Dispositifs à bande abrasive	40
II.5.1. Appareils de superfinitions rapportées : Série 204/208	40
II.5.2. Dispositif ALL-JOB	41
II.5.3. Dispositif à bande T25	41
II.5.4. Surfaceuse à bande abrasive	42
II.5.5. Lime abrasive	42
II.6. Bandes abrasives	43
II.6.1. Types des bandes abrasives	47
a- Bandes abrasives sur support papier	47
b- Bandes abrasives sur support toile	47
II.6.2. Paramètres des bandes abrasives	48
a- Densité des pics	48
b- Hauteur moyenne des grains abrasifs	49
c- Angle au sommet des pics de rugosité	49

II.1. Définition de toilage :

Le procédé de toilage est une technique de super finition récente dans son utilisation [Khe07a, Rec08], et se distingue des autres procédés de super finition par l'utilisation d'un support élastique et d'un outil automatiquement régénéré qui est la bande abrasive de faible épaisseur appliquée sur une pièce en rotation (figure II.1) [Jou05], ce procédé de finition est remarquablement simple et permet de réduire les coûts de fabrication, en diminuant le temps de production et améliorer la qualité globale du produit [Klo05]. Malheureusement son développement pratique est difficile parce que les mécanismes physiques de base de processus d'abrasion jusqu'à se jour sont mal connus [Sch02, Mez09a], ainsi, dans l'industrie, la gamme de procédé de toilage reste encore empirique, avec chaque spécification de nouveau production, les tests préliminaires sont en effet nécessaires pour réaliser la configuration opérationnelle optimale du processus.

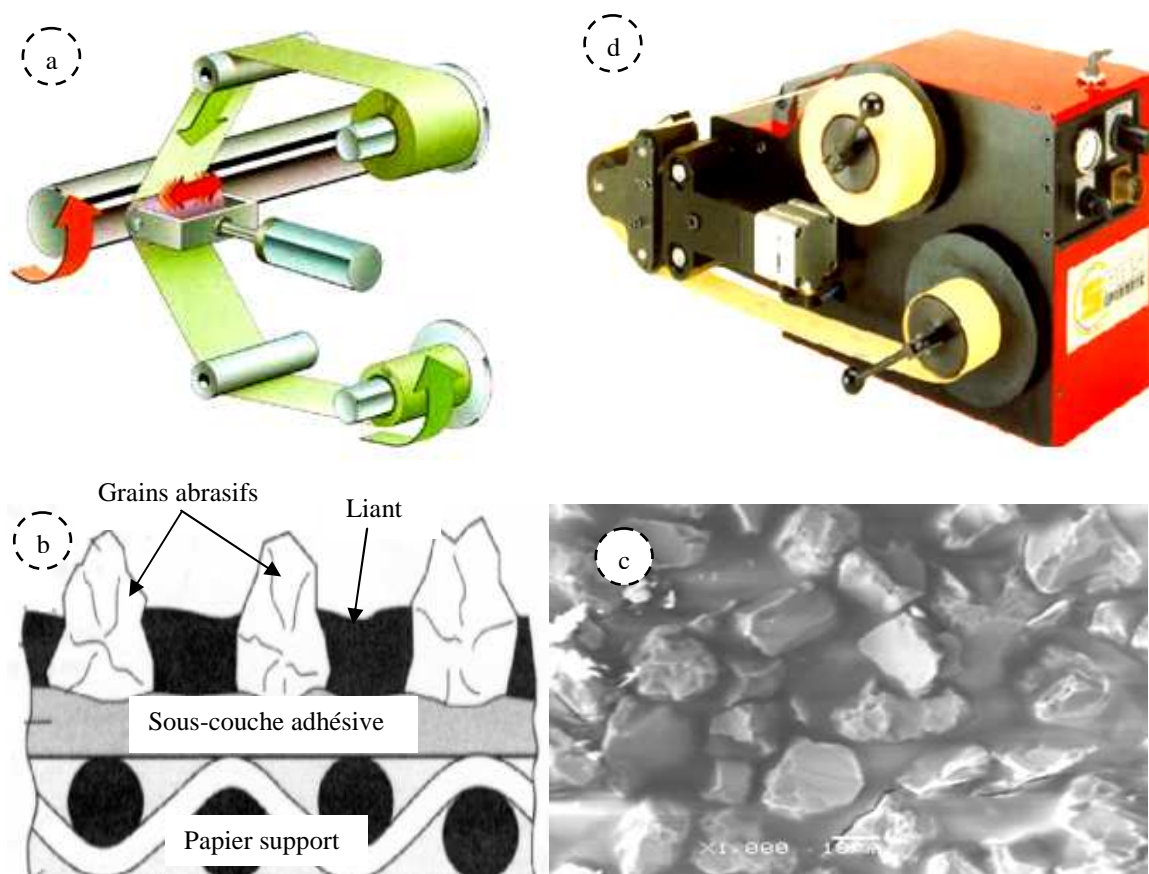


Figure II.1 : (a) Principe de toilage - (b) Modélisation de la structure d'une toile abrasive - (c) Vue au MEB d'une toile réelle de calibre 20 µm - (d) Exemple du dispositif de toilage [Mez09a].

Une étude préliminaire a montré que le toilage est un procédé complémentaire au tournage dur [Khe07a, Rec03b], c'est-à-dire le tournage des métaux durs, se définit comme une opération de tournage sur des pièces traitées et durcies thermiquement, d'une dureté supérieure à 45HRC jusqu'à 65HRC ou plus, sans lubrification (usinage à sec) et par l'outil CBN (nitrure de bore cubique) [Ben07a, Grz08a, Grz08b], le toilage est une solution intéressante pour corriger les défauts laissés par le tournage dur [Rec03b], en effet, des études précédentes [Kis99, Rec03c] 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 notamment été montré que l'usure en dépouille V_B des outils entraînait une dérive des contraintes résiduelles (figure II.2.a), ainsi que des modifications métallurgiques (couches blanches – figure II.2.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 II.2.c). Ces morceaux de matières très dures, très fragiles et facilement détachables constituent des sources majeures d'endommagement [Rec03b]. Le procédé de toilage est de réduire les irrégularités de surface et d'améliorer de façon très significative l'intégrité de surface [Mez09a].

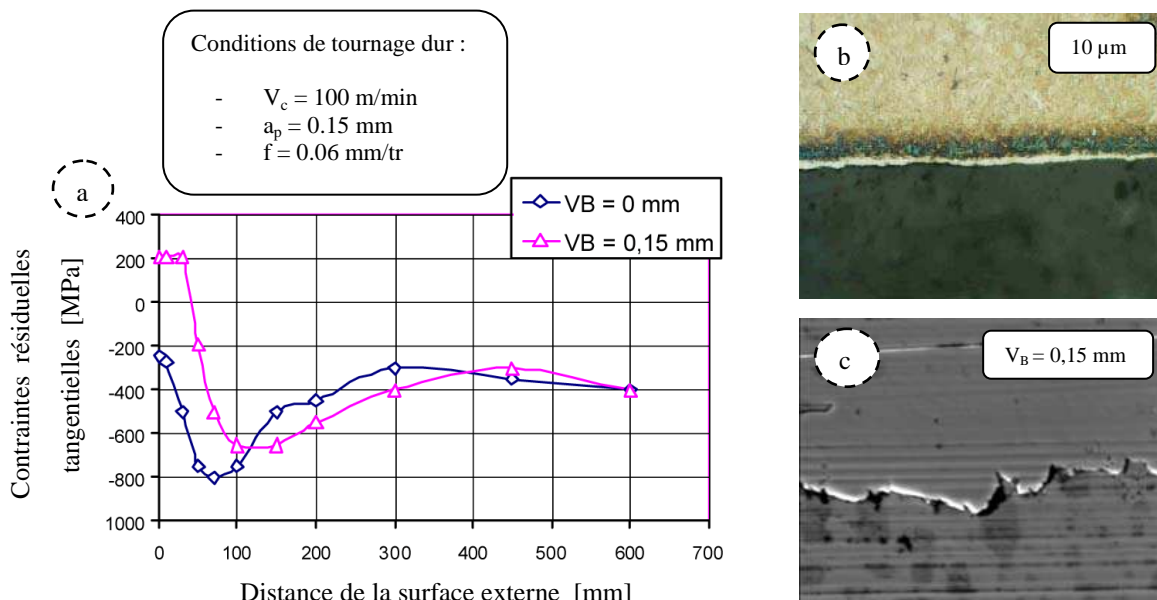


Figure II.2 : Problèmes d'intégrité de surface observés sur des surfaces obtenues par tournage dur [Rec03b].

Rech et al [Rec03c] ont montré que le toilage supprime les refoulements de matière laissés par le tournage dur. Il conduit à une surface plus homogène ce qui améliore considérablement le taux de portance. Le toilage permet donc de stabiliser la rugosité obtenue sur les surfaces malgré l'usure de l'arête de tournage dur qui a tendance à faire croître les pics de rugosité.

II.2. Principe de toilage :

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

- La première 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 que son pouvoir abrasif est fortement réduit : les conditions de finition ne sont donc 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, 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 toilage, différentes configurations de toilage peuvent être aussi distinguées en fonction de la géométrie du support pressant la toile contre la surface à usiner :

- Le toilage par galet (figure II.3.a) : un galet cylindrique, de dureté définie, presse la toile abrasive sur la pièce. Le contact toile abrasive/surface usinée est très limité.

- Le toilage par mâchoires (figure II.3.b) : Des mâchoires de forme définie pressent ensemble la toile abrasive sur la pièce cylindrique. Le contact toile abrasive/surface usinée 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, rugosité).

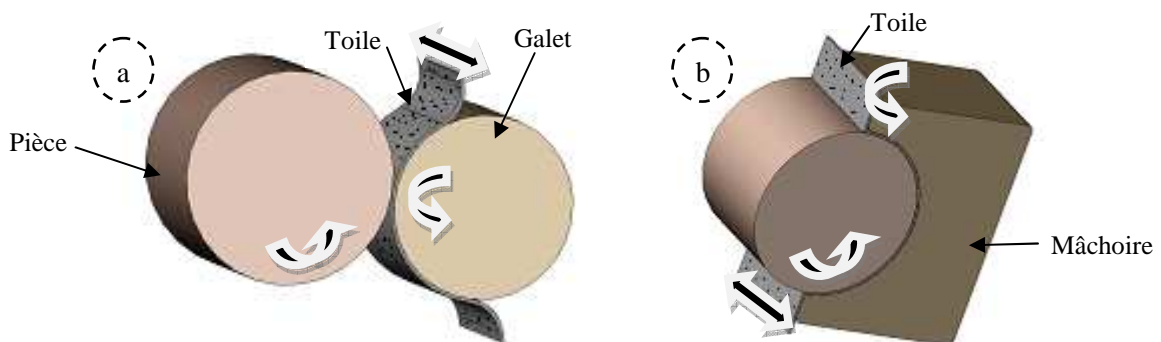


Figure II.3 : Principe de toilage par galet (a) et par mâchoire (b).

II.3. Paramètres influençant le procédé de toilage :

II.3.1. Galet de contact :

Selon l'application et la qualité de finition exigée, la dureté de galet de contact est fondamentale. Pour l'ébauche (phase de pré-finition), on utilise généralement des galets durs permettant un enlèvement de matière relativement important et donc d'améliorer la géométrie de la pièce en termes de circularité, rectitude et cylindricité de la zone usinée. Lors de la finition (phase ultime), les galets souples s'imposent lorsqu'il s'agit d'améliorer significativement les valeurs superficielles d'état de surface et d'augmenter le taux de portance [Sch01].

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, par contre le plus mauvais état de surface est obtenue avec un galet dur (figure II.4).

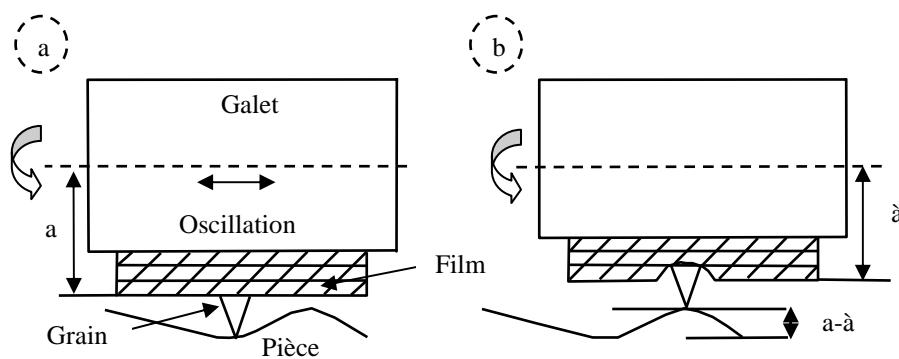


Figure II.4 : Influence de l'élasticité du galet et du film supportant les grains abrasifs,

a : au passage sur un creux d'ondulation, b : au passage sur un sommet d'ondulation [Khe05].

II.3.2. Vitesse d'avance de la toile :

Quand l'avance de la bande abrasive augmente les paramètres de la rugosité augmentent aussi. 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 ainsi améliorer la capacité de coupe de la toile. 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) conduiraient à des états de surfaces meilleurs (figure II.5) [Khe05].

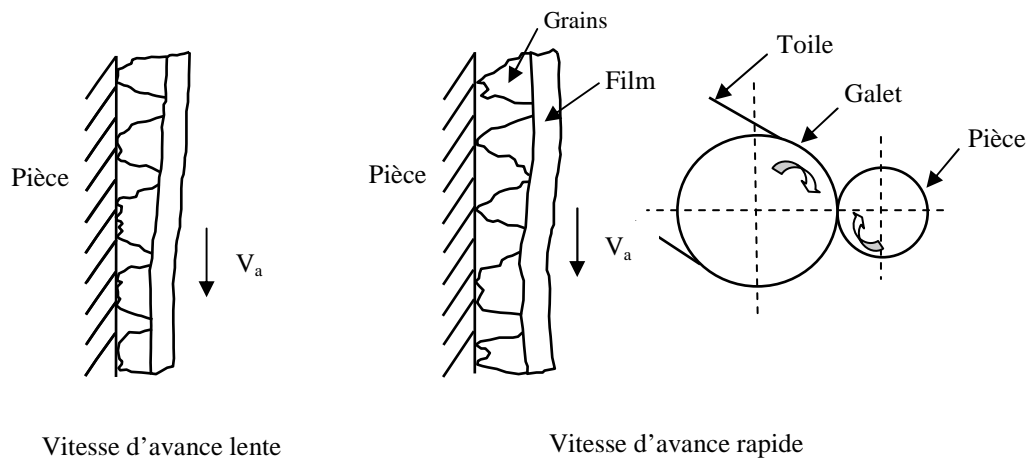


Figure II.5 : Influence de la vitesse d'avance de la toile sur l'usure des grains dans la zone de contact [Khe05].

La figure II.6 illustre le déplacement d'un grain abrasif à une durée de toilage fixe, mais à deux vitesses d'avance différentes. Donc dans le cas d'une vitesse lente qu'on a le meilleur état de surface. En effet, dans ce cas les grains passent plus de temps en contact avec la pièce que par rapport à une vitesse rapide. Les grains se trouvent donc plus arrondis ce qui conduit à un état de surface meilleur [Khe05].

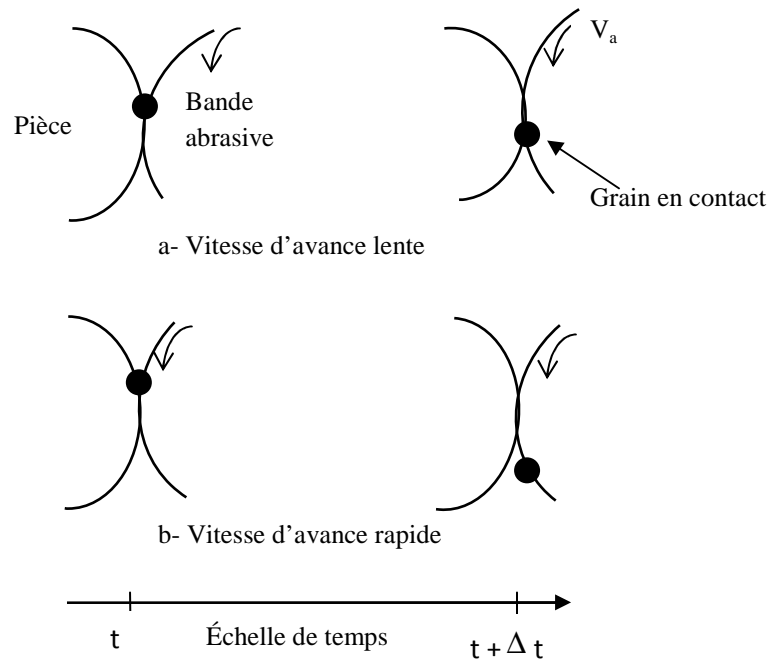


Figure II.6 : Déplacement d'un grain en contact pour la même durée de toilage et à deux vitesses différentes [Khe05].

II.3.3. Durée de toilage :

La figure II.7 représente la variation du gain de rugosité G_R en fonction de la durée de 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 stabilise à ce niveau au delà des 9 secondes de toilage, même si la dispersion augmente sensiblement, remarquons 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).

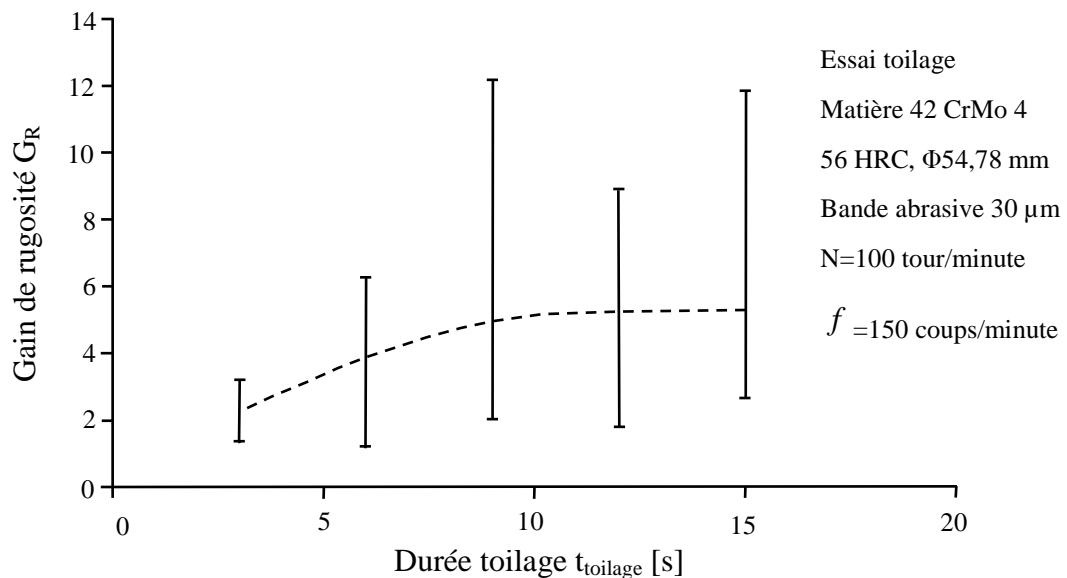


Figure II.7 : Evolution du gain de rugosité G_R en fonction de la durée de toilage [Ghi05].

Donc, le temps de cycle fait apparaître deux régimes distincts :

- D'une part, un régime primaire de toilage, qualifié de transitoire et caractérisé par un temps limite de coupe ou la superfinition de courte durée implique plutôt une prédominance par enlèvement de matière (coupe).
- D'autre part, le prolongement du toilage jusqu'à un régime établi, régime secondaire de toilage, qui conduit à la prédominance de la composante de frottement qu'à un enlèvement de matière [Big09].

II.3.4. Taille des grains abrasifs :

De manière évidente, les grains abrasifs de grosseur élevée génèrent plus de micro-copeaux, d'où un fort taux d'enlèvement de matière, l'enlèvement de matière 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 dureté superficielle de la contre face explique cette différence [Elm07].

Des nombreux chercheurs ont fait différents essais, et des configurations on été faite sur chacun de ces essais, ils ont trouvé que la granulométrie de $30\ \mu\text{m}$ qui permet d'atteindre les valeurs minimales de la rugosité et donne un meilleur état de surface (figure II.8) [Mez09b, Big09].

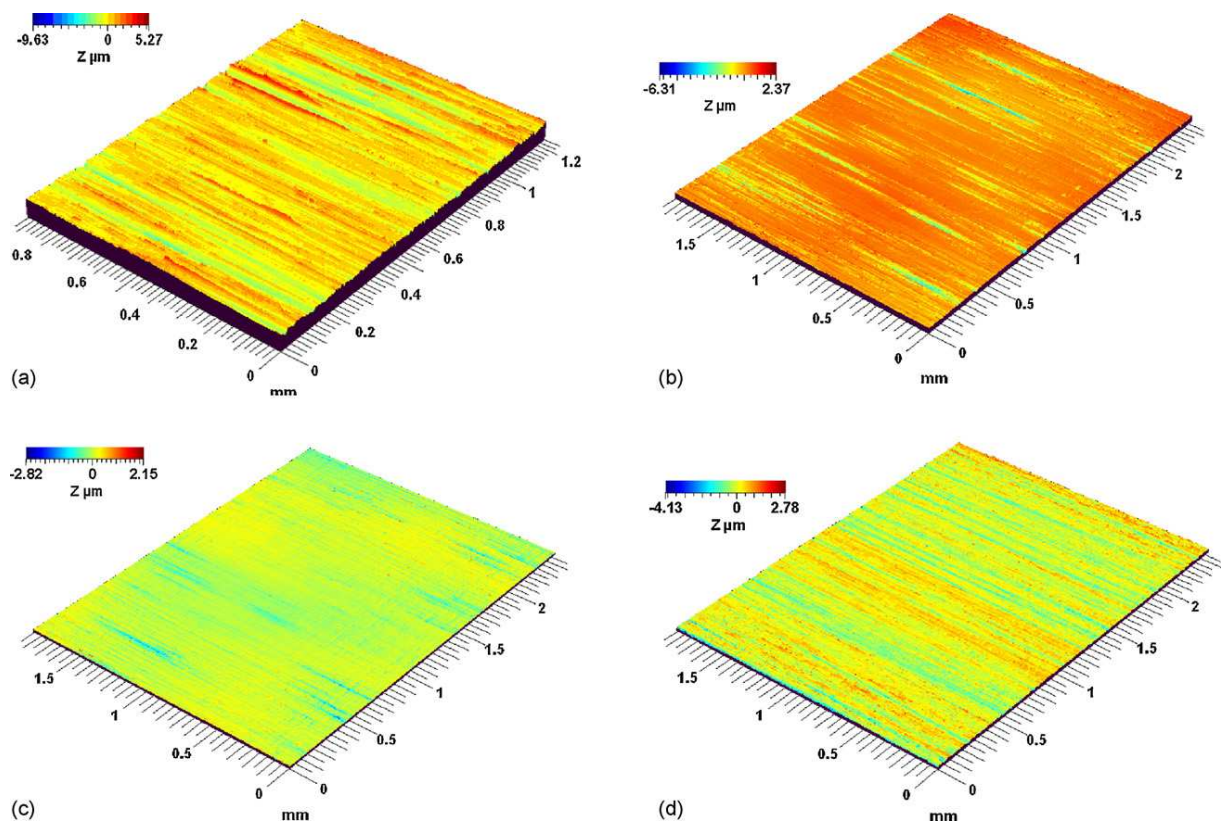


Figure II.8 : Vue 3D de topographies de surfaces extérieurs de l'acier original (a) et après le toilage par différentes tailles de grain (b) $9\ \mu\text{m}$ (c) $30\ \mu\text{m}$ (d) $80\ \mu\text{m}$ [Mez09b].

II.3.5. Fréquence d'oscillation :

La fréquence d'oscillation influe également, non seulement sur la diminution du taux des irrégularités de surface de la pièce finie, mais également sur l'activation privilégiée du mécanisme de coupe en toilage. Examinons graphiquement ces deux observations. La figure II.9 montre une progression croissante de gain de rugosité G_R en fonction de f . On note aussi que sans oscillation de la bande abrasive ($f = 0$), le gain de rugosité reste à un niveau très faible de 1,9 par rapport aux fréquences f 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 abrasive sur l'action des grains d'abrasifs. En effet, en faisant osciller le contact toile/pièce, la densité de grains actifs augmente [Ghi05].

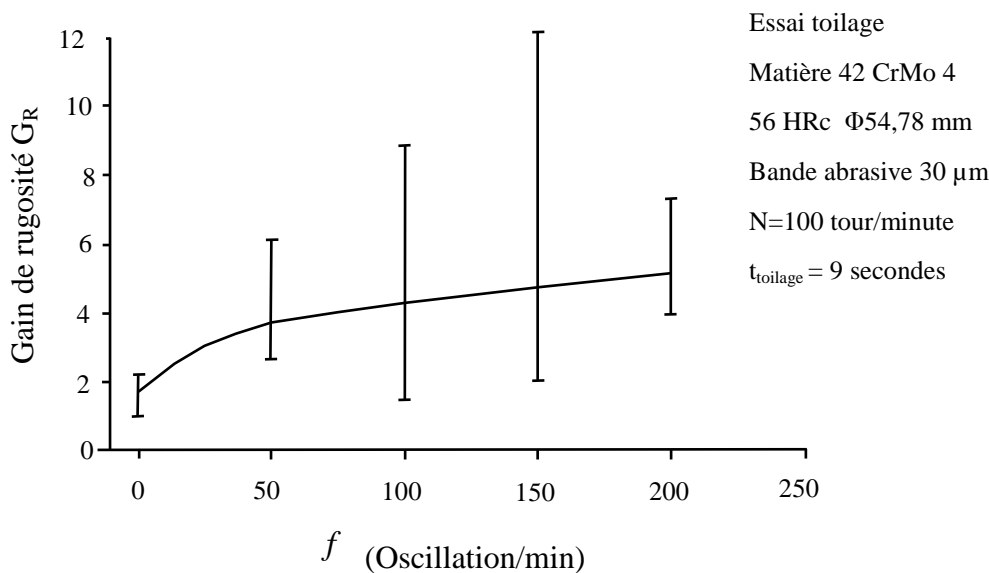


Figure II.9 : Evolution du gain de rugosité G_R en fonction de la fréquence d'oscillation f [Ghi05].

II.3.6. Pression de contact :

La pression de contact est le paramètre le plus influent sur la topographie de surface. L'augmentation de la pression a en général 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].

Khellouki et al [khe07a] ont montré que le paramètre de rugosité R_a diminue lorsque la force appliquée augmente. Cette réduction est rapide pour les forces appliquées faibles parce que le nombre de grains actifs est plus grand et moins usée, 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 toilée (figure II.10).

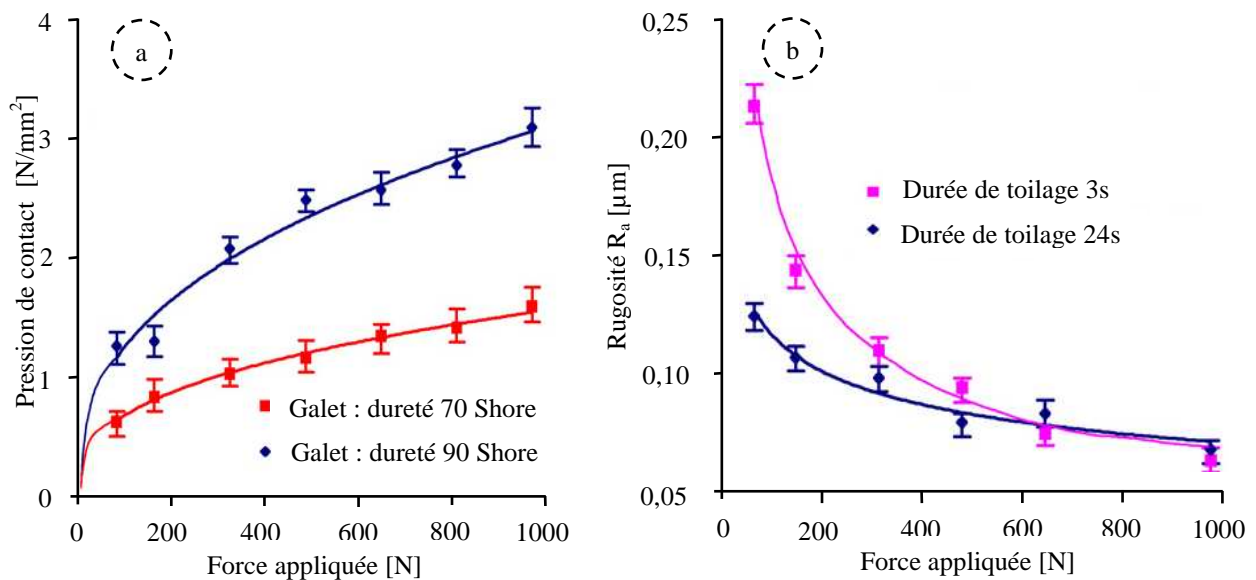


Figure II.10 : Influence de la force appliquée sur : (a) pression de contact
(b) rugosité R_a [Khe07a].

II.4. Caractérisation des surfaces toilées :

II.4.1. Influence du toilage sur la topographie de surface :

La rugosité des surfaces joue un rôle particulièrement important sur le comportement des interfaces, donc l'étude de la rugosité des surfaces est une étape fondamentale pour évaluer les transformations géométriques d'une surface induite notamment par un procédé de finition. Le comportement de surfaces en contact fait principalement intervenir l'aire réelle de contact qui dépend de la rugosité mais aussi de la déformation des aspérités.

L'influence du toilage sur la topographie des surfaces a été le moteur du développement de cette technique. Le toilage permet une amélioration très significative de la rugosité de surface. Dans notre cas, le paramètre R_a passe de 0,3 µm à 0,1 µm [Khe07b], et dans une autre étude le paramètre de rugosité R_a passe de 0,3 µm à 0,2 µm après la super finition par procédé de toilage [Lim05]. Une analyse globale des surfaces avant et après toilage (figure II.11) et de

deux profils de rugosité extraits (figure II.12.a) permet de voir que le toilage entraîne une réduction de l'amplitude des écarts micro-géométriques, ainsi qu'une augmentation de densité des stries peu profondes, ce qui améliore beaucoup la courbe de taux de portance (figure II.12.b).

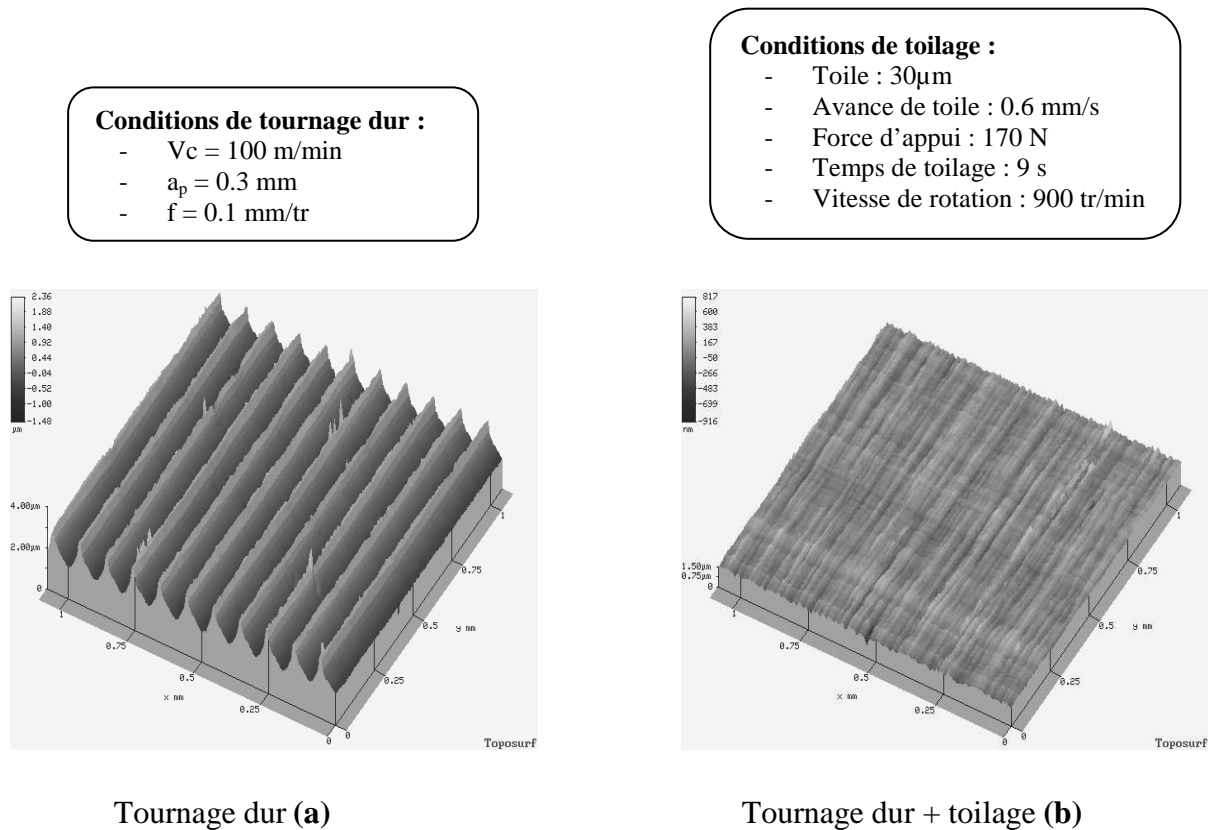


Figure II.11 : Topographie de surface obtenue à l'issue de l'opération de tournage dur et de tournage dur + toilage [Grz08a].

De plus, le toilage fait disparaître le pas de rugosité laissé par le tournage dur. Cela constitue un avantage important en termes de limitation de la période rodage de la surface en fonctionnement. L'analyse des surfaces toilées qui présentaient des refoulements de matière (figure II.2.c), permet de constater que ces 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 beaucoup la rugosité ($R_a \sim 0,27 \mu\text{m}$ à $R_a \sim 0,11 \mu\text{m}$) par élimination des refoulements de matière laissés par le tournage dur (exemple : bourrelets, manteaux,...) [Rec09], par contre ne modifie pas les écarts de forme et l'ondulation [Rec09, Khe07a].

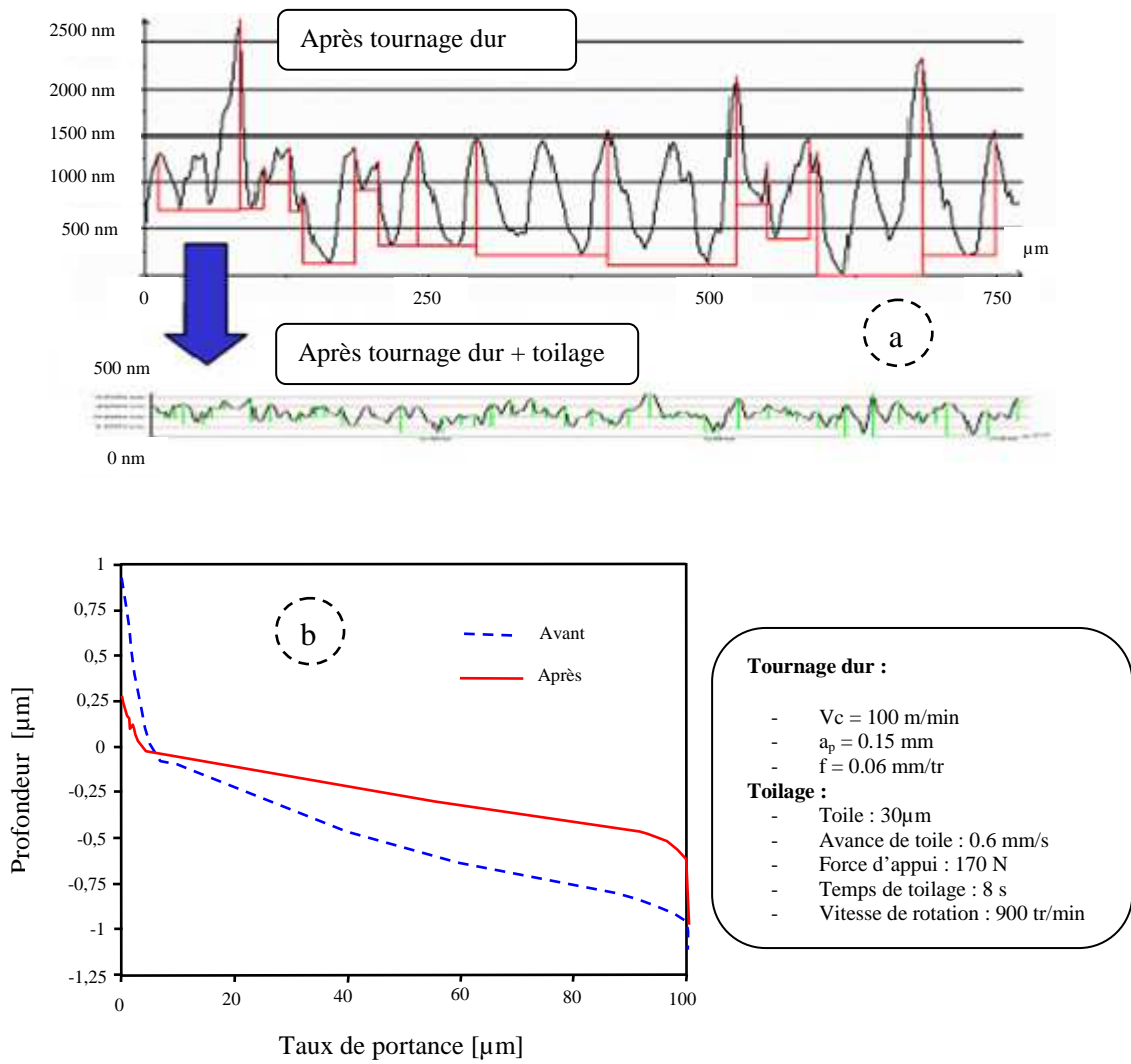


Figure II.12 : Evolution du profil de rugosité et du taux de portance [Rec03a].

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 (figure II.13) [Khe07a].

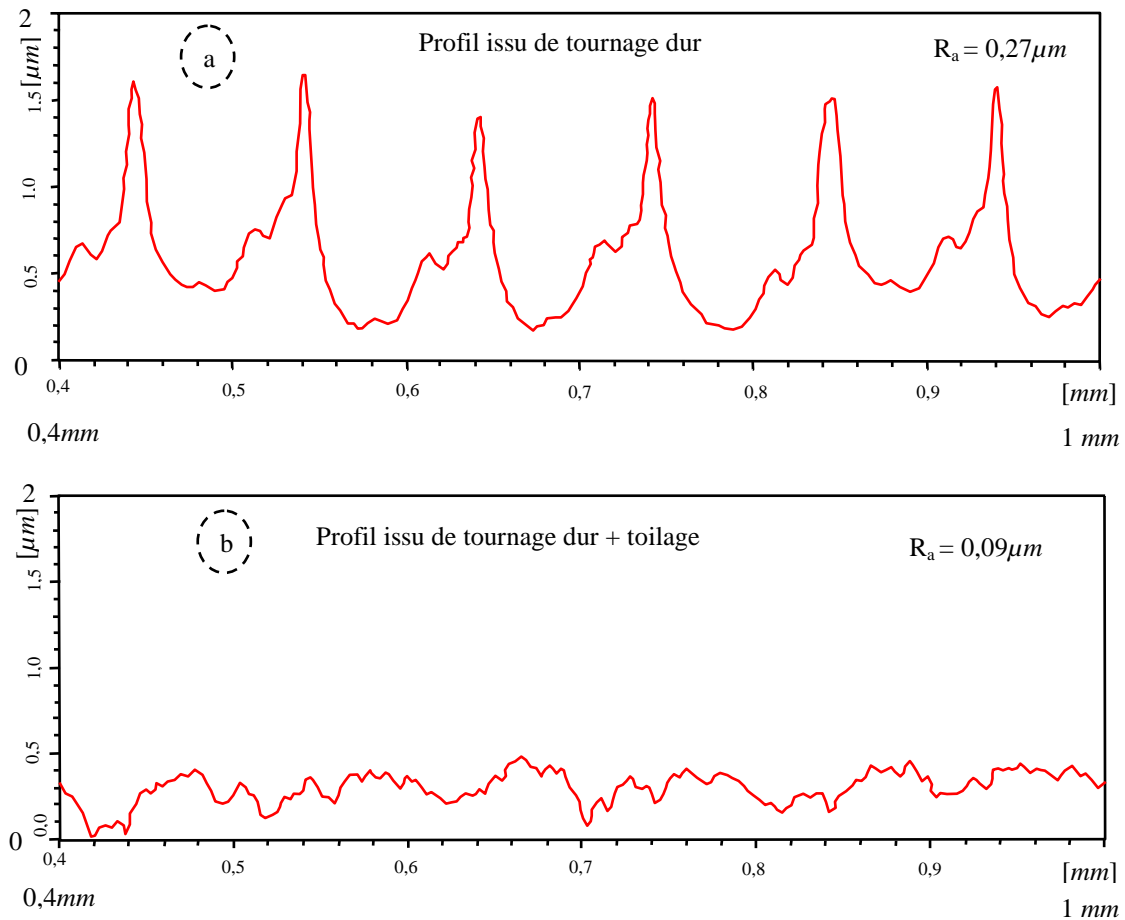


Figure II.13 : Profils de rugosité obtenus après tournage dur et après tournage dur + toilage [Khe07a].

II.4.2. Influence du toilage sur les contraintes résiduelles :

De façon générale, les contraintes résiduelles dans une structure sont les contraintes multiaxiales statiques qui existent en l'absence de toute sollicitation extérieure (forces, moments,...). Elles apparaissent dans la pièce après suppression d'un chargement initialement introduit [Bel94, Rem01].

Tout procédé d'élaboration et de fabrication (solidification, usinage, mise en forme, soudage,...) 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 autre génère dans une pièce des contraintes résiduelles qui peuvent influencer (positivement ou négativement) son comportement en fatigue, en rupture et en corrosion [Ton80, Hab06]. Les effets de ces

contraintes sont souvent préjudiciables. Elles constituent alors un facteur d'endommagement et de mauvaise tenue en fatigue des pièces [Rem01]. C'est pourquoi la mesure de leurs valeurs avec ce nouveau procédé de fabrication qui est le tournage dur et le toilage présente de l'intérêt.

L'analyse des surfaces toilées permet de voir que le toilage influence le profil de contraintes résiduelles sur une épaisseur de 10 μm environ depuis la surface extérieure (figure II.14) [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, Grz08a], la profondeur de cette couche affectée dépend de la charge locale appliquée sur le grain (c'est-à-dire sur la force macroscopique appliquée par le système, sur la rigidité du galet, sur la taille et la densité des grains), dans cette couche, le tournage dur crée des contraintes résiduelles de traction qui sont néfastes à la pièce mécanique, car elles accélèrent l'apparition et la propagation des fissures. Par contre le procédé de toilage induit des contraintes résiduelles de compression en surface qui est un rôle bénéfique et ce en retardant l'apparition de fissures. Ainsi, la durée de vie des composants mécaniques soumises à différents chargements dépend de l'état de contraintes internes générées dans le matériau [Rec08, Rec09]. Une bande abrasive de 9 μm induit des contraintes résiduelles de compression dans une sous-couche très mince de $\sim 5 \mu\text{m}$ [Grz08a].

De surcroît, le niveau de contrainte de la couche externe, qui est la zone la plus sensible pour la tenue en fatigue, plonge vers la compression d'une valeur correspondant à environ -500 MPa. Il apparaît donc que le toilage permet d'améliorer très significativement le profil de contraintes résiduelles, le rendant ainsi exclusivement compressif, ce qui est un élément important participant à la bonne tenue en fatigue des surfaces [Rec03a].

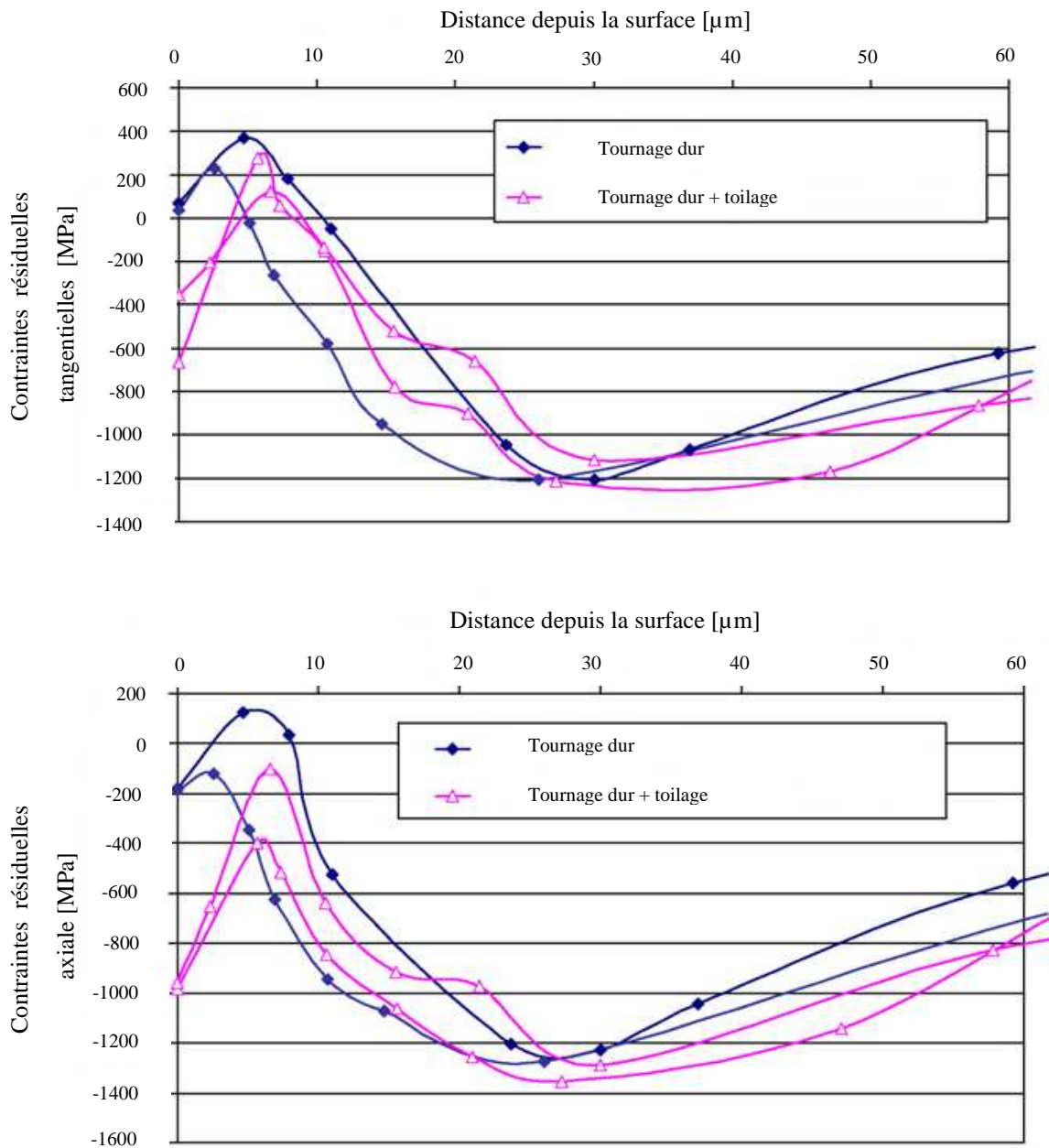


Figure II.14 : Distribution des contraintes résiduelles après tournage dur et après tournage dur + toilage [Rec08a].

II.4.3. Influence du toilage sur la microstructure métallurgique :

Lors du processus de fabrication par enlèvement de matière des métaux durs, il y a apparition de couches blanches (bandes blanches) au niveau de la couche superficielle de la pièce usinée et du copeau obtenu (figure II.15) [Hab06]. La couche blanche formée pendant l'usinage est généralement une phase dure et fragile, ce qui peut provoquer la présence de 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 aérospatiales et automobiles [Bar03].

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 [Hab06], et 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 et la vitesse de coupe) [Cho05].

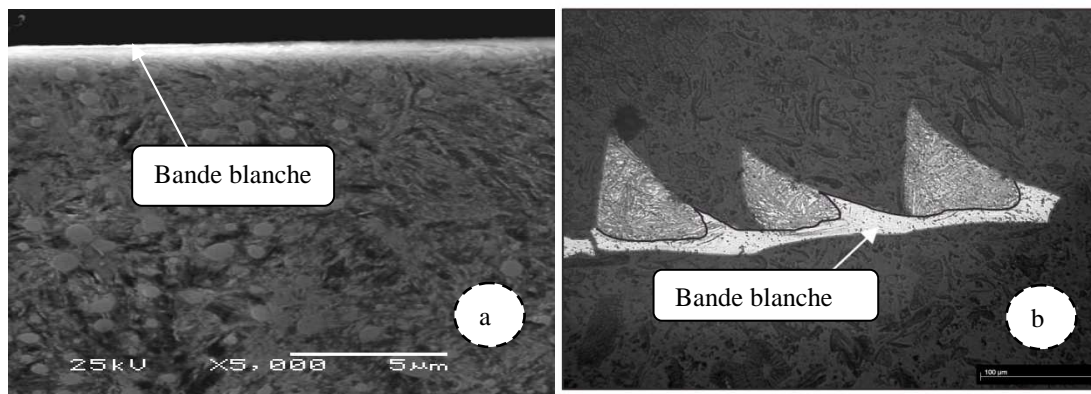


Figure II.15 : Exemples de couches blanches obtenues en usinage dur (100Cr6 sans carbure, 55HRC).
 (a) couche blanche observée au niveau de la surface usinée ($V_c = 200\text{m/min}$, $f = 0,1\text{ mm/tr}$) et (b) couche blanche observée sur un copeau ($V_c = 100\text{ m/min}$, $f = 0,08\text{ mm/tr}$) [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 en rien la microstructure laissée par l'opération précédente. Il faut en effet 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. Celles-ci n'ayant pas été quantifiées ou estimées, il est néanmoins aisé de constater l'absence de toutes étincelles, contrairement à d'autres opérations abrasives telles que la rectification qui induisent des températures locales très importantes conduisant à des modifications de la microstructure [Sha84].

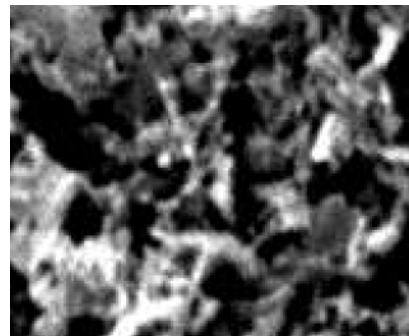
L'analyse micrographique des surfaces obtenues par tournage dur à l'aide des outils usés permet de constater que le toilage n'est pas en mesure de supprimer ces couches blanches. En effet, le toilage permet d'écarter les irrégularités de surface sur une profondeur de 1 à 2 μm , mais ne permet pas de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

II.4.4. Morphologie du micro copeaux :

Ghidossi et al [Ghi05] ont montré que la composante de coupe en toilage se manifeste essentiellement dans les premiers instants, c'est à dire ceux formés en début du processus (figure II.16.a). La taille des micro-copeaux générés en début de toilage et logés dans l'espace inter-grains est relativement importante. A l'opposé, en fin de toilage, le micro copeaux sont fins, courts et agglomérés (figure II.16.b).



(a) début de toilage.



(b) à 9 secondes de toilage.

Figure II.16 : Morphologie évolutive des micro-copeaux avec la dure de toilage

($N = 100$ tours/min, $f = 150$ oscillations par minute) [Ghi05].

II.5. Dispositifs à bande abrasive :

II.5.1. Appareils de superfinitions rapportées : Série 204/208 :

Appareil électrique de super finition à la toile pouvant être rapporté sur des machines de grande et petite capacité pour la super finition de surfaces rectifiées ou tournées, idéal pour la super finition de surfaces planes [www2].

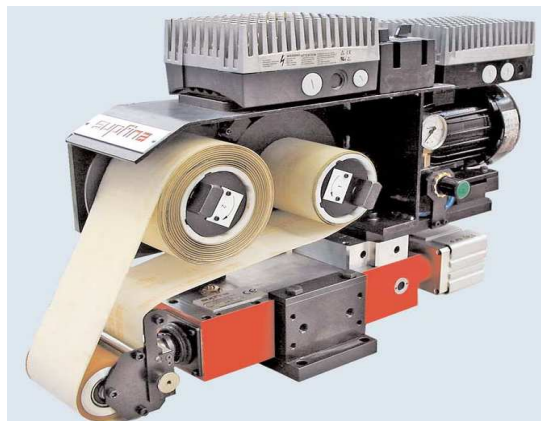


Figure II.17 : Appareils de super finition rapportés : Série 204/208 [www2].

Le tableau II.1 représente les caractéristiques techniques des appareils de super finition rapportés, série 204/208.

	Supfina 204	Supfina 208
Fréquence (oscillation/min)	0-2200	0-2200
Amplitude en mm	5	5
Pression en bar	1-6	1-6
Poids de l'appareil en Kg	70	70
Largeur de toile en mm	100	150
Puissance en kW	0,95	0,95

Tableau II.1 : Caractéristiques techniques des appareils de super finition rapportés, Série 204/208 [www2].

II.5.2. Dispositif ALL-JOB :

Le dispositif ALL-JOB sert à l'usinage des pièces à l'aide d'une bande abrasive de largeur de 32 mm et de longueur de 1080 mm. La vitesse de défilement est de 28 m/sec [www3].



Figure II.18: Dispositif ALL-JOB [www3].

II.5.3. Dispositif à bande T25 :

Il sert à l'usinage des pièces à l'aide d'une bande abrasive de largeur de 50 mm et de longueur de 2000 mm, on peut l'adapter directement sur le tour, comme un outil où on peut faire : Polissage, Brossage, de toutes matières : métaux ferreux, non ferreux.

Ce dispositif peut être équipé de brosse métallique, roue à lamelles ou coton de polissage [www4].



Figure II.19 : Dispositif à bande T25 [www4].

II.5.4. Surfaceuse à bande abrasive :

Il comporte une bande abrasive de 864x50 mm tournante à vitesse de 43 m/sec [www4].



Figure II.20 : Surfaceuse à bande abrasive [www4].

II.5.5. Lime abrasive :

Il comporte une bande abrasive de 475x20 mm tournante à vitesse de 33 m/sec [www4].

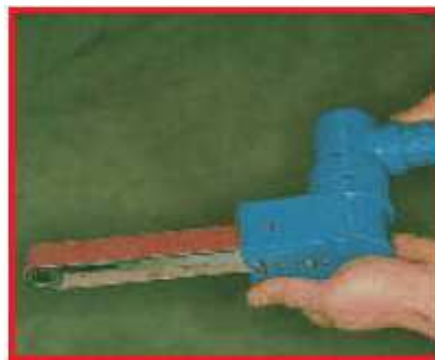


Figure II.21: Lime abrasive [www4].

II.6. Bandes abrasives :

L'efficacité d'une opération de toilage dépend fortement de la fonctionnalité de l'outil abrasif. Cette dernière résulte de la morphologie des grains d'abrasif qui implique à la fois leur angularité (pouvoir de pénétration et de coupe) et la distribution de leur orientation géométrique au cours du processus de toilage (densité active des grains d'abrasif). L'outil de coupe en toilage se compose généralement de la base ; du grain, toile et du liant. Selon ces trois éléments structuraux, plusieurs variétés de toiles sont utilisées dans l'industrie, leur choix reste encore très empirique [Mez08], l'évaluation de propriétés des bandes abrasives dans le procédé de toilage est un problème complexe car : la taille nominale des grains d'abrasifs, leur forme aléatoire et la distribution relative des particules abrasives sur la toile [Car05].

La figure II.22 montre les topographies des surfaces de toiles abrasives à granulométrie croissante.

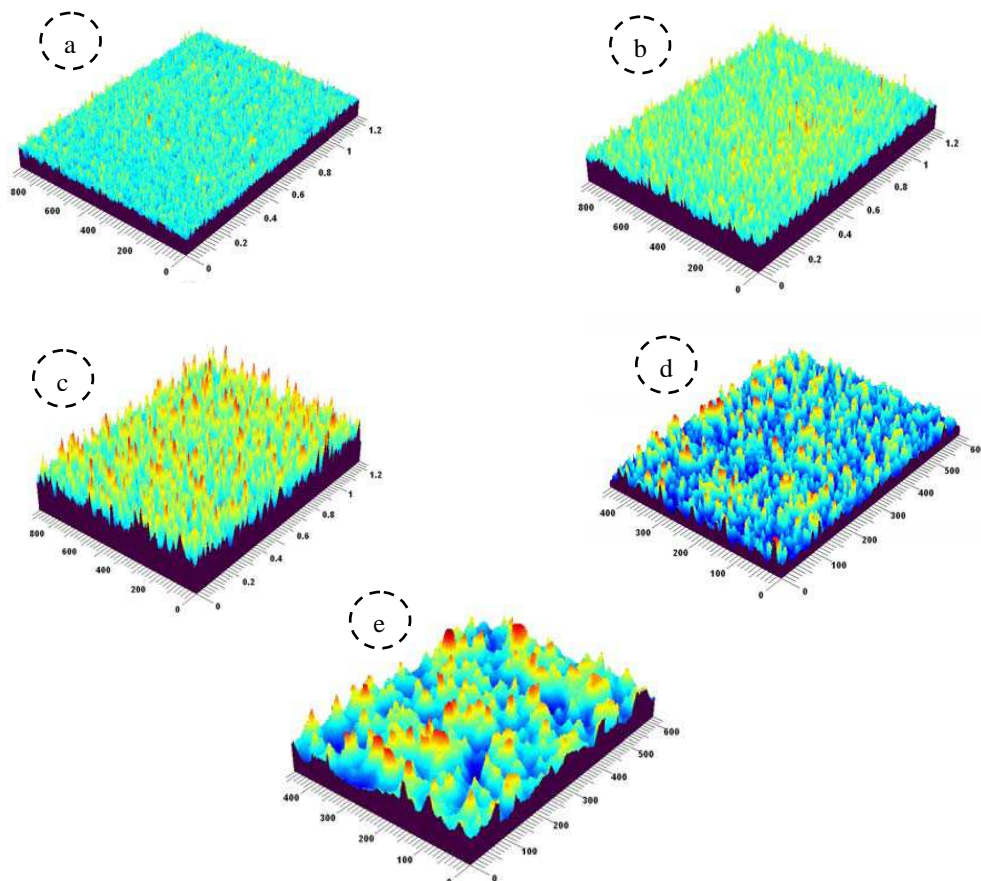


Figure II.22 : Vue 3D de surfaces de toiles abrasives pour différentes tailles de grains

(a) 9 μm (b) 15 μm (c) 30 μm (d) 40 μm (e) 80 μm [Zah07].

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

- la structure du film se définit par un nombre de grains d'abrasifs de plus en plus grand lorsque la granulométrie est faible. Dans ce cas la structure de toile est fermée alors que pour une grosse granulométrie, la toile présente une structure plus ouverte. On voit bien ici qu'il y a 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 d'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'espacement 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 II.23 montre cet effet. Elle précise aussi l'organisation de la rugosité du film ou le paramètre A_r est ici une image de la valeur du logement du copeau, le paramètre R_i étant l'image du pouvoir de pénétration d'un grain dans la surface toilée.

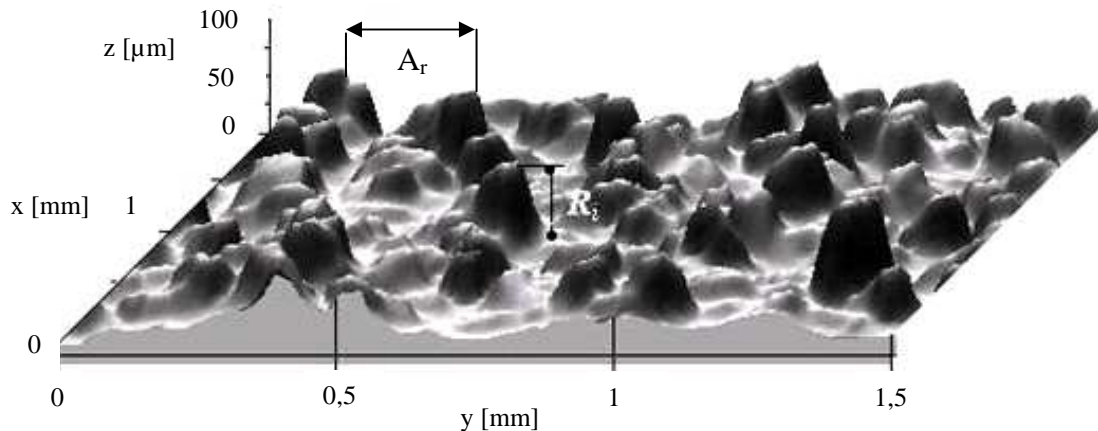


Figure II.23 : Vu 3D du film abrasif 3M neuf avec une granulométrie moyenne de $30\ \mu\text{m}$ [Elm07].

Une des caractéristiques également importante du film abrasif est constituée par sa morphologie : ceci implique non seulement la hauteur et la taille nominale des grains d'abrasifs, mais également leur forme et la distribution de leur densité active selon leur orientation géométrique au cours du processus d'abrasion par toilage, il est clair que la

difficulté réside ici dans la morphologie particulière de chaque grain (figure II.24) : un seul grain peut contenir plusieurs pics et plusieurs arrêtes tranchantes. En plus, le nombre des arrêtes est aléatoire d'un grain à un autre. Afin de tenir compte de la morphologie granulaire dans la caractérisation du film abrasif,

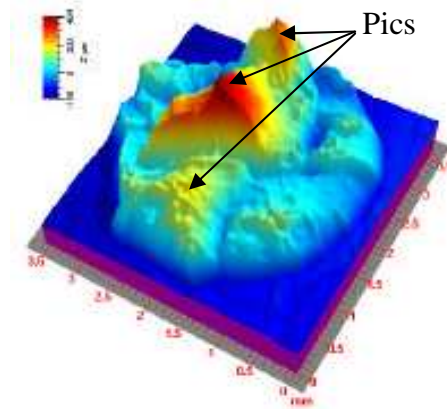


Figure II.24 : Morphologie d'un grain abrasif [Ham02].

L'image topographique globale abrasive est segmentée en utilisant l'algorithme des lignes de partage des eaux "LPE" [Mez08]. L'application de cet algorithme permet la détection des lignes de crêtes de la surface qui représentent dans notre cas les arrêtes tranchantes en surface du film. Les pics sont les premiers points qui entrent en contact avec la surface à usiner. Ils correspondent ici aux maxima de ces lignes détectées (figure II.25).

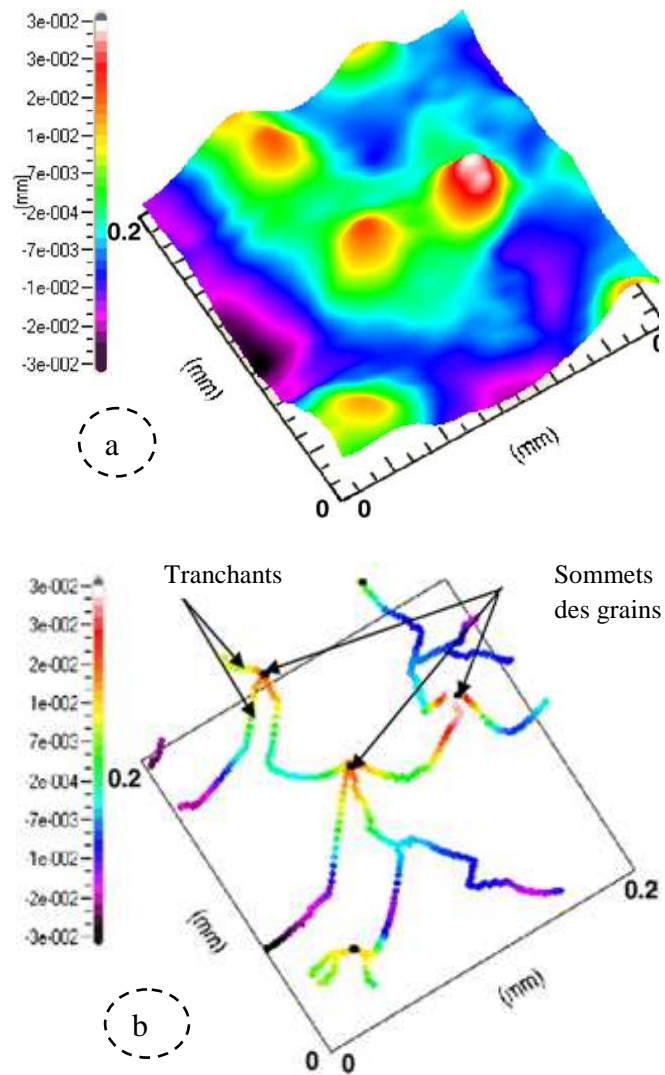


Figure II.25 : Application de l'algorithme des lignes de partage des eaux "LFE" [Mez08] :

(a) : Vue 3D d'une surface de toile abrasive de granulométrie moyenne de $80\mu\text{m}$,

(b) : Détection des arêtes tranchantes et des pics des grains abrasifs.

II.6.1. Types des bandes abrasives :

a- Bandes abrasives sur support papier :

Le tableau II.2 représente les différents types des bandes abrasives sur support en papier.

Bande abrasive	Support	Utilisations	Nature du grain	Poudrage
PS21	Papier	Acier, acier inoxydable.	Corindon	Serré
PS26	Papier super antistatique	Bois	Corindon	Espacé

Tableau II.2 : Différents types des bandes abrasives sur support papier [www3].

b- Bandes abrasives sur support toile :

Le tableau II.3 représente les différents types des bandes abrasives sur support en toile.

Abrasif	Support	Résistance à l'eau	Granulométries disponibles	Utilisations	Nature du grain	Poudrage
LS 309 X	Toile de coton, lourde	Non	40 - 360	Acier, fonte, bois	Corindon	Serré
CS 310 X	Toile de coton lourde	Non	20 - 600	Acier, acier inoxydable, métaux non ferreux	Corindon	Serré
CS 310 XF	Toile de coton, lourde, flexible	Non	40 - 240	Acier, acier inoxydable, métaux non ferreux, fonte	Corindon	Serré
CS 311 JF	Toile de coton, légère, très flexible	Non	80 -320	Métaux non ferreux, bois	Corindon	Semi espacé
CS 311 YXOC	Toile de polyester, lourde	Oui	36, 40, 60 - 400	Bois	Corindon	Espacé

Tableau II.3 : Différents types des bandes abrasives sur support toile [www3].

II.6.2. Paramètres des bandes abrasives :

Un ensemble de trois paramètres essentiels pour une caractérisation complète de la toile abrasive se déclinent comme suit :

a- Densité des pics ρ_s (mm^{-2}) :

Elle correspond au nombre de pics par unité de surface pour un film de granulométrie donnée. Ce paramètre (densité des pics abrasifs en surface de la toile) calculé avant et après usinage permettra de nous informer sur le comportement à l'usure de grains abrasifs au cours de cette opération [Car05, Ham03].

La figure II.29 représente la variation de la densité des pics abrasifs en surface de la bande abrasive avant et après toilage en fonction de grosseur des grains (éprouvette en acier, $P = 0,8MPa$).

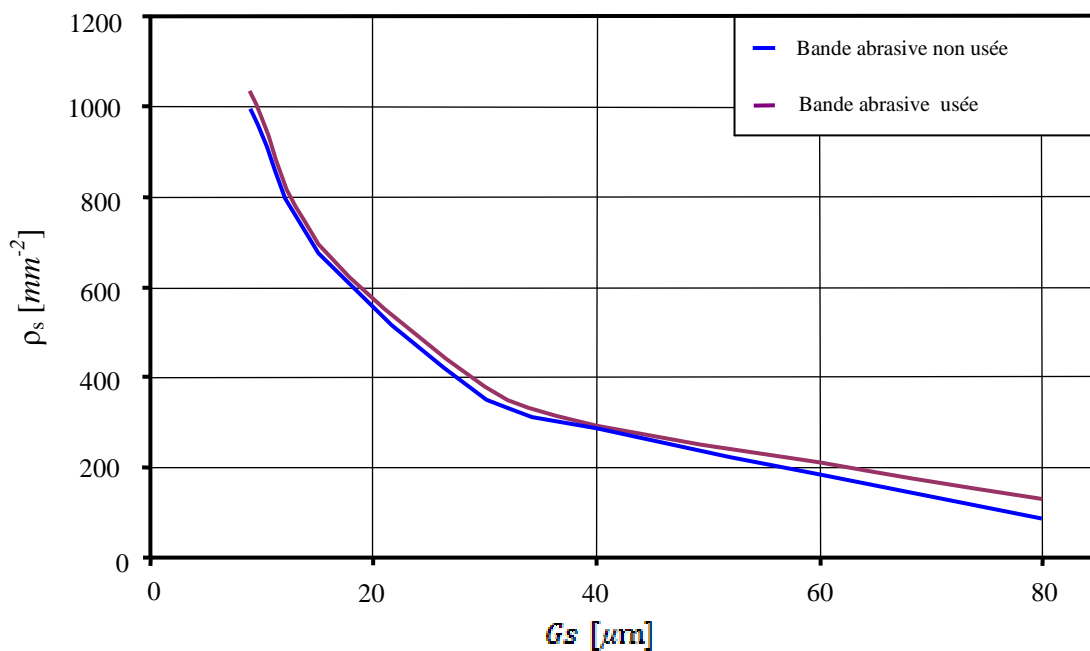


Figure II.29 : Variation de densité des pics avant et après toilage en fonction de grosseur des grains [Mez08].

b- Hauteur moyenne des grains abrasifs H_g (μm) :

Il s'agit de la hauteur moyenne des pics. Les hauteurs élémentaires de pics sont calculées par rapport à un plan de référence fixe se situant au niveau du liant sur la toile abrasive [Ham03].

La figure II.30 représente la variation de taux de la hauteur moyenne des grains abrasifs (ΔH_g) avant et après toilage en fonction de grosseur des grains.

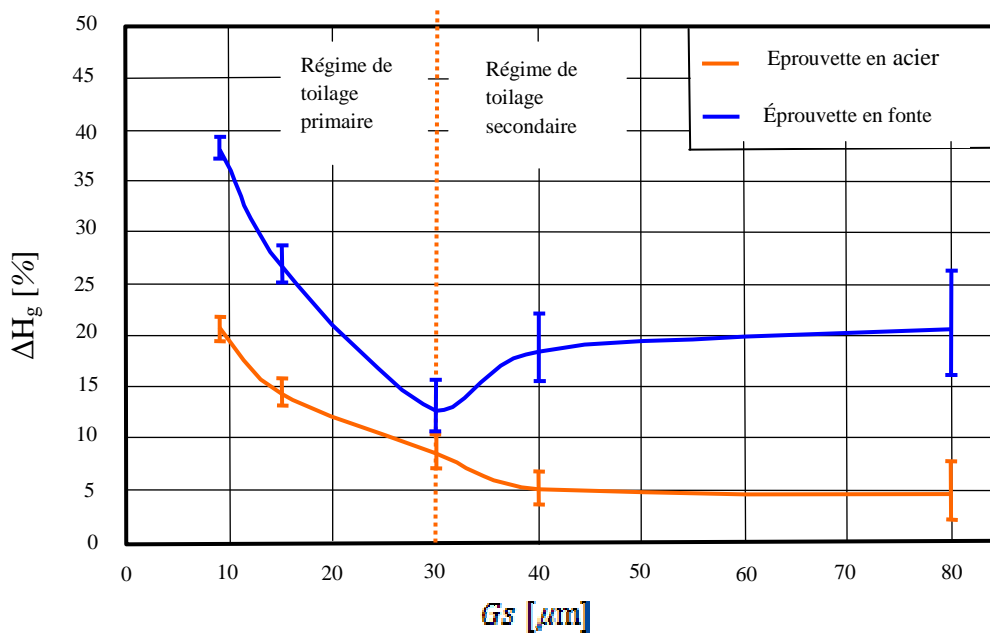


Figure II.30 : Variation de taux de la hauteur des grains abrasifs (ΔH_g) avant et après toilage en fonction de grosseur des grains [Mez08].

c- Angle au sommet des pics de rugosité θ_s ($^\circ$) :

Ce paramètre est très important pour l'identification des mécanismes physiques activés lors du procédé d'abrasion. Des essais de rayage réalisés avec différents angles d'attaque sur différents matériaux confirment l'importance de ce paramètre quant aux mécanismes activés au cours du processus par abrasion. En effet, plus l'angle d'attaque est petit (angle au sommet plus important) plus il favorise les phénomènes de coupe et donc d'enlèvement de matière [Ben07b].

La figure II.31 montre le taux $\Delta\theta_s$ (variation d'angle) en fonction de grosseur des grains abrasifs pour deux types de matériaux.

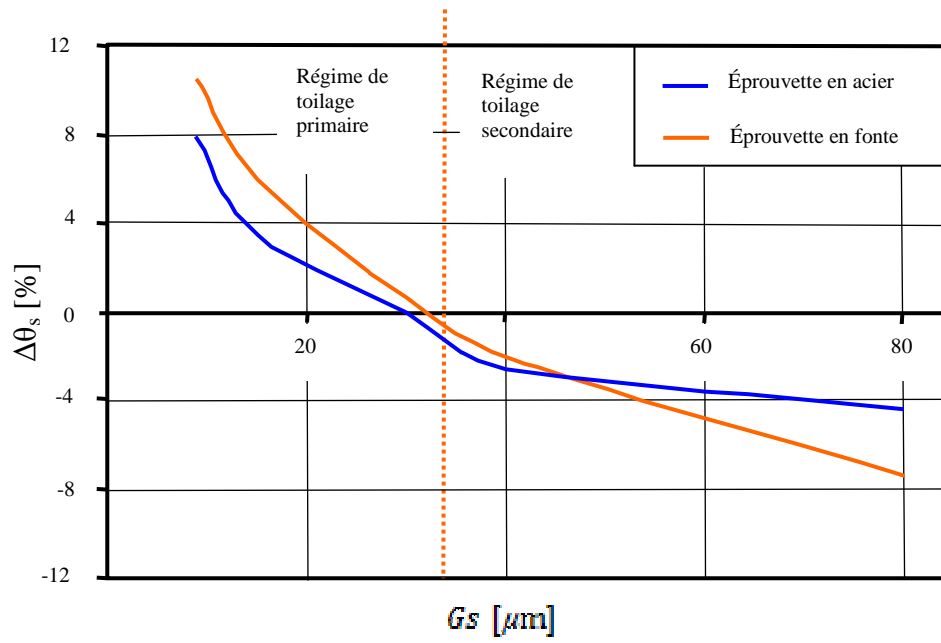


Figure II.31 : Variation d'angles $\Delta\theta_s$ en fonction de grosseur des grains abrasifs pour deux types de matériaux [Mez08].

CHAPITRE III

Mécanisme d'usure

III.1. Mécanismes d'usure	52
III.1.1. Usure abrasive	52
a- Usure abrasive à deux corps	54
b- Usure abrasive à trois corps	57
III.1.2. Usure adhésive	58
III.1.3. Usure érosive	58
III.1.4. Usure par fatigue	59
III.1.5. Autres types d'usure	60
III.2. Effet de quelques paramètres sur l'usure abrasive	61
III.2.1. Influence de la charge	61
III.2.2. Influence de la vitesse	61
III.2.3. Influence de la dureté	62
III.2.4. Effet de la taille des particules abrasives	63
III.2.5. Influence de lubrification	63
III.3. Mécanismes physiques d'abrasion	64
III.3.1. Action d'un grain	64
III.3.2. Action de plusieurs grains	65

III.1. Mécanismes d'usure :

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. L'usure cause le changement structurel, déformation plastique et fissuration de la surface. Les différents mécanismes d'usure peuvent se produire selon la lubrification, nature des surfaces, environnement chimique et les conditions de l'opération. Les cinq mécanismes d'usure majeurs sont l'adhésion, l'abrasion, l'érosion, la fatigue de la surface et la corrosion. Dans le toilage avec les bandes abrasives, le mécanisme d'usure est principalement l'usure abrasive mais les autres mécanismes sont aussi possibles.

III.1.1. Usure abrasive :

L'usure par abrasion d'un corps est provoquée par le glissement à sa surface d'un autre corps. Sous l'effet de la force normale appliquée entre ces deux corps, les agents d'abrasion, qui peuvent être, soit des aspérités de l'autre corps, soit des particules plus ou moins libres engendrées par l'un des deux corps ou étrangères aux deux l'indentent et enlèvent des particules en se déplaçant [Tho84]. L'usure abrasive est un phénomène qui représente l'endommagement des surfaces par des aspérités ou des particules dures. Ce phénomène est prépondérant lors de la coupe (enlèvement de matière), particulièrement repérée pour des matériaux fragiles [Geo00].

Les agents d'abrasion peuvent être de diverses natures, et liés ou non à l'un des deux corps. Suivant les cas, on distinguera deux cas [Mis81a] :

- Si les particules dures qui constituent l'abrasif sont fixées à la surface du corps antagoniste et qu'elles se déplacent à la surface du corps étudié sans rouler, on parlera d'abrasion à deux corps.
- Si maintenant ces particules sont indépendantes des deux surfaces en mouvement relatif et qu'elles sont libres d'indenter ces deux surfaces, animées d'un mouvement de translation et de rotation, c'est de l'abrasion à trois corps.

La figure III.1 présente ces deux types de mécanismes d'usure.

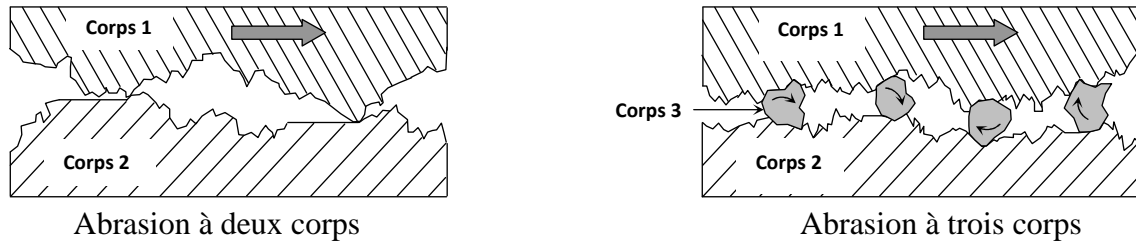


Figure III.1 : Mécanismes d'usure par abrasion [Tho84].

Dans le mode à deux corps, la particule abrasive liée (est identifié comme un outil-coupant) est solidement fixé à la matrice. Dans le mode abrasif à trois corps, les particules libres forment un agent de glissement entre les deux corps (figure III.1.b). Les particules libres dans le mode d'usure à trois corps peuvent être intentionnellement ajoutés ou être détaché en débris de la surface usée.

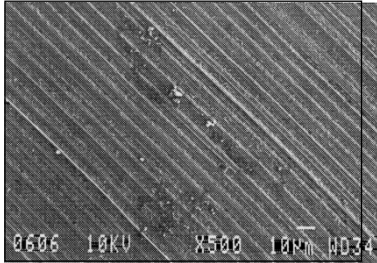
Les manifestations d'usure abrasive sont le changement de la rugosité de la surface qui résulte de l'enlèvement de matière et le changement des propriétés physico-chimiques de la surface et de la sub-surface par rapport au bloc massif. En plus de la description mécanique et géométrique, ces déformations sont accompagnées par :

- La production de la chaleur hautement localisée.
- La création des excitations et des défauts dans la matière.
- La production des liaisons suspendues et des électrons piégés.
- Et l'émission des espèces excités et réactives.

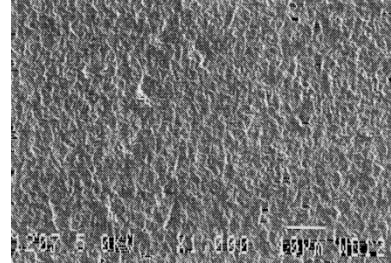
Malgré la différence de cinématique des aspérités ou particules responsables de l'abrasion, Misra et al [Mis81b] ont montré expérimentalement une grande similitude notamment de l'influence sur la vitesse d'abrasion de chacun des paramètres. De l'abrasion à deux corps à l'abrasion à trois corps, la vitesse d'usure diminue d'un ordre de grandeur, ceci venant du fait que dans le cas de l'abrasion à trois corps, les particules ayant la possibilité de rouler provoquent une usure moindre.

Trezona et al. [Tre99] ont également étudié la transition entre abrasion à deux corps et à trois corps. Ils ont pour cela réalisé des essais d'abrasion sphère-plan (test de cratérisation bille-plan), la bille étant en acier très dur et le plan en acier à outil plus tendre. Ils ont observé le type d'abrasion auquel ils avaient affaire dans chaque cas. Des images de surfaces ayant subi chacune un type d'abrasion sont reportées sur la figure III.2. La première constatation en

observant cette figure est que l'abrasion à deux corps génère de nettes rayures sur la surface, parallèles à la direction de glissement. En revanche, l'abrasion à trois corps forme une surface accidentée sans direction privilégiée puisque les particules sont libres de rouler dans une direction aléatoire et d'indenter cette surface en formant des cratères.



Abrasion à deux corps : stries



Abrasion à trois corps : cratères

Figure III.2 : Surfaces abrasées [Tre99].

L'usure abrasive à deux corps provoque plus de dégâts que l'usure abrasive à trois corps, l'action des aspérités des grains abrasifs se fait par déformation plastique et par coupe [Com98].

L'usure abrasive est aussi définie comme étant d'enlèvement de matière à partir d'une surface par des particules dures glissant entre deux surfaces. Il y a deux types d'usure abrasive :

a- Usure abrasive à deux corps :

Les modèles d'usure abrasive avec des abrasifs liés considèrent que l'aspérité abrasive est comme un outil tranchant qui produit un cratère sur une surface (figure III.3).

Le volume dV de la matière enlevée par un cône rigide à façonné un poinçon avec θ un angle de demi-point culminant qui glisse à la surface de l'échantillon le long d'une distance dL sous une charge appliquée dP est :

$$\frac{dV}{dL} = \frac{2 \cot \theta}{\pi} \frac{dP}{H} = \frac{2 \tan \alpha}{\pi} \frac{dP}{H} \quad (\text{III.1})$$

Où : H est la dureté du matériau de l'indenteur et α est l'angle d'attaque de la particule pour qui la direction glissante est parallèle à la surface de l'échantillon.

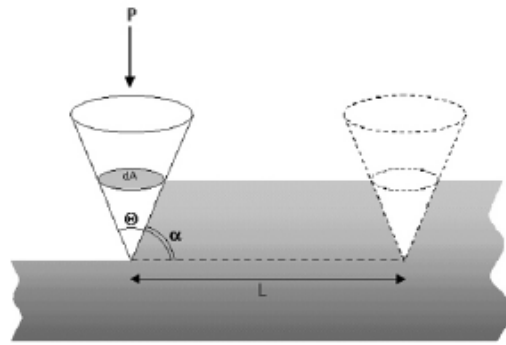


Figure III.3: Le modèle d'usure abrasive par une particule en forme conique [Ali06].

- Le volume total V de la matière enlevée est la somme des volumes enlevés par chaque particule individuelle glissant le long d'une longueur totale L à la surface abrasée de l'échantillon est exprimé comme suit:

$$\frac{V}{L} = K \cdot \frac{P}{H} \quad (\text{III.2})$$

Le coefficient K est le coefficient d'usure, c'est-à-dire, la probabilité pour qu'un volume élémentaire de matière soit enlevé par un grain abrasif. L'ordre de magnitude de la valeur K est une signature prophétique du mécanisme d'usure. Pour le cas d'usure abrasif, K est environ 10^{-1} et elle est inférieure à 10^{-2} pour le cas d'usure adhésive.

La dureté H n'est pas la seule caractéristique de la matière impliquée dans l'usure abrasive, mais d'autres facteurs peuvent être considérés, en pratique, la dureté des particules reste un critère pour la sélection des abrasifs pour le polissage et il est accepté communément qu'une particule avec une dureté H_a grattera une surface avec une dureté H_s quand $H_a > 1.2 H_s$.

Dans le modèle simplifié d'usure abrasive, il est supposé que toute la matière est enlevée du cratère qui provient de la trajectoire glissante. En fait, le cratère peut provenir de deux conditions extrêmes qui sont respectivement le micro-coupage et le micro-labourage.

Après une action abrasive glissante le long d'une distance L , le taux d'enlèvement de matière est défini par S_{ab} :

$$S_{ab} = [A_t - (B_1 + B_2)]/A_t \quad (\text{III.3})$$

Où : A_t est l'aire totale de la section longitudinale de la rainure induite par la particule glissante, B_1 et B_2 sont les aires de la section de la matière déplacées sur chaque côté de la rainure comme le montre la figure III.4. Les dimensions de la vague dépendent de la forme et de la vitesse de l'action du grain.

Pour un seul grattement, la valeur S_{ab} est déterminée par le mécanisme de déformation. Par exemple, avec $S_{ab} = 0$, il y a une déformation plastique sans formation de débris, alors qu'avec le deuxième cas extrême, avec $S_{ab} = 1$, il y a un processus de micro-coupe dans lequel toute la matière est enlevée

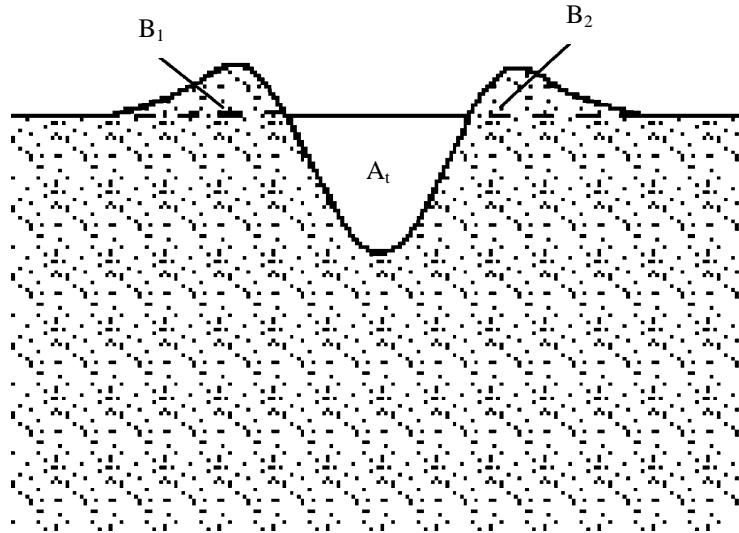


Figure III.4 : Coupe de section longitudinale d'une rainure induite par une particule glissante sur une surface [Fan05].

A_t : est le volume total entaillé par la particule.

B_1 et B_2 : correspondent au matériau déplacé latéralement.

Le mécanisme d'usure n'est pas un mécanisme pur de micro-coupage ou micro-labourage et la proportion des deux mécanismes ensemble dépend des dimensions et la morphologie des abrasifs, la dureté des abrasifs par rapport à la matière usée et le comportement mécanique des matières à polir :

- 1- l'usure abrasive augmente rapidement avec la dimension des particules pour atteindre une valeur optimale.
- 2- l'usure abrasive est une fonction de la dureté relative $x = H_a/H$; où H_a est la dureté des abrasifs et H est la dureté de la matière à polir. Le rendement abrasif est bas pour $x < 0.7$, alors il augmente linéairement pour $0.7 < x < 1.7$, avant d'atteindre la saturation quand $x > 1.7$.

- 3- il y a un angle critique pour les particules menant à la formation d'une déformation plastique avec formation d'une rainure ou formation d'un grattement avec enlèvement de matière. Le micro-coupage sera le mécanisme dominant pour un angle d'attaque (α) plus grand que l'angle critique (α_c), par contre, le micro-labourage peut se produire à $\alpha < \alpha_c$.

La transition de micro-labourage au micro-coupage est aussi observé pour le cas d'indenteur qui est caractérisé par $\alpha \ll \pi/2$ comme pour un cas sphérique pour une particule abrasive usée. Les modes de tension élastique et élastoplastique sont possibles. Quand on augmente la charge appliquée, les déformations élastiques et plastiques se produisent successivement avant que la matière ne soit poussée en avant par la particule et l'enlève dans une série d'éclats plats.

La transition du micro-labourage au micro-coupage ne dépend pas seulement sur les caractéristiques géométriques des abrasifs mais du comportement rhéologique des matériaux à considérer, c'est à dire, l'évolution de tensions et l'écoulement des matières exposées à une charge appliquée.

La mécanique de contact fournit une description des contraintes à la surface. Quand la particule abrasive est usée, il est habituel de la décrire comme un grain de forme sphérique [Rem02].

b- Usure abrasive à trois corps :

L'usure abrasive à trois corps se produit quand les particules libres peuvent se déplacer dans l'interface entre les surfaces de contact. Une telle situation se produit quand les abrasifs sont intentionnellement déposés et peuvent rouler sur la surface.

Le mode à trois corps peut se produire aussi quand de petits morceaux de la matière détachée du matériau est piégé ou circule dans le contact entre les deux premier corps.

Ces débris d'usure associés avec les transformations tribologiques superficielles résulte à la formation d'un troisième corps qui peut être éjecté du contact ou peut circuler dans l'interface entre les surfaces de contact.

III.1.2. Usure adhésive :

L'usure adhésive est provoquée par le transfert de matière d'une surface à l'autre de deux pièces en contact et en mouvement relatif. La composition, la microstructure, la topographie de la surface, la présence ou l'absence des lubrifiants ou d'autres médias, la charge, la vitesse de contact et la température affectent ce type d'usure. L'usure adhésive fait appel à des notions de physico-chimie. Il y a formation de liaisons (intermoléculaires, inter atomiques) à l'interface. On parle d'usure douce lorsqu'on a cisaillement de ces liaisons. L'usure sévère (aussi appelée ; grippage) apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces. D'où la formation d'un film de transfert, collée à la surface antagoniste [Geo00] (voir figure III.5).

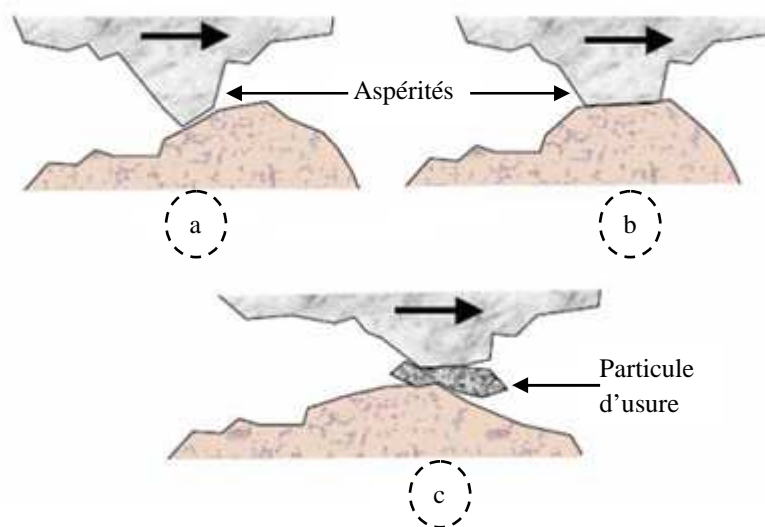


Figure III.5 : Illustration de l'usure par adhésion [Ali07].

III.1.3. Usure érosive :

L'usure érosive est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre la surface d'un solide. Ce mécanisme d'usure dépend des propriétés des matériaux en présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact et de la taille de la particule.

Le mécanisme d'érosion est simple, l'érosion de la particule solide est un résultat de l'impact d'une particule solide A, avec la surface solide B, une partie de la surface B été enlevée (voir figure III.6). L'usure par érosion possède donc beaucoup de similitudes avec l'usure abrasive.

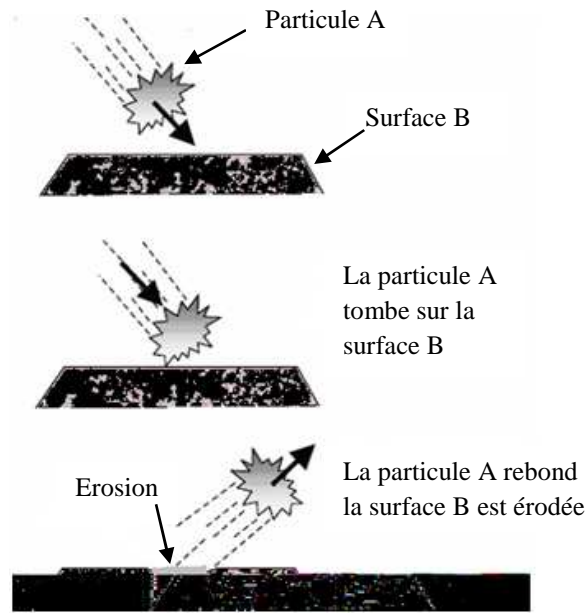


Figure III.6 : Schéma de l'usure érosive [Ali07].

L'érosion par cavitation se produit quand un solide et un fluide sont en mouvement relatif, dû au fluide devenant instable et pétillant au-dessus et imposé contre la surface du solide, comme le montre la figure III.7.

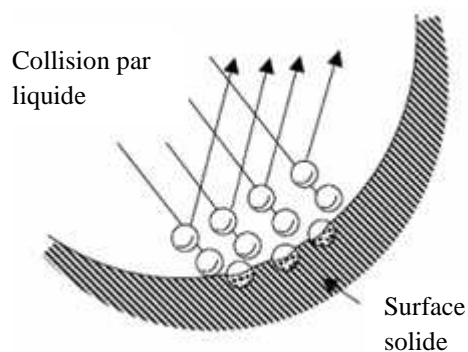


Figure III.7 : Schéma de l'érosion par cavitation due à des bulles liquides [Ali07].

III.1.4. Usure par fatigue :

Il y a formation de fissures dans les matériaux sous l'effet de gradients de contraintes cycliques. Les fissures se propagent vers la surface et il y a détachement de grosses particules dont la taille peut atteindre le millimètre. On parlera particulièrement d'égrènement lorsqu'il y a formation de trous correspondant à la microstructure initiale des matériaux. Il y a déchaussement au niveau des joints de grains d'un métal par exemple. On parle de délamination lorsque des déformations plastiques répétées des premiers corps conduisent à

des fissures en sous-surface, parallèles à la surface. Il y a propagation des fissures le long du plan de cisaillement maximum [Geo00] (voir figure III.8).

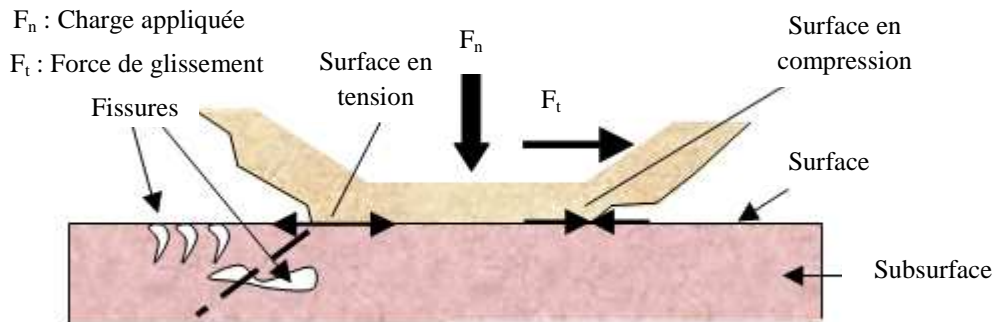


Figure III.8 : Illustration du mécanisme d'usure par fatigue [Ali07].

III.1.5. Autres types d'usure :

- Usure par soudage :

Lorsque que deux solides sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, il se produit un échauffement dans le contact qui peut provoquer des soudures locales entre les matériaux en présence et engendrer de l'usure. Ce mécanisme est l'expression la plus sévère de l'usure adhésive [Pet03].

- Usure corrosive et oxydative :

L'usure corrosive et oxydative est due à l'effet de réactions chimiques entre la surface usée et son milieu environnant. La vitesse d'usure dépend de la réactivité chimique des surfaces dans le milieu [Pet03].

- Usure par fretting :

Le fretting est un mouvement oscillatoire de faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact. Celui-ci engendre différentes formes de dégradation pouvant conduire à la perte de fonctionnalité. Le contact est souvent en glissement partiel, c'est-à-dire que les deux solides n'ont pas de mouvement relatif dans la partie centrale du contact, mais ils glissent sur un anneau en périphérie du contact. Les cycles de sollicitation provoquent la fissuration des matériaux et la formation de débris qui peuvent accélérer l'usure lorsqu'ils restent confinés dans le contact [Pet03].

III.2. Effet de quelques paramètres sur l'usure abrasive :

III.2.1. Influence de la charge :

La charge est un facteur très important dans tout le processus d'usure. La charge peut être constante, oscillante ou par chocs. Elle peut être uniforme ou non uniforme.

Le taux d'usure abrasive augmente presque proportionnellement avec la charge appliquée. Aux faibles charges, l'usure abrasive est faible à cause du nombre limité des points de contact entre les surfaces, et pour les grandes charges l'usure abrasive est grande à cause que ces charges élevées la profondeur de pénétration des particules abrasives dans les matériaux, ce qui donne une usure abrasive important (voir figure III.9) [Kum10].

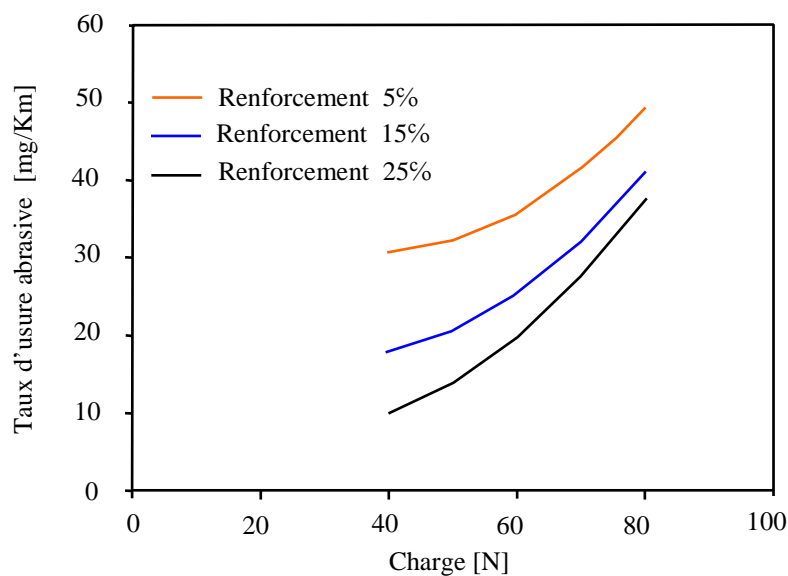


Figure III.9 : Effet de la charge appliquée sur le taux d'usure abrasive [Kum10].

III.2.2. Influence de la vitesse :

L'effet de la vitesse de glissement sur le taux d'usure abrasive est montré dans la figure III.10. Il peut être observé à partir des chiffres que le taux d'usure abrasive est fortement dépendant de la vitesse de glissement. Comme la vitesse de glissement augmente, l'usure abrasive augmente également. À haute vitesse, la fréquence des particules abrasives qui entre en contact avec la surface de glissement augmente, conduisant ainsi à produire de la chaleur de frottement. Ceci qui donne une grande usure abrasive [Kum10].

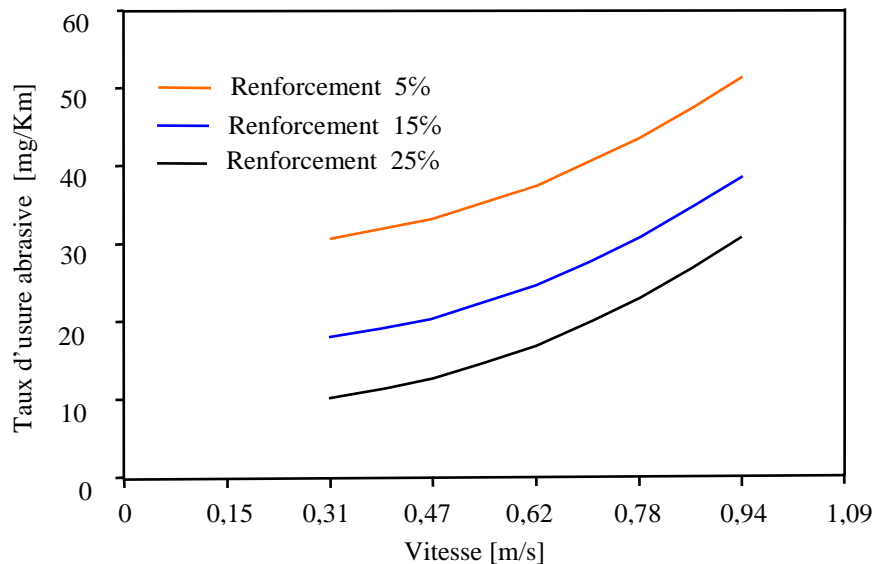


Figure III.10 : Effet de la vitesse de glissement sur le taux d'usure abrasive [Kum10].

III.2.3. Influence de la dureté :

L'usure abrasive des matériaux est inversement proportionnelle à leurs duretés, l'augmentation de la résistance à l'usure avec l'accroissement de la dureté est basé sur la microstructure des matériaux et le pourcentage de cémentite. Les structures martensitiques obtenues après traitement thermique (trempe et revenu) des matériaux montrent que, plus les grains de matériaux sont fins plus la dureté augmente. La résistance à l'usure croît proportionnellement avec la teneur en cémentite (voir figure III.11) [Kla06].

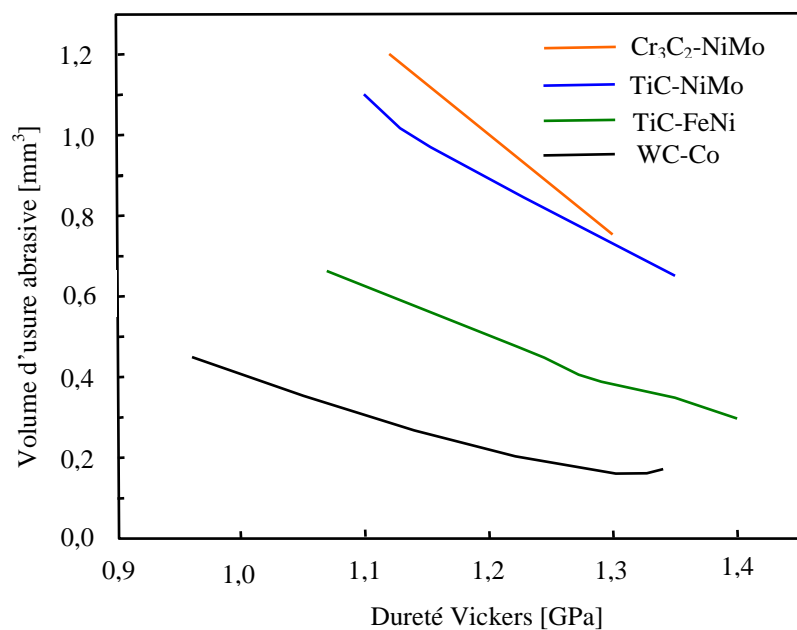


Figure III.11 : Usure abrasive des composites en carbure en fonction de la dureté Vickers [Kla06].

III.2.4. Effet de la taille des particules abrasives:

Les études faites sur l'effet de la taille des particules abrasives sur l'abrasion des métaux, ont montré que ce paramètre est plus influent sur l'usure abrasive [Kum10].

Les particules responsables de l'abrasion ont en général une taille comprise entre 5 et 500 μm [Gah99]. La figure III.12 montre que lorsque les particules sont petites, l'abrasion augmente avec l'augmentation de la taille des particules.

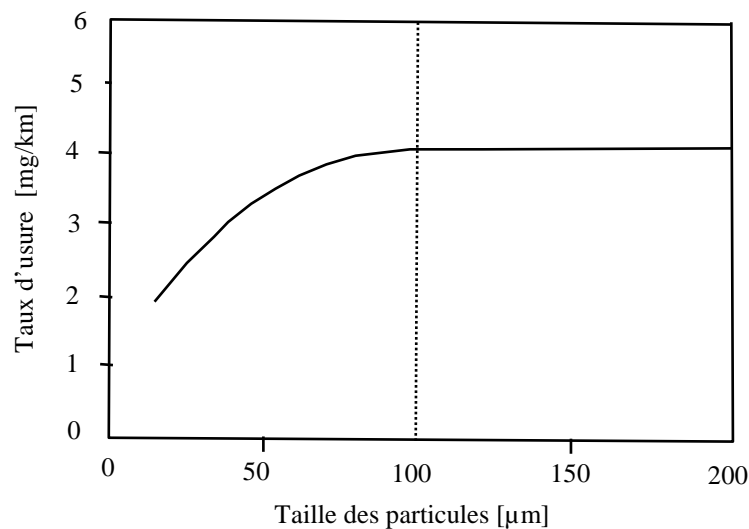


Figure III.12 : Evolution de l'abrasion en fonction de la taille des particules (abrasion à deux corps) [Gah99].

Au dessus de la taille critique, soit 100 μm , la vitesse d'usure est pratiquement indépendante d'une augmentation de la taille des particules. Gahlin et al [Gah99] ont regroupé plusieurs explications pour ce phénomène mais l'évaluation de la taille des particules reste difficile car ce sont rarement des sphères.

Les mécanismes fondamentaux de l'abrasion dans ce cas sont reliés uniquement à la déformation plastique et à la rupture fragile.

III.2.5. Influence de lubrification :

La fonction principale d'un lubrifiant est de diminuer la vitesse d'abrasion en facilitant le glissement entre les deux surfaces. Il permet par ailleurs de refroidir le système en absorbant les calories. Il sert aussi de protection contre l'oxydation. Enfin, il permet d'évacuer les particules d'usure créées. Il peut prendre de nombreuses formes : liquide (huile), solide

(graphite),...etc. En général, l'épaisseur du film de lubrifiant est relativement importante (supérieure aux dimensions des aspérités, de manière à éviter les interactions entre aspérités).

III.3. Mécanismes physiques d'abrasion :

III.3.1. Action d'un grain :

L'analyse microscopique du processus de coupe par abrasion consiste à étudier l'action d'une particule abrasive élémentaire sur une surface antagoniste. Cette approche est à la base de la compréhension des phénomènes locaux de déformations plastiques et de rupture, mis en jeu au cours du processus d'abrasion. Le grain, en rectification, ou l'aspérité, en usure abrasive, ont des géométries et des orientations particulières et peuvent posséder plusieurs arêtes et faces de coupe. Ceci engendre un écoulement complexe autour de la particule abrasive pouvant mener à un micro-usinage (rectification) et à un phénomène de déformation plastique (usure abrasive) comme l'illustre la figure III.13.

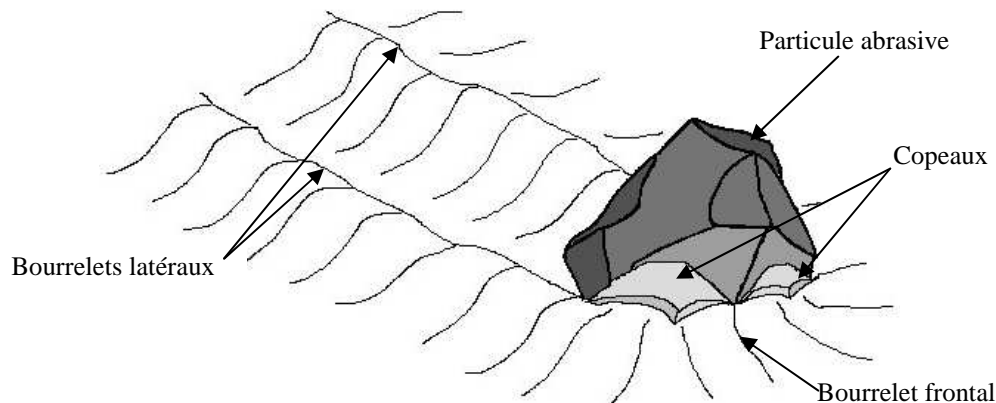


Figure III.13 : Action d'une particule abrasive sur une surface antagoniste [Bar08].

Les modes élémentaires de l'action abrasive sont définies de la façon suivante [Abe88]:

1. Si la pénétration est suffisamment faible et l'arête tranchante émoussée, l'abrasion consiste en une déformation plastique sans enlèvement de matière. Le résultat de cette interaction élémentaire est un micro-sillon de labourage (figure III.14.a).
2. Si l'arête tranchante présente des angles vifs correctement orientés par rapport au sens de glissement, l'abrasion consiste en un processus de coupe. Celui-ci conduit principalement à un refoulement de la surface, suivi d'un enlèvement de matière plus ou moins prononcé en

relation avec les propriétés élasto-plastiques du matériau abrasé. Dans ce cas il y a une apparition d'une rayure de micro-coupe (figure III.14.b).

3. Si par contre, dans des conditions analogues, l'abrasion s'opère sur une surface en matériau élasto-fragile, la morphologie d'indentation se caractérise par des éclats, des arrachements et des fractures. On parlera alors d'une trace de micro-écaillage le long du sillon créé par l'indentation (figure III.14.c).

4. Si l'interaction élémentaire à la base de l'action d'abrasion est cyclique (déplacements alternés et répétés), un phénomène de décohésion de la matière est observé. Celui-ci s'apparente à la fatigue et se concrétise par la génération d'une trace de micro-fatigue (figure III.14.d).

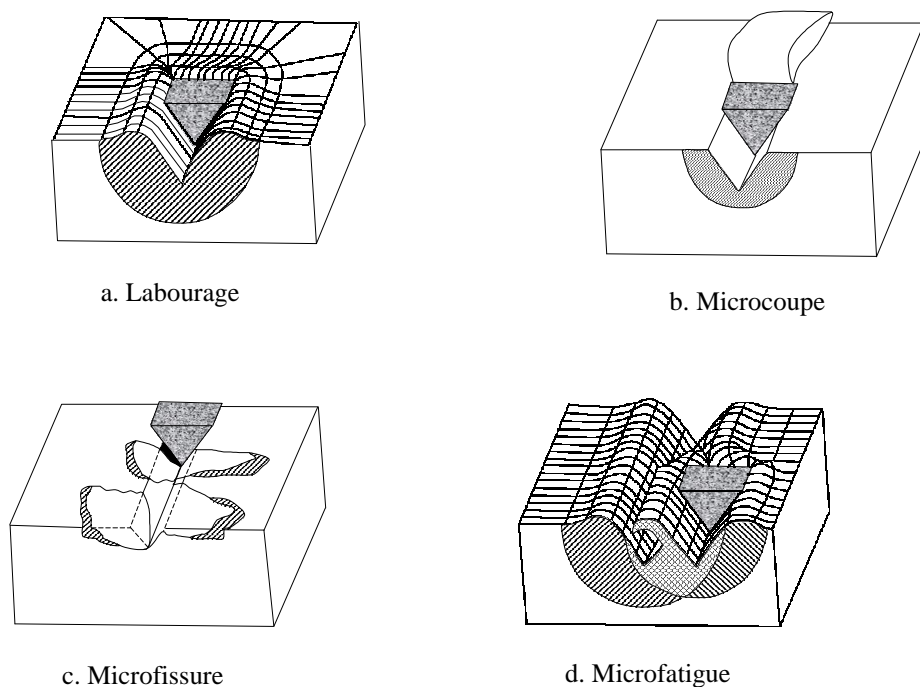


Figure III.14 : Illustration schématique des modes élémentaires de déplacement de la matière en abrasion dans un test sclérométrique [Abe88].

III.3.2. Action de plusieurs grains :

Zhen Bing Hou et al [Hou03] ont estimé, dans le cas de la rectification plane, le pourcentage de grains qui entrent en contact avec la pièce et, en particulier, ceux qui participent activement à l'enlèvement de matière. La figure III.15 représente schématiquement la distribution des grains. Y sont indiquées les valeurs du diamètre maximum, du diamètre minimum des grains et la distribution probabiliste des grains.

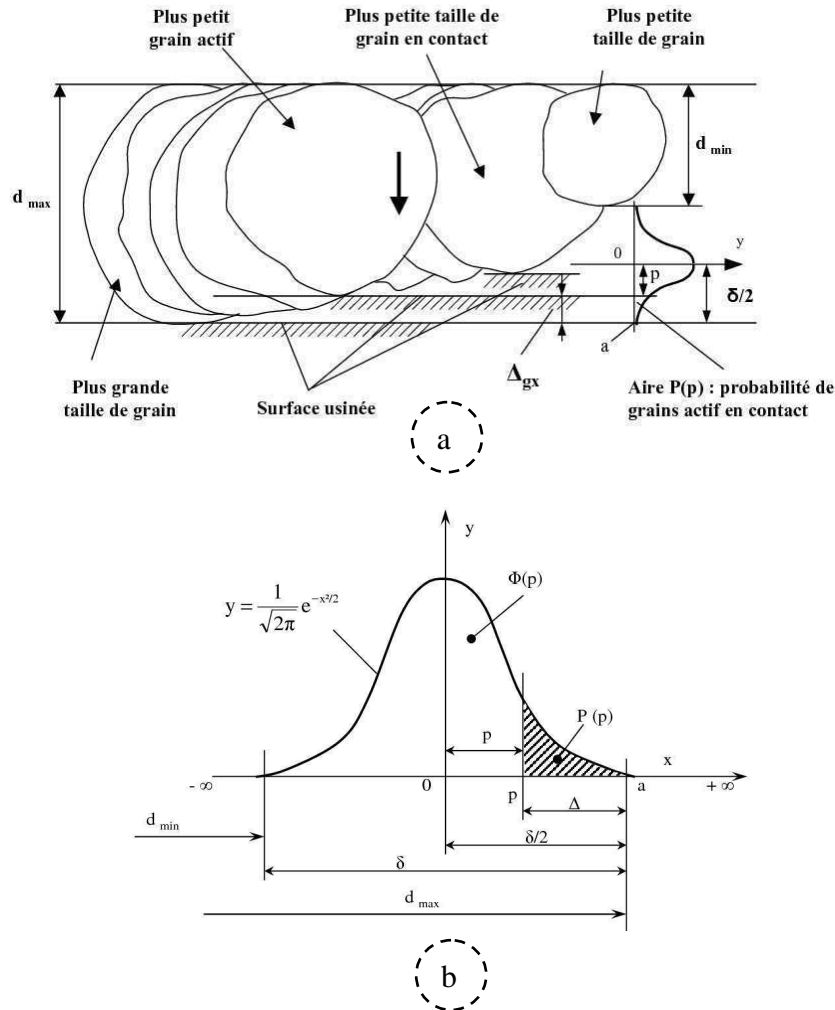


Figure III.15 : Schéma représentatif de la distribution des grains abrasif sur la meule [Hou03].

Cette étude a concerné à la fois la rectification de finition (c-à-d. Form and Finishing Grinding, FFG) et Celle d'ébauche (c-à-d. Stock Removal Grinding, SRG). Les tests de rectification, dont les conditions expérimentales sont reportées en tableau III.1, ont permis d'estimer la valeur de Δ_{gx} , qui dans ce cas est d'environ 2,5% du diamètre nominal des grains abrasif. La profondeur Δ_{ind} , assurant un enlèvement de matière théorique égal à celui mesuré lors des tests expérimentaux, a été donc identifiée. La valeur de cette profondeur, conjointement à la distribution probabiliste de la taille des grains, montre que :

- Le pourcentage de grains en contact avec la pièce est très faible tant pour la finition (3,77%) que pour l'ébauche (moyenne de 14%).
- Seulement 0,14% des grains (environ 5% des grains en contact) génère des copeaux dans l'opération de finition et environ 1,65% (12% de ceux en contact) pour

l'ébauche. Par ailleurs, en ébauche, le nombre de grains en contact avec la pièce augmente lorsque la taille des grains diminue.

	FFG	SRG	
Matériau usiné	Acier-AISI 1008	Acier-AISI 1008	Acier-AISI 1008
Type de meule	A46H8V	A46H8B	A24H8B
Translation de la pièce (mm/s)	20,32	20,32	20,32
Rotation de meule (mm/s)	30,48	63,5	63,5
Avance de la meule (mm/s)	0	6,39 et 6,265	6,308 et 6,519

Tableau III.1 : Conditions expérimentales des tests de rectification plane réalisés par Zhen Bing Hou et al [Hou03].

L'étude effectuée par Zhen Bing Hou et al [Hou03] a permis d'évaluer quantitativement le nombre des grains intéressés par la coupe. Elle montre aussi que d'autres phénomènes physiques, tels que le labourage et le frottement, caractérisent l'action de la plupart des grains en contact avec la surface à usiner.

Un modèle similaire a été proposé par Chang et al [Cha00] pour l'analyse de pierrage. L'approche est, comme dans les travaux de Zhen Bing Hou et al [Hou03], de type statistique.

La finalité de cette recherche est de vérifier la possibilité de l'utilisation d'une fonction statistique pour la représentation de la distribution réelle des hauteurs des grains d'une pierre abrasive. Le nombre de grains intéressés par l'action de coupe a été ici déterminé à partir du calcul des efforts appliqués sur chaque grain et des caractéristiques de l'outil abrasif.

La valeur moyenne des pénétrations des grains abrasifs dans la pièce est estimée à partir de la valeur de la rugosité superficielle (R_a) de l'outil abrasif. Deux modèles de distribution des tailles de grains abrasifs ont été considérées : normale et log-normale. Ces deux fonctions statistiques ont été utilisées pour le calcul du pourcentage de grains actifs en fonction de la pression de contact (voir figure III.16). Le pourcentage de grains actifs augmente avec la pression de contact, tout en restant très limité. En effet, dans les conditions de contact considérées (voir le tableau III.2), ce pourcentage est d'environ 0,16% pour une pression de contact égale à 1MPa.

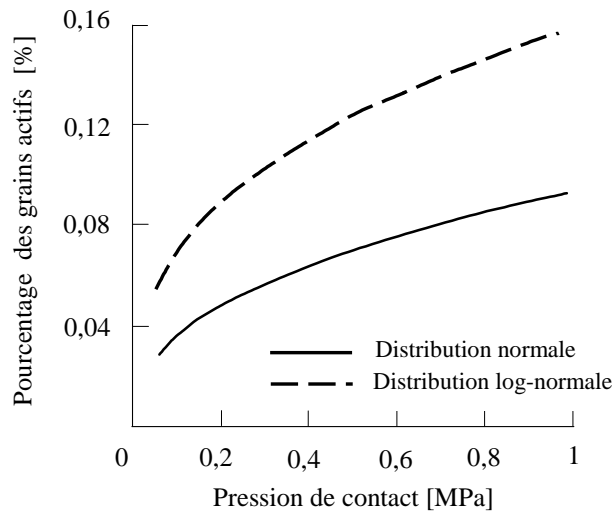


Figure III.16 : Pourcentage des grains actifs en fonction de la pression de contact Pierre/pièce [Cha00].

La figure III.17 montre les évolutions de l'effort normal et de la rugosité de surface en fonction de la pression de contact. Les efforts normaux calculés selon une distribution log-normale sont plus bas à cause du nombre plus élevé de grains actifs lors du contact avec la pièce (figure III.17.a). Pour ce qui concerne la rugosité de la surface usinée, l'écart entre les valeurs numériques et expérimentales diminue en utilisant une distribution log-normale des hauteurs des grains d'abrasif (figure III.17.b).

Matériau usiné	Acier 8119 (58-62HRC)
Matériau de la pierre	Al_2O_3
Surface de contact pièce/pierre	98 (mm ²)
Vitesse relative pièce/pierre	1,14 (m/s)
Fréquence des oscillations de la pierre	2300 (cycle/min)
Amplitude des oscillations de la pierre	0,5 (mm)
Temps de cycle	10 (s)

Tableau III.2: Conditions expérimentales des tests de pierrage [Cha00].

Le pourcentage (inférieur à 0,2%) de grains actifs fourni par le modèle de Chang et al [Cha00] est très proche de celui précédemment obtenu par le modèle de Zhen Bing Hou et al [Hou03], ceci bien que les procédés abrasifs analysés soient différents. Il n'est pas possible d'établir si ce résultat est dû à l'approche statistique qui rend les résultats indépendants des procédés d'abrasion. Enfin, l'analyse de ces deux modèles laisse apparaître que :

- L'estimation des grains en contact avec la pièce et des grains qui sont réellement responsables de la génération de copeaux peut-être une possibilité de recherche pour l'interprétation séparée des phénomènes physiques de coupe, labourage et frottement.
- Même dans le cas d'une approche statistique, la modélisation des procédés abrasifs nécessite de nombreuses données expérimentales.

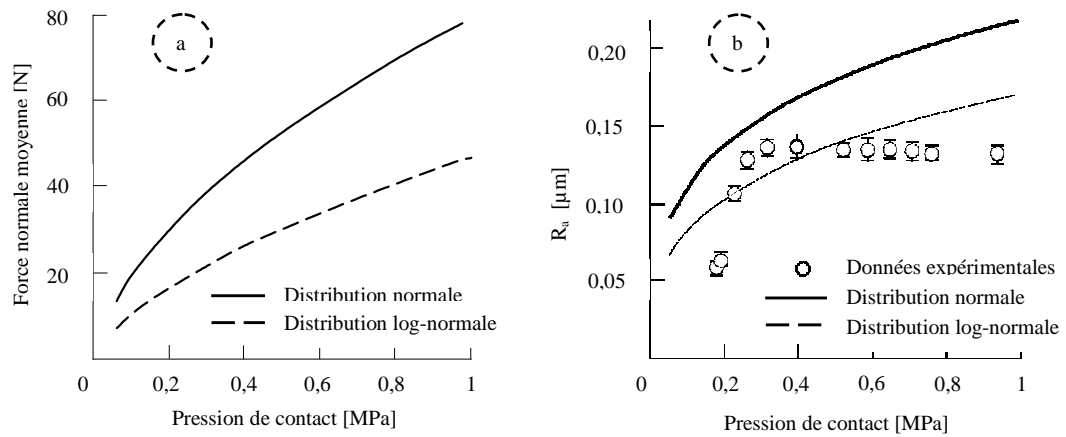


Figure III.17 : (a) Effort normal et (b) Rugosité de la surface usinée en fonction de la pression de contact pierre/pièce [Cha00].

CHAPITRE IV

Matériaux et dispositifs utilisés

IV.1. Matériaux et techniques expérimentales	71
IV.1.1. Matériaux utilisés	71
IV.1.2. Moyens utilisés	72
1. Four électrique	72
2. Microscope AXIOVERT 40 MAT	73
3. Rugosimètre	74
IV.1.3. Bandes abrasives utilisées	74
IV.1.4. Condition de travail	76
IV.2. Réalisation du dispositif de toilage	77
IV.2.1. Dispositif de toilage	77
IV.2.2. Composition du dispositif	77
IV.2.3. Dessin de définition des différentes pièces de dispositif	79
IV.2.4. Fixation du dispositif	89
IV.2.5. Elaboration des outils à abrasifs appliquées	90

IV.1. Matériaux et techniques expérimentales :

IV.1.1. Matériaux utilisés :

Le matériau usiné est un acier à roulement 100C6 (AISI 52100) de composition chimique effectué par la spectrométrie dans laboratoire de société SANIAK (Groupe BCR). A cause de sa résistance élevée à l'usure, l'acier 100C6 est préconisé surtout pour la fabrication de billes, de rouleaux, de bagues et de cages de roulements. Il est également employé dans la mise en forme à froid comme matrice de formage, cylindres de laminoirs et revêtements d'usure.

Le tableau IV.1 donne la composition chimique d'acier 100C6.

% en masse	%C	%Cr	%Cu	%Si	%S	%Mn	%Mo	%P	%Ni
Valeur mesurée	0,98	1,35	0,22	0,23	0,004	0,34	0,04	0,001	0,12

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier 100C6.

Certaines caractéristiques physiques de cet acier sont présentées dans le tableau IV.2 ci-dessous :

Caractéristiques [unités]	Valeurs
Conductivité thermique [W/m.K]	37,5
Module d'élasticité [GPa]	213
Masse volumique [kg/m ³]	7834
Chaleur massique [J/kg.K]	486

Tableau IV.2 : Quelques caractéristiques physiques de l'acier 100C6 [Pou99].

Cet acier est choisi comme un matériau à usiner car il présente approximativement 47% des matériaux thermiquement traités utilisés dans la fabrication des pièces [Ben07a]. Les essais de tournage ont été réalisés sur des pièces d'essais de même matériau (acier 100C6 trempé et non trempé). Elles sont composées de 5 paliers, chacun de diamètre 20 mm et de longueur 20 mm (figure IV.1). Elles comportent un centrage permettant la mise en position précise des pièces d'essais.

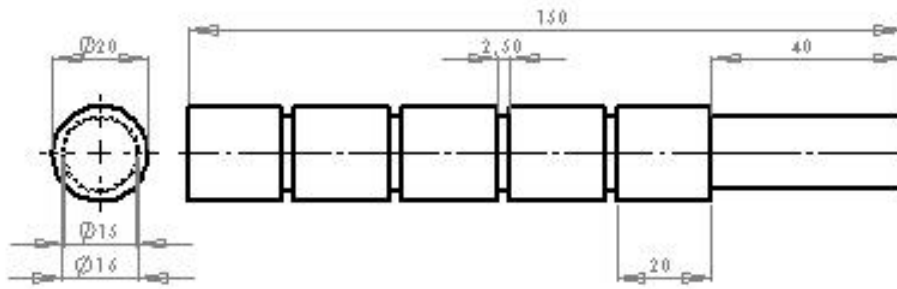


Figure IV.1 : Dessin de définition des pièces d'essais.

Les essais sont réalisés sur un tour parallèle V S 1 (matador) de puissance à la broche 2,2 KW a une gamme de vitesses comprise entre 170 et 3550 tr/min. Les pièces sont usinées par tournage et tournage dur avec un outil de carbure revêtu CVD de type P10 ayant une bonne tenue de coupe, une forte ténacité et une grande résistance à l'usure, la désignation selon ISO est : SPGN 09 03 04 (SIP P10) et la porte plaquette utilisé est de désignation : P 10 S 16 RC SKPR 09.

IV.1.2. Moyens utilisés :

1. Four électrique :

Le traitement thermique des pièces a été effectué au moyen d'un four électrique de type CARBOLITE d'une puissance de 2,6 KW et de température maximale 1100°C (figure IV.2). La trempe se fait à l'huile dans température est 850 °C (temps de chauffage et de maintien respectivement 45 min et 15 min) suivi d'un revenu à 200 °C (temps de chauffage et de maintien respectivement 30 min et 15 min). Sa dureté est de 20 et 62HRC avant et après le traitement.



Figure IV.2 : Four électrique “CARBOLITE”.

2. Microscope AXIOVERT 40 MAT :

Le microscope AXIOVERT 40 MAT (voir figure IV.3) fonctionne par réflexion ou transmission. Il est équipé de plusieurs objectifs, ce qui permet un grossissement pouvant atteindre 1000X. Il permet de visualiser, de mesurer les dimensions des détails microscopiques, et de les photographier. La platine porte-échantillon facilite le déplacement sur une distance variant de 0.1 à 20 mm dans deux directions perpendiculaire au dessus de l'objectif.

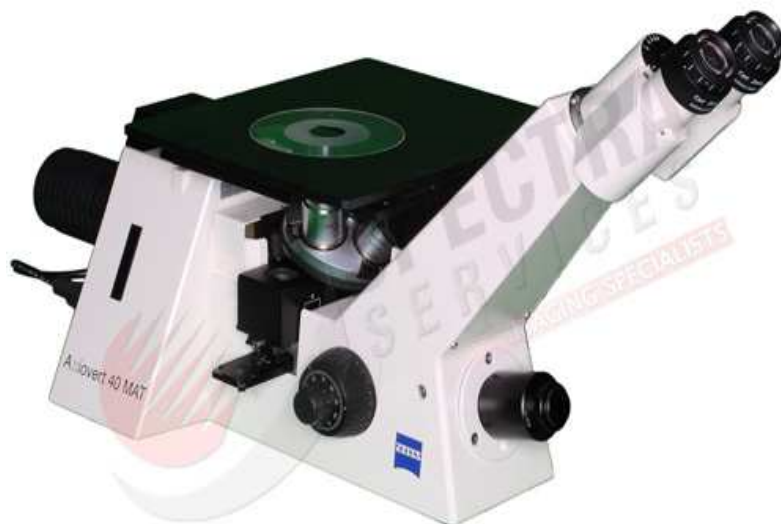


Figure IV.3 : Microscope AXIOVERT 40 MAT.

3. Rugosimètre :

C'est un appareil de mesure des paramètres de rugosité commandé par un microprocesseur de type Mitutoyo SurfTest-301 de précision $0,01 \mu\text{m}$ (figure IV.4). Il est composé d'un capteur qui sert à détecter les déplacements verticaux du palpeur, d'un calculateur et d'une unité d'affichage. Le rugosimètre permet d'enregistrer le profil de rugosité sur un rouleau de papier (imprimante intégrée).

Chaque essai est répété cinq fois et à la fin de chaque essai, des mesures de rugosité ont été réalisées sur les surfaces usinées afin d'analyser l'effet des différents paramètres de coupe. Les valeurs de rugosité indiquées dans cette étude sont une moyenne de cinq mesures effectuées sur chaque surface usinée en cinq endroits différents. Les mesures de la topographie sont faites sur ce rugosimètre utilisant un filtre Gaussien et une longueur d'onde de coupure $0,8 \text{ mm}$. Les profils de rugosité sont mesurés sur une longueur de $4,8 \text{ mm}$.

Pour nos mesures, nous avons retenu la rugosité arithmétique $R_a [\mu\text{m}]$ (moyenne de toutes les valeurs de la rugosité R sur la longueur d'évaluation "l") et la rugosité totale $R_{\text{max}} [\mu\text{m}]$ (elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité).



Figure IV.4 : Rugosimètre "SurfTest-301".

IV.1.3. Bandes abrasives utilisées :

Les bandes abrasives utilisées dans les essais de toilage sont des bandes de support toile souple, de résine et une seule couche des grains de l'oxyde d'aluminium, ces bandes sont fabriquées par la société française premines industries (P180 ($\sim 78 \mu\text{m}$), P320 ($\sim 46,2 \mu\text{m}$), P400 ($\sim 35 \mu\text{m}$), P800 ($\sim 21,8 \mu\text{m}$), P1000 ($\sim 18,3 \mu\text{m}$), P1200 ($\sim 15,3 \mu\text{m}$)).

La figure IV.5 montre les topographies des surfaces de toiles abrasives à granulométrie croissante obtenues avant toilage par microscope AXIOVERT 40 MAT de grossissement 20X.

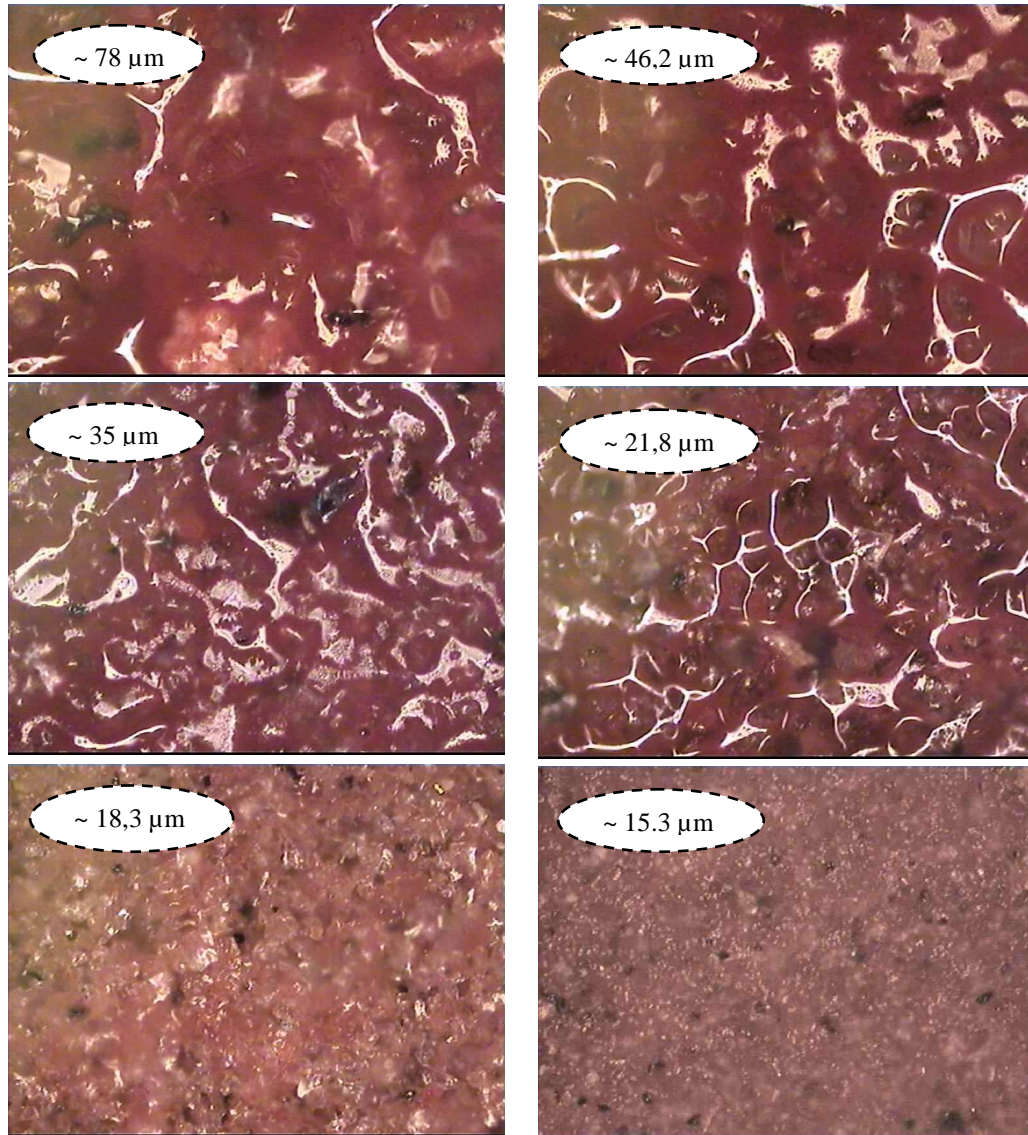


Figure IV.5 : Topographie des bandes abrasives neuves.

IV.1.4. Condition de travail :

A. Condition de travail de tournage :

Même condition de travail pour le tournage (T) et le tournage dur (TD).

Rotation de la pièce : 800 tr/min.

Vitesse d'avance : 0.15 mm/tr.

Profondeur de passe : 0.3 mm.

B. Condition de travail fixée du toilage :

Vitesse de rotation de la bande abrasive : 150 tr/min.

Déplacement de la bande abrasive : 12 mm.

Amplitude d'oscillation : $\pm 1,5$ mm.

Lubrifiant utilisé: l'huile Tasfalout 22^M diluée à 1/10.

Les grosseurs des grains utilisés sont déterminées comme suit (tableau IV.3) :

Code des bandes abrasives	P180	P320	P400	P800	P1000	P1200
Grosueur des grains [μm]	~ 78	~ 46,2	~ 35	~ 21,8	~ 18,3	~ 15,3

Tableau IV.3 : Grosueur des grains abrasifs utilisés.

IV.2. Réalisation du dispositif de toilage :

IV.2.1. Dispositif de toilage :

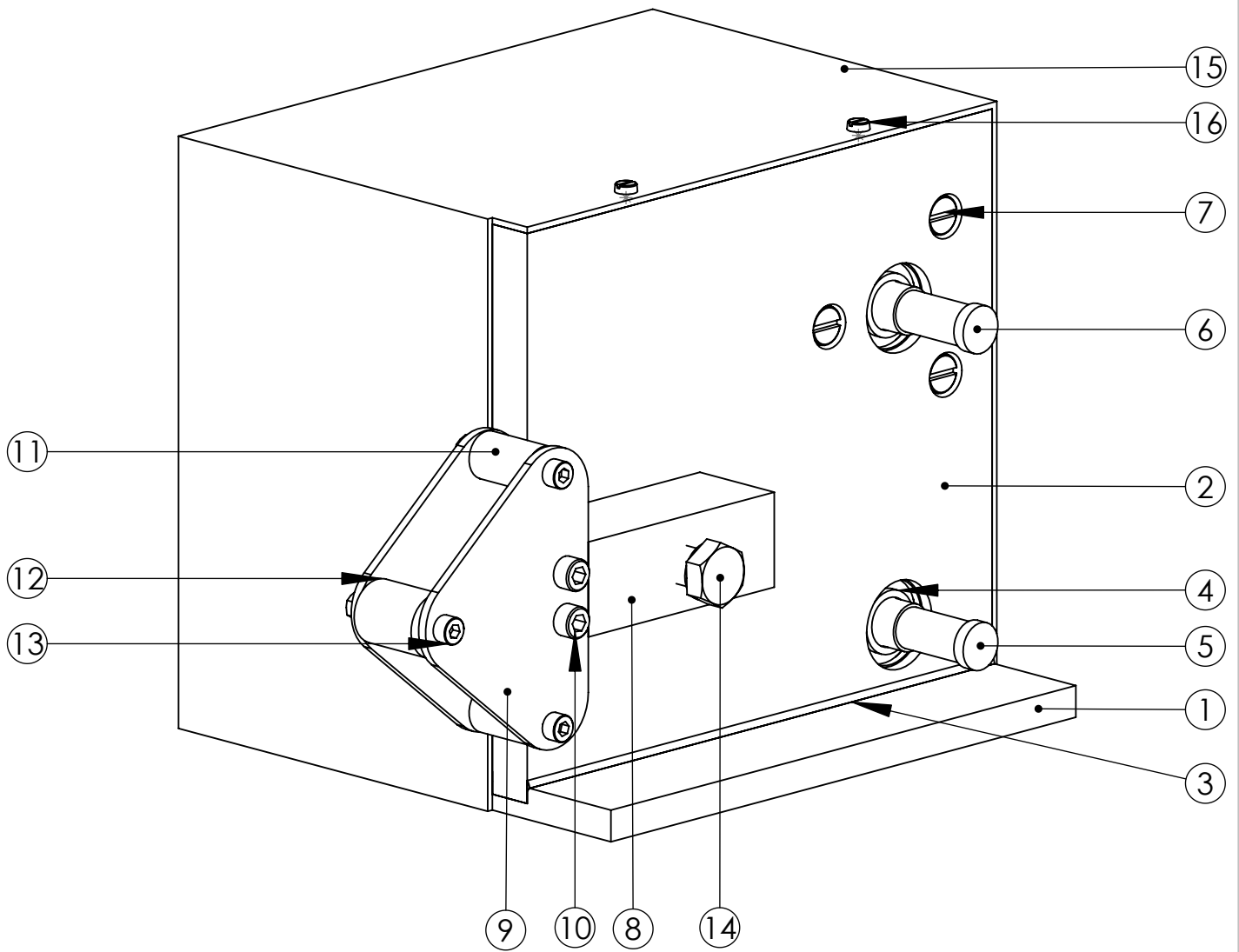
Ce dispositif est réalisé dans l'unité d'Almoules dans la zone industrielle de Sétif. La réalisation a été faite selon les étapes suivantes :

- Préparation des dessins de définition nécessaires pour la réalisation du dispositif.
- Assemblage et l'ajustement du dispositif pour l'utilisation.
- Élaboration des outils abrasifs (toile).

IV.2.2. Composition du dispositif :

Le dispositif de toilage se compose des éléments suivants (Voir Figure IV.6) :

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



16	4	Vis à tete cylindrique fondue M4 x 10	ISO 1207
15	1	Boîtier	Tôle
14	1	Vis de pression téton long M12 x 45	ISO 4027
13	3	Vis à tête cylindrique à six pans creux M5 x 38.5	ISO 4762
12	1	Galet	Polyamide
11	2	Guide	XC48
10	2	Vis à tête cylindrique à six pans creux M6 x 39.5	ISO 4762
9	2	Support galet	XC48
8	1	Glissière	XC48
7	3	Vis à tete cylindrique fondue M8 x 27	ISO 1207
6	1	Arbre moteur	35 NCD 16
5	1	Arbre de guidage	35 NCD 16
4	2	Roulement à billes SKF	Cdyn=5.59KN, Cstat=2.85KN.
3	2	Soudage	
2	1	Porte glissière	XC48
1	1	Support de dispositif	XC48
N°	QTE	NOM DE PIECE	MATERIAU

ECHELLE: 1: 2

Institut d'optique et de mécanique de précision

Hamdi
Amine



N : 1

Dispositif de toilage

Dispositif de toilage

2011

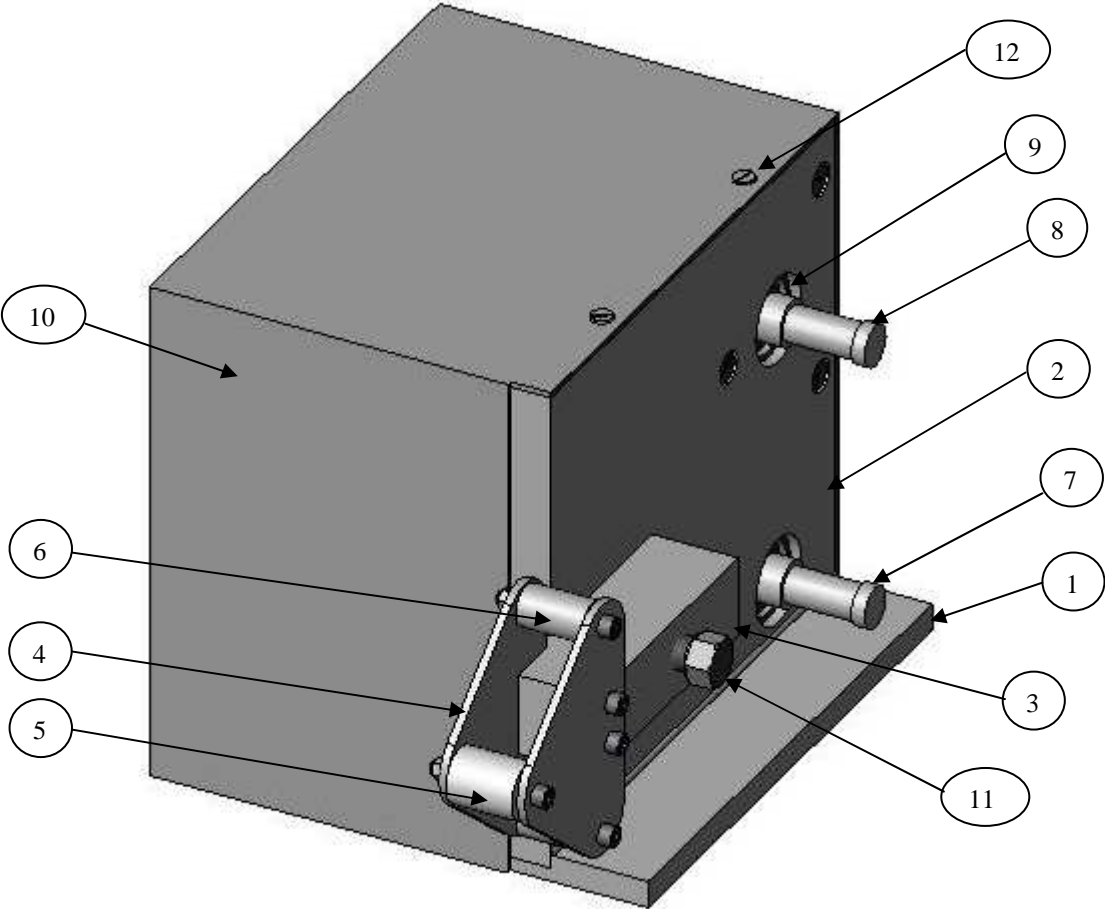
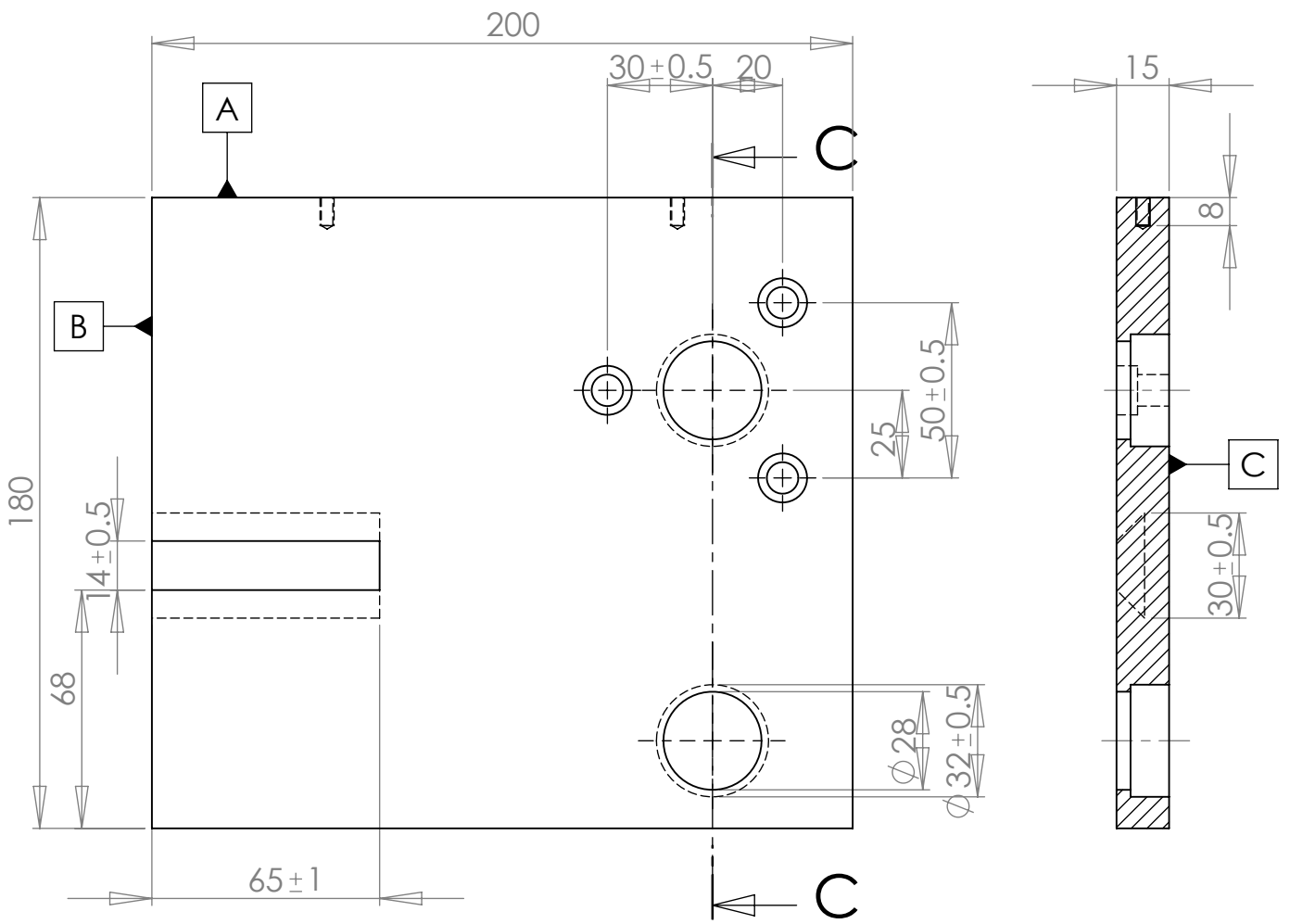
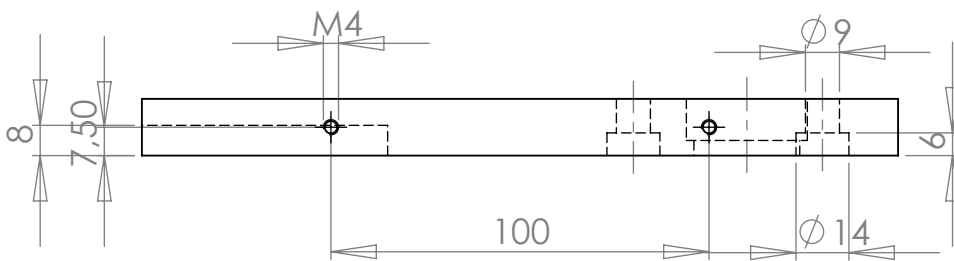


Figure IV.6 : Dispositif de toilage dessiné par SolidWorks.

IV.2.3. Dessin de définition des différentes pièces de dispositif :



COUPE C-C
ECHELLE 1 : 2



ECHELLE 1 : 2

Université Ferhat Abbas -Sétif-

Hamdi
Amine

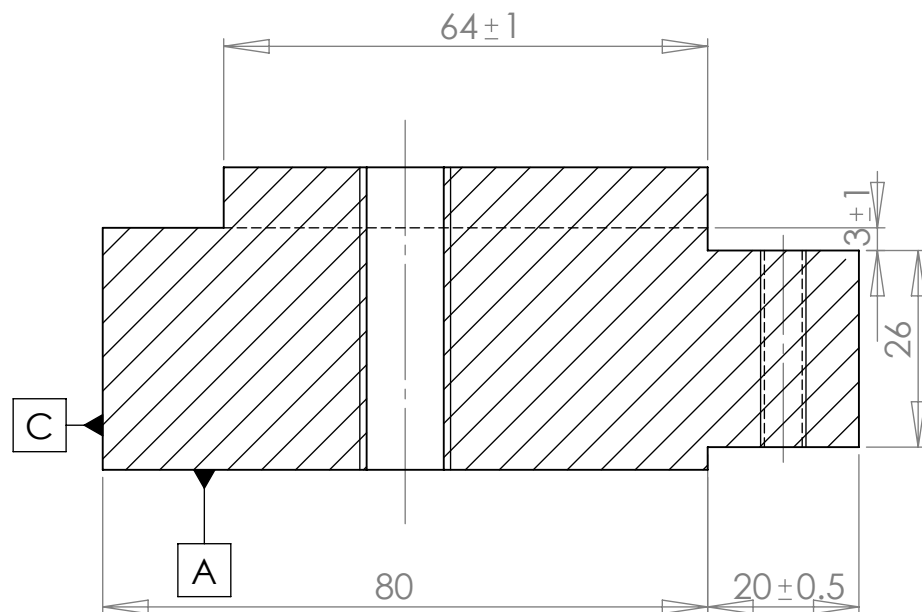
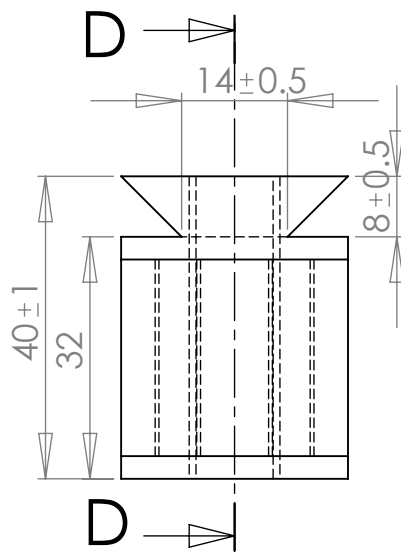


Porte moteur

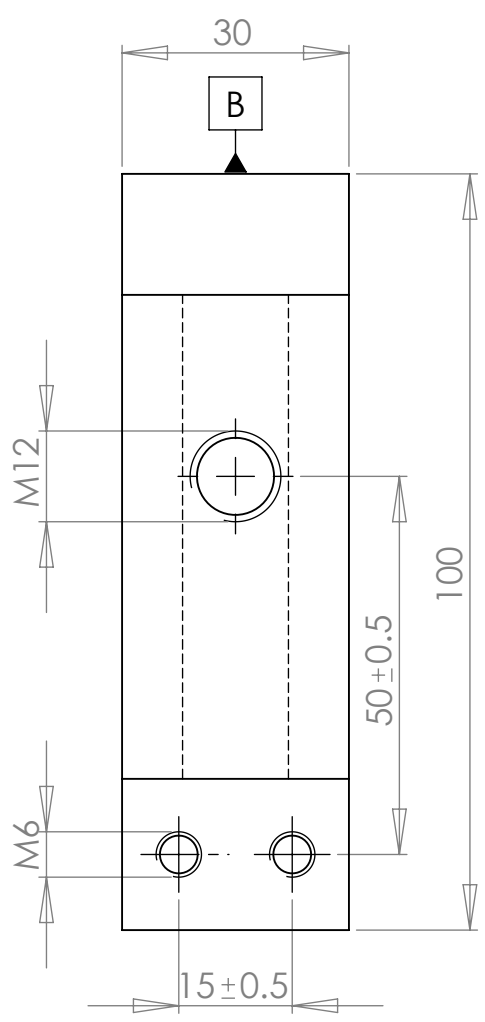
Dispositif de toilage

N : 3

2011

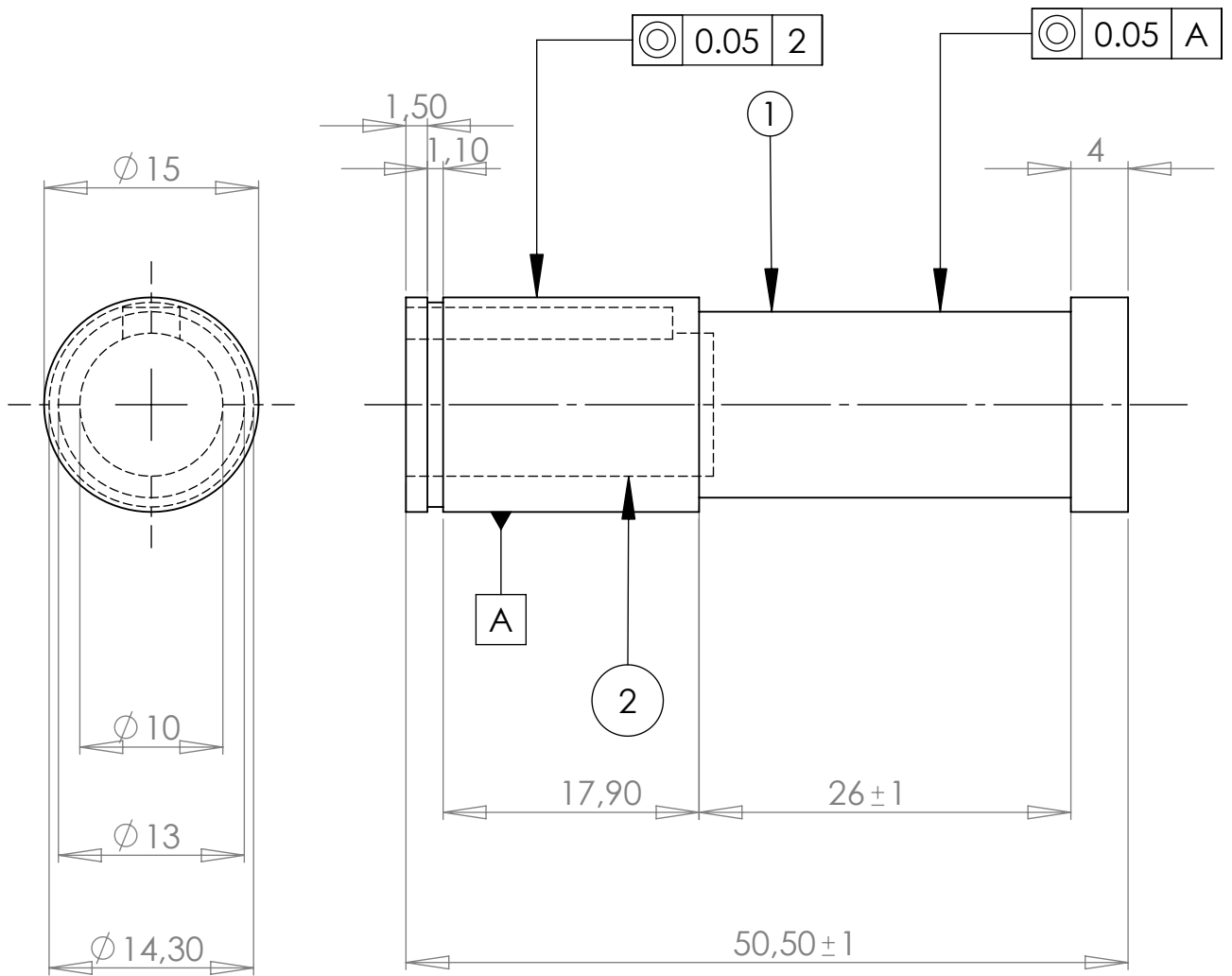


COUPE D-D
ECHELLE 1 : 1



\perp	0.05	A	B
\perp	0.05	A	C
\perp	0.05	B	C

ECHELLE 1 : 1	Université Ferhat Abbas -Sétif-	Hamdi Amine
	Glissière	Dispositif de toilage
N : 4		2011



ECHELLE 2 : 1

Université Ferhat Abbas -Sétif-

Hamdi
Amine

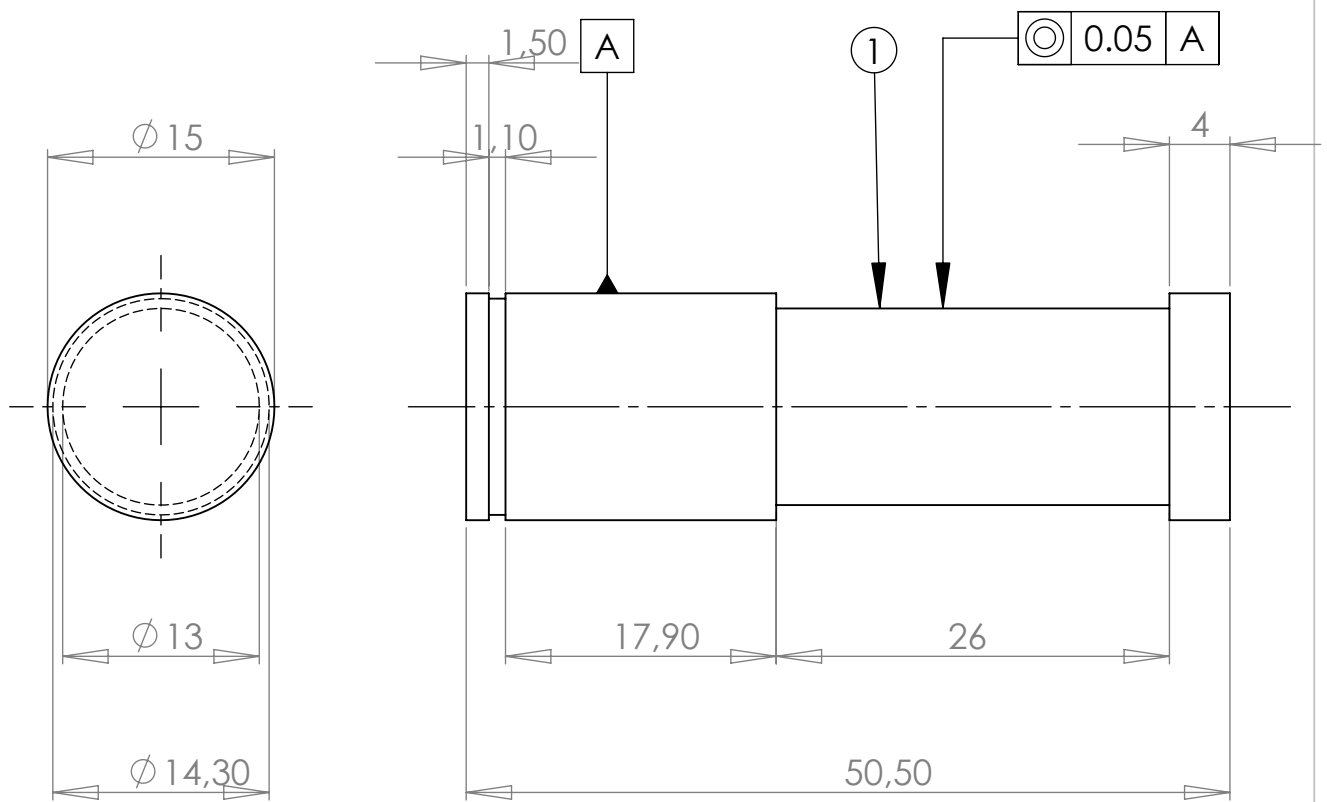


Arbre moteur

Dispositif de toilage

N : 5

2011



ECHELLE 2 : 1

Université Ferhat Abbas -Sétif-

Hamdi
Amine

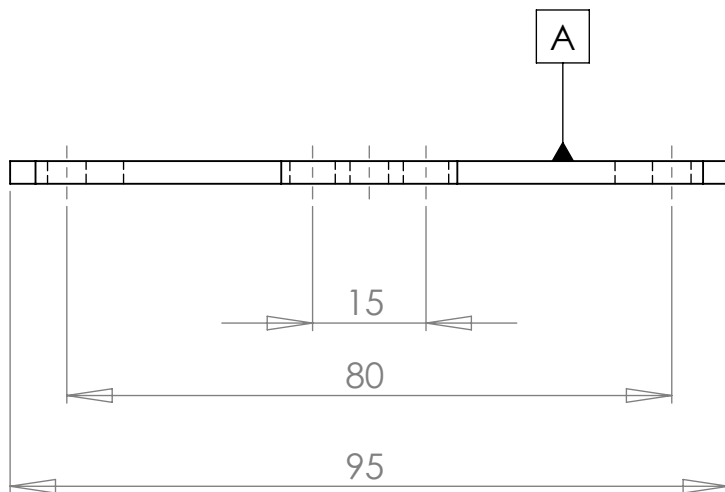
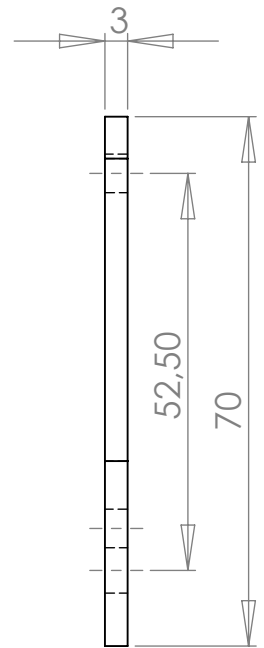
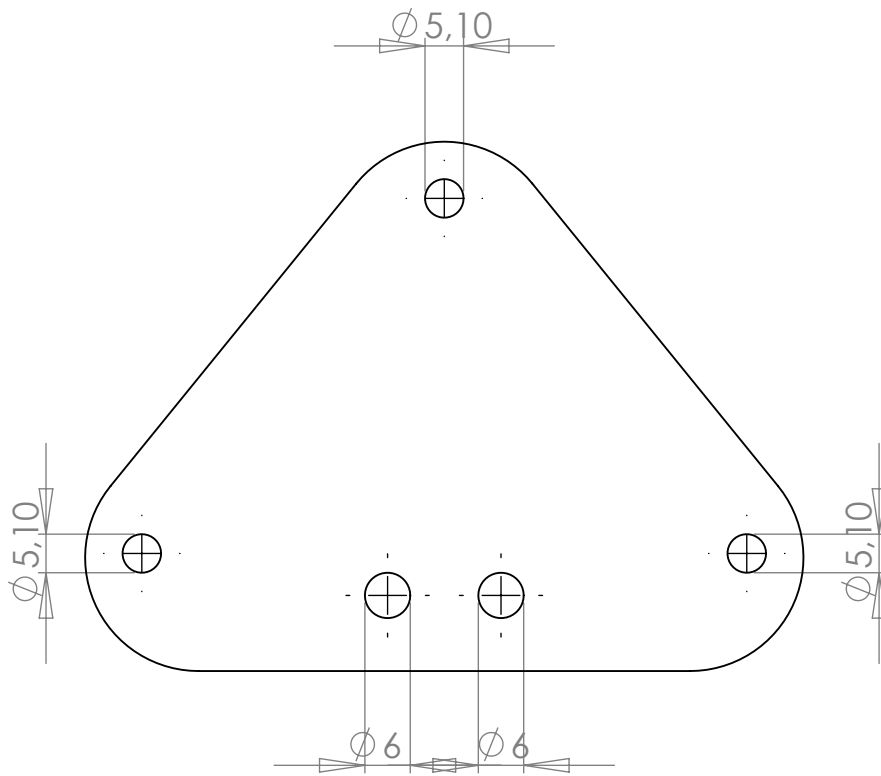


Arbre de guidage

Dispositif de toilage

N : 6

2011



ECHELLE 1 : 1

Université Ferhat Abbas -Sétif-

Hamdi
Amine

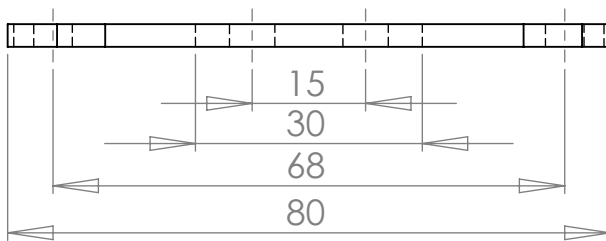
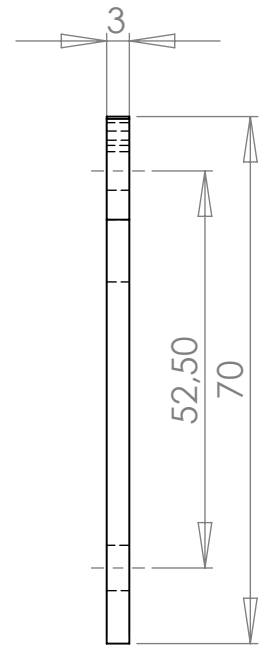
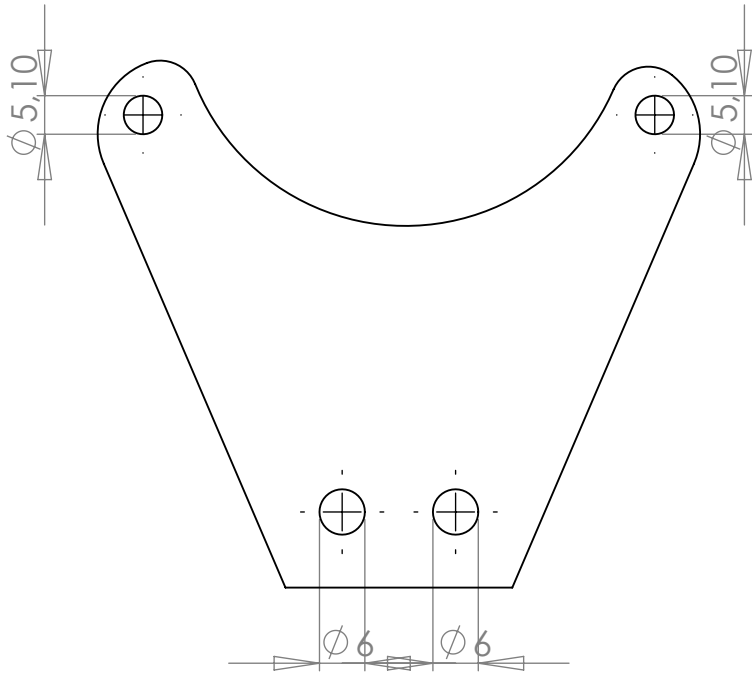


Support galet

Dispositif de toilage

N : 7

2011



ECHELLE 1:1

Université Ferhat Abbas -Sétif-

Hamdi
Amine

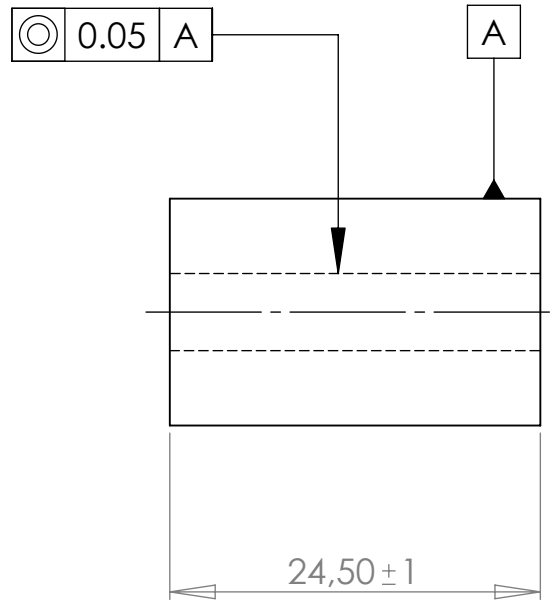
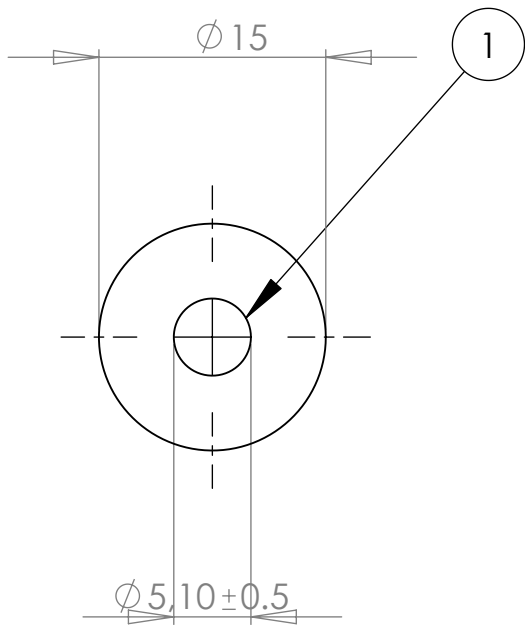



Mâchoire

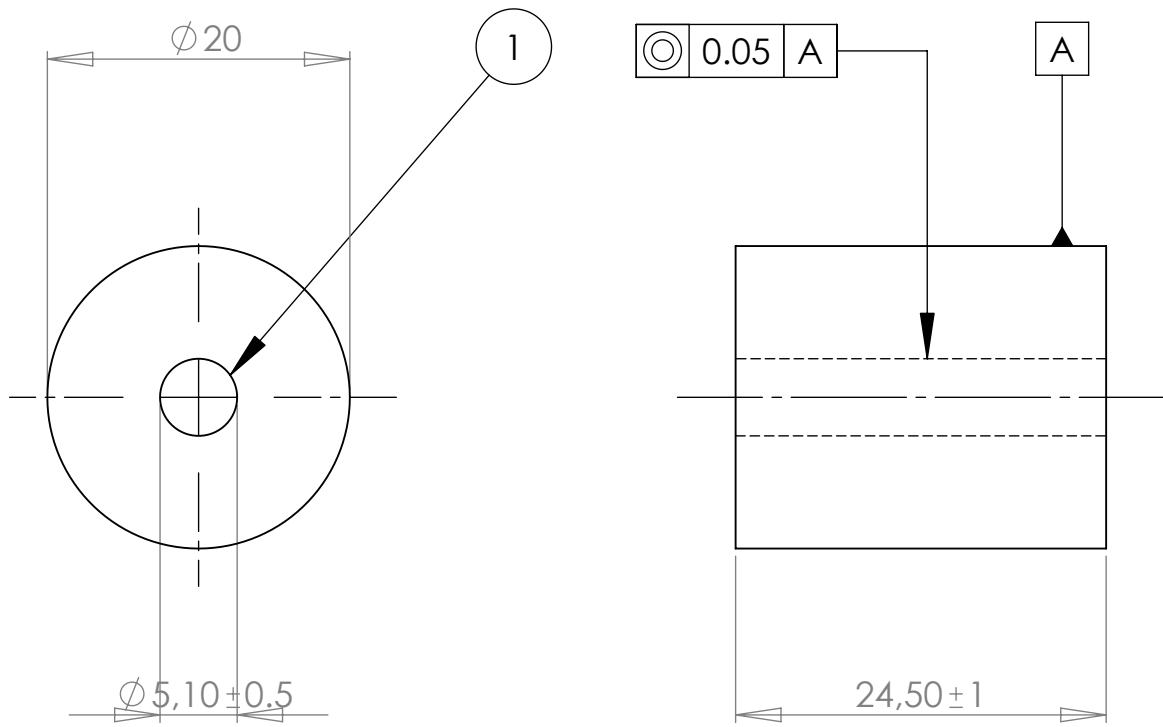
Dispositif de toilage

N : 8

2011



<p>ECHELLE 2 : 1</p>	<p>Université Ferhat Abbas -Sétif-</p>	<p>Hamdi Amine</p>
	<p style="text-align: center;">Guide</p>	<p>Dispositif de toilage</p>
<p>N : 9</p>		<p>2011</p>



ECHELLE 1 : 1

Université Ferhat Abbas -Sétif-

Hamdi
Amine



Galet

Dispositif de toilage

N : 10

2011

IV.2.4. Fixation du dispositif :

Le dispositif de toilage est fixé sur un tour parallèle à la place du chariot porte outil, toute en respectant le parallélisme entre l'axe du mandrin et l'axe du galet comme le montre les figures IV.7 et IV.8.

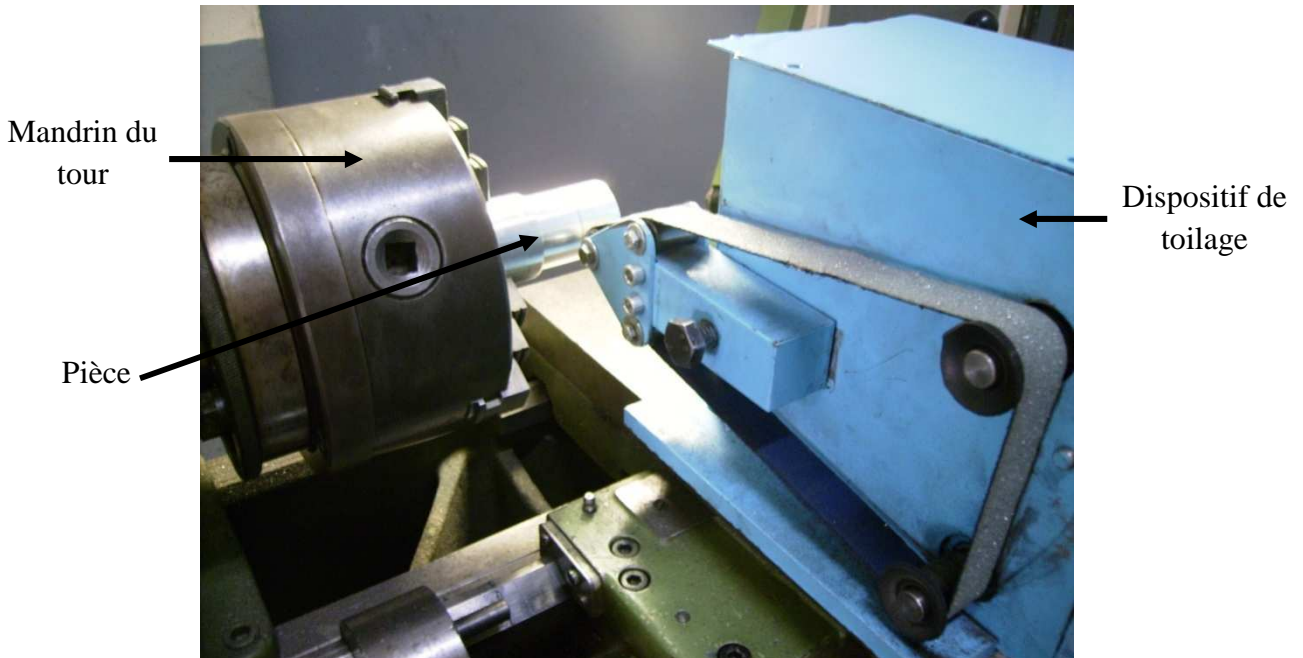


Figure IV.7 : Montage de dispositif sur le Tour Vue à gauche.

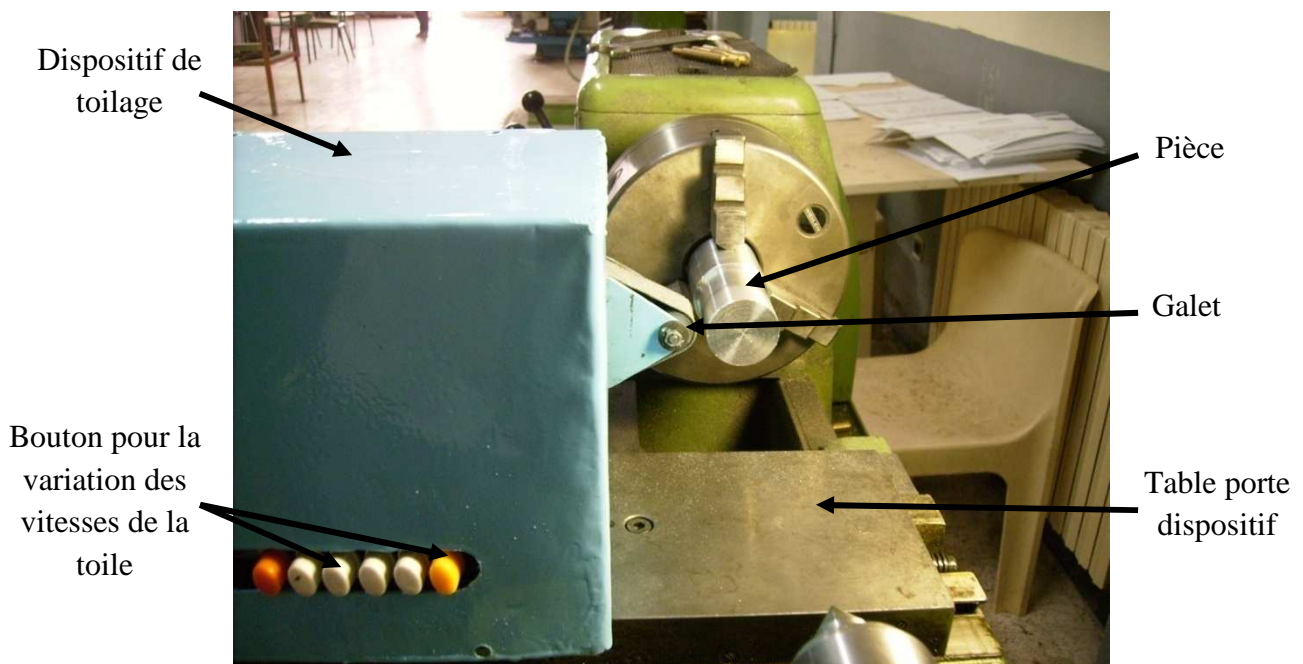


Figure IV.8 : Le parallélisme entre l'axe du mandrin et l'axe de galet Vue de face.

IV.2.5. Elaboration des outils à abrasifs appliqués :

Ces outils ont été élaborés dans le laboratoire du verre du département d'optique et de mécanique de précision manuellement, il se fait suivant ces étapes :

Préparation des éléments nécessaires pour l'élaboration des outils :

- Les grains abrasifs.
- Support des grains en toile (la bâche).
- Colle.
- Pinceau.

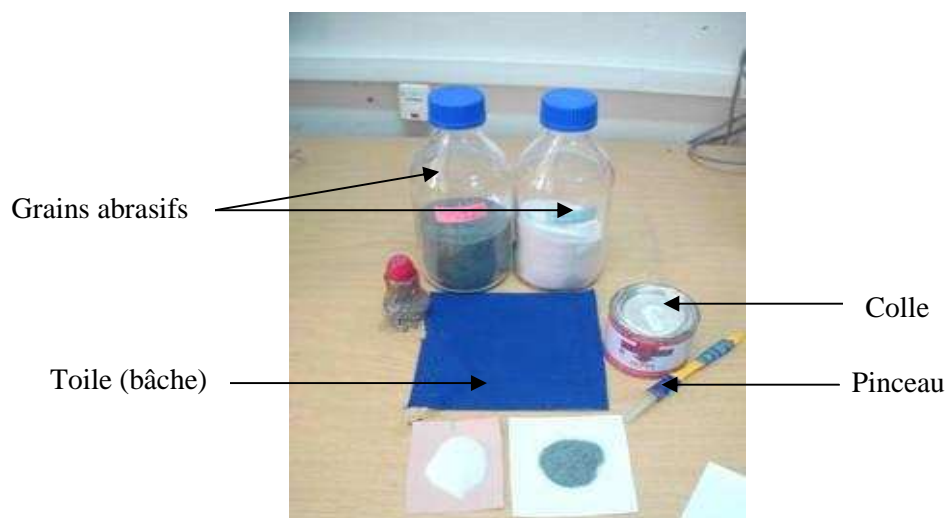


Figure IV.9 : Représentation des éléments nécessaires pour l'élaboration des outils.

On coupe la bâche en bandes de 20 mm de largeur et 60 mm de longueur. Les bandes coupées sont bien serré avant d'étaler une couche de colle, puis les grains abrasifs sont versés sur la couche de colle pour la réalisation de la première couche, après 15 min une deuxième couche est réalisée de la même manière. La figure IV.10 montre les bandes abrasives obtenues.



Figure IV.10 : Bande abrasif.

CHAPITRE V

Résultats et interprétation

V.1. Variation de la rugosité en fonction de temps	92
V.1.1. Sans lubrification	92
V.1.2. Avec lubrification	95
V.2. Variation de la rugosité en fonction de la vitesse de rotation de la pièce	98
V.2.1. Sans lubrification	98
V.2.2. Avec lubrification	99
V.3. Variation de la rugosité en fonction de la grosseur des grains	100
V.3.1. Sans lubrification	101
V.3.2. Avec lubrification	102
V.4. Variation de la rugosité en fonction des grains successifs	103
V.4.1. Sans lubrification	103
V.4.2. Avec lubrification	105
V.5. Variation de l'état de l'abrasif	106
V.6. Conclusion	109

V.1. Variation de la rugosité en fonction de temps :

Dans cette étape, on fixe deux paramètres ; la moyenne de la grosseur des grains de la bande abrasive est $21,8 \mu\text{m}$ et la vitesse de rotation de la pièce 800 tr/min .

V.1.1. Sans lubrification :

Les figures V.1 et V.2 montrent l'évolution respective de la rugosité R_a et R_{max} en fonction du temps de toilage t_{toilage} .

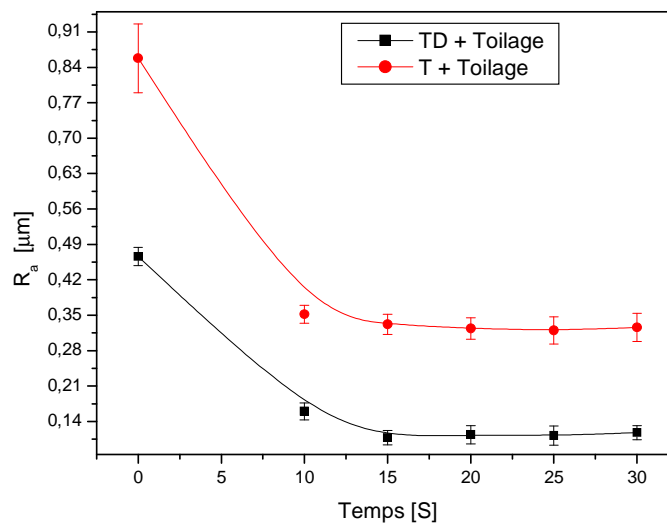


Figure V.1 : Variation de la rugosité R_a en fonction du temps.

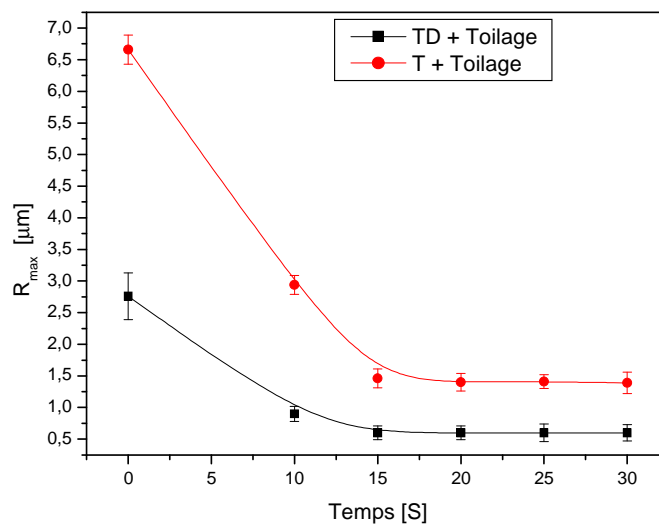


Figure V.2 : Variation de la rugosité R_{max} en fonction du temps.

D'après les deux graphes V.1 et V.2, il est clair que l'opération de toilage montre deux régimes distincts. Le premier, où t_{toilage} passe de 0 à environ de 15 secondes, est caractérisé par la rugosité diminue considérablement avec la durée de toilage pour les deux cas de l'acier :

R_a à partir de $0,466 \mu\text{m}$ ($t_{\text{toilage}}= 0 \text{ s}$) jusqu'à $0,108 \mu\text{m}$ ($t_{\text{toilage}}= 15 \text{ s}$) pour l'acier trempé, et $0,858 \mu\text{m}$ ($t_{\text{toilage}}= 0 \text{ s}$) jusqu'à $0,32 \mu\text{m}$ ($t_{\text{toilage}}= 15 \text{ s}$) pour l'acier non trempé, R_{max} à partir de $2,76 \mu\text{m}$ ($t_{\text{toilage}}= 0 \text{ s}$) jusqu'à $0,6 \mu\text{m}$ ($t_{\text{toilage}}= 15 \text{ s}$) pour l'acier trempé, et $6,66 \mu\text{m}$ ($t_{\text{toilage}}= 0 \text{ s}$) jusqu'à $1,4 \mu\text{m}$ ($t_{\text{toilage}}= 15 \text{ s}$) pour l'acier non trempé.

Donc, pour ce régime, le toilage permet une réduction très importante de la hauteur des pics du profil, qui se traduit en terme commun par une amélioration de l'état de surface. Au début du toilage, les arêtes tranchantes des grains abrasifs sont vives et permettent la génération de micro-copeaux relativement importants, le phénomène de coupe est prédominant (voir figure V.3). Le second régime (après $t_{\text{toilage}} > 15 \text{ s}$) au cours duquel l'effet de toilage chute rapidement et la rugosité ne diminue plus de manière significative. Ceci peut être expliqué par que la taille des micro-copeaux générés en début de toilage est logés dans l'espace inter-grains est relativement importante et ne permettent plus à ceux-ci une indentation franche de la surface usinée, les arêtes tranchantes des grains abrasifs s'arrondissent et se détachent de la matrice liante pour former un troisième corps. Le phénomène de frottement devient prédominant. A ce stade, l'effet de toilage chute et se stabilise à un niveau faible que celui nécessaire pour générer des micro-copeaux ou déformer plastiquement la matière (labourage par déformation plastique). De plus, ce frottement n'améliore plus la rugosité.

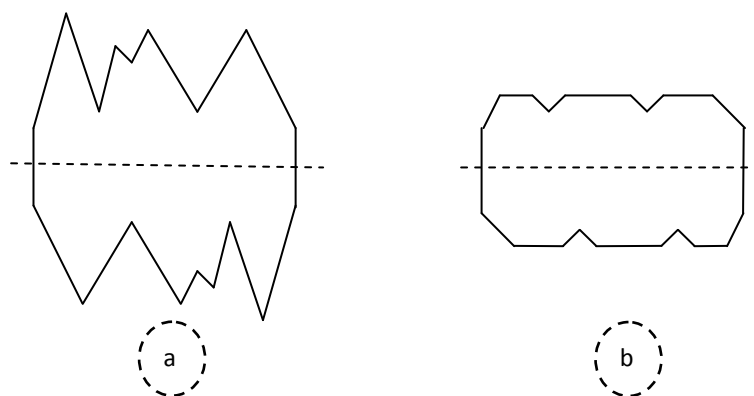


Figure V.3 : Effet de la coupe sur le profil de la surface usinée ; a- profil après tournage dur, b- profil après tournage dur + toilage.

Les surfaces toilées sont observées par le microscope AXIOVERT 40 MAT, les figures V.4a-b montrent respectivement la surface de l'acier trempé et non trempé toilé par la bande

abrasive de granulométrie $21,8 \mu\text{m}$ et la vitesse de rotation de la pièce 800 tr/min . Ces figures montrent une nette amélioration de la surface dans les deux cas, les crêtes sont abrasées par les particules abrasives au fur et à mesure que le temps de toilage augmente jusqu'à ce que la surface devienne lisse ($t_{\text{toilage}} = 15 \text{ s}$).



Figure V.4 : Image microscopique après toilage sans lubrification en fonction du temps.

V.1.2. Avec lubrification :

Les figures V.5 et V.6 illustrent l'évolution respective de la rugosité R_a et R_{max} en fonction du temps de toilage $t_{toilage}$.

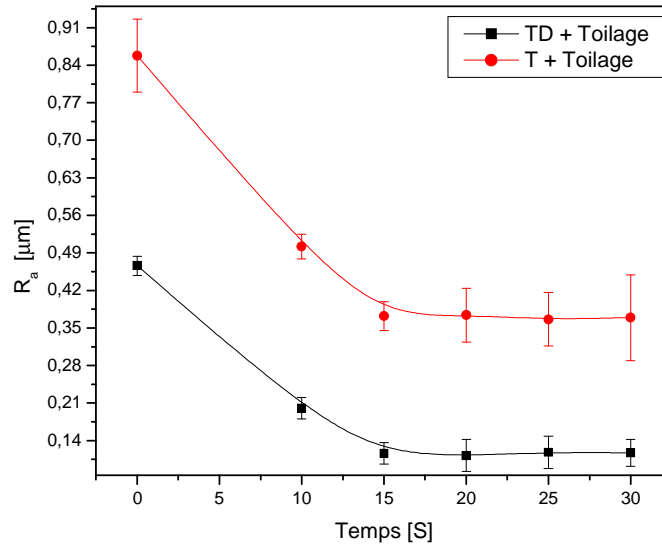


Figure V.5 : Variation de la rugosité R_a en fonction du temps.

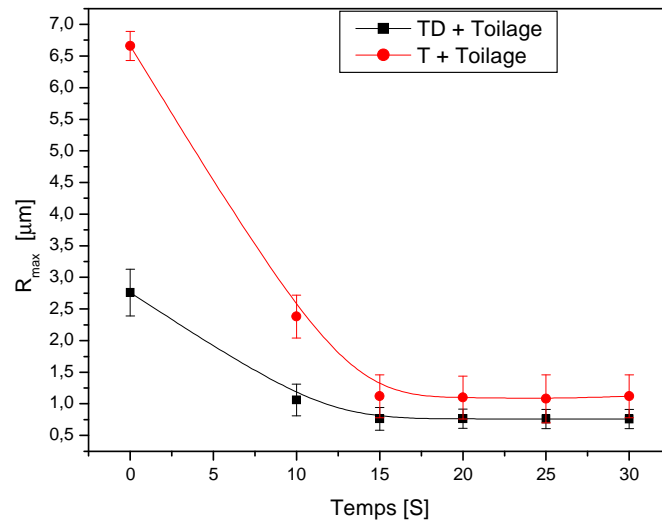


Figure V.6 : Variation de la rugosité R_{max} en fonction du temps.

Les deux figures V.5 et V.6 présentent qu'au début du toilage, la surface de l'acier dans les deux cas est rugueuse, après quelques secondes de toilage, la rugosité diminue jusqu'à une valeur minimale puis se stabilise sensiblement à partir de temps de toilage 15 secondes. On remarque aussi que la rugosité obtenue par toilage sans lubrification est toujours meilleur par rapport au toilage avec lubrification dans les deux cas (acier trempé et non trempé), mais la différence est faible et ce durant toute la phase de toilage, cette faible différence peut être expliqué par le glissement important de la bande abrasive lors du toilage avec lubrification qui en plus favorise, plus aisément le détachement des grains abrasifs et sans usure, par contre le détachement est difficile dans le cas de toilage sans lubrification, ce qui favorise l'usure totale des grains abrasifs en contact avec les échantillons et donc, amélioré plus l'état de surface.

La Figure V.7a-b présente respectivement les topographies de la surface toilées de l'acier trempé et non trempé. Ces figures illustrent clairement les modifications qu'a subies la surface de l'acier trempé et non trempé durant le toilage avec lubrification, l'amélioration de la surface de l'acier est caractérisée par la diminution des défauts se trouvent sur la surface de l'acier engendré par le tournage ou le tournage dur.

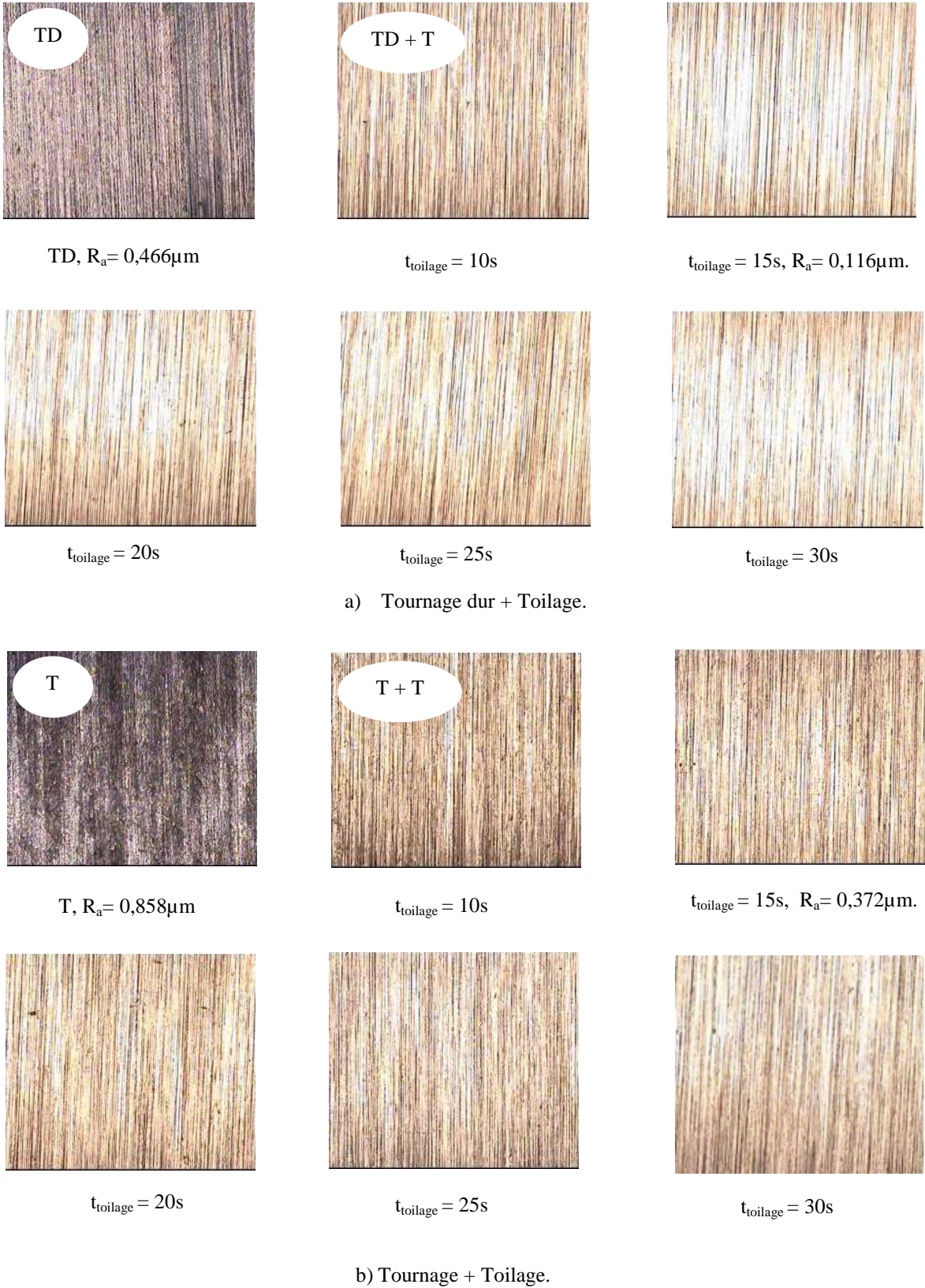


Figure V.7: Image microscopique après toilage avec lubrification en fonction du temps.

V.2. Variation de la rugosité en fonction de la vitesse de rotation de la pièce:

Pour déterminer la vitesse de rotation de la pièce optimal pendant le toilage lubrifié et non lubrifié de l'acier trempé et non trempé, on fixe deux paramètres : le temps de toilage $t_{\text{toilage}} = 15$ secondes et la bande abrasive utilisé est de grosseur moyenne $21,8 \mu\text{m}$.

V.2.1. Sans lubrification :

Les résultats obtenus de la rugosité R_a et R_{max} des échantillons toilés en fonction de la vitesse de rotation de la pièce sans lubrification sont présentés aux figures V.8 et V.9.

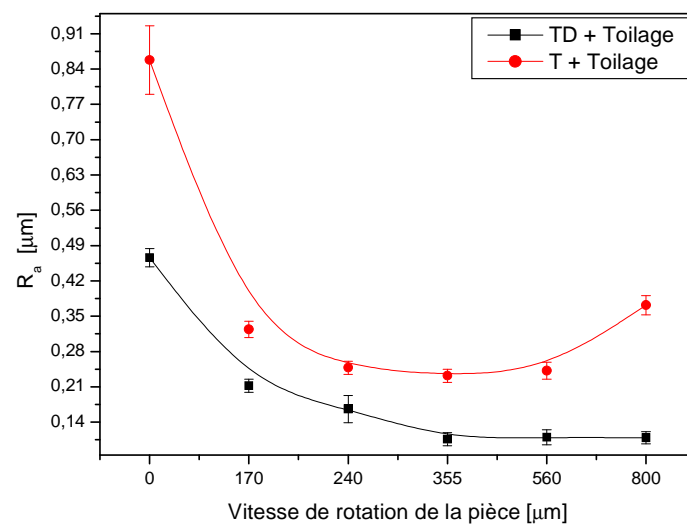


Figure V.8 : Variation de la rugosité R_a en fonction de la vitesse de rotation de la pièce.

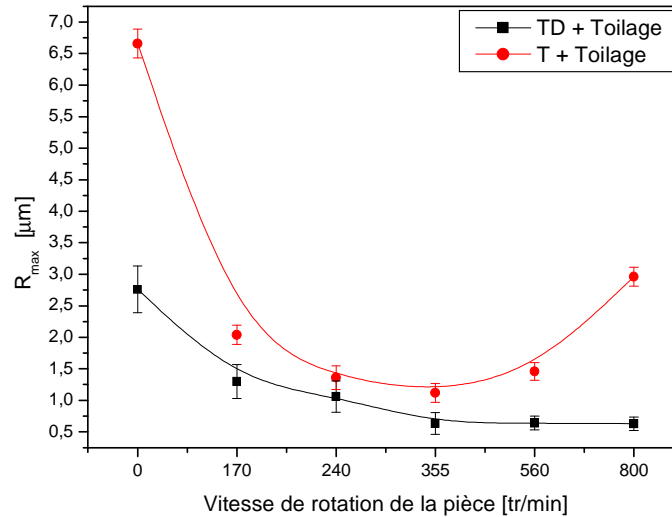


Figure V.9 : Variation de la rugosité R_{max} en fonction de la vitesse de rotation de la pièce.

L'évolution de l'état de surface comme montré les figures V.8 et V.9 indiquent que la rugosité diminue jusqu'à une vitesse de rotation 355 tr/min puis elle tend à se stabiliser pour l'acier trempé, par contre pour l'acier non trempé, on remarque que la rugosité diminue aussi lorsque la vitesse de rotation augmente jusqu'à 355 tr/min puis elle augmente. Cette variation de l'état de surface est peut être justifiée par le fait de dureté du matériau, la dureté des grains abrasifs et la vibration de la machine de toilage (tour et dispositif de toilage), dans la phase I ($N \leq 355$ tr/min) la vitesse de rotation de la pièce faible, donc il y a une stabilisation d'usinage entre l'échantillon et les grains de la bande abrasive (vibration faible), dans la phase II ($N > 355$ tr/min) la rugosité de l'acier trempé elle tend à se stabilise puisque la dureté de cet acier est très élevée (62 HRC), les grains sont dur et malgré que les vibrations peut être grand, il y a une stabilisation entre les grains de la bande abrasive et la surface toilé. Dans le deuxième cas (acier non trempé) la dureté est faible, les grains sont dur et les vibrations peut être grand, ceci engendre que les grains pénètre plus dans la surface toilé et produit l'augmentation de la rugosité.

V.2.2. Avec lubrification :

Les résultats obtenus de la rugosité R_a et R_{max} des échantillons toilés en fonction de la vitesse de rotation de la pièce avec lubrification sont présentés aux figures V.10 et V.11.

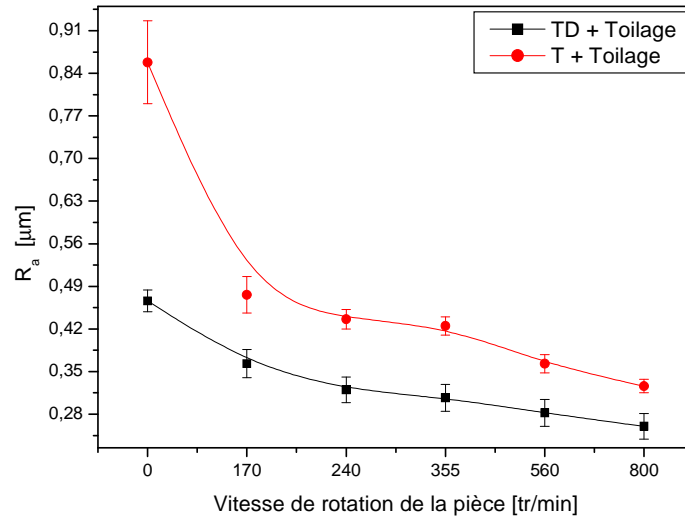


Figure V.10 : Variation de la rugosité R_a en fonction de la vitesse de rotation de la pièce.

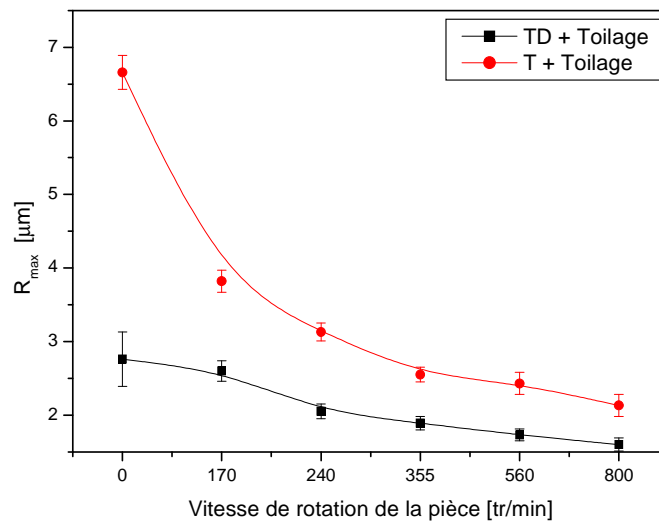


Figure V.11 : Variation de la rugosité R_{max} en fonction de la vitesse de rotation de la pièce.

On remarque d'après les résultats de la figure V.10 et V.11 que les rugosités R_a et R_{max} diminuent continuellement au fur et à mesure que la vitesse de rotation de la pièce augmente comme une opération d'usinage par enlèvement de matière (tournage). Et par comparaison avec les résultats de rugosité R_a et R_{max} sans lubrification il y a une différence entre ces résultats, cette différence peut être expliquée que l'utilisation de lubrification au cours de toilage laisse une stabilisation d'usinage entre l'échantillon et les grains de la bande abrasive.

V.3. Variation de rugosité en fonction de la grosseur des grains :

Pour déterminer la grosseur optimale de toilage de l'acier 100C6 trempé (TD) et non trempé (T) qui donne le meilleur état de surface (minimum de rugosité) on prend les paramètres suivants : la vitesse de rotation de la pièce 800 tr/min et le temps $t_{\text{toilage}} = 15$ secondes. Et comme représente-la figure IV.1, notre pièce divisée en cinq paliers où on réalise l'opération de toilage pour chaque grosseur de grains à partir de l'état initial obtenue par tournage ou tournage dur.

V.3.1. Sans lubrification :

Les figures V.12 et V.13 illustrent l'évolution de la rugosité R_a et R_{max} en fonction de la granulométrie des bandes abrasives.

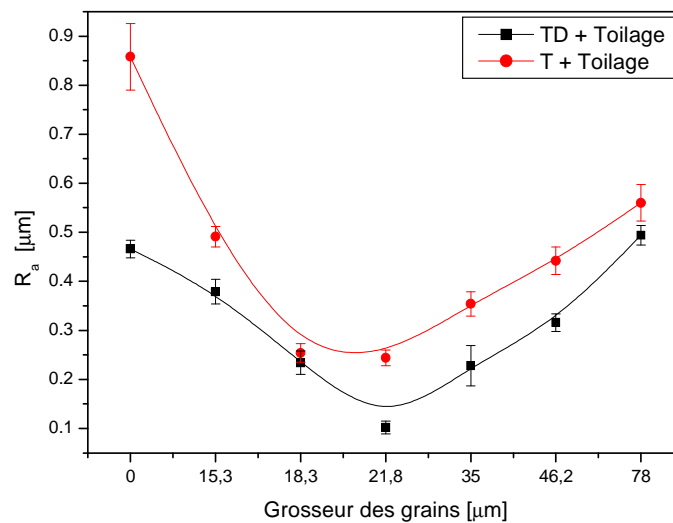


Figure V.12 : Variation de la rugosité R_a en fonction de la granulométrie de la bande abrasive.

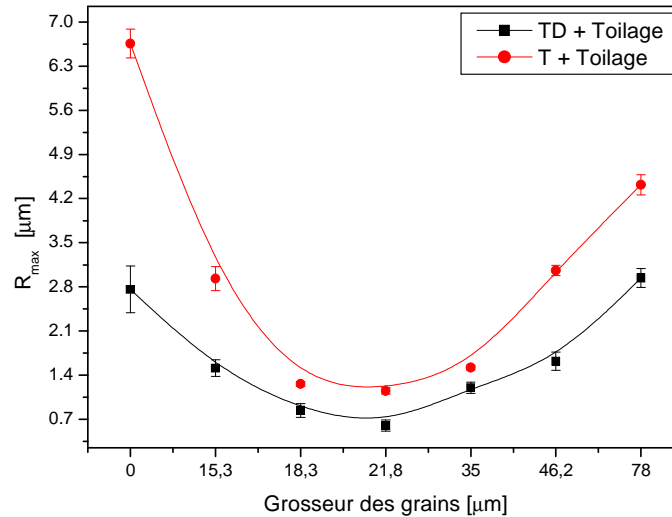


Figure V.13 : Variation de la rugosité R_{\max} en fonction de la granulométrie de la bande abrasive.

D'après les courbes des figures V.12 et V.13 on remarque que la rugosité de l'acier trempé obtenue par la bande des grains abrasifs 78 μm augmente. Ce résultat peut être expliqué par le fait que lors du gros toilage (la taille des grains abrasifs grande), la surface de contact entre les grains et la surface toilée représentant un profil très rugueuse et plus grande est par conséquent les grains enlèvent plus de matière, ce qui engendre une augmentation de la rugosité. Dans les autres cas, on distingue que la rugosité diminue en fonction de la grosseur des bandes abrasifs, mais cette diminution est différente de bande abrasive à d'autre bande, on remarque aussi que la bande abrasive de granulométrie 21,8 μm donne un meilleur résultat, ceci peut être expliqué par l'adaptation de la morphologie des grains et leur distribution granulométrique avec l'état initial de la surface de l'échantillon obtenue par tournage ou tournage dur.

V.3.2. Avec lubrification :

Les résultats obtenus de la rugosité R_a et R_{\max} des échantillons toilés en fonction de la granulométrie de la bande abrasive avec lubrification sont présentés aux figures V.14 et V.15.

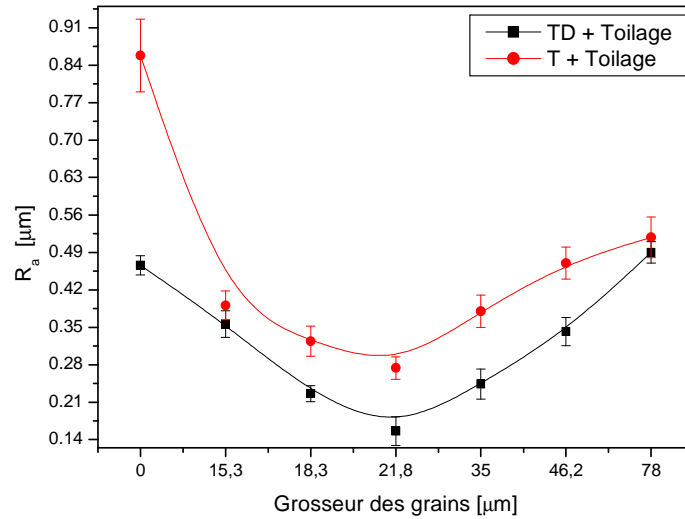


Figure V.14 : Variation de la rugosité R_a en fonction de la granulométrie de la bande abrasive.

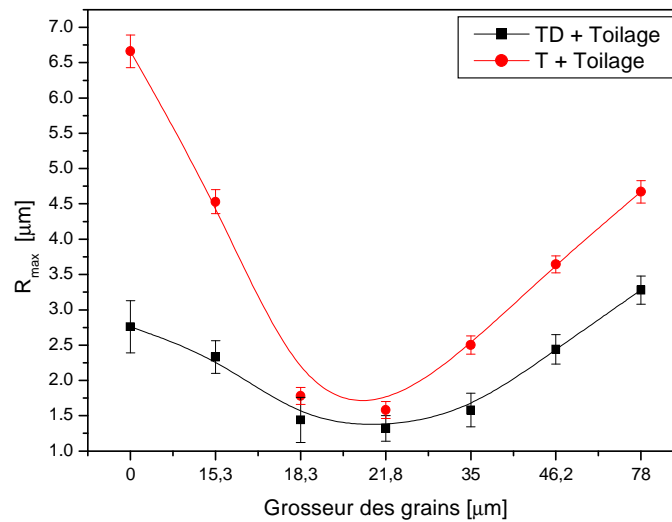


Figure V.15 : Variation de la rugosité R_{max} en fonction de la granulométrie de la bande abrasive.

On constate sur les courbes de la figure V.14 et V.15 que l'état de surface s'améliore avec tout les grosseurs des bandes abrasives utilisé, sauf la bande abrasive de grosseur 78 μm utilisé pour l'acier dur qui engendre une mauvaise rugosité, on constate aussi que la bande abrasive de grosseur 21,8 μm donne un minimum de rugosité par rapport à les bandes de grosseur ; 15,3 μm , 18,3 μm , 35 μm et 46,2 μm , puis elle commence à augmenter

progressivement, cela peut être expliqué par que les grains fins ($18,3 \mu\text{m}$ et $15,3 \mu\text{m}$) sont arrondis plus que anguleuse et ces bandes est défini par un nombre de grains d'abrasifs de plus en plus grand lorsque la granulométrie est faible, donc la structure de la toile est fermée alors que pour une grosse granulométrie, la toile présente une structure plus ouverte. Ces courbes confirment les résultats précédents (figure V.11 et V.12) que la bande abrasive $21,8 \mu\text{m}$ donne toujours un bon état de surface (minimum de rugosité) pour les deux cas d'acier.

V.4. Variation de rugosité en fonction des grains successifs:

Dans ce cas la surface de l'acier a subi un toilage consécutif de différentes fractions dans l'ordre décroissant des dimensions des grains abrasifs ($78 \mu\text{m}$ jusqu'à $15,3 \mu\text{m}$). Et pour chaque étape de finition par une bande abrasive on mesure la rugosité R_a et R_{max} .

V.4.1. Sans lubrification :

Les figures V.16 et V.17 montrent l'évolution respective de la rugosité R_a et R_{max} en fonction de la grosseur des grains abrasifs successifs.

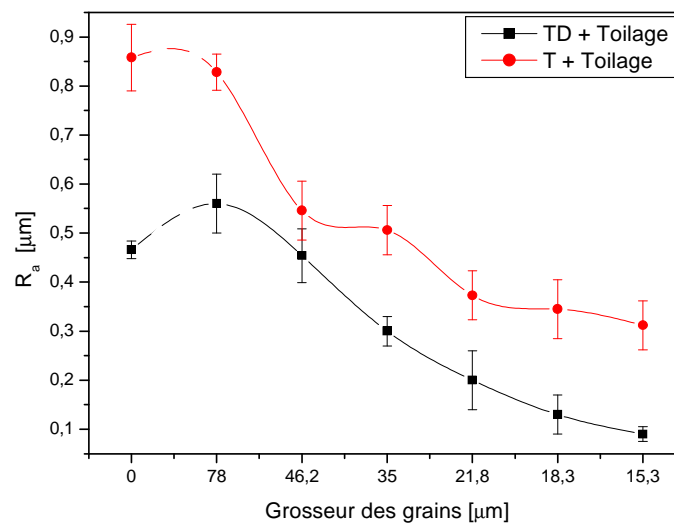


Figure V.16 : Variation de R_a en fonction de la grosseur des grains.

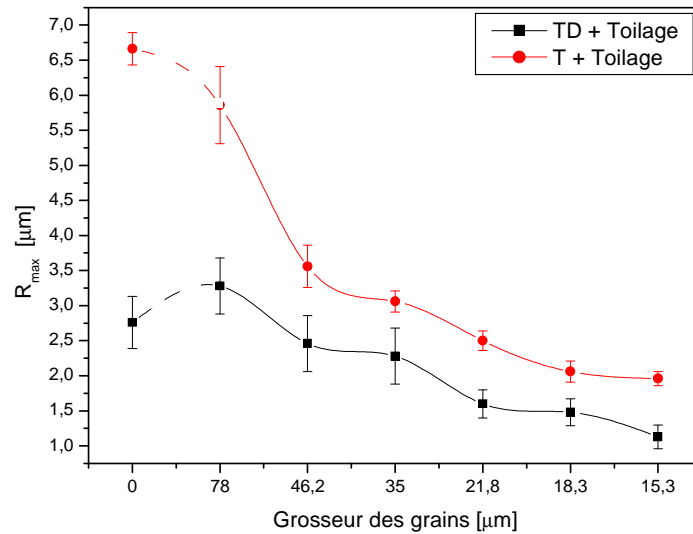


Figure V.17 : Variation de R_{max} en fonction de la grosseur des grains.

Les courbes de rugosité données aux figures V.16 et V.17 montrent que la grosseur des grains abrasifs ($\sim 78 \mu\text{m}$) est détérioré la surface de l'échantillon de l'acier trempé puisque la granulométrie de cette bande est peut être grand par rapport à l'état de surface initiale de l'échantillon. A partir de la bande abrasive de grosseur moyenne $46,2 \mu\text{m}$, la surface s'améliore pour les deux cas (acier trempé et non trempé) au fur et à mesure que la grosseur des grains diminue. Ceci peut être dû à l'effet de la surface de contact entre les grains et la surface de l'échantillon (voir figure V.18). En effet, au début du toilage ($\sim 46,2 \mu\text{m}$) les arrêtes vifs des gros grains entrent en contact avec les aspérités de la surface très rugueuse, ce qui favorise l'enlèvement de macro défauts (défauts macro-géométriques). Au fur et à mesure que le temps de toilage est 15 secondes pour chaque étape de finition, des grains plus fins sont employés et par conséquent la surface de contact est réduite avec la réduction des dimensions des arrêtes vifs et des défauts de surface. Ceci engendre l'enlèvement des défauts de faibles dimensions (micro géométrique) ce qui permet de réduire la rugosité de la surface.

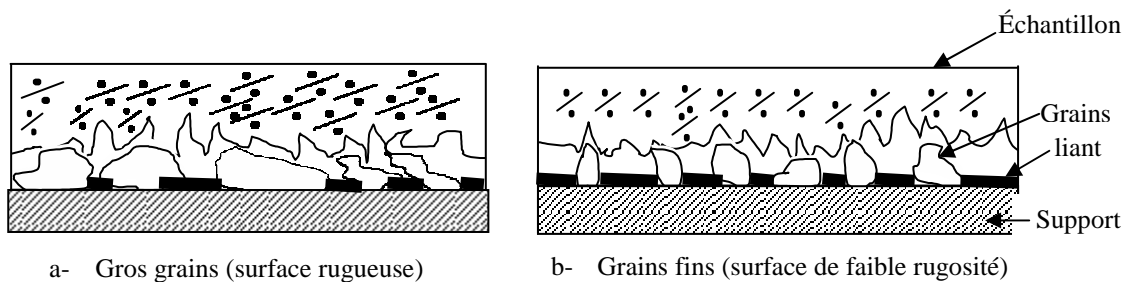


Figure V.18 : Principe de contact grains/surface.

V.4.2. Avec lubrification :

Les figures V.19 et V.20 représentent l'évolution de la rugosité R_a et R_{max} en fonction de la grosseur des grains abrasifs qui constitue les bandes abrasives avec lubrification.

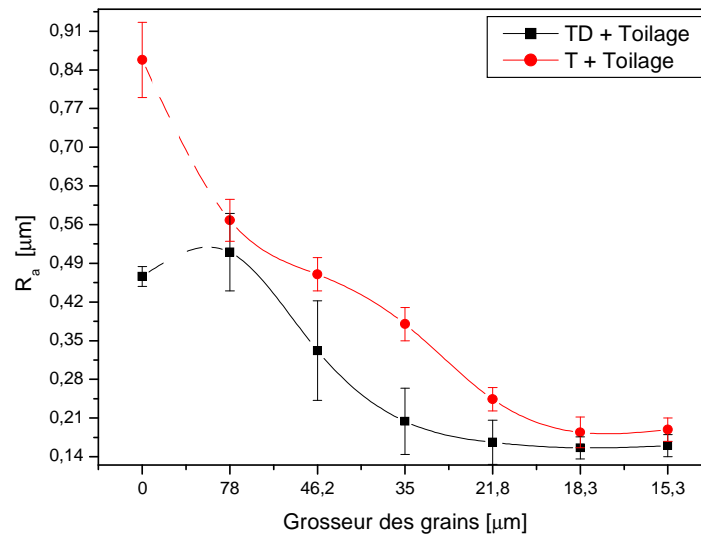


Figure V.19 : Variation de R_a en fonction de la grosseur des grains.

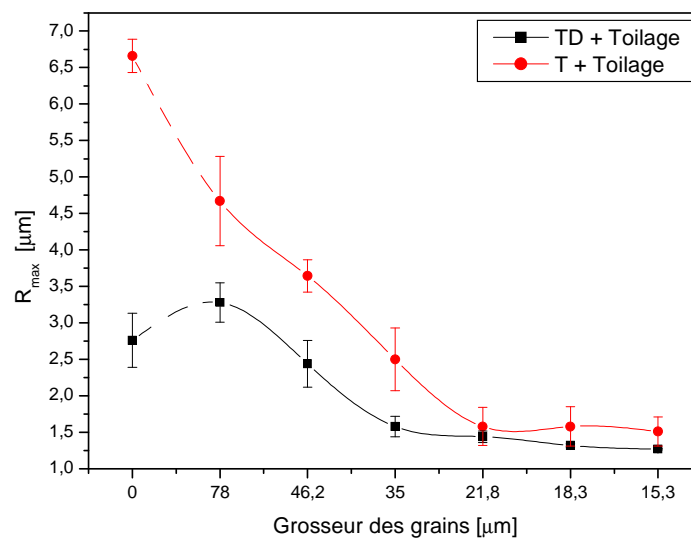


Figure V.20 : Variation de R_{max} en fonction de la grosseur des grains.

Les courbes de la figure V.19 et V.20 montrent que la rugosité (R_a et R_{max}) diminue rapidement puis progressivement avec la diminution de la grosseur des grains, cela peut être

explique par, les gros grains enlève les défauts macro-géométriques et préparé la surface pour les grains fins qui enlever les défauts micro-géométriques et pour ça on remarque toujours une diminution de la rugosité.

V.5. Variation de l'état de l'abrasif :

Les caractéristiques fondamentales des outils abrasifs sont déterminées en fonction de leur efficacité d'usinage, donc leur capacité de générer des surfaces de haute qualité et de posséder une durée de vie élevée. Dans notre cas il est important de connaître le comportement des grains abrasifs après les différentes étapes de toilage des surfaces, puisque les grains abrasifs sont considérés comme des micro-outils capables d'enlever des micro-copeaux de la surface à finir. Les figures V.21 et V.22 montrent l'évolution respective de la structure des grains d'abrasif après nettoyage en fonction de la durée de toilage t_{toilage} et de la grosseur des grains à sec (sans lubrification).

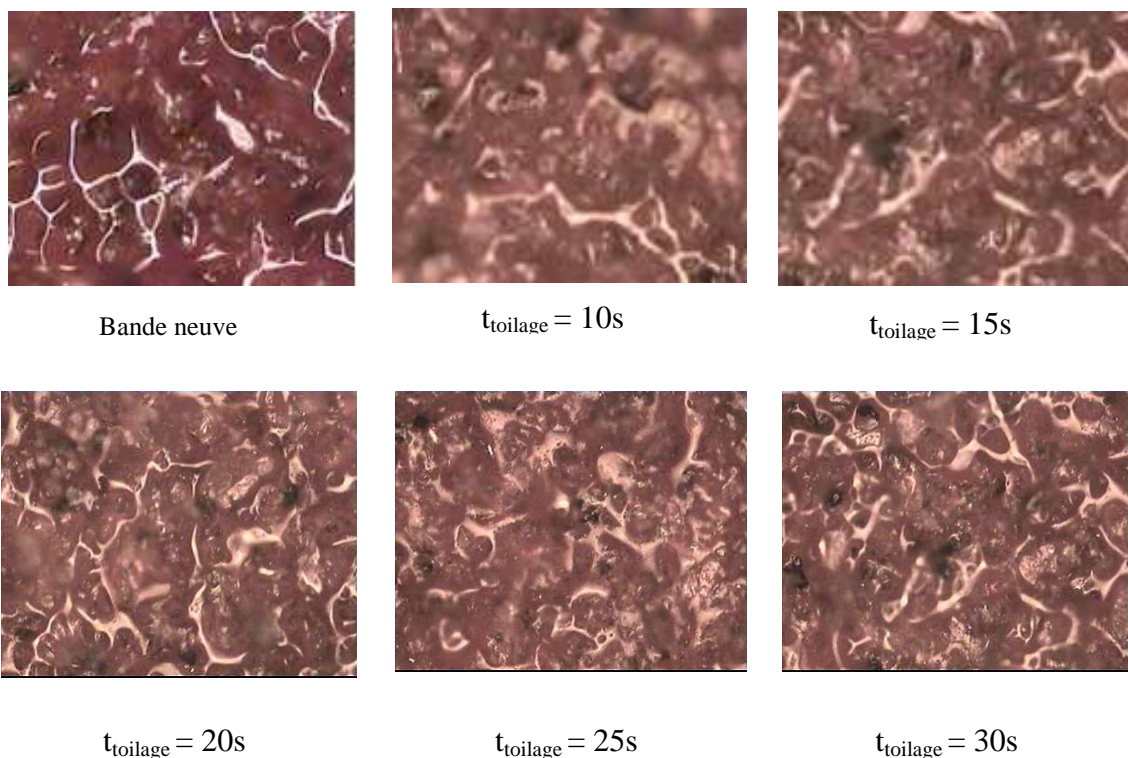
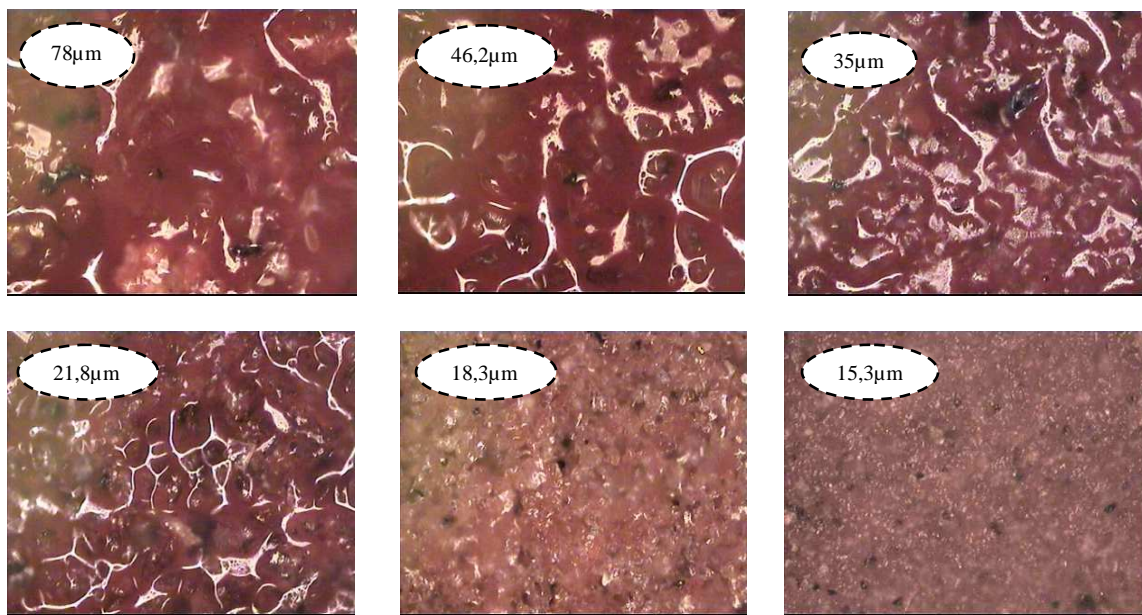
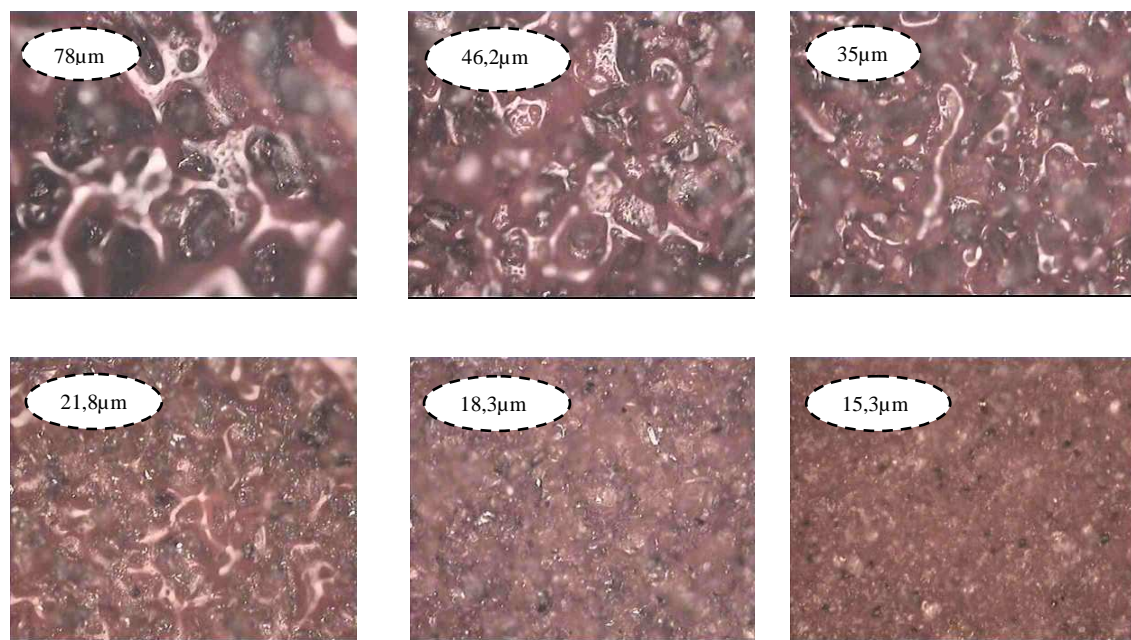


Figure V.21 : Morphologie évolutive des grains d'abrasifs en fonction de la durée de toilage t_{toilage} sans lubrification (bande abrasive : $21,8 \mu\text{m}$, $N = 800 \text{ tr/min}$).



A) Avant toilage.



B) Après toilage sans lubrification.

Figure V.22 : Morphologie évolutive des grains d'abrasifs en fonction de ce gosseur avant et après toilage ($N = 800$ tr/min, $t_{\text{toilage}} = 15$ s).

Les formes micrographiques, reportées aux figures V.21 et V.22, ont été réalisées au microscope AXIOVERT 40 MAT, par visée par rapport à la surface de la bande abrasive. La

bande neuve porte des grains d'abrasif de taille moyenne $21,8 \mu\text{m}$, qui présentent à la surface leur meilleure aptitude à la coupe. 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 V.21), le pouvoir de coupe diminue (l'angularité chute par rapport à début). Donc après $t_{\text{toilage}} = 15$ secondes, les arêtes tranchantes des grains abrasifs s'émousent et la hauteur active des grains diminue rapidement au dessus de la résine. De plus, les micro-copeaux s'agglomèrent en amas entre les grains abrasifs et ne permettent plus d'accélérée l'action de coupe. Le mécanisme d'usure des grains peut être expliqué de la manière suivante : les grains ont d'abord usé leurs arêtes vives, puis ils se sont fragmentés par rupture fragile et enfin les fragments encore incrustés dans la matrice liante.

V.6. Conclusion :

Cette étude a permis de montrer l'effet des paramètres de coupe sur la topographie des surfaces toilées. Le toilage d'un acier 100C6 (trempé et non trempé) permet d'améliorer l'état de surface généré par le tournage ou tournage dur ; $R_a \sim 0,4 \mu\text{m}$ jusqu'à $\sim 0,1 \mu\text{m}$ pour l'acier trempé, et $\sim 0,8 \mu\text{m}$ jusqu'à $\sim 0,3 \mu\text{m}$ pour l'acier 100C6 non trempé ; $R_{\text{max}} \sim 2 \mu\text{m}$ jusqu'à $\sim 0,6 \mu\text{m}$ pour l'acier trempé, et $\sim 6 \mu\text{m}$ jusqu'à $\sim 1 \mu\text{m}$ pour l'acier 100C6 non trempé.

L'influence du temps de toilage sur la finition de surface fait apparaître deux régimes :

- Un régime primaire de toilage, qualifié de transitoire, où la super finition de courte durée implique plutôt une prédominance de coupe.
- Le prolongement du toilage jusqu'à un régime établi, régime secondaire, qui conduit à la prédominance de la composante de frottement.

L'augmentation de la vitesse de rotation de la pièce est un effet positif sur l'amélioration de l'état de surface de l'acier 100C6 trempé et à partir de 355 tr/min cette vitesse presque n'influe pas beaucoup sur la rugosité.

Par rapport au temps, la lubrification n'a pas une grande influence, mais avec la vitesse de rotation de la pièce elle a une influence remarquable, peut être on n'a pas utilisé la bonne lubrification ou le débit est grand et donc, peut être, en utilisant une lubrification goutte à goutte, on aurait de meilleurs résultats.

La bande abrasive de grosseur moyenne 21,8 μm donne un meilleur état de surface avec et sans lubrification.

Malgré le coût de l'opération, le toilage par les grains abrasifs successivement sur l'acier trempé donne une rugosité $\sim 0,09 \mu\text{m}$ et le toilage directement par une seule bande abrasive de grosseur moyenne 21,8 μm donne une rugosité $\sim 0,1 \mu\text{m}$.

Les valeurs de la rugosité obtenues en tournage dur ont tendance à être plus faibles qu'en tournage classique. En fait, d'après les résultats trouvés, on note que la rugosité diminue lorsque la dureté du matériau augmente.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis de présenter le procédé de toilage en général et d'étudier l'effet de paramètres de coupe sur la topographie des surfaces toilées d'un acier 100C6 trempé et non trempé. Les résultats obtenus dans ce travail ont permis de conclure les points suivants :

- Les paramètres de toilage tel que le temps de toilage, la vitesse de rotation de la pièce, la grosseur des grains de la bande abrasive, ont une influence très importante sur l'état de surface des pièces.
- Le toilage est une solution intéressante pour corriger les défauts laissés par le tournage dur. Nos résultats montrent que le toilage supprime ou diminue les refoulements de matière laissé par le tournage dur et stabilise la rugosité des surfaces.
- La lubrification dans le procédé de toilage par l'huile Tasfalout 22^M diluée à 1/10 donne un mauvais état de surface par rapport au toilage à sec.
- La durée de vie des bandes abrasives chute fortement avec l'augmentation de temps d'utilisation car elles sont fabriquées par une seule couche des grains abrasifs et l'usure rapide des grains soit par arrondissement des arêtes coupantes soit par fracture ou par détachement.
- La technique de toilage répond aux conditions imposées par la super finition des pièces mécaniques et par conséquent elle peut être employée, avec succès, dans l'industrie. Comparativement avec la rectification, la technique de toilage présente un grand nombre d'avantage dont le plus important réside dans sa capacité de finir des surfaces de haute qualité en un temps très court et sans lubrification (protéger l'environnement).

En perspectives ; nous pouvons proposer les points :

- ✚ Amélioration de ce dispositif pour régler la pression, la fréquence d'oscillation et la vitesse de rotation de la bande abrasive.
- ✚ Développement et amélioration des bandes abrasives.
- ✚ Etude la possibilité de l'application de cette technique à la super finition des céramiques et des verres optiques.
- ✚ Faire la technique d'analyse in-situ en coupe (mesures de la température et des efforts de coupe).
- ✚ Modélisation et simulation de ce procédé de la super finition.

Bibliographie

- [Abe88] M. Abebe, F. C. Appl: Theoretical analysis of the basic mechanics of abrasive processes: Part I: General model. *Wear*, Vol 126, Issue 3, 1988, pp.251-266.
- [Ali07] T. Aliouane : Etude du comportement des polissoirs en polyuréthane durant le polissage du verre optique. Thèse de doctorat, D.O.M.P, Sétif, Algérie, 2006.
- [Bar03] A. Barbacki, M. Kawalec, A. Hamrol: Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 133, 2003, pp21-25.
- [Bar05] M. Barge : Etude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, N° d'ordre : 2005-17, 2005.
- [Bar08] M. Barge, J. Rech, H. Hamdi, J. M. Bergheau: Experimental study of abrasive process. *Wear* 264 (2008), pp382–388.
- [Bel94] A. Belassel : Etude de la distribution des contraintes d'ordre I et II par diffraction des rayons X dans un acier perlitique. Thèse de doctorat, Mécanique et matériaux, ENSAM, N° d'ordre : 1994-01(1994).
- [Bel97] N. Belkhir : Elaboration et caractérisation des pastilles a base d'oxyde de cérium utilisées en polissage du verre optique. Thèse de magistère, D.O.M.P, Sétif, 1997.
- [Bel08] N. Belkhir : Contribution à l'amélioration des propriétés optiques et mécaniques des surfaces doucies et polies. Thèse de doctorat, D.O.M.P, Sétif, Algérie, 2008.
- [Ben05] K. Bensalem : Caractérisation des défauts de surface et de subsurface du verre optique doucie. Mémoire de l'ingénieur, D.O.M.P, Sétif, Algérie, 2005.
- [Ben07a] 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.
- [Ben07b] M. Ben Tkaya, H. Zahouani, S. Mezlini, Ph. Kapsa, M. Zidi, A. Dogui : The effect of damage in the numerical simulation of a scratch test, *Wear* 263 (2007), pp.1533–1539.
- [Big09] M. Bigerelle, A. Gautier, B. Hagege, D. Favergeon, B. Bounichane, : Roughness characteristic length scales of belt finished surface. *Journal Of Materials Processing Technology*, 2009.
- [Bou01] D. Bouzid : Contribution à l'élaboration et à la caractérisation des outils à abrasifs agglomérés utilisés pour le polissage du verre optique. Thèse de doctorat, D.O.M.P, Sétif, Algérie, 2001.
- [Bri06] E. Brinksmeier and al: Finishing of structured surfaces by abrasive polishing. *Precision Engineering*, Vol. 30, 2006, pp.325-336.
- [Car05] A.L. Carrano, J.B. Taylor : Geometric modelling of engineered abrasive processes, *Journal of Manufacturing processes* 7 (2005), pp.17-27.
- [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.
- [Cha00] S.H. Chang, T.N. Farris, S. Chandrasekar: Contact mechanics of superfinishing. *Transactions of the ASME*, Vol.122, 2000, pp.388–393.
- [Cho05] Y. K. Chou, H. Song: Thermal modelling for white layer predictions in finish hard turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 45, 2005, pp.481-495.
- [Com98] A. Comet, J. P. Deville: *Physique et ingénierie des surfaces*. EDP, France, 1998.
- [Die06] M. Dieye: *Comportement dynamique du système pièce/outil/machine (POM) en*

rectification plane passe profonde. Ecole doctorale de L'ENSAM (ED-432), Metz, N° d'ordre: - 2002, 2006.

- [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.
- [Eva04] C. J. Evans, E. Paul, D. Dornfeld, D. A. Lucca, G. Byrne, M. Tricard, F. Klocke, O. Dambon, B.A. Mullany : Material removal mechanisms in lapping and polishing. PartII, *Ann, CIRP52(2)*, 2004.
- [Fan05] L. Fang, Q. Cen, K. Sun, W. Liu, X. Zhang, Z. Huang: FEM computation of groove ridge and Monte Carlo simulation in two-body abrasive wear. *Wear* 258 (2005), pp.265–274.
- [Fel09] E. Felder : Usinage par abrasion-Analyses expérimentale et théorique. CEMEF, ParisTech, [BM7053], Avril 2009.
- [Gah99] R. Gahlin. S. Jacobson: The Particle Size Effect in Abrasion Studied by Controlled Abrasive Surfaces, *Wear* 224 (1999), pp.118-125.
- [Ghi05] P. Ghidossi, M. El Mansori, E. Sura, R. Geoffroy, S. Deblaise : Procédé de superfinition par toilage : analyse énergétique des variables " process " –temps de cycle et fréquence d'oscillation. 4th International Conference on Integrated Design and Production, Casablanca, Morocco, 9-11 November 2005.
- [Grz08a] 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.
- [Grz08b] W. Grzesik : Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. *Wear* 265 (2008b), pp.327-335.
- [Gui98] A. Guimier : Métallographie et techniques d'analyse. Édition PYC, Paris, 1998.
- [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.
- [Ham03] H. Hamdi, M. Dursapt, H. Zahouani: Characterization of abrasive grain's behaviour and wear mechanisms, *Wear* 254 (2003), pp.1294–1298.
- [Hou03] Z. B. Hou, R. Komanduri: On the mechanics of the grinding process – Part I. Stochastic nature of the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003), pp.1579–1593.
- [Ina96] I. Inasaki: Grinding process simulation based on the wheel topography measurement. *Annals of the CIRP*, vol. 45/1/96, pp.347, 1996.
- [Jac99] S.D. Jacobs, S.R. Arrasmith, I.A. Kozhinova, L.L. Gregg, A.B. Shorey, H.J. Romanofsky, D. Golini, W.I. Kordonski, P. Dumas, and S. Hogan, MRF: Computer-Controlled Optics Manufacturing. *The American Ceramic Society Bulletin*, 1999.
- [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.
- [Kar04] H. H. Karow: *Fabrication Methods for Precision Optics*. Wiley-interscience ISBN0-471-70379-6 USA, 2004.
- [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.

- [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 (2007), pp.81–87.
- [Khe07b] A. Khellouki, J. Rech, H. Zahouani: Influence of the belt finishing process on the surface texture obtained after hard turning. *J. Eng. Manuf.* 221 (7), 2007a, pp.1129 –1137.
- [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.
- [Kla06] H. Klaasen, J. Kubarsepp, V. Vainola: Abrasive wear and mechanical properties of carbide composites. *ISSN 1392–1320 MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*. Vol. 12, No. 1. 2006.
- [Klo05] F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert : Capability profile of hard cutting and grinding processes. *CIRP Annals* 54 (2005).
- [Kra80] S. F. KRAR, W. OSWALD, J. E. ST-AMAND: *L'ajustage mécanique*. Deuxième édition, Canada, 1980.
- [Kum10] S. Kumar, V. Balasubramanian: Effect of reinforcement size and volume fraction on the abrasive wear behavior of AA7075Al/SiCp P/M composites-A statistical analysis. *Tribology International* 43 (2010), pp.414-422.
- [Lim05] J.G. Lima, R.F. Ávila, M. Faustino, J.P. Davim : Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005), pp.388-395.
- [Mar00] J.P. Marioge : *Surface optique: Méthodes de fabrication et de contrôle, recherches*. Edition EDP Sciences France, 2000, pp.26-33.
- [Mez05] S. Mezghani : *Approches multi-échelles de caractérisation tridimensionnelle des surfaces – Applications aux procédés d'usinage –*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, N° d'ordre : 2005-11, 2005.
- [Mez08] S. Mezghani, M. El Mansori: Abrasiveness properties assessment of coated abrasives for precision belt grinding. *Surface & Coatings Technology* 203 (2008), pp.786/789.
- [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 (2009), 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 (2009), pp.86-91.
- [Mis81a] A. Misra, I. Finnie: Some observations on two-body abrasive wear. *Wear*, Volume 68, Issue 1, 1981, pp41-56.
- [Mis81b] A. Misra, I. Finnie: Correlations between two-body and three-body abrasion and erosion of metals. *Wear*. Vol. 68, no. 1, 1981, pp. 33-39.
- [Nop09] J. M. Noppe : *Usinage par abrasion*. Encyclopaedia universalis, France, 2009.
- [Pet03] G. Petitet : *Contribution à la compréhension des mécanismes élémentaires d'usure douce des élastomères charges réticules*. Thèse de doctorat, école centrale de Lyon, N° d'ordre : ECL 2003-07,
- [Pou99] G. Poulachon : *Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage des aciers durcis*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Cluny France, 1999.
- [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.
- [Rec09] J. Rech : Superfinition des pièces par toilage et pierrage. ENISE, LTDS, 21-22 octobre 2009, Cluses.
- [Rem01] M. Remadna : Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempe 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.
- [Rem02] G. Rémond et al: Implications of Polishing Techniques in Quantitative X-Ray Microanalysis. J.Res.Nat.Inst.Stand. Technol.107, (2002), pp.639-662.
- [Rup72] W. I. Rupp: Loose abrasive grinding of optical surface. Appl. Opt, p 2797, 1972.
- [Sal89] E. Saljé, W. Hörsemann, M. Klyk : Grinding of cylindrical blanks with controlled workspeed, CIRP Annals, Vol. 38/1/89, pp.303-306, 1989.
- [Sch01] D.M. Schibish, U. Friedrich : Technologie de superfinition : des surfaces de haute précision. Verlag Modern Industrie, SUPFINA Griebshaber, 2001.
- [Sch02] D.M. Schibish, U. Friedrich : Technologie de superfinition: Des surfaces de haute Précision, Verlag Moderne Industrie, Supfina Grieshaber, 2002.
- [Sha84] M. C. Shaw, A. Vyas: Heat affected zones in grinding steel. Annals of the CIRP, 43/1, 1984, pp.279-282.
- [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.
- [Tho84] Y. Thore: Etude théorique et expérimentale du frottement et de l'usure par abrasion des matrices en forgeage à chaud des aciers. Influence d'une nitruration. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1984.
- [Ton80] H. K. Tonshoff, E. Brinksmeier: Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhardness and residual stresses analysis, Annals of the CIRP, Vol29/2, 1980, pp.519-530.
- [Tre99] R. I. Trezona, D. N. Allsopp, I. M. Hutchings: Transition between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. Wear 225-229 (1999), pp.205-214.
- [www1] www.microtechnica.free.fr/superfin.htm
- [www2] www.supfina.com
- [www3] www.centre des grains abrasives.com
- [www4] www.les bandes abrasives.com
- [Zah07] H. Zahouani: Identification Multi-Echelles par Ondelettes Continues de la Signature des Etats de Surface. Workshop Rugosité - Poitiers - 11 Octobre 2007.

Abstract :

The precise machining of the functional surfaces of mechanical workpiece, i.e obtaining parts without any defect on the geometrical level, only by the means of the processes of pre-machining (turning and grinding) requires a considerable techno-economic effort. These processes are followed by developed processes of abrasion, which are called superfinish, such as grinding, honing, the belt finishing... the objective is to reduce and remove the imperfections of the workpiece surfaces and structures due to the processes of pre-machining. The belt finishing is an alternative of these advanced processes to improve the surface. It is characterized by a low temperature. It is a very recent process of completion. Thus, the mechanisms of this operation and its influence on the surfaces and its functionality is still ambiguous. These advantages attract the manufacturers more and more. The belt finishing of complicated forms start to replace other processing like grinding. This project makes it possible to locate the performances of the belt finishing compared to the other conventional processes like turning, milling,...etc. Because it keeps the surface quality in a stable and well improved state whatever the surface quality resulting from the conventional processes.

Keywords: Process of belt finishing, roughness, integrity of the surface, superfinish.

المخلص:

التصنيع الدقيق لسطوح قطع ميكانيكية العملية, وهذا يعني الحصول على أجزاء من دون خطأ في الهندسة, إلا من خلال عمليات ما قبل التصنيع (الخراطة و التجليخ) تتطلب جهدا كبيرا تقنيا و اقتصاديا. و تتبع هذه عمليات بعمليات متطورة لتأكل, ما يسمى ما فوق التحسين مثل: تجليخ, شحذ, تصنيع بالحزام...و الهدف هو تخفيض و إزالة عيوب سطح القطع و بنيتها المشكلة بسبب عمليات ما قبل التصنيع. التصنيع بالحزام هو بديل هذه العمليات المتقدمة لتحسين السطح, إذ تتميز بحرارة منخفضة. إنها عملية تحسين جديدة جدا, ذلك أن آليات عمل هذه العملية و تأثيرها على سطح و عمل القطع لا تزال غامضة. هذه الفوائد تهم أكثر فأكثر الصناعيين, تصنيع بالحزام للأشكال المعقدة بدأت تحل محل عمليات أخرى مثل التجليخ. و يوفر هذا العمل مقارنة بين تصنيع بالحزام و العمليات التقليدية مثل: الخراطة, التفريز... إلخ. لأنه يجعل السطح أكثر استقرارا و تحسينا بغض النظر عن سطح المحضر عن طريق الطرق التقليدية.

مفاتيح البحث: عملية التصنيع بالحزام, خشونة, بنية السطح, ما فوق التحسين.