



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de *MAGISTER* Année 2010

**Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs
répercussions sur un contact mécanique**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : PRODUCTIQUE

Par

Bourebria Mounira

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Lakhdar LAOUAR M.C Université d'Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :	Ammar	HAIHAEM	Prof.	Université d'Annaba
EXAMINATEURS :	Hamid	HAMADACHE	M.C	Université d'Annaba
	Slimane	MEKHILEF	M.C	Université d'Annaba
	Abdelaziz	BOUCHELAGHEM	M.C	Université d'Annaba

Remerciements

Je tiens à remercier le professeur A.Haiahem directeur du laboratoire de mécanique industriels et de lui adresser toute l'expression de ma reconnaissance pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, et de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je tiens à remercier en tout premier lieu le docteur L.Laouar qui a dirigé se mémoire dans la continuité de mes études. Tout au long de cette année, il a su orienter mes recherches, tout en tirant partie de ma formation d'ingénieur. Il a toujours été disponible pour d'intenses et rationnelles discussions. Pour tout cela, sa confiance et son soutien en fin de travail, je le remercie vivement.

Je suis très sensible et honoré de la présence dans ce jury de monsieur A.Bouchelaghem maître de conférence au département de génie mécanique et responsable de la formation magistère option mécanique productique.

Je remercie tout particulièrement monsieur S.Mekhilef, maître de conférences au département de génie mécanique, d'avoir bien voulu prendre part au jury.

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur H.Hamadache, maître de conférences au département de génie mécanique, qui a accepté de juger ce travail et d'être le rapporteur.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à monsieur K.Bey chef de département de génie mécanique pour toute l'aide qu'il m'a apportée.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à tous le personnel technique et administratif du département de génie mécanique pour leur assistance pendant toute la durée des essais.

Mes remerciements s'adressent à tous les enseignants du laboratoire de mécanique industriels, et collègues pour leurs encouragements.

Enfin mes remerciements vont à mon mari, mes trois enfants, ma famille et ma belle famille pour leurs soutiens durant cette formation.

Résumé

L'élaboration de ce mémoire comprend une recherche bibliographique relative, à l'état de surface, ces défauts, aux paramètres de rugosité, ainsi que l'influence de cette dernière sur le comportement des surfaces en contact, et la relation entre procédés d'usinage et qualité de surface usinée.

Une partie expérimentale mettant en place des essais utilisant trois procédés de fabrication : tournage, rectification, et brunissage. Dans une première phase, en suivant le modèle des plans d'expériences de Box-Behnken et une simulation au moyen d'un programme sous Matlab, le régime optimal a été déterminé et appliquée pour la préparation des surfaces de l'éprouvette d'essai. En seconde phase, ont été réalisées des traitements de surface par rectification et brunissage, des mesures de rugosité des surfaces obtenues ont été réalisées et les résultats ont été interprétés. En troisième et dernière phase, les données de rugosité des surfaces ont été numérisées et exploitées au moyen de programmes développés sous matlab7.0, afin de reconstituer les topographies des surfaces. Ensuite, un traitement des données a été effectué ayant pour but d'analyser et d'évaluer des contacts mécaniques entre surfaces.

Abstract

The development of this thesis includes a literature relative to the surface, these defects, the roughness parameters, and the influence of the latter on the behavior of the contact surfaces , and the relationship between methods of machining and quality of machined surface.

An experimental part by implementing tests using three processes: turning, grinding and burnishing. In a first phase, following the model of Box- Behnken experiments planning and simulation using a Matlab program, the optimal regime was determined and applied to the surface preparation of the test specimen. In the second stage, were performed by surface treatment and grinding browning measures surface roughness obtained were performed and the results were interpreted. Third and final phase, the surface roughness data were digitized and used by programs developed under matlab7.0 to reconstruct topographies of surfaces. Then, a data processing was performed with the aim of analyzing and evaluating the mechanical contact between surfaces.

SOMMAIRE

Liste des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction	1
Chapitre I Etude Bibliographique	
I.1 Introduction.....	3
I.2 qu'est ce que la tribologie.....	3
I.2.1 Impact de la tribologie sur la société.....	3
I.2.2 Aspect scientifique de la tribologie.....	4
I.2.3 Paramètres d'un contact frottant.....	5
I.2.4. Système tribologique.....	6
I.3 Frottements.....	7
I.3.1 Définition.....	7
I.3.2 Différents types de frottements.....	7
I.3.3 système mécanique et son comportement en service.....	8
I.4 Topographie de surface.....	9
I.4.1 Définition.....	9
I.4.2 Importance et caractérisation de la topographie de surface.....	10
I.5 Importance de l'état de surface.....	11
I.5.1 Définition.....	11
I.5.2 Rôle et fonction d'une surface.....	11
I.5.3 Différents types de surface.....	12
I.5.4 Les défauts de surface.....	14
I.5.4.1. Ordre 1: écart de forme ou de position (ligne moyenne).....	15
I.5.4.2 Ordre 2: Ondulations périodiques.....	16
I.5.4.3 Ordre 3: stries sillons.....	16
I.5.4.4 Ordre 4: Arrachement de matière.....	17
I.5.5 Différents types de lignes.....	17
I.5.5.1 Longueur de base, d'évaluation.....	17
I.5.5.2 Lignes de référence.....	18
I.6. La rugosité.....	19

I.6.1.Définition.....	19
I.6.2. Principaux paramètres de rugosité.....	20
I.6.2.1 Paramètres liés aux motifs et à la ligne envelope.....	20
I.6.2.2 Paramètres liés à la ligne moyenne.....	21
I.6.2.3 Paramètres liés à la distribution d'amplitude.....	22
I.6.3 Mesure de la rugosité.....	23
I.6.4 Introduction des paramètres de rugosité dans l'étude de la lubrification.....	24
I.7 Procédé d'usinage et qualité de surface.....	26
I.7.1 Introduction.....	26
I.7.2 Procédés par coupe.....	28
I.7.2.1 Tournage.....	28
I.7.2.2 Matériaux utilisés pour les outils.....	28
I.7.2.3 Type de tournage et outils correspondants.....	29
I.7.3 Procédés par abrasion.....	30
I.7.3.1 Rectification.....	30
I.7.3.2 Les différents types de rectification.....	30
I.7.3.3 Matériaux.....	30
I.7.3.4 Différents types de meules.....	31
I.7.3.4 Abrasifs.....	31
I.7.3.4 Avantages de la rectification.....	32
I.7.4 Procédés par déformation plastique.....	32
I.7.5 Traitement Mécanique de Surface.....	33
I.7.5.1 Galetage.....	34
- Différents types de galetage.....	35
-.Influence du galetage sur la rugosité.....	35
-Avantages du galetage.....	36
I.7.5.2 Brunissage.....	36
- Principe de brunissage.....	36
- Avantages du brunissage.....	37
- Inconvénients du brunissage.....	37
I.8 Conclusion.....	38

Chapitre II Matériels et techniques expérimentales

II.1 Introduction.....	39
II.2 Les essais préliminaires.....	39
II.2.1 Matériaux.....	39
II.2.1.1 Composition chimique et microstructure.....	40
II.2.1.2 Caractéristiques mécaniques.....	40
II.2.2 Machine outil.....	41
II.2.3 Outil.....	41
II.2.4 Régime de coupe.....	42
II.2.5 Méthodologie d'essai.....	42
II.2.5.1 Méthodes des plans d'expérience.....	42
II.2.5.2 Préparation de la pièce.....	44
II.2-6 Rigidité du système.....	44
II.2.7 Mesure de rugosité.....	45
II.2.8 Traitement par plans de Box Behnken et simulation.....	47
II.2.9 Interprétation des résultants.....	51
II.3 Préparation de l'éprouvette d'essai.....	52
II.3.1 Traitement par rectification.....	53
II.3.2 brunissage à la bille en diamant	53
II.3.3 Procédure de mesure des rugosités.....	55
II.3.3.1 Méthodologie de mesure.....	55
II.3.3.2 Appareil de mesure.....	55
II.3.3.3 Profils obtenus par les différents procédés de traitement.....	56
• Procédé de tournage.....	56
• Procédé de rectification.....	58
• Procédé de brunissage.....	60
II.3.3.4 aspect macroscopique des surfaces usinées.....	63
II.4 Conclusion.....	64

Chapitre III Traitement informatique des données

III.1 Introduction.....	65
III .2 Programme réalisant les surfaces en 3D.....	65
III.2.1 Présentation des données	65
III.2.2 Organigramme.....	68

III.2.3 Algorithme.....	69
III.2.4 Représentations graphiques des surfaces en 3D.....	70
III.2.4.1 Surface traitée par tournage.....	70
III.2.4.2 Surface traitée par rectification.....	71
III.2.4.3 Surface traitée par brunissage.....	72
III.2.4.4 Surfaces superposés.....	73
III.2.4.5 Résultats et interprétation.....	74
III .3 Programme d'analyse et d'estimation des paramètres de contact entre surfaces.....	74
III.3.1 Sous programme 1- contact entre surfaces.....	74
III.3.1.1 Organigramme.....	76
III.3.1.2 Algorithme.....	77
III.3.1.3 Simulation du contact.....	79
III.3.1.4 Résultats et interprétation	82
III.3.2 Sous programme 2–rugosités dans un contact lubrifié.....	83
III.3.2.1 Introduction.....	83
III.3.2.2 Procédure de calcul.....	85
III.3.2.3 Organigramme.....	86
III.3.2.4 Algorithme.....	87
III.3.2.5 Résultats et interprétation	88
III.4 Conclusion.....	89
Conclusion générale et perspectives.....	90
Références bibliographiques.....	92
Annexes1 : Procédés de fabrication et rugosité de surfaces réalisées	95
Annexes2: Représentation de la 95 ^{ème} percentiles pour la distribution F.....	96
Annexes3: Caractéristiques des rugosimètres sj-201et SJ-301.....	97
Annexes4: présentation des programmes réalisés.....	98

Liste des figures

- Figure I.1 Les éléments d'un contact mécanique
- Figure I.2 Schéma générale de la tribologie
- Figure I. 3 Différents types de frottement
- Figure I.4 Contact dans un palier
- Figure I.5 Topographie correspondant à quelques modes de finition des surfaces
- Figure I.6 Topographie de surface
- Figure I.7 Représentation de la surface de référence
- Figure I.8 Surface spécifiée et surface associée
- Figure I.9 Surface réelle
- Figure I.10 Défauts d'ordre 1
- Figure I.11 Défauts d'ordre 2
- Figure I.12 Défauts d'ordre 3
- Figure I.13 Défauts d'ordre 4
- Figure I.14 Longueurs d'évaluation et de base
- Figure I.15 Ligne des moindres carrées
- Figure I.16 Lignes enveloppes inférieur et supérieur
- Figure I.17 Paramètres d'ondulation
- Figure I.18 Paramètres liés aux motifs
- Figure I.19 Paramètres liés à la longueur de base
- Figure I.20 Paramètres liés à la longueur d'évaluation
- Figure I.21 Paramètres liés à la distribution d'amplitude
- Figure I.22 Rugosité anisotrope
- Figure I.23 a) Réducteur b) Moteur c) Coussinets d) Coussinets quadrillés
- Figure I.24 Tournage avec outil à arête unique
- Figure I.25 a) Plaquette pour tournage b) dur Outil de tournage dur
- Figure I.26 Porte-outils spéciaux
- Figure I.27 Types de meules
- Figure I.28 Différents types de grains
- Figure I.29 a) Pièces réalisées par forgeage b) Pièces réalisées par estampage
- Figure I.30 Effet de galetage sur la surface
- Figure I.31 Outils à galetés

Figure I.32 Principe du galetage

Figure I.33 Principe de brunissage

Figure II.1 La microstructure du XC48

Figure II.2 Tour universel SN40

Figure II.3 Outil à plaquette en carbure métallique P20

Figure II.4 Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai

Figure II.5 Montage et préparation de la pièce

Figure II.6 Préparation de la pièce sur tour

Figure II.7 Mesure de la rugosité

Figure II.8 influence des paramètres des régimes de coupe sur la rugosité

Figure II.9 Organigramme fonctionnel

Figure II.10 Traitement informatique des données

Figure II.11 Courbes d'isoréponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et la profondeur de coupe "a" au niveau de la fréquence de rotation N710 trs /min

Figure II.12 Courbes d'isoréponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et la profondeur de coupe "a" au niveau de la fréquence de rotation N1000 trs /min

Figure II.13 Courbes d'isoréponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et la profondeur de coupe "a" au niveau de la fréquence de rotation N1000 trs /min

Figure II.14 Montage et préparation de l'éprouvette d'essais

Figure II.15 Brunissoir en diamant

Figure II.16 Montage et traitement par brunissoir

Figure II.17 Eprouvette traitée par différents procédés

Figure II.18 Génératrices de mesure de rugosité

Figure II.19 Surf test sj-301

Figure II.20 Profils des rugosités pour le tournage entre 0°- 135°

Figure II.21 Profils des rugosités pour le tournage entre 180°- 315°

Figure II.22 Profils des rugosités pour la rectification entre 0°- 135°

Figure II.23 Profils des rugosités pour la rectification entre 180°- 315°

Figure II.24 Profils des rugosités pour le brunissage entre 0°- 135°

Figure II.25 Profils des rugosités pour le brunissage entre 180°- 315°

Figure II.26 Variation des rugosités lors des différents traitements

Figure II.27 Microscope métallographique

Figure II.28 Aspect macroscopique des surfaces, X130

Figure III.1 Schéma de mesure des rugosités

Figure III.2 Les étapes du programme réalisant la surface en3D

Figure III.3 Algorithme réalisant la surface en3D

Figure III.4 Représentation topographique de la surface réalisée par le procédé de tournage

Figure III.5 Représentation topographique de la surface réalisée par le procédé de rectification

Figure III.6 Représentation topographique de la surface réalisée par le procédé de brunissage

Figure III.7 Comparaison d'aspect de surfaces réalisées par les différents procédés.

Figure III.8 Schémas de contact entre surfaces

Figure III.9 Etapes de calcul du nombre de points de contact

Figure III.10 Algorithme calculant le % de contact

Figure III.11 Evaluation du contact $surft / surfr$

Figure III.12 Evaluation du contact $surft / surfb$

Figure III.13 Evaluation du contact $surfr / surfb$

Figure III. 14 profils des surfaces superposés

Figure III.15 Etapes du déroulement du calcul du rapport $\frac{h}{\sigma}$

Figure III.16 Algorithme de calcul du rapport $\frac{h}{\sigma}$

Liste des tableaux

Tableau I.1: Impacts de la tribologie sur la société

Tableau I.2 : les défauts macroscopiques et microscopiques

Tableau II.1: les éléments chimique du XC48

Tableau II.2: Caractéristiques mécaniques

Tableau II.3: Les Caractéristiques de la machine outil

Tableau II.4: Les caractéristiques géométriques

Tableau II.5: matrice des essais

Tableau II.6: Matrice d'expérience

Tableau II.7: les valeurs de Ra correspondantes aux régimes

Tableau II.8: les valeurs mesurées de Ra

Tableau II.9: Valeurs de Ra, Ry, Rz, et Rq lors du tournage, rectification et brunissage

Tableau III.1: résultats de calcul des points de contact du %de contact

Liste des symboles

h : L'épaisseur locale du film

h_0 : l'épaisseur nominale du film

δ_1, δ_2 : amplitudes des rugosités des deux surfaces mesurées par rapport à un niveau moyen

p : La pression moyenne

U_1 et U_2 : Les vitesses des parois des surfaces (1) et (2) suivant la direction x

η : Viscosité du lubrifiant

ϕ_x, ϕ_y : Facteurs correcteurs au débit de poiseuille.

ϕ_s : Facteur correcteur au débit de couette

σ^2 : Variance combinée des amplitudes de rugosité des deux surfaces

σ^2_1 : Variance des amplitudes de rugosité de la surface (1)

σ^2_2 : Variance des amplitudes de rugosité de la surface (2)

A : Allongement du matériau

$R_{0,2}$: Résistance à la rupture

h : Hauteur de l'outil

b : Largeur de l'outil

l : Longueur de l'outil

α : Angle de dépouille

β : Angle de taillant

γ : Angle de coupe

a : Profondeur de passe

f : Avance sur le rayon

N : Fréquence de rotation

L : Longueur de la pièce

D : Diamètre de la pièce

R_a : c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts

MT : matrice des valeurs de rugosité de la surface traitée par tournage

MR : matrice des valeurs de rugosité de la surface traitée par rectification

MB : matrice des valeurs de rugosité de la surface traitée par brunissage

X : Longueur de mesure (génératrice)

Y : La ligne directrice

Surft : surface traitée par tournage

Surfr : surface traitée par rectification

Surfb : surface traitée par brunissage

$z=1 : 3$

1= surft / surfr

2= surft / surfb

3= surfr / surfb

p_{cr} (1, 2, 3) : nombre de point de contact réel (sans élimination des pics)

P_c (1, 2, 3) : nombre de points de contact après élimination des pics

P_{ct}(1, 2, 3) : nombre de points de contact total

P_{err} (1, 2, 3) : % réel de contact

P_{er} (1, 2, 3) : % de contact après élimination des pics

Diff : matrice de différence entre les deux surfaces en contact

Per : % total de contact (surfr, surfb et surfb)

A : point minimum de la matrice diff (i, j), indice de 1 à 3

B : point maximum de la matrice diff (i, j) , indice de 1 à 3

R_{yT}(i, j) : matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par tournage

R_{yB} (i, j) : matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par brunissage

R_{yR} (i, j) : matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par rectification

ET : écart type des amplitudes de rugosité de la matrice R_{yT} (surface traitée par tournage).

ER : écart type des amplitudes de rugosité représentées par la matrice R_{yR} (surface traité par rectification).

EB : écart type des valeurs des amplitudes de rugosité représenté par la matrice R_{yB} (surface traitée par brunissage).

Introduction

Le monde de la conception et de la fabrication mécanique est très vaste, en commençant par la plus petite pièce utilisée par un chirurgien dentiste à la plus grande pièce d'un navire ou navette spatiale. Tout système mécanique est composé d'un ensemble de pièces liées entre elles, et en mouvement les unes par rapport aux autres, sont soumises aux frottements, ce qui nécessite la lubrification des surfaces en contact pour éviter l'usure rapide. Pour la réalisation des surfaces des pièces, il existe plusieurs procédés d'usinage, ainsi qu'un nombre important d'opérations de finition et de traitement mécanique. En général, tous les procédés de fabrication mécanique ont pour objectif l'amélioration des caractéristiques mécaniques, et géométriques des surfaces, afin qu'elles répondent aux exigences techniques et aux conditions de fonctionnement. Toutes les surfaces ne sont pas parfaitement lisses, elles portent toujours les marques de mouvement de l'outil, ou des vibrations de la machine outil lors de la fabrication, ce qui engendre des défauts sur la surface en l'occurrence la rugosité. L'étude de l'influence de cette dernière, ainsi que la lubrification du contact peut contribuer à augmenter les performances et la durée de vie des mécanismes [1]. En effet, l'amélioration des propriétés géométriques des zones superficielles des pièces est un moyen permettant d'augmenter leurs durées de vie, et de prévenir certains effets néfastes tels que la corrosion et l'usure. Cependant, le bon fonctionnement des pièces dépend largement de la qualité de leurs usinage, donc de la rugosité des surfaces réalisées, ainsi le problème réside dans le choix du procédé le mieux adapté et le plus efficace à long terme, d'où l'intérêt de l'étude des procédés d'élaboration des pièces, et leurs influences sur la qualité des surfaces usinées [2].

Le but de ce travail est de montrer l'importance des procédés de fabrication des surfaces de pièces mécaniques, et leurs impacts sur la rugosité de surface qui en découle, et sur le comportement d'un système mécanique.

Dans le premier chapitre, est présentée une étude bibliographique mettant en relief la qualité des surfaces et sa relation avec les procédés d'usinage, ainsi que son rôle, ses différents paramètres, ses types de défauts, et l'importance de topographie de surface. Ensuite l'étude se portera sur la rugosité, ses paramètres, son influence sur un contact mécanique.

Le deuxième chapitre comporte une partie expérimentale où des essais d'usinage des surfaces ont été envisagés, trois procédés de fabrication ont été considérés: tournage, rectification, et brunissage. L'objectif de ces essais est de montrer d'une part l'importance des procédés de

finition des surfaces vis-à-vis de la qualité obtenue, et d'autre part de mettre en valeur la rugosité des surfaces dans un contact mécanique.

Le troisième chapitre est consacré aux traitements informatiques des données, deux programmes ont été développés, les topographies des surfaces pour chaque cas d'usinage ont été élaborées, une analyse des surfaces en contact a été explicitée, et enfin un calcul du rapport $\frac{h}{\sigma}$ a été mené pour l'estimation de l'importance de la rugosité dans un contact lubrifié.

Le mémoire s'achève par des conclusions, et des perspectives.

www.oxpdf.com

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Les phénomènes de frottements affectent tout les aspects de notre vie soit de manière positive ou négative et plus précisément ils interviennent dans la grande majorité des phénomènes physiques, ils ont des avantages tel que leurs exploitation dans le freinage, sciage, polissage, mais aussi des inconvénients comme par exemple usure, perte d'énergie, échauffement. Depuis les mesures prises par les égyptiens contre les frottements, la découverte de nouvelles techniques d'expérimentation à l'échelle atomique et celle de simulation sur ordinateur a donné des grands espoirs à la recherche pour comprendre les processus complexes intervenants dans un contact tribologique [3].

I.2 Qu'est ce que la tribologie

La tribologie c'est l'étude des frottements, donc la science et la technologie des surfaces solides en contact, elle regroupe un ensemble d'aspect de frottement, de lubrification, de l'usure, et de l'adhérence entre surfaces de deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre. On observe dans tout les systèmes mécaniques le phénomène de frottement, cette composante tribologique est décisive dans le domaine d'application variés allant de la mécanique industrielle, aux systèmes vivants [4].

Quoique les phénomènes concernés soient familiers, peu de gens réalisent qu'ils intéressent de nombreux développements technologiques, des plus anciens aux plus modernes. Pour tailler l'indispensable biface dans un silex, nos ancêtres de la préhistoire s'étaient rendu compte que, avant de percuter la roche à l'aide du maillet, il fallait polir (on utilisant un caillou) la région à choquer, leur découverte peut s'expliquer: le polissage provoque des micro-fractures qui se développent ensuite sous l'effet du choc, c'est ce même principe qui trouve aussi son application dans l'usinage des céramiques.

I.2.1 Impacts de la tribologie sur la société

La tribologie entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines industriels: conservation de l'énergie, fiabilité des systèmes, productivité, développement et fabrication de nouveaux équipements, elle intervient aussi dans les systèmes vivants voir tableau I.1 qui montre que la tribologie trouve ses applications dans deux grands domaines: celui des systèmes mécaniques et celui de la mise en œuvre des matériaux. Un compte rendu du Département de l'énergie américain estimait que le développement de la tribologie pouvait réduire la consommation énergétique de ce pays de onze pour cent, le rapport bénéficiaire qui

correspond au rapport de l'économie réaliste sur le coût des recherches et du développement variait entre 1,5% et 12% dans ce domaine industriel. L'utilisation convenable de la tribologie minimise l'usure, celle-ci peut varier dans un rapport de un à cent mille, selon le choix des couples de matériaux. Si l'apparition des technologies modernes de fabrication et leur automatisation ont grandement modifié le visage de nos usines, c'est grâce au rôle de la tribologie. Cela est également vrai pour de nombreuses techniques de fabrication.

Tableau 1.1 : Impacts de la tribologie sur la société [4]

Systèmes mécaniques	Mise en œuvre des matériaux
➤ Vivant: animal, homme • membranes biologiques • prothèses biomécaniques • cartilages • dentisterie ➤ Organes de machines • Paliers, roulement • segments • cames, engrenages, frein • joints ➤ contacts pseudo statiques • Systèmes électriques • Systèmes magnétiques • Micro mécanismes • Micro robots • pneumatiques, chaussures ➤ Terre • génie civil • mouvement des sois • tremblements de terre • écoulement des glaciers ➤ Maintenance: • fiabilité, durée de vie prédite	➤ types de matériaux – artificiels métaux, polymères – céramiques, composites – naturels – Adhérence, collage – composites, textiles, libres matrices – Déformations plastiques – laminage, filage, extrusion – emboutissage, découpage – outillages de coupe, polissage – Lubrifiants – Traitements des surfaces

I.2.2 Aspects scientifique de la tribologie

La tribologie est un domaine pluridisciplinaire, qui requiert des connaissances relatives aux surfaces, à la science des matériaux, à la mécanique, et aux fluides.

Le comportement des matériaux apparaît comme un élément essentiel. Selon leur ductilité où leur fragilité, la nature de leur contact diffère énormément, et les lois de frottement et d'usure varient donc aussi. La caractérisation des surfaces et des couches proches de l'extrême surface à une très

grande importance en tribologie, c'est pourquoi l'environnement joue un rôle tout à fait essentiel. La tribologie met donc en contact deux surfaces, en tranchant fictivement une surface on trouve une succession de couches qui portent en elles l'histoire de sa fabrication et de sa préparation. La compréhension des lois physico-chimiques des surfaces permet, dans certains cas d'appréhender l'origine de leurs comportements particuliers. Ainsi, les forces d'interaction moléculaire (dont les effets se font sentir sur des distances ne dépassant pas la centaine d'angströms, soit le millionième de centimètre) sont certes responsables de l'adhésion, mais se trouvent aussi en compétition avec d'autres phénomènes qui sont décrits par la physique des solides. La compréhension de la tribologie nécessite enfin l'application des lois de la mécanique des fluides complexes, de la mécanique des solides, pour pouvoir prédire les régimes de lubrification. On dit d'une science qu'elle a l'âge de ses instruments de mesure, La tribologie qui utilise les toutes dernières techniques de la physique, de la chimie, de la mécanique et de l'informatique, est donc une science jeune [4].

I.2.3 paramètres d'un contact frottant

Le contact tribologique est constitué de quatre éléments principaux :

- Les solides A et B sont les corps en contact
- L'environnement E
- Le milieu inter facial I (3^{ime} corps)

En tribologie les conditions de travail de contact sont gouvernées par les mécanismes qui transmettent des charges statiques ou dynamiques et imposent une cinématique, une température, et un environnement [1].

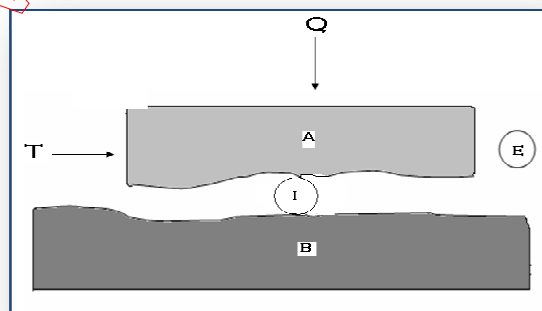


Figure I.1 Les éléments d'un contact mécanique [1]

I.2.4 Systèmes tribologiques

Les approches mécaniques prédominent dans le cas de la lubrification en film épais, il n'en est pas de même en ce qui concerne la lubrification limite, le frottement sec et l'usure. Les contributions historiques pour le frottement [AMONTONS, 1699], [COULOMB, 1773] et pour la mécanique du contact [HERTZ, 1896], [BOUSSINESQ, 1885] sont aujourd'hui bien connues et ont été analysées afin de bien cerner leurs limitations. L'approche industrielle de l'usure a changé au cours de ce siècle, quelques décennies auparavant l'ingénieur devait fabriquer des équipements qui fonctionnaient. Aujourd'hui, l'utilisateur est de plus en plus exigeant sur la durée de vie. Les difficultés rencontrées par les ingénieurs pour prédire l'usure et pour sélectionner des couples de matériaux, résultent essentiellement du fait que le frottement et l'usure ne sont pas directement des propriétés intrinsèques des matériaux, et que les sollicitations du système tribologique sont en général complexes (pression, vibrations) [3].

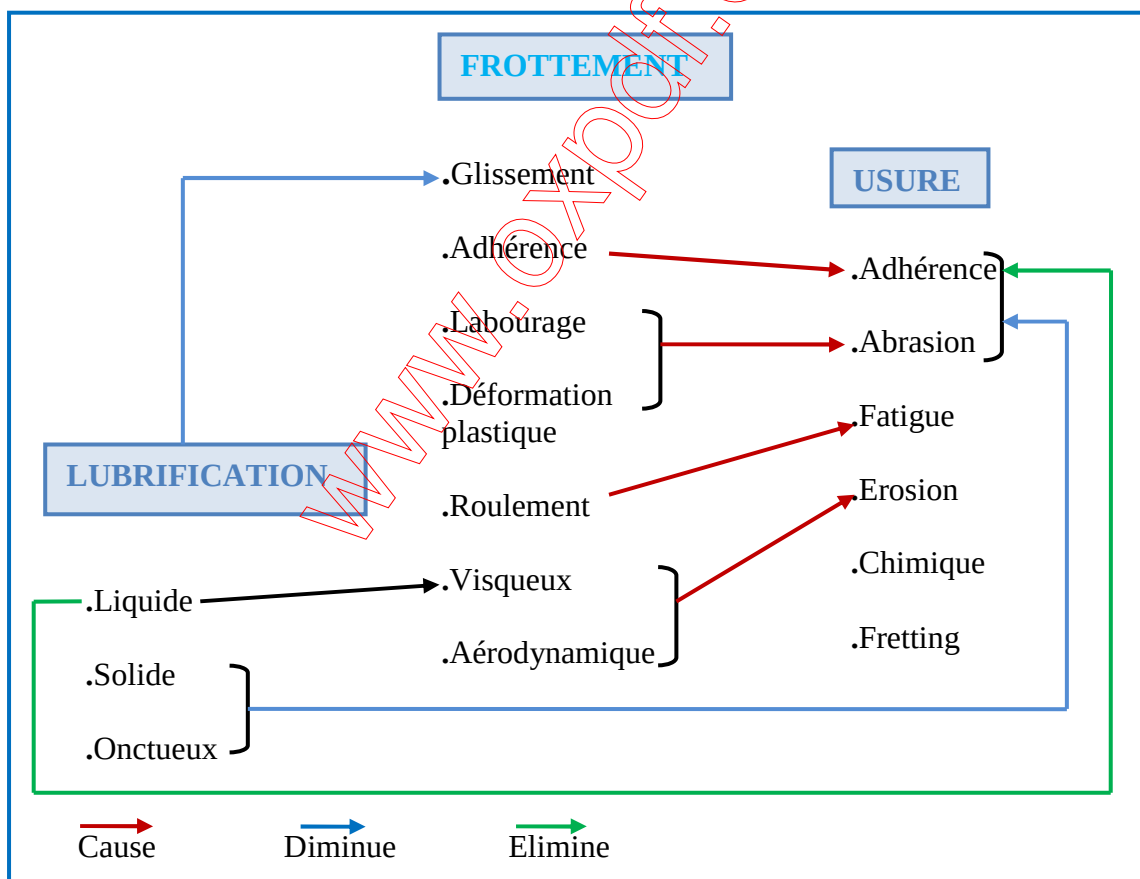


Figure I.2 Schéma générale de la tribologie

I.3 Frottements

Les frottements interviennent dans la grande majorité des phénomènes physiques de la vie courante. Nous considérons comme évidents les effets positifs. Rares sont les personnes qui sont conscientes de l'importance du frottement dans la vie quotidienne. C'est le cas pour les opérations comme marcher, démarrer, arrêter, faire tourner une voiture, faire de la musique avec un instrument de la famille du violon, fixer des pièces avec un clou ou une vis, tenir un objet dans la main.

La relation entre frottement et adhésion est au centre des questions que soulève la tribologie depuis très longtemps, et les idées imaginées par d'illustres scientifiques restent d'actualité [3].

I.3.1 Définition

Le frottement, phénomène se produisant à la surface de deux corps en contact et en interaction ou en mouvement l'un par rapport à l'autre. Lorsque deux solides en contact sont en mouvement, des frottements s'opposent aux forces de déplacement. Ces derniers se produisent au niveau des irrégularités des surfaces en contact. Pour les atténuer, on peut appliquer un lubrifiant entre les deux surfaces. Dans tous les cas, il engendre une résistance au mouvement provoquant la création de contraintes mécaniques superficielles et la dissipation de chaleur. En général, il entraîne l'usure plus ou moins rapide des corps en contact, et par conséquent la modification de leurs surfaces [1].

I.3.2 Les différents types de frottements

Lorsque deux solides A et B sont en contact figure 3a, on peut distinguer deux types de frottement : si A et B glissent l'un par rapport à l'autre, il apparaît un frottement de glissement figure 3b, lorsque A roule sur B figure 3c, on parle de frottement de roulement. Quand un corps se déplace dans un fluide (un gaz ou un liquide), on parle de frottement visqueux ou frottement fluide figure 3d [3]. En générale le contact entre deux corps aux surfaces rugueuses provoque une grande force de frottement qui joue le rôle d'obstacle, et freine le mouvement relatif entre les deux surfaces. La force de frottement (F) est égale à la somme de la force existante pour rompre les adhérences (F_R) et la force de déformation nécessaire pour labourer les aspérités (F_L) [5]. Cette dernière varie avec la variation de la rugosité c'est-à-dire plus la rugosité de surface est faible plus la force (F_L) est faible, ce qui a pour conséquence la diminution de la force de frottement et le mouvement entre les deux corps se fait avec moins d'obstacles et de résistances [2].

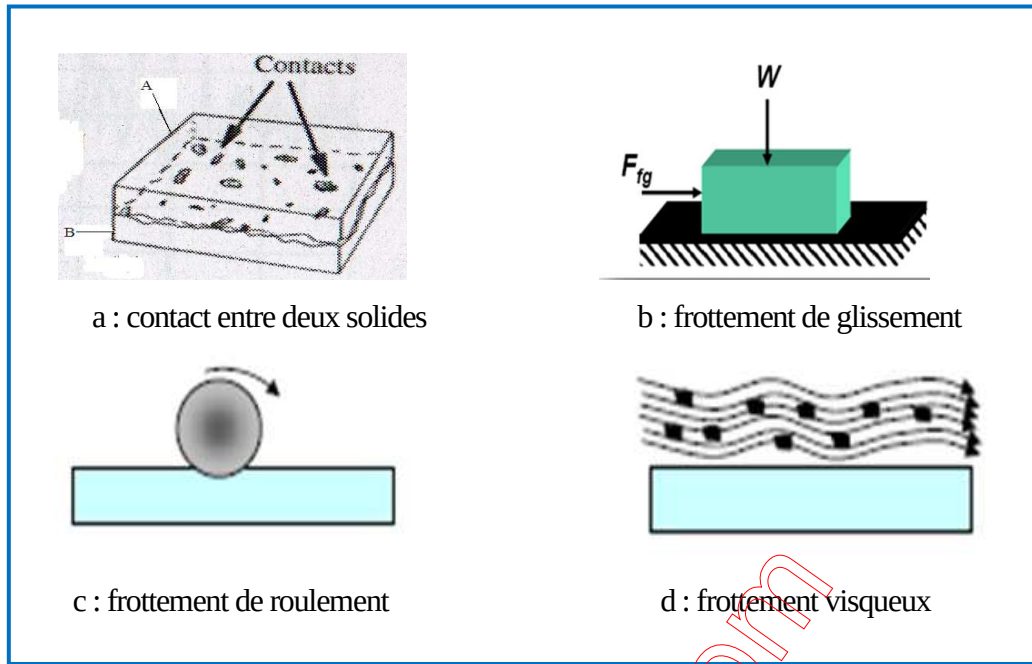


Figure I.3 Différents types de frottement [3]

I.3.3. Système mécanique et son comportement en service

Tous les systèmes mécaniques obéissent à des phases de démarrage et arrêt plus au moins fréquente. Afin d'augmenter la fiabilité des composants d'un système mécanique ainsi que sa durée de vie il faut connaître le déroulement de ces phases, ce qui permettra d'améliorer la conception et la fabrication de ses composants, par exemple le cas des paliers : lors du démarrage ou l'arrêt du rotor on peut identifier trois phases distinguées ou les lois régissant le contact dans le palier sont différentes.

Phase 1 : contact solide /solide entre arbre et le coussinet le rotor ne tourne pas

Phase 2 : le rotor commence à accélérer et a la de décélération il ya contact entre l'arbre et coussinet dans cette phase la lubrification est mixte à cause de l'existence du lubrifiant dans certaines zones localisées du contact dans le cas de démarrage, la génération hydrodynamique n'est pas encore suffisante pour faire décoller l'arbre et dans le cas de l'arrêt elle n'est plus suffisante pour continuer à assurer la portance, donc l'arbre entre en contact avec le coussinet.

Phase 3 : le rotor tourne à une vitesse suffisamment importante pour créer une portance hydrodynamique c'est la lubrification hydrodynamique, il n'est ya plus de contact partiel entre l'arbre et le coussinet.

Pour localiser la position relative des deux surfaces en regard en fonction des phases de contact sévère, l'exemple d'un palier voir figure I.4.

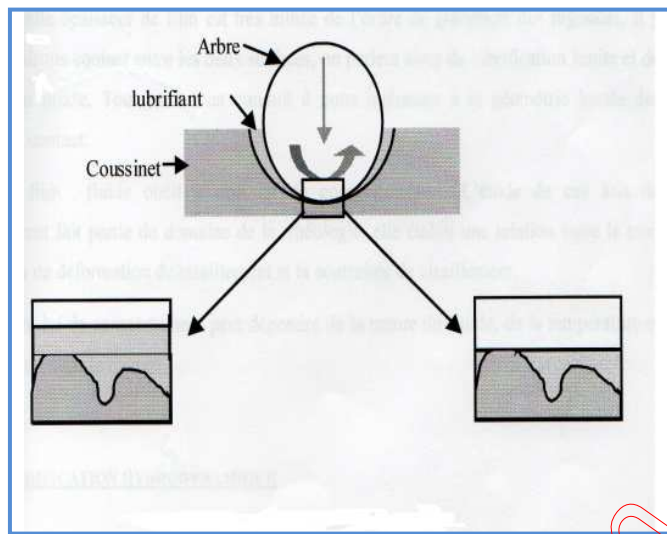


Figure I.4 Contact dans un palie [1]

En fonctionnement, les centres du coussinet et de l'arbre ne coïncident pas il existe un coin convergent, divergent le lubrifiant est entraîné dans cet espace convergent par la rotation de l'arbre, et donc il ya création d'un champ de pression qui s'oppose à la charge. Cette pression générée par le déplacement relatif des surfaces tend à entrainer le fluide qui séparé complètement les surfaces c'est le régime hydrodynamique, si les surfaces sont totalement séparés par le film fluide donc les défauts de surfaces tels que les aspérités ne sont pas prises en compte dans les calculs ce qui concerne les épaisseurs du film mince, la pression hydrodynamique peut être très importante et créer des déformations élastiques sur les surfaces en contact, c'est le régime élastohydrodynamique. Si l'épaisseur du film est très mince de l'ordre des rugosités il y aura contact entre les deux surfaces dans certains endroits, c'est la lubrification limite et mixte d'où on relève l'importance de la géométrie locale des surfaces en contact [1].

I.4 La topographie des surfaces

I .4.1 Définition

Elle regroupe l'ensemble des facteurs caractérisant les irrégularités d'une surface qui vont du domaine microscopique défini plus généralement par la rugosité, au domaine macroscopique correspondant à la géométrie de contact qui résultent de la mise en œuvre et du parachèvement d'une pièce mécanique et en particulier [6].

- génération de sillons, aspérités, cavités, porosités
- génération de défaut de forme (linéarité, circularité)

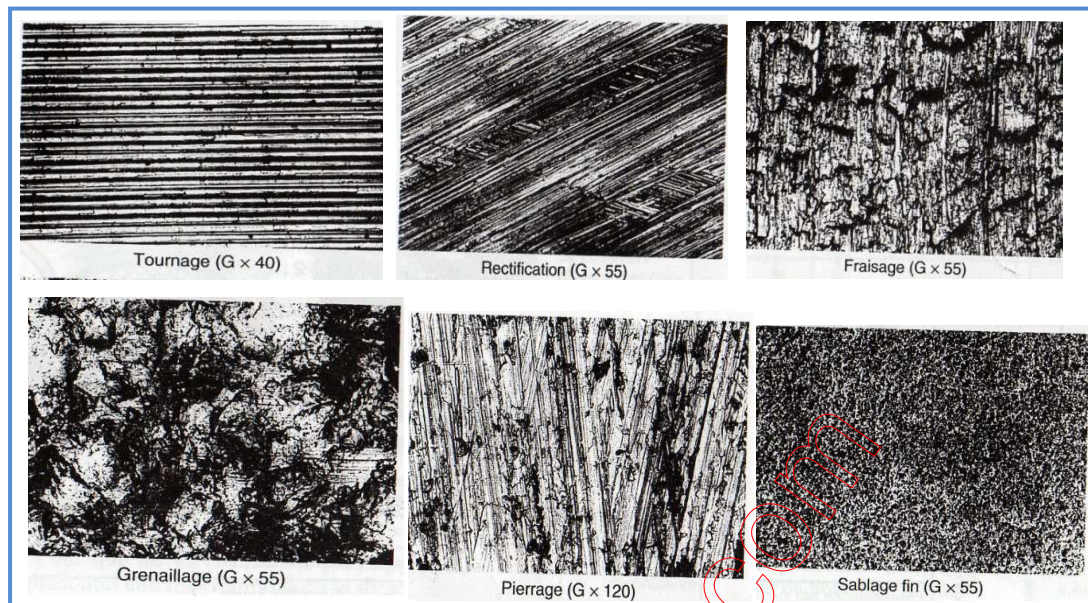


Figure I.5 Topographie des surfaces correspondant à quelques modes de finition [6]

I.4.2 Importance et caractérisation de la topographie de surface

La topographie agit sur la plus part des facteurs qui gouvernent le comportement au frottement et à l'usure notamment :

- Le mode de contact
- Comportement du milieu inter facial (3ème corps)

Elle doit prendre en compte toutes les caractéristiques des irrégularités de surface dimensionnelles (hauteur des pics) géométriques (forme, acuité des aspérités ou cavité), mais aussi la répartition et l'orientation (préférentielle, aléatoire). La topographie des surfaces influe énormément sur les propriétés d'un système mécanique.

Une surface métallique typique est caractérisée par une topographie définissant un profil avec des bosses et des creux voir figure I. 5, le contact se fait à la pointe des bosses les plus élevés donc la surface réelle de contact est faible [7].

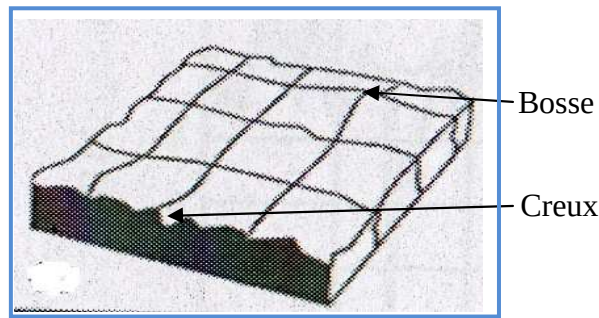


Figure I. 6 Topographie de surface [7]

La caractérisation d'une surface d'un échantillon est obtenue par des mesures profilométriques d'une zone de cette surface.

*La micro-rugosité : elle caractérise à l'échelle micrométrique les bosses et les creux résultant du procédé de mise en forme de la surface

*L'ondulation de la surface (macro-rugosité) ayant une longueur d'onde des variations du profil plus grande que celle de la micro-rugosité

La rugosité est représentée par les défauts d'ordre 2 et 3, elle est l'un des paramètres qui caractérise la topographie, et joue un rôle important dans la lubrification d'un système mécanique.

I.5. Importance de l'état de surface

I.5.1 Définition

Les états de surfaces sont représentés par les irrégularités dues au procédé d'élaboration de la pièce, en général ils sont mesurés avec des appareils à palpeur à pointe en diamant nommé profilomètres, et reproduit sous forme graphique permettant de visualiser la forme des irrégularités et d'estimer leurs profondeurs et leurs espacements. Dans le bureau d'étude l'état de surface est un élément très important car il représente la cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie, et l'aspect des surfaces usinées [8].

I.5.2 Rôle et fonctions de surface

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [9].

La surface fonctionnelle d'une pièce peut remplir 16 fonctions

Surface de contact avec une autre pièce :

- frottement de glissement lubrifié (FG),
- frottement à sec (FS),
- frottement de roulement (FR),
- frottement fluide (FF),
- résistance au matage (RM),
- étanchéité dynamique avec ou sans joint (ED),
- étanchéité statique avec ou sans joint (ES),
- ajustement fixe avec contrainte (AC),
- adhérence, collage (AD) ;

Surface libre, indépendante :

- générée par la coupe d'un outil (OC),
- résistance aux efforts alternés (EA),
- résistance à la corrosion (RC),
- destinée à recevoir un revêtement, peinture (RE),
- destinée à recevoir un dépôt électrolytique (DE),
- mesure (ME), aspect (AS).

I.5.3 Différents types de surfaces

-Surface de référence

C'est une surface particulière qui permet de définir ou de contrôler d'autres surfaces [10]

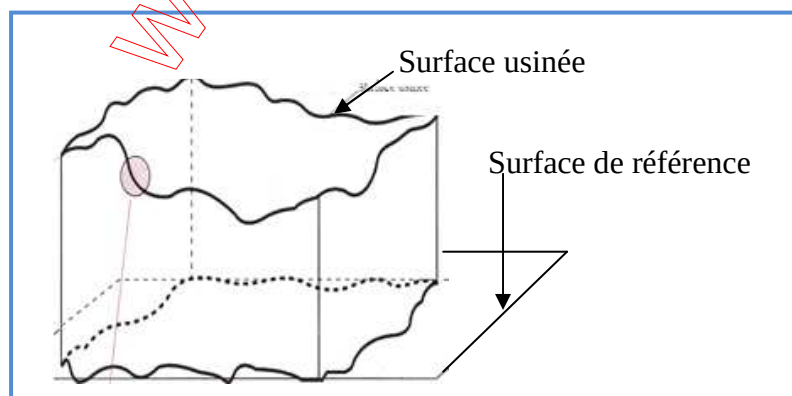


Figure I. 7 Représentation de la surface de référence

-Surface spécifiée

Surface parfaite sur le dessin de définition, elle est définie géométriquement par le bureau d'études à l'aide de cotes nominales.

-Surface associée

C'est la surface théorique représentant au mieux la surface réellement fabriquée. Elle est de même nature que la surface nominale ou spécifiée

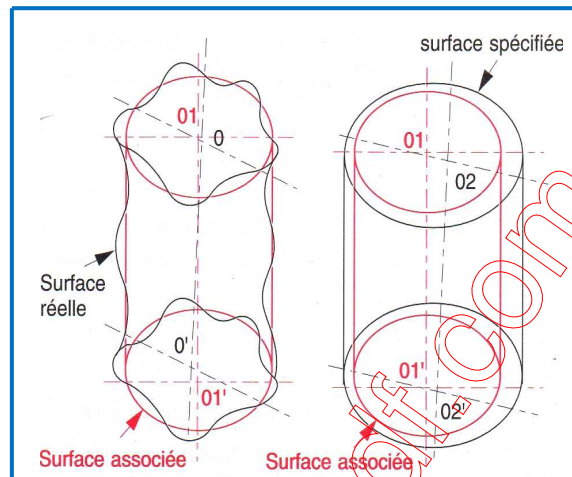


Figure I. 8 Surface spécifiée et surface associée

-Surface mesurée

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée.

-Surface réelle

Surface obtenu au cours de la fabrication

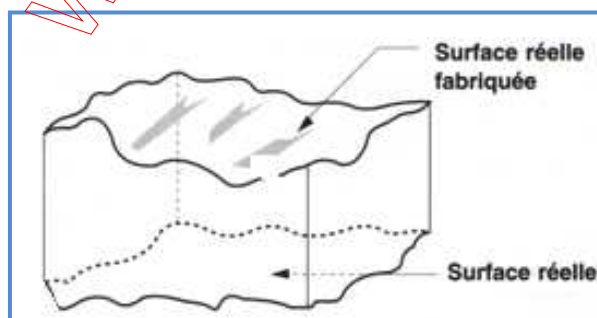


Figure I. 9 Surface réelle

I.5.4. Les défauts de surface

La norme NF E 05-515 distingue six ordres de défauts de surface, du plus grand au plus petit :

1. Écart de forme (échelle macroscopique) : défaut de planéité, de rectitude, de circularité
2. Ondulation (échelle macroscopique) : l'écart entre les crêtes est compris entre 0,5 et 2,5 mm
3. Stries et sillons (défauts périodiques ou pseudopériodiques, échelle microscopique) l'écart entre les crêtes est inférieur ou égal à 0,5 mm
4. Défauts localisés (échelle microscopique) : marque d'outil, arrachement, fente, piquûre
5. Structure cristalline (échelle méso-scopique)
6. Réseau cristallin (échelle nano-scopique)

Tableau 3 : les défauts macroscopiques et microscopiques [11]

	Désignation	Causes
macrographiques	défauts de forme et de position	Pendant l'usinage et après l'usinage etc.
	ondulation périodique	Fraisage : pas de l'ondulation = avance par tour de fraise, vibrations, pièce et outil, etc.
micrographiques	strie - sillon, rugosité périodique	Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil : lubrification, vibrations.
	arrachement, fentes, marques d'outil, piquûres, etc.	Qualité de l'affûtage de l'outil. Hétérogénéité du matériau usiné.

Il existe 4 ordres pour caractériser l'état de surface, (au plus l'ordre augmente au plus les Défauts étudiés sont petits) qui sont les suivants :

I.5.4.1. Ordre 1 : écart de forme ou de position (ligne moyenne)

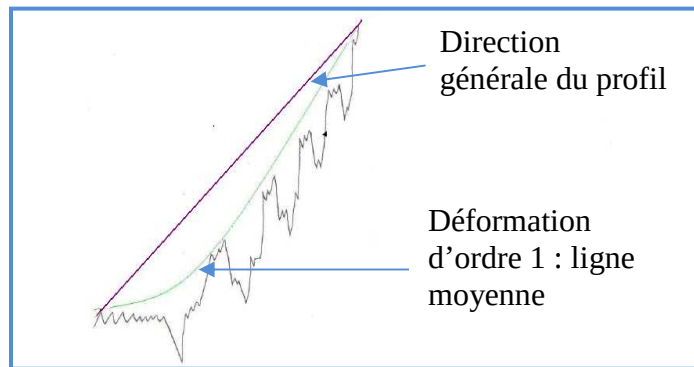


Figure I.10 Défauts d'ordre 1 [11]

L'ordre 1 est représenté par la ligne moyenne

Les différents types de défauts représentés par l'ordre 1 sont :

- ✓ Les défauts de planéité
- ✓ Les défauts de rectitude
- ✓ Les défauts de circularité

L'influence de ces défauts à lieu au niveau de :

- ✓ L'étanchéité : Statique (pas de mouvement entre les pièces)

Dynamique (mouvement entre deux pièces)

- ✓ Les frottements : Roulement, Glissement
- ✓ Durée de vie des organes

Les causes de ces défauts sont :

- ✓ La déformation de la pièce avant usinage dans son système d'ablocage
- ✓ La déformation de la pièce au cours de l'usinage due à l'effort exercé par L'outil sur la pièce ou due à la mauvaise inclinaison de l'outil
- ✓ La déformation de la pièce après démontage (contraintes internes (ex : Température)
- ✓ La déformation de l'outil machine due à l'action de la pièce sur l'outil
- ✓ Les défauts au niveau des guidages
- ✓ L'évaluation de la surface :
 - ✓ Discontinue: Comparateur (maillage) Machine à mesurer tridimensionnelle
 - ✓ Continue : Palpage, interférométrie
- ✓ On peut également utiliser un marbre ou calibre ou une bague

I.5.4.2. Ordre 2 : Ondulations périodiques

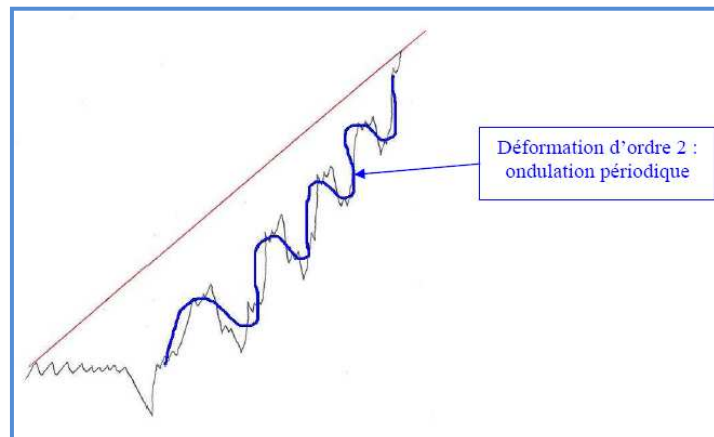


Figure I. 11 Défauts d'ordre 2 [11]

L'influence de ces défauts est la même que pour l'ordre 1

Les causes de ces défauts sont les phénomènes vibratoires basse fréquence, ces derniers se traduisent par un manque de rigidité au niveau de :

- ✓ La pièce, due à un mauvais équilibrage du montage sur le porte pièce
- ✓ L'outil, dû à une dent cassée au niveau de la fraise par exemple
- ✓ La machine

I.5.4.3. Ordre 3 : stries ou sillons

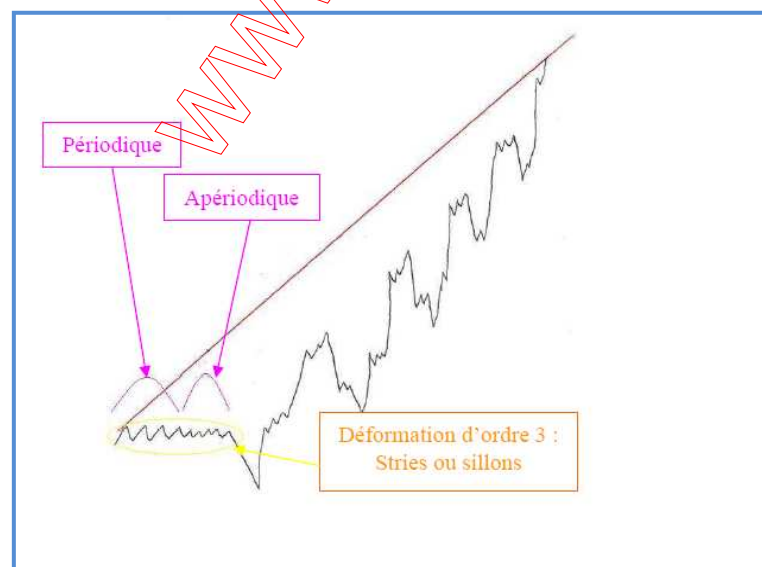


Figure I.12 Défauts d'ordre 3 [11]

L'influence de ces défauts à lieu au niveau de :

- ✓ L'étanchéité : Statique (pas de mouvement entre les pièces)
Dynamique (mouvement entre deux pièces)
- ✓ Les frottements fluides
- ✓ Les problèmes de revêtement (peinture...)

Les causes de ces défauts sont :

- ✓ Les phénomènes vibratoires haute fréquence
- ✓ Les stries ou sillons dus au passage de l'outil (r)

I.5.4.4. Ordre 4 : Arrachement de matière

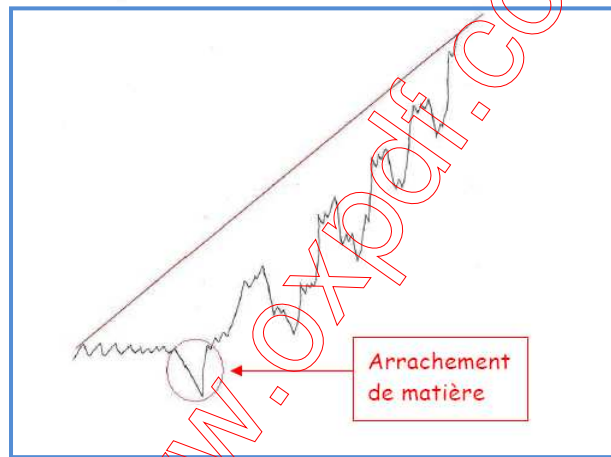


Figure I.13 Défauts d'ordre 4 [11]

L'influence de ces défauts est la même que pour l'ordre 3

Les causes de ces défauts sont :

- ✓ Le mauvais affûtage de l'outil
- ✓ Chocs de l'outil sur la pièce (au montage par exemple)
- ✓ Empreinte du système de serrage

I.5.5. Différents types de lignes

La direction générale du profil est équivalente à la ligne des moindres carrés du profil.

I.5.5.1. Longueur de base, d'évaluation

La longueur de base est définie par l'outil de mesure (notée l)

La longueur d'évaluation est la longueur totale à mesurer (notée L)

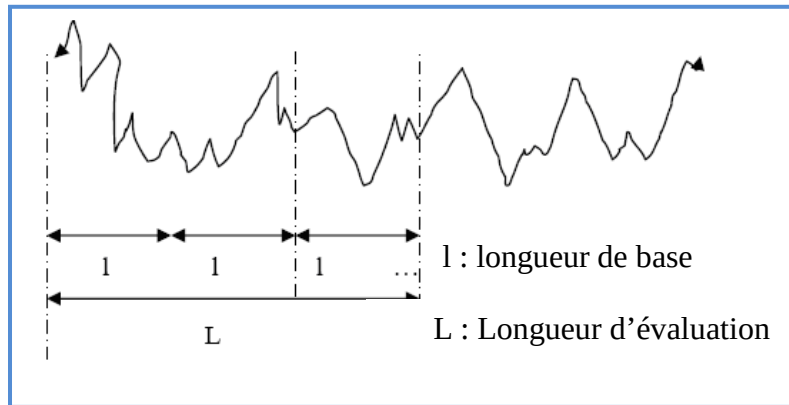


Figure I.14 Longueurs d'évaluation et de base [11]

I.5.5.2. Lignes de référence

Ce sont les lignes à partir desquelles les paramètres du profil sont déterminés :

- Les lignes moyennes : Moyennes arithmétique

Moyenne des moindres carrés

- Les lignes enveloppes : Enveloppe supérieure

Enveloppe inférieure

❖ La ligne moyenne arithmétique :

C'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (L) la somme des aires entre elle et le profil soit égale de part et d'autre :

❖ La ligne des moindres carrés :

C'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (L) la somme des carrés des écarts entre elle et le Profil soit minimal de part et d'autre

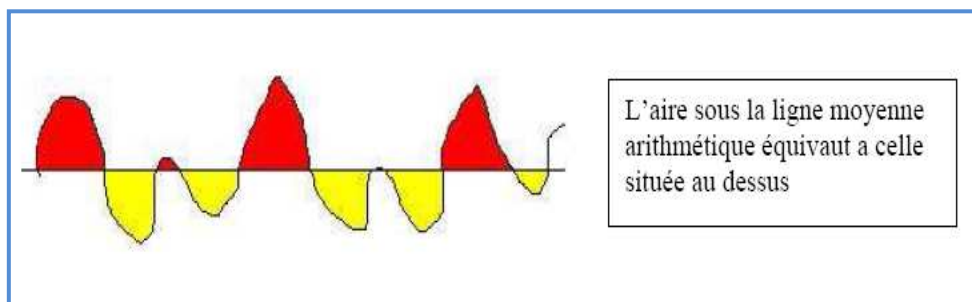


Figure I.15 Ligne des moindres carrés [11]

❖ La ligne enveloppe supérieure :

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies locales du profil.

❖ La ligne enveloppe inférieure :

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus bas des creux locaux du Profil. Le problème est que tous les points ne sont pas pris en compte (très aléatoire).

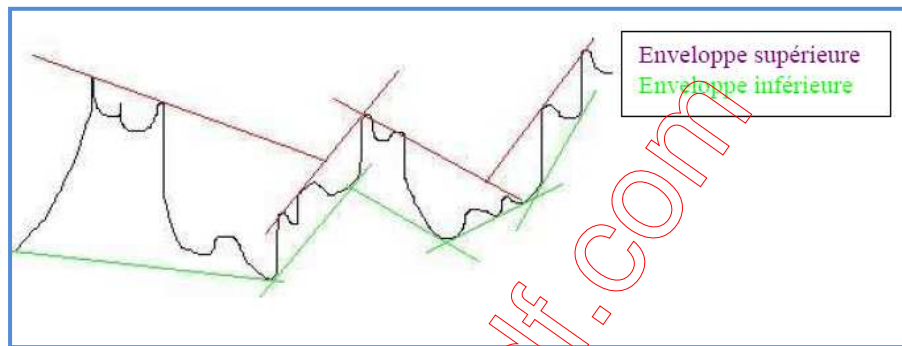


Figure I.16 Ligne enveloppe inférieure et supérieure

I.6 La rugosité

La confusion est souvent faite entre le degré de propreté et la rugosité d'une surface, il important de rappeler que ces deux notions sont différentes et totalement indépendantes l'une de l'autre.

- la propreté est une caractéristique chimique.
- la rugosité est une caractéristique physique

La rugosité peut être considérée comme un élément complémentaire du degré de soins (état de propreté) ou comme l'élément essentiel de contrôle, suivant la nature des traitements ou revêtements postérieurs [12].

I.6.1. Définition

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière [13].

I.6.2. Principaux paramètres de la rugosité

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité. En pratique, dans un profil et sur une longueur considérée, seuls trois d'entre eux sont retenus:

- "**Ra**": écart moyen, c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale. On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité.
- "**Rt**": écart total, c'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux.
- "**Rz**": régularité, c'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 longueurs [13].

I.6.2.1. Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe

Le motif est une portion de profil comprise entre deux pics, il est caractérisé par sa largeur ou pas et par la profondeur de chacun de ses cotés [8].

Les paramètres liés aux motifs peuvent être évalués graphiquement en traçant la ligne enveloppe supérieure et la ligne enveloppe inférieure.

Ces motifs déterminent la profondeur moyenne de rugosité R et son pas moyen AR voir figure I.17

La ligne enveloppe supérieur permet de déterminer les motifs d'ondulation et de calculer la profondeur moyenne d'ondulation W et son pas AW voir figure I.18.

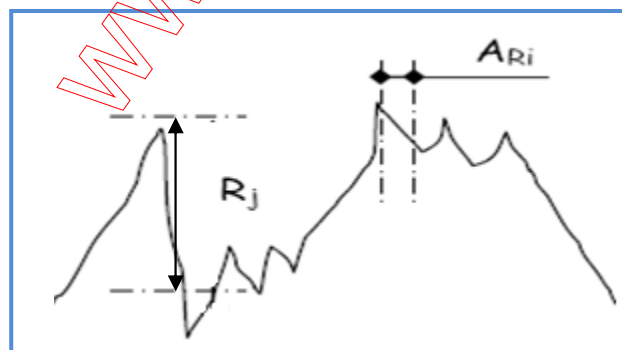


Figure I.17 Paramètres liés aux motifs [11]

$$R = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m R_j$$

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$$

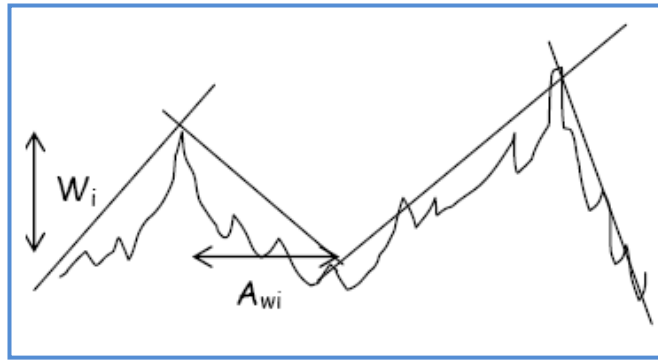


Figure I. 18 Paramètres d'ondulation [11]

$$Aw = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Aw_i \quad \text{Pas moyen}$$

$$W = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m W_j \quad \text{Profondeur moyenne}$$

I.6.2.2. Paramètres liés à la ligne moyenne

La référence pour le calcul des paramètres dans la définition ISO 4287/1, est la ligne des moindres carrés calculée sur une longueur de base. la valeur moyenne des valeurs trouvées sur cinq longueurs de base.

Les principaux paramètres liés à la ligne moyenne sont indiqués comme suit :

-Au niveau de la longueur de base :

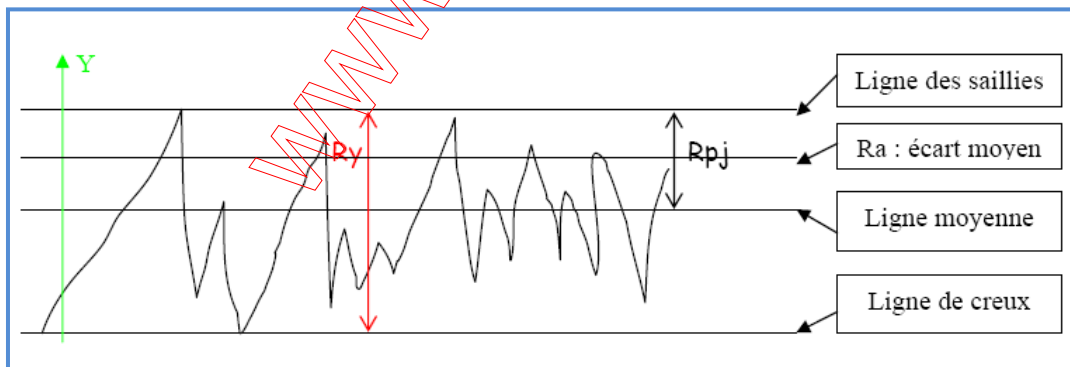


Figure I. 19 Paramètres liés à la longueur de base [11]

R_{pj} : distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne

R_{aj} : écart moyen arithmétique du profil

$$R_{aj} = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| \cdot dx$$

R_y : distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux

R_p : Représente la moyenne des R_{pj}

$$R_p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{pj}$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{aj}$$

-Au niveau de la longueur d'évaluation

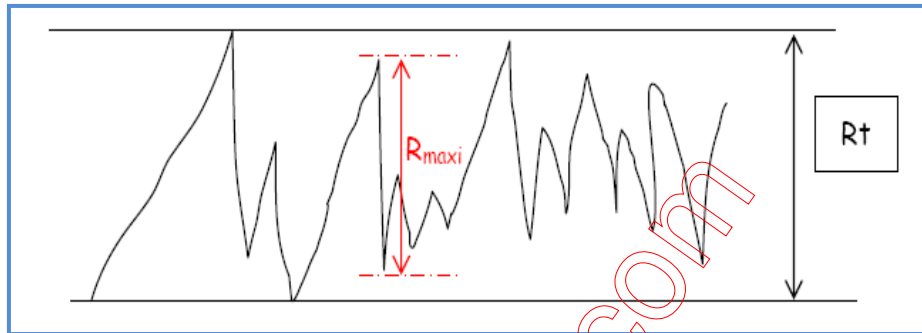


Figure I. 20 Paramètres liés à la longueur d'évaluation [11]

R_t : c'est le plus grand des R_y (R_y étant dans la longueur de base, on choisit le plus grand R_y compris dans la longueur d'évaluation). On considère que R_t est plus au moins équivalente à R_y

R_{max} : c'est le plus grand écart entre une saillie et un creux consécutif

I.6.2.3 Paramètres liés à la distribution d'amplitude

Ces paramètres sont calculés soit sur le profil total sur toute la longueur d'évaluation L , soit sur le profil de rugosité sur une longueur qui peut être plus grande que la longueur de base.

Distribution d'amplitude : C'est la fonction de densité de probabilité des points du profil. La forme de cette distribution peut être caractérisée par les paramètres R_q , S_k , et E_k correspondant aux moments centrés d'ordre 2,3 et 4, qui sont utilisés en tribologie pour simuler dans les modèles mathématiques le comportement de la surface [8].

Taux de portance T_p représenté par la courbe D'Abbott-Firestone, c'est la courbe cumulée de distribution d'amplitude en fonction de la profondeur de coupe (c) elle représente le pourcentage réelle qui porterait sur une surface plane après usure hypothétique égale à (c) voir figure I.21.

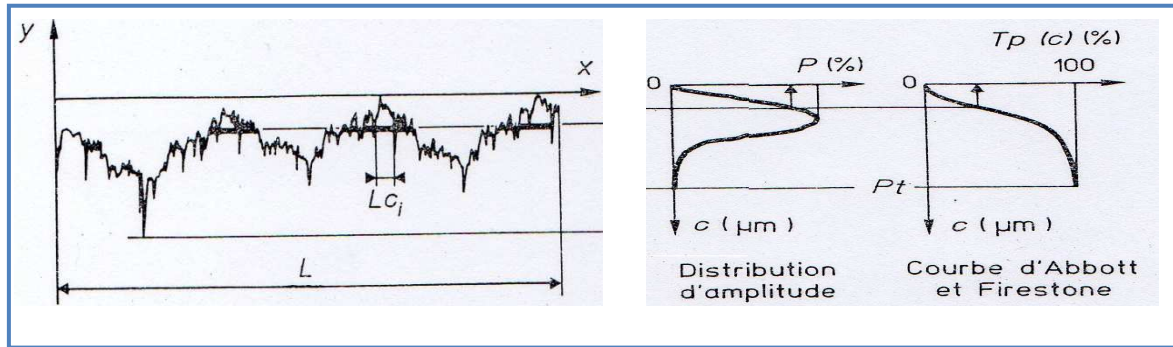


Figure I.21 Paramètres liés à la distribution d'amplitude [8]

C : (μm) profondeur de coupe

L_{ci} : longueur de coupe élémentaire

P : (%) densité de probabilité des points du profil

P_t : profondeur totale du profil

$T_p(C)$: taux de longueur portante (% de longueur portante après une usure hypothétique égale à (C))

D'où l'on peut mettre en évidence ces paramètres de surface dans les calculs d'un contact mécanique, donc connaître la topographie de surface est devenu un élément important en tribologie.

I.6.3 Mesure de la rugosité

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne sont pas suffisantes pour distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un rugosimètre qui détermine de manière sûre et précise un certain nombre de paramètres de rugosité (R_a , R_z ...). Parmi les applications industrielles nécessitant l'utilisation d'un rugosimètre on peut citer les domaines suivants [14] :

- **Mécanique:** l'optimisation de la rugosité permet un meilleur ancrage mécanique, notamment au sein de dispositifs où les forces de friction jouent un rôle fonctionnel prépondérant (ex: cônes morses).
- **Qualité:** l'utilisation d'un rugosimètre permet le contrôle de la qualité de finition en bout de chaîne de production, permettant de détecter et de corriger d'éventuels problèmes survenus durant l'usinage.
- **Recherche:** la mesure de la rugosité permet d'évaluer la qualité d'un nouvel enduit ou procédé de traitement de surface [13].

I.6.4- Introduction des paramètres de rugosité dans l'étude de la lubrification

Plusieurs approches ou analyse ont pris en compte les paramètres de rugosité dans l'étude de la lubrification parmi eux l'analyse stochastique qui prend en considération les paramètres statistiques de la rugosité, l'analyse déterministe qui fait une description géométrique de la rugosité et l'analyse d'homogénéisation qui revient à diviser le problème en deux, problème local, et problème globale [15].

-Analyse stochastique

C'est TZEND et SAIDEL en 1967 ont été les premiers à introduire l'analyse stochastique pour étudier un patin avec une rugosité transverse unidimensionnelle.

En 1997 BOEDO et BOOKER [16] ont utilisé la théorie des éléments finis pour analyser la performance d'un palier avec une rugosité isotropique et ses effets sur la déformation élastique du palier. Récemment en 2000 ZHANG et CHENG [17] ont étudié les effets de la rugosité et les effets non-newtoniens et thermiques en régime hydrodynamique dans les paliers chargés, en utilisant le modèle de lubrification mixte.

Un travail encore plus récent, en 2001, WANG et KEITH [18] ont analysé les effets de rugosité, et les effets non-newtoniens en utilisant la théorie de cavitation. Trois types de rugosité ont été étudiés : longitudinal, axial et isotrope, avec un chargement dynamique dans les paliers.

L'épaisseur locale du film :

$$h = h_0 + \delta_1 + \delta_2 \quad (1)$$

h_0 : l'épaisseur nominale du film c'est la distance entre le niveau moyen de chacune des deux surfaces.

δ_1, δ_2 : amplitudes des rugosités des deux surfaces mesurées par rapport à un niveau moyen, ses deux grandeurs peuvent être assimilées à une distribution gaussienne des hauteurs, de valeur moyenne nulle et de variance respectives σ_1^2, σ_2^2 .

La rugosité combinée $\delta = \delta_1 + \delta_2$ a pour variance σ^2 .

A titre d'exemple l'équation de REYNOLDS moyennée en compressible sera [1] :

$$\nabla \left(\phi_p \rho \frac{h^3}{12\eta} \nabla p \right) = \nabla (\rho \phi_c h U) + \frac{U_1 + U_2}{2} \sigma \frac{\partial(\rho \phi_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \phi_c h)}{\partial t} \quad (2)$$

(2): l'équation de Reynolds homogénéisée en compressible

En incompressible, ρ devient une constante, on obtient

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Phi_x \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Phi_y \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial h_T}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} \sigma \frac{\partial(\phi_s)}{\partial x} + \frac{\partial h_T}{\partial t} \quad (3)$$

(3) : l'équation de Reynolds homogénéisée en incompressible

p : La pression moyenne

h : l'épaisseur du fluide

U_1 et U_2 : Les vitesses des parois des surfaces (1) et (2) suivant la direction x

η : Viscosité du lubrifiant

Φ_x, Φ_y : Facteurs correcteurs au débit de poiseuille.

Φ_s : Facteur correcteur au débit de couette

σ^2 : Variance combinée des amplitudes de rugosité des surfaces (1) et (2)

Les expressions de ces facteurs empiriques ont été considérées dans les travaux de KANE [1].

Connaissant la variance σ^2 et la hauteur nominal du film h , on peut définir le rapport " $\frac{h}{\sigma}$ "

qui permet de déterminer l'importance de la rugosité sur la lubrification. On retrouve ce rapport dans tous les travaux utilisant l'équation de Reynolds homogénéisée.

* Pour $\frac{h}{\sigma} > 3$: les effets de la rugosité ne sont pas importants, L'équation de Reynolds classique pour les surfaces lisses est suffisante.

* Pour $\frac{h}{\sigma} = 3$: les effets commencent à devenir non négligeables.

* Pour $\frac{h}{\sigma} < 3$: on considère que les aspérités interagissent les unes avec les autres, et le régime de lubrification est mixte.

L'approche stochastique est basée sur l'introduction des facteurs d'écoulement dans l'équation de Reynolds et pour une rugosité aléatoire sur les surfaces en contact, mais cette analyse connaît des limites car seule une description globale est possible, on ne peut avoir accès aux informations locales. Ainsi deux profils de rugosités différentes mais qui ont les mêmes propriétés statistiques conduisent aux mêmes répartitions de pression. Alors qu'en réalité, on doit tenir compte de l'aspect local et global de la rugosité ainsi que du caractère anisotrope voir figure II.22.

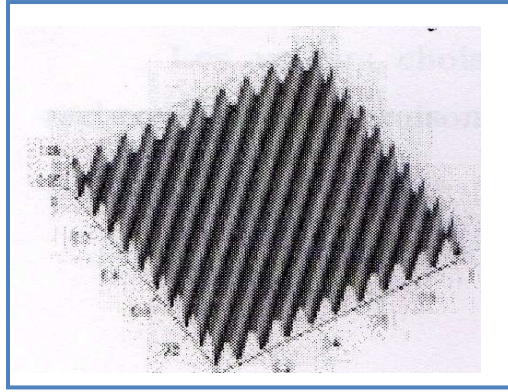


Figure I. 22 Rugosité anisotrope

I .7 Procédés d’usinage et qualité de surface

I.7.1 Introduction

Jusqu’ a nos jours l’usinage a gardé son poids économique, mais l’amplification des tendances actuelles est motivée par la concurrence vers une plus grande productivité. Le constructeur cherche toujours le procédé le plus économique, avec lequel on peut obtenir un produit de qualité, répondant aux exigences de l’utilisateur.

De nombreuses industries et notamment celles de l’automobile, accordent une importance de plus en plus aux procédés capables de satisfaire à des fonctions multiples tel que l’accroissement mécaniques-tribologiques, et résistance à la corrosion. La réalisation des vilebrequins de moteurs (automobiles, véhicules industriels) voir figure I.23b, nécessite un certain nombre de procédé d’élaboration et de finition de surface comme le tournage, la rectification, les traitements thermiques, car ils sont soumis à d’importantes sollicitations. Certains secteurs de la mécanique comme ceux des engins de travaux publics, du matériel agricole font usage de paliers ou d’articulations voir figure I.23a.c, et leurs réalisations fait intervenir des procédés par coupe, et des traitements mécaniques comme le brunissage, galetage, grenailage, tous ces procédés influent de près sur la qualité des surfaces. La notion de qualité fait un grand retour, c’est un facteur différentiateur à l’heure actuelle où l’industrie fait face à une concurrence internationale sévère, où la pression sur le prix est élevée, la qualité est devenue le principal élément. L’état de la couche superficielle et la micro-géométrie sont les principaux éléments qui définissent la qualité de surface, cette dernière influe sur les propriétés fonctionnelles des pièces et des ensemble des machines, notamment leurs résistances à l’usure, leurs rigidités et tenue à la corrosion. Elle joue un rôle technologique important, car elle définit les valeurs des surépaisseurs, les régimes de coupe, et les défauts de la mise en position. Ce qui a poussé le fabricant à chercher de nouvelles techniques de façonnage de surface mécanique [19].

La multiplicité des procédés d'usinage et la grande variété des métaux constructifs rendent la mise en forme des opérations d'usinage d'une pièce ou une famille de pièces un problème complexe. En conséquence la vision actuelle consiste plutôt à essayer de tirer parti, au mieux et de manière complémentaire de performance des divers procédés de mise en forme avec et sans enlèvement de matière pour aboutir à une gamme de fabrication plus économique. Dans l'industrie mécanique l'informatique a beaucoup contribué à développer le domaine de modélisation et simulation des surfaces et de leurs comportements. L'évolution des machines outils, ainsi que les formes des outils, et leurs matériaux ont énormément servis à améliorer la qualité du produit. Donc l'optimisation des procédés d'usinage permet d'augmenter la production, et de minimiser le temps et le coût de fabrication, selon leurs phénomènes physiques on peut les classer comme suit [8] :

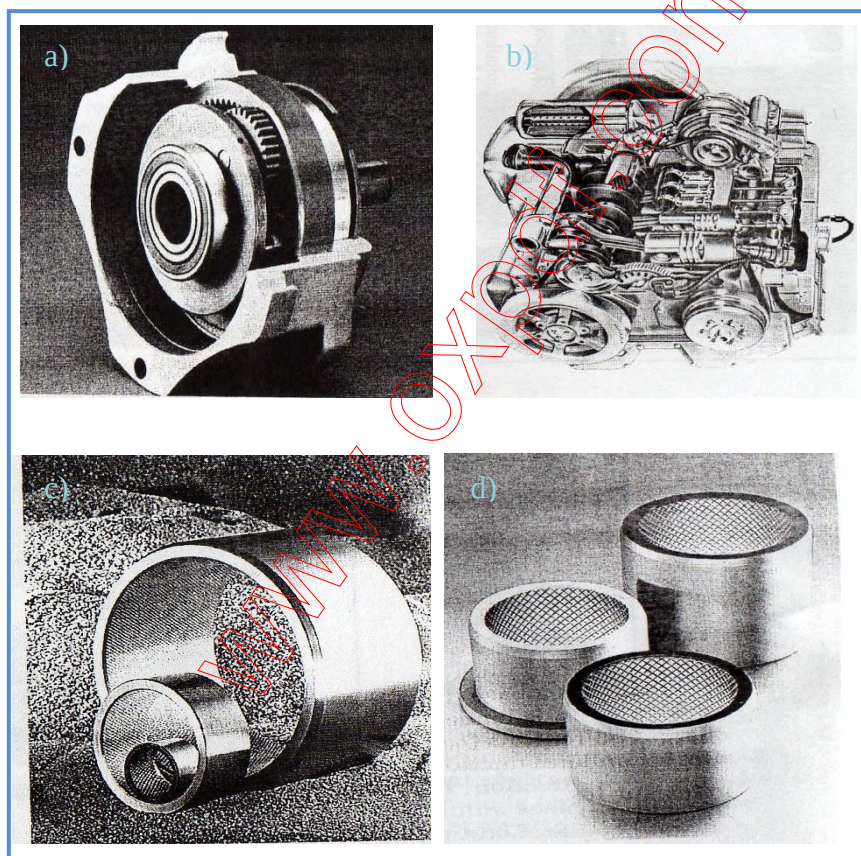


Figure I. 23 a) Réducteur b) Moteur c) Coussinets d) Coussinets quadrillés

I.7.2 Procédés par coupe

Le principe de ces procédés est l'enlèvement de matière, qui est réalisé par l'action d'un outil coupant à titre d'exemple (tournage, fraisage)

I.7.2.1. Tournage

Vu l'importance de l'application de ce procédé, il a fait l'objet d'une grande optimisation malgré la simplicité de sa cinématique et de ces outils, cette optimisation concerne les machines outils (tours à commande numérique), les outils, les portes pièce, le chargement et déchargement. Le tournage est l'un des procédé d'usinage les plus utilisés jusqu'à présent et représente une grande productivité [20].

Il utilise un outil coupant à arête unique, la pièce usinée est animée d'un mouvement de rotation dit mouvement de coupe et l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation appelé mouvement d'avance qui permet de définir le profil de la pièce voir figure I.24. La combinaison de ces deux mouvements ainsi que la forme de la partie active de l'outil permettent d'obtenir des formes de révolution [21].

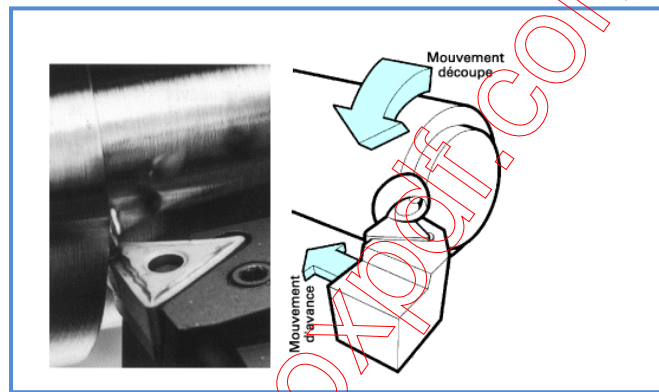


Figure I.24 Tournage avec outil à arête unique [22]

I.7.2.2. Matériaux utilisés pour les outils

- **L'acier rapide**

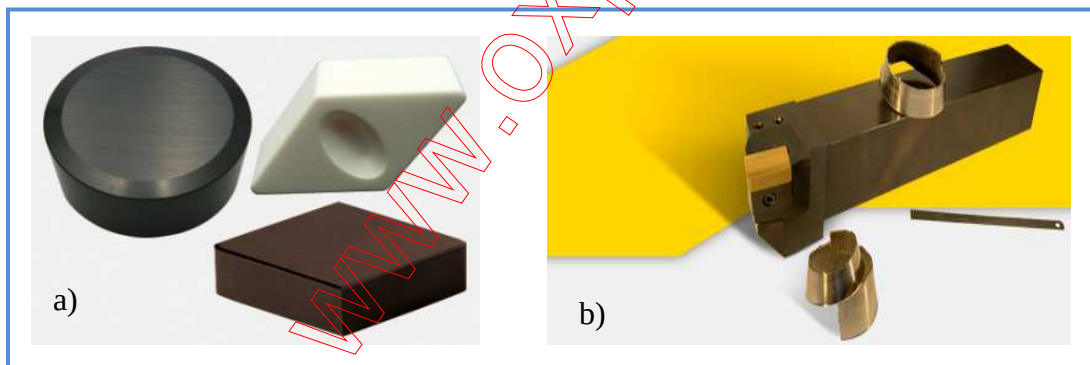
Très employé pour la production d'outils de coupe. Les caractéristiques qui le rendent intéressant sont sa dureté d'environ 65 HRC et sa ténacité qui lui confère une bonne longévité et permet l'obtention des rugosités suivantes : R_a / R (12,5 / 40) - 6,3 / 16 - 1,6 / 4 - (0,8 / 2) voir annexe 1.

- **Les carbures métalliques**

Rentrent dans cette catégorie les alliages composés de tungstène (60-90%), titane et tantale (1-35%) et de cobalt ou nickel (5-15), La fabrication du métal dur est réalisée par frittage, on en fait généralement des plaquettes qui sont brasées ou vissées sur le corps de l'outil. Certains outils de petites dimensions sont fabriqués entièrement en métal dur [22].

I.7.2.3.Type de tournage et nouveaux outils

Il existe divers types de tournage selon la forme et la matière de la pièce, les conditions, et les exigences techniques. *Le fabricant evatec-tools* propose des solutions innovantes qui permettent d'améliorer la qualité finale du produit en diminuant les temps d'usinage. Plusieurs types de tournage ont été développés [22] tels que : Le tournage dur qui aujourd'hui un procédé permettant de produire des surfaces de très haute qualité équivalente à celle des opérations de rectification, et qui peut atteindre une rugosité $Ra = 0.2\mu m$, et une précision dimensionnelle de qualité 6. Cette technique est caractérisée par de faibles profondeurs de coupe, et d'avance et par d'importants efforts spécifiques de coupe. Il apparaît de très hautes températures en cours de travail (entre 500° et 1500° selon les cas) à l'interface de l'arête de coupe et de la pièce. Donc ce procédé nécessite des méthodes de choix des conditions de coupe, et des méthodes de suivi de production introduisant des critères traditionnellement absents des cahiers de charges, dont les contraintes résiduelles, le refoulement de matière et l'état métallurgique. Des solutions compétitives ont été proposées en tournage dur avec des matériaux désignés pour résister aux très hautes températures, céramiques mixtes et les CBN. Ces matériaux ont la capacité de garder leur dureté à chaud, et donc leur résistance à l'usure voir figure I.25a.



. Figure I.25 a) Plaquette pour tournage dur b) Outil pour tournage dur [22]

Une large gamme d'outils pour le tournage permettant de répondre aux vastes opérations de chariotage, dressage, profilage. Afin d'optimiser les performances actuelles et répondre aux applications spéciales, des outils et des portes outils spéciaux figure I.25b, I.26 sont conçus pour permettre de regrouper plusieurs opérations en une seule. Ces solutions innovantes permettent d'améliorer la qualité finale du produit en diminuant les temps de cycle d'usinage.



Figure I.26 Porte-outils spéciaux [22]

I.7.3 Procédés par abrasion

Dans ce procédé l'enlèvement de matière se fait par l'action d'un grand nombre de grains abrasifs. Exemple (rodage, la rectification, polissage).

I.7.3.1. Rectification

Cette technique de finition consiste à uniformiser la surface voulue de manière à éliminer la friction qu'elle pourrait engendrer en entrant en contact avec une autre pièce.

I.7.3.2. Les différents types de rectification

-La rectification plane

C'est un meulage horizontal de la pièce de façon à éliminer à plusieurs reprises des couches de matériaux allant de 20 à 40 μm (0,0005 à 0,001 pouce). Ici, la pièce est fixe et effectue un mouvement alternatif uni-axial (gauche droite).

-**La rectification double face** : Consiste à rectifier les deux faces de la pièce en même temps.

- **Rectification cylindrique** : la pièce tourne sur elle-même en effectuant sa course le long de la meule.

Aujourd'hui avec l'apparition des nouveaux procédés d'usinage à grande vitesse, Contrairement à l'usinage traditionnel, la rectification permet des usinages de précision dimensionnelle élevée grâce au principe de l'usinage par abrasion [23].

I.7.3. 3. Matériaux

Il est possible de rectifier :

- Acier classique non trempé
- Acier trempé jusqu'à 70 HRC
- Acier chromé dur

- Céramique
- Carbure

I.7.3.4 Différents types de meules

Standard : Corindon à base de Al_2O_3 (fritté, normal, semi-supérieur, supérieur, monocristallin, à billes creuses...)

Nitride de Bore Cubique (abréviation : CBN. Le nom commercial donné par General Electric en 1969 : Borazon)

Diamant

Une meule se compose d'abrasifs, de liant et de pores d'aération. L'abrasif est l'outil effectif, le liant servant de support. Pour juger les propriétés d'une meule, il faut aussi tenir compte de la grosseur des grains de l'abrasif et de la quantité de liant (la dureté). Les symboles de désignation des meules sont normalisés au niveau international [24].



Figure I.27 Types de meules [23]

I.7.3.5. Abrasifs

On utilise 4 groupes d'abrasifs synthétiques :

- Le corindon (oxyde d'aluminium)
- Le carbure de silicium
- Le diamant
- Le nitride de bore

D'une manière générale, on peut dire que les corindons conviennent aux matériaux à forte résistance à la traction tels que l'acier, le fer forgé et la fonte malléable. Le carbure de silicium convient aux matériaux à faible résistance à la traction tels que la fonte moulée, le

cuivre, la pierre naturelle, le carbure. De nos jours le diamant est utilisé pour l'affûtage des carbures.

Pour les aciers rapides fortement alliés, il a été développé un nouvel abrasif approprié, le nitrure de bore.

Dans chaque cas la meule se différencie par

- La variété du grain (oxyde d'aluminium, carbure de silicium, diamant, etc.) voir figure I.28
- La grosseur du grain
- L'espace entre chaque grain
- Le liant
- Le diamètre



Figure I.28 Différents types de grains [23]

I.7.3.6 Avantages de la rectification

- Possibilité de s'attaquer aux matériaux les plus durs
- Pouvoir atteindre des tolérances dimensionnelles de l'ordre du micromètre (0,001 mm)
- Obtenir un état de surface poussé
- Permet d'être moins précis sur l'usinage

I.7.4 Procédés par déformation plastique

La conception, la fabrication, et la mise au point de pièces ou structure utilisant des matériaux métalliques vivent actuellement une importante évolution. En effet, le marché, les nouvelles

réglementations, la sécurité, les économies d'énergie, et la prise en compte du développement durable conduisent dorénavant à une diminution globale du poids des structures et à l'utilisation de nouveaux matériaux métalliques de plus en plus résistants. Cette amélioration des propriétés mécaniques est souvent associée à des microstructures multiphasées et des changements de phase peuvent se produire au cours de la déformation.

Cette dernière génère un fibrage qui améliore les performances mécaniques ce qui permet de réduire les dimensions, l'inertie, et les vibrations. Ce procédé permet la mise en forme des pièces par (forgeage, tréfilage, laminage, estampage, emboutissage, martelage) par exemple le forgeage est un procédé produisant des pièces de formes à partir d'un lopin par déformation plastique par chocs ou pression, à froid ou à chaud (alliage d'Aluminium 480 °, Acier 1250°) voir figure I.29a.

Estampage est un formage à chaud par pression ou par chocs de pièces en série, entre deux matrices (outillage spécifique) portant en creux la forme de la pièce. La précision dimensionnelle est plus grande qu'en forge libre voir figure I.29b [25].

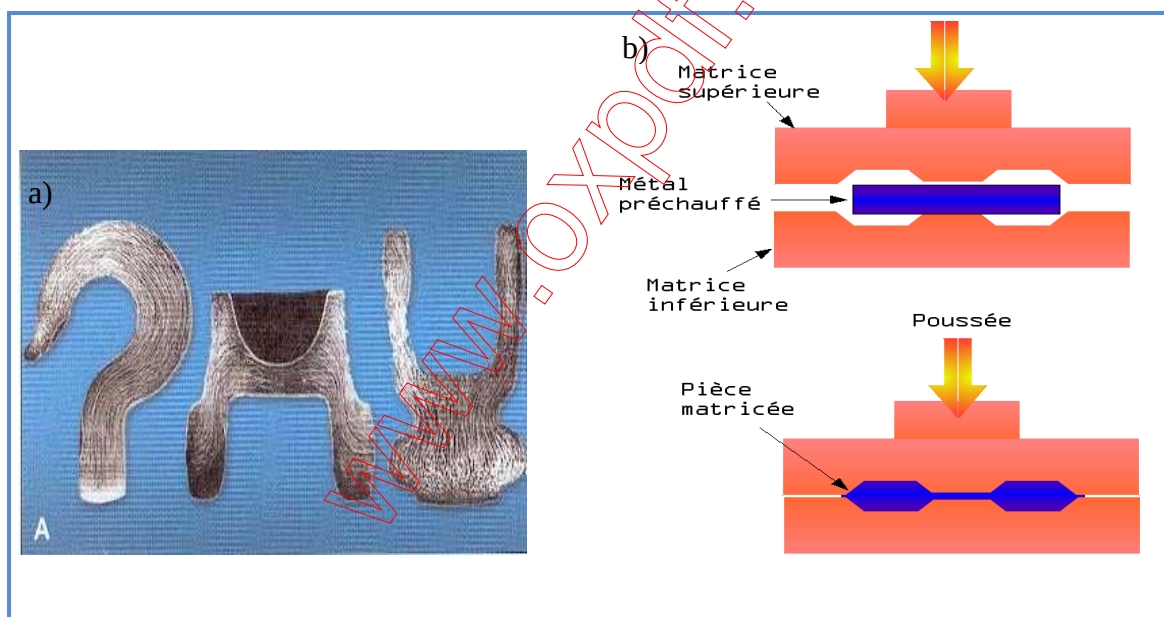


Figure I.29 a) Pièces réalisées par forgeage b) Pièces réalisées par estampage [25]

Rugosité de surfaces brutes réalisées voir annexe 1 :

- Estampage : $R_a / R : 12,5 / 40 - 3,2 / 10 - (1,6 / 4)$
- Forgeage : $R_a / R : 3,2 / 10$
- Laminage à froid (sur cuivre) : $R_a 0,6 \text{ à } 0,08\mu\text{m} / R_{max} = 1,0 \text{ à } 1,5\mu\text{m}$

I.7.5 Traitement Mécanique de Surface

Les traitements mécaniques de surface sont des procédés qui permettent d'améliorer les performances des matériaux par une action combinée de durcissement superficiel, de modification structurale et d'introduction de contraintes résiduelles de compression grâce à une déformation plastique hétérogène à la surface des pièces mécaniques. Les traitements les plus utilisés sont le brunissage, le galetage, le martelage. Le principe de base est la mise en application d'une pression à la surface d'un matériau pour provoquer une déformation plastique soit par un outil de forme comme pour le galetage, soit par une onde de choc comme pour le traitement par choc laser. Cette déformation plastique n'est pas homogène sur la profondeur de la pièce à partir de la surface traitée. Ce type de traitements génère des contraintes résiduelles de compression qui sont souvent favorables pour la résistance à la fatigue et à la corrosion. Si la dureté et la taille des grains sont des paramètres bien connus des mécaniciens et des métallurgistes et communs par rapport aux autres traitements de surface, l'introduction des contraintes résiduelles de compression constitue une particularité [26]. L'autre caractéristique particulière de ces traitements mécaniques est l'état de surface des pièces traitées. En effet, après le traitement l'état de surface et la géométrie locale des pièces sont modifiés par rapport à l'état initial. Les traitements par galetage engendrent une amélioration de l'état de surface si les conditions optimales de traitement sont appliquées [27].

I.7.5.1 Galetage

Depuis de nombreuses années le galetage des surfaces est utilisé pour la finition des essieux des wagons moteurs des chemins de fer. Précisément on le rencontre dans différentes branches de l'usinage mécanique, il s'impose de plus en plus comme étant une technique extrêmement importante et rentable [28].

Le galetage est une opération de finition mettant en contact des galets en acier traité poli et une pièce d'une dureté inférieure comme indiqué sur la figure I.30. La surface obtenue par galetage est plus fine et présente une meilleure résistance à l'usure que celle obtenue par abrasion. Le galetage travaille par déplacement de la matière plutôt que par enlèvement [29], il oblige, sous l'application d'une force orthogonale, les crêtes d'une rugosité de surface qui a subi un usinage antérieur (tournage, fraisage) à fluer dans les creux figure I.31, il s'applique sur des pièces métalliques qui ont un allongement $A > 6 \%$.

Plusieurs recherches ont confirmé les avantages imputés au galetage tels : l'amélioration de la dureté superficielle, la rugosité de surface lui donnant une bonne précision dimensionnelle et géométrique, et la production des contraintes résiduelles de compression qui permettent l'amélioration des résistances à l'usure, à la fatigue, à la corrosion [30].

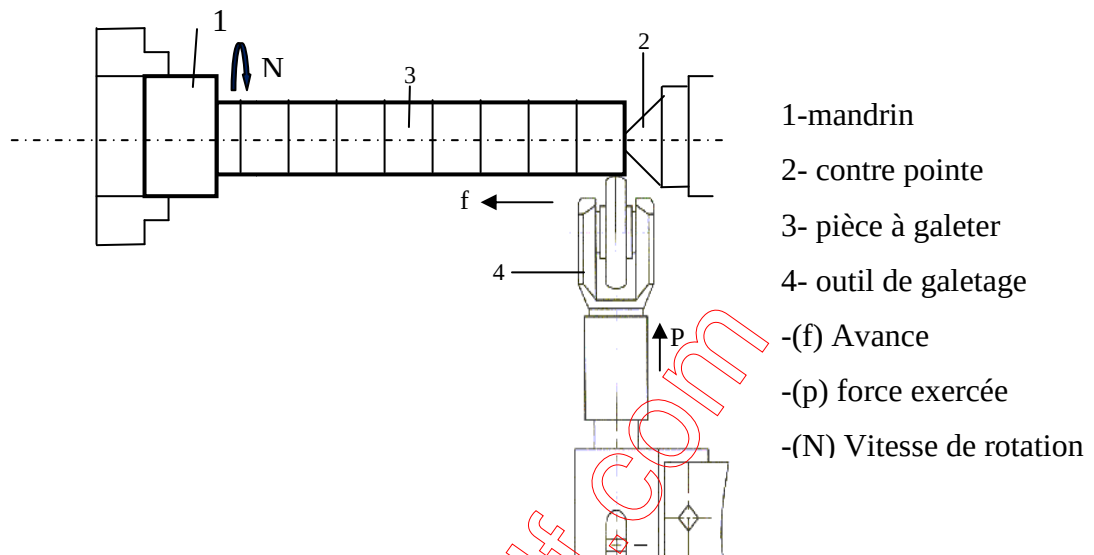


Figure I.30 Principe du galetage [29]

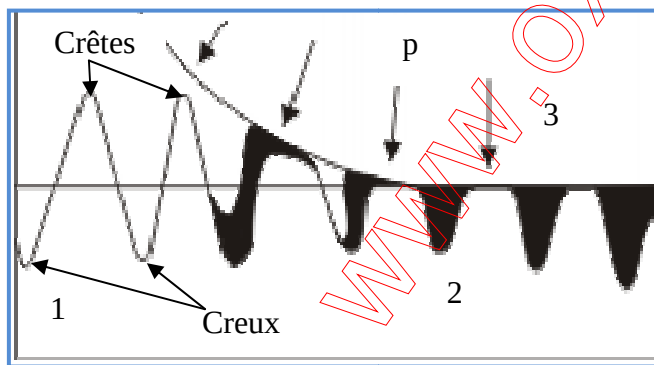


Figure I.31 Effet de galetage sur la surface [29]
1- surface usinée 2- surface galecée, 3- galet

- P force de galetage.



Figure I.32 Outils de galetage [30]

- Différents types de galetage

- **Galetage de renforcement :** il permet d'augmenter la résistance à la fatigue des pièces de construction
- **Galetage dimensionnel ou de forme :** le but de ce galetage est modifier la forme initial de la pièce

- **Galetage de surface :** avec ce galetage on peut améliorer la surface au niveau macro et micro géométrique et il est possible d'atteindre un niveau de super finition.

- Influence du galetage sur la rugosité

L'amélioration de la rugosité sur les pièces brunies dépend des paramètres de procédés.

- Par l'augmentation de la vitesse de déformation on augmente la température dans la zone de déformation qui permet, la stabilisation au moment donné, ainsi que le métal prend un aspect de plus en plus visqueux ce qui réduit le frottement entre l'outil et la pièce ce qui provoque l'amélioration de l'état de surface avec une diminution de la rugosité.

L'amélioration de Ra et aussi assurée par:

- L'augmentation de l'effort de brunissage qui provoque le fluage du métal et par conséquent la plastification, ce qui diminue la rugosité.
- L'augmentation du rayon de l'outil qui réduit la hauteur d'aspérité; ce qui permet la diminution de Ra [28].

- Avantages du galetage

- 1- Amélioration de l'état de surface de 0,05 à 0,1 R_a soit 2 à 4 microns
- 2- Meilleur contrôle de la cote jusqu'à 0,01 mm
- 3- Amélioration de la dureté en surface de 5 à 10%
- 4- Amélioration du temps de contact jusqu'à 300%
- 5- Amélioration de la résistance à la corrosion
- 6- Réduction de la friction
- 7- Elimination des traces et des imperfections
- 8- Remplace des opérations onéreuses comme la rectification ou rodage
- 9- Production accrue à cout réduit comparée à d'autres opérations de finition

I.7.5.2 Brunissage

Il est d'usage courant qu'une pièce mécanique soit destinée à un rôle fonctionnel dans des conditions sévères. De ce fait, le matériau doit avoir de hautes caractéristiques mécaniques dont le choix reste un souci majeur pour les industriels à cause des contraintes économiques que peut causer ce choix. Néanmoins, ce problème peut être résolu en faisant appel à des méthodes de fabrication et des modes de traitement sur des matériaux « classique » pour satisfaire les exigences techniques[31].

Le brunissage est un procédé qui agit par déformation plastique superficielle, cette technique est utilisée dans le parachèvement ou finition des surfaces de contact des pièces métalliques dures et des métaux plastiquement déformables [32].

C'est une technique de polissage utilisée en finition:

- ✓ D'un revêtement métallique comme la [dorure](#) ou l'argenture
- ✓ D'une fabrication en argent, en or, en cuivre ou en alliage cuivreux.

L'opération est réalisée avec un outil : le [brunissoir](#).

- Principe de brunissage

Le brunissoir exerce une pression sur les crêtes de la surface, ce qui a pour conséquence un fluage de la matière dans les creux, au fur et à mesure de l'avance de l'outil. Il sert à niveler les aspérités de la surface usinée en créant une zone de métal écroui indice d'une amélioration de l'état de surface [32] voir figure I.33.

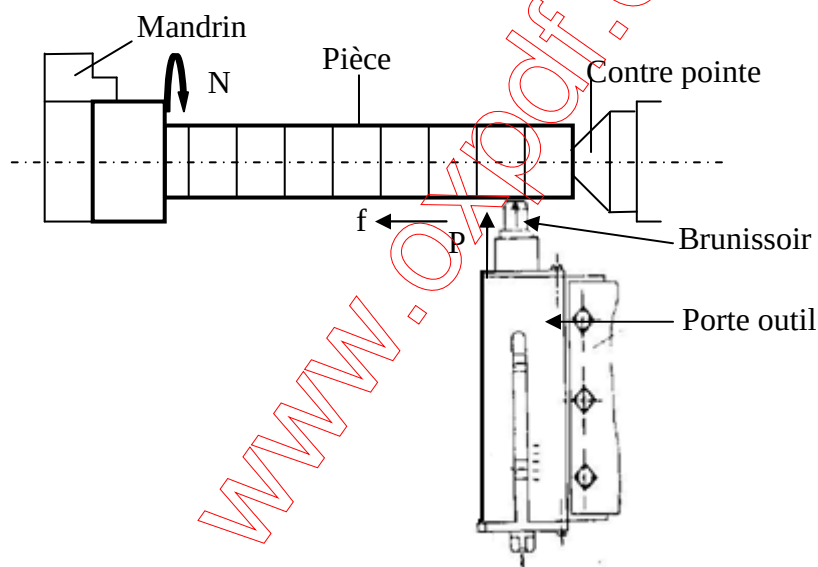


Figure I. 33 Principe de brunissage [30]

Le brunissage a pour but de :

- ✓ Rendre la surface du métal brillante
- ✓ Améliorer l'état de surface
- ✓ Réduire la rugosité de la surface
- ✓ Augmenter la dureté superficielle

- Avantages du brunissage

- ✓ Amélioration de l'état de surface
- ✓ Amélioration des caractéristiques mécaniques
- ✓ Outillage simple, durée de vie élevée, et peu coûteux
- ✓ Opération économique car le brunissage est appliqué sur des pièces non traitées
- ✓ Il Crès des précontraintes de compression qui agissent favorablement sur l'endurance

- Inconvénients du brunissage

- ✓ Moyens de contrôle onéreux
- ✓ Utilisé que pour le matériau plastiquement déformable

I.8 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'importance de la rugosité dans un système mécanique. Dans le domaine de la tribologie (usure, frottement, lubrification), elle représente un des paramètres qui caractérise la topographie de surface, et intervient dans les calculs de l'épaisseur du film lubrifiant. La qualité de surface est un élément de concurrence dans l'industrie, elle constitue un élément tranchant pour le fabricant qui reste toujours motivé pour innover de nouvelle gamme d'usinage, améliorer les performances des machines outils, créer des gammes d'outillage qui s'adapte avec la technique moderne d'usinage, d'où ressort l'intérêt des procédés d'usinage, tels que le tournage, la rectification, et le traitement mécanique de surface.

La prochaine étape a pour but de réaliser des essais expérimentaux dans les quelles on aborde l'effet des procédés d'usinage sur la rugosité des surfaces usinées.

CHAPITRE II

MATERIELS ET TECHNIQUES

EXPERIMENTALES

www.oxpdt.com

II.1.Introduction

Plusieurs travaux ont été réalisés pour essayer de relever les facteurs qui influent sur l'état de surface, et sur le comportement tribologique des pièces dans un mécanisme. Il a été montré dans le chapitre I qu'il existe une relation étroite entre les procédés d'usinage et de fabrication des pièces mécanique, et la qualité des surfaces en service. Ces dernières années ont vu une grande évolution des techniques de finition des surfaces des pièces à titre d'exemples tournage dur, le grenaillage, mais le premier souci du fabricant c'est comment obtenir des pièces de qualité qui répondent aux exigences techniques et fonctionnelles tout en minimisant le coût de fabrication [33].

Dans ce chapitre une étude a été faite pour démontrer l'importance du choix judicieux du procédé d'usinage et de finition des surfaces mécaniques. Pour cela trois surfaces ont été finies par les procédés suivants :

Le tournage très utilisé, connu pour sa grande productivité, disponibilité de l'outillage, et qui est relativement économique.

La rectification son avantage c'est la grande qualité de ses surfaces mais elle reste toujours un moyen de finition très coûteux.

Le procédé de traitement mécanique superficielle en l'occurrence le galetage à la bille (brunissage) qui est une technique de finition par déformation plastique superficielle, caractérisée par sa grande productivité et son coût réduit, il tend à remplacer les opérations de rectification et de rodage qui sont très onéreuses, il connaît plusieurs avantages tels que : l'amélioration des états de surface, de la dureté, et des caractéristiques mécaniques.

II.2 Les essais préliminaires

Dans cette partie seront présentés les essais préliminaires qui ont pour objectif la détermination du régime de coupe optimal servant à la préparation de l'éprouvette qui sera traitée par différents procédés cités au paragraphe précédent.

II.2.1 Matériau

Le matériau utilisé est l'acier XC48 fourni sous forme de barres cylindriques. Cet acier comme tous les aciers à moyen carbone s'emploie dans la construction mécanique après normalisation, amélioration et trempe superficielle, pour une variété de pièces (vilebrequins, bielles, arbre à cames, pignons) [33].

II.2.1.1 Composition chimique et microstructure

L'analyse du matériau a été réalisée au niveau du laboratoire d'ARCELOR MITTAL, les résultats sont indiqués sur le tableau II.1

Tableau II.1 : la composition chimique du XC48 [34]

Teneur des éléments%											
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ae	Ti	Ni	Cr	Mn	Sn
0,50	0,65	0,29	0,006	0,010	0,016	0,008	0,003	0,006	0,014	0,002	0,002

La microstructure est représentée sur la figure II .1

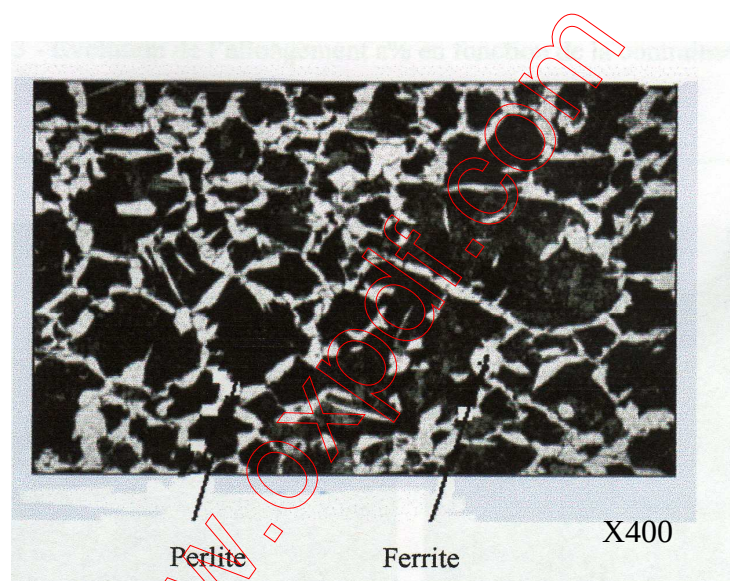


Figure II.1 La microstructure du XC48 [34]

II.2.1.2 Caractéristiques mécaniques

Les essais de traction ont été effectués au laboratoire de la DRA, les résultats sont indiqués au tableau suivant :

Tableau II.2 : Caractéristiques mécaniques [34]

Module de Young	R_m	$Re_{0,2}$	A
210 GPa	646,4 N / mm ²	325,5 N / mm ²	17%

II.2.2 Machine outil

Les essais préliminaires ont été réalisés sur un tour universel, TOSTRENCIN type SN40 voir Figure II. 2



Figure II.2 Tour universel TOSTRENCIN SN40 C

Les Caractéristiques de la machine outil sont consignées sur le tableau II.3 [35]

Tableau II.3 : Caractéristiques de la machine outil

Dmax (mm)	Distance entre pointe (mm)	Diamètre de passage dans la broche (mm)	Avance mm/tr	Vitesse de rotation trs /min	Puissance de la machine KW
600-700	1060-2060	52	0,05- 6,4	45-2000	6,6 Kw

II.2.3 Outil

L'outil utilisé lors de finition de la pièce est à plaquette en carbure métallique voir figure II.3

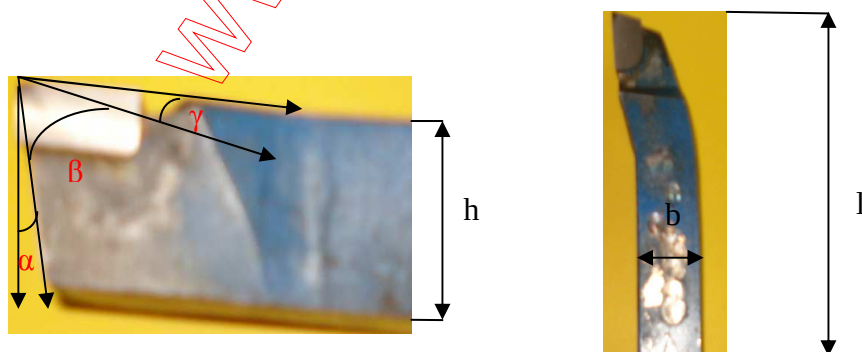


Figure II.3 Outil à plaquette en carbure métallique P20

Les caractéristiques géométriques [36] sont consignées sur le tableau II.4

Tableau II.4 : caractéristiques géométriques

h mm	b mm	l mm	φ	ε	φ_1	α	β	γ
20	20	125	98°	70°	12°	10°	72°	8°

II.2.4 Régime de coupe

Le régime de coupe a été choisi en fonction du matériau à usiner, de l'outil et des caractéristiques de la machine outil selon [36].

- Profondeur de passe a : (0, 5 – 1) mm
- Avance sur le rayon f : (0, 05- 0, 16) mm/tr
- Vitesse de rotation N : (710- 1400) tr/mn

II.2.5 Méthodologie d'essai

Les essais préliminaires ont été conduits selon le modèle de planification d'expériences multifactorielle 'plan de Box Behnken' [37].

II.2.5.1 Méthodes des plans d'expériences

Le but est de voir la variation de la qualité de surface réalisée en fonction de trois paramètres de régime de coupe (N , f , a). Ces derniers représentent les paramètres d'entrée du système MODOP selon la figure II.4. Au moyen d'un modèle mathématique de Box Behnken qui sera établie, la réponse du système en l'occurrence la qualité de surface est représentée par " R_a ". Le traitement des données se fera à l'aide d'un programme sous matlab.

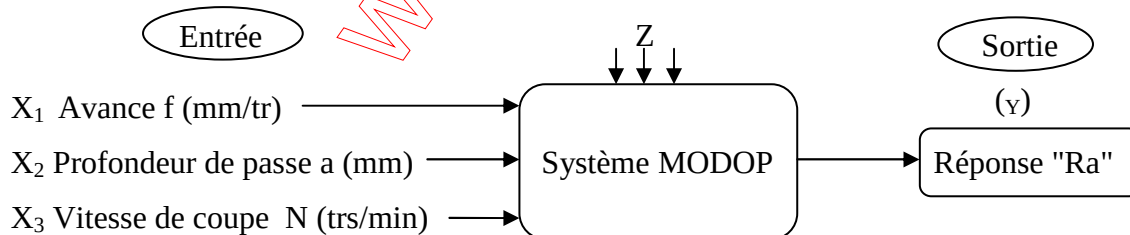


Figure II.4 Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai

Z: paramètres constants, température, montage.....etc.

La matrice des essais est présentée sur le tableau II.5

Tableau II.5 : matrice des essais

Facteurs	paramètres	Niveaux		
		-1	0	+1
X ₁	N (tr/mn)	710	1000	1400
X ₂	f (mm/tr)	0,05	0,11	0,16
X ₃	a (mm)	0,5	0,75	1

Les plans de Box Behnken à trois facteurs et trois niveaux, prévoient une matrice d'expérience de 15 combinaisons voir tableau II.6

Tableau II.6 : Matrice d'expérience

N° du palier	X1 N (tr/mn)	X2 f (mm/tr)	X3 a (mm)
1	710	0.05	0.75
2	1400	0.05	0.75
3	710	0.16	0.75
4	1400	0.16	0.75
5	710	0.11	0.5
6	710	0.11	1
7	1400	0.11	0.5
8	1400	0.11	1
9	1000	0.05	0.5
10	1000	0.16	0.5
11	1000	0.05	1
12	1000	0.16	1
13	1000	0.11	0.75
14	1000	0.11	0.75
15	1000	0.11	0.75

II.2.5.2 Préparation de la pièce

Selon les plans de Box Behnken la pièce de longueur $L=285\text{mm}$ de diamètre $D=56\text{ mm}$ est réalisée en 15 paliers de 15 mm de largeur, séparés par des gorges de $2\text{mm} \times 3\text{ mm}$. La pièce est maintenue dans un montage mixte comme indiqué sur les figures II.5 et II.6.

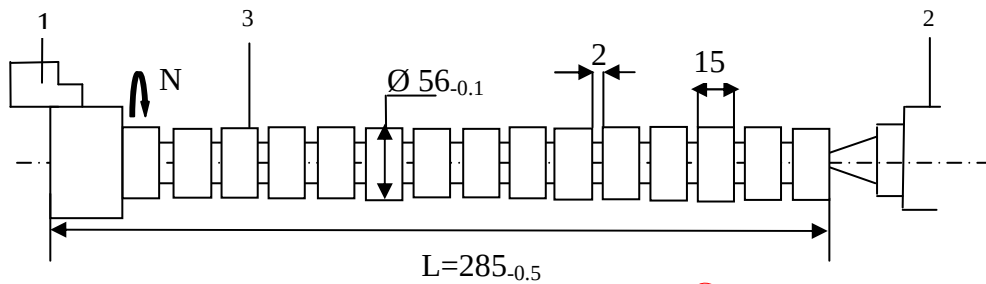


Figure II.5 Montage et préparation de la pièce 1-mandrin 2-contre pointe 3- pièce

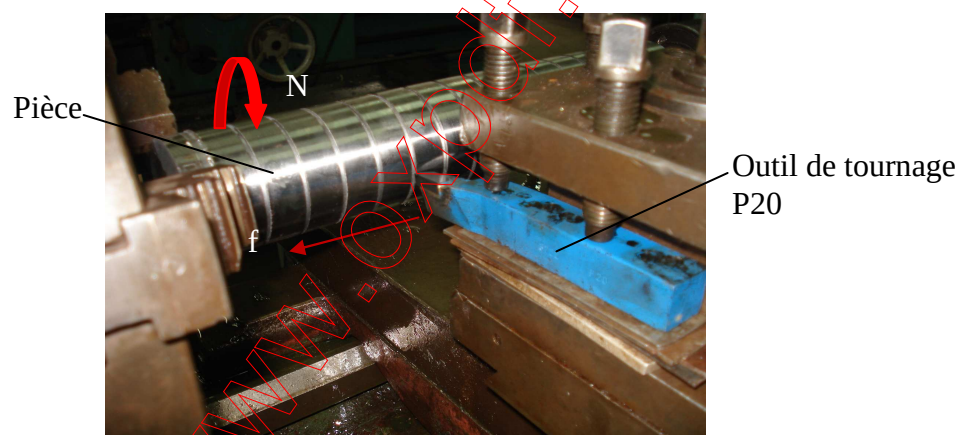


Figure II.6 Préparation de la pièce sur tour

Les opérations ont été réalisées sans lubrifiant.

II.2.6 Rigidité du système

La rigidité du système MODOP est donnée par [36]

$$L^{0,75} / D \leq 2$$

$$L=285\text{mm} \quad D=56\text{mm}$$

$$L^{0,75} / D = 1,23 < 2$$

D'après ces résultats le système est rigide. A la suite de l'usinage, les mesures de rugosité ont été réalisées au moyen d'un rugosimètre type TR100 présenté sur la figure II.7.

II.2.7 Mesure de rugosité

Les mesures des rugosités ont été effectuées par un appareil de mesure à palpeur modèle TR100 comme indiqué sur la figure II.7



Figure II.7 Mesure de la rugosité

Caractéristiques techniques de l'appareil

- Paramètres de mesures de Ra et Rz
- Plage de mesure 0.05 ; 10 μm pour Ra
0.1 ; 50 μm pour Rz
- Longueur de mesure 6mm
- Calibre $\lambda_1=0.25$ mm pour Ra=0.05 0.25
 $\lambda_2=0.8$ mm pour Ra=0.32 2.5
 $\lambda_3=2.5$ mm pour Ra=2.5 10

Les valeurs moyennes des rugosités Ra mesurées pour chaque palier et correspondant à chaque régime sont présentées dans le tableau II.7.

Tableau II.7 : les valeurs de Ra correspondantes aux régimes

N° d'essai	Paramètres de régime			Ra moy (μm)
	N (tr /min)	F (mm /tr)	a (mm)	
1	710	0.05	0.75	3.55
2	1400	0.05	0.75	2.77
3	710	0.16	0.75	2.41
4	1400	0.16	0.75	2.31
5	710	0.11	0.5	2.32
6	710	0.11	1	1.58
7	1400	0.11	0.5	2.23
8	1400	0.11	1	1.38
9	1000	0.05	0.5	3.61
10	1000	0.16	0.5	2.32
11	1000	0.05	1	2.97
12	1000	0.16	1	2.79
13	1000	0.11	0.75	1.77
14	1000	0.11	0.75	1.71
15	1000	0.11	0.75	1.61

L'influence des paramètres des régimes peut être appréciée à partir de l'histogramme présenté sur la figure II.8.

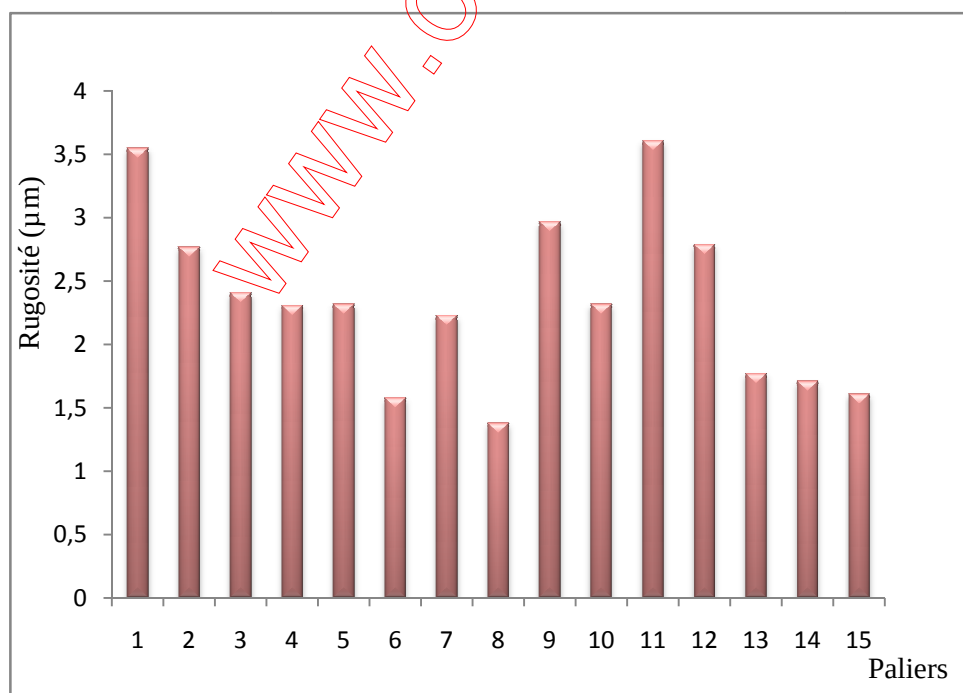


Figure II.8 Influence des paramètres des régimes de coupe sur la rugosité

Il ressort du graphe que chaque régime influe différemment sur la rugosité R_a . Le traitement par le modèle de Box-Behnken nous permettra une évaluation plus exhaustive de l'effet des paramètres des régimes.

II.2.8 Traitement par les plans de Box Behnken et simulation

Les étapes permettant le traitement des données et l'obtention du modèle sont illustrées sur l'organigramme de la figure II.9.

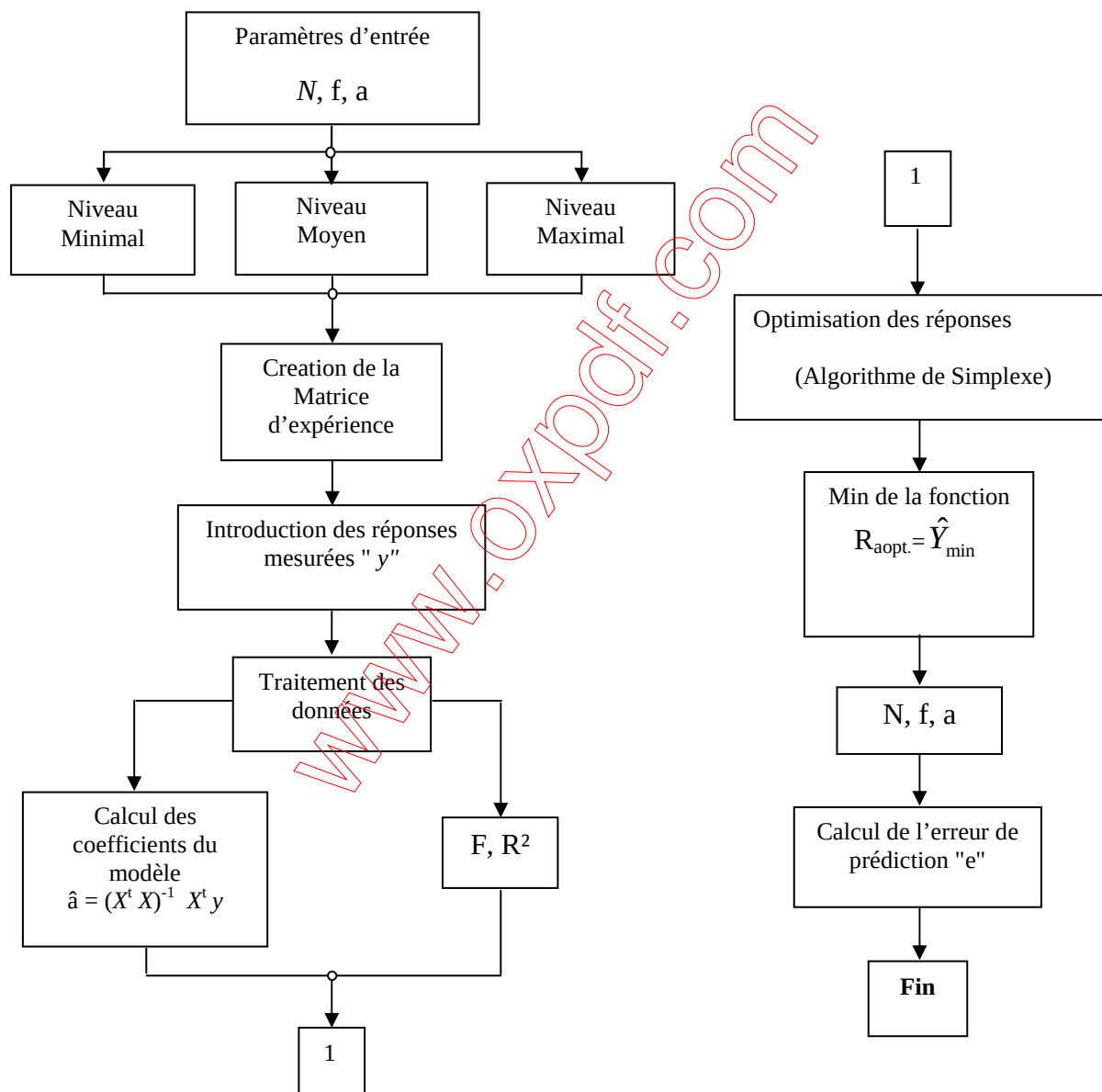


Figure II.9 Organigramme fonctionnel

Le traitement des données est réalisé par un programme [38], fonctionnant sous Matlab, selon l'interface présenté sur la figure II.10.

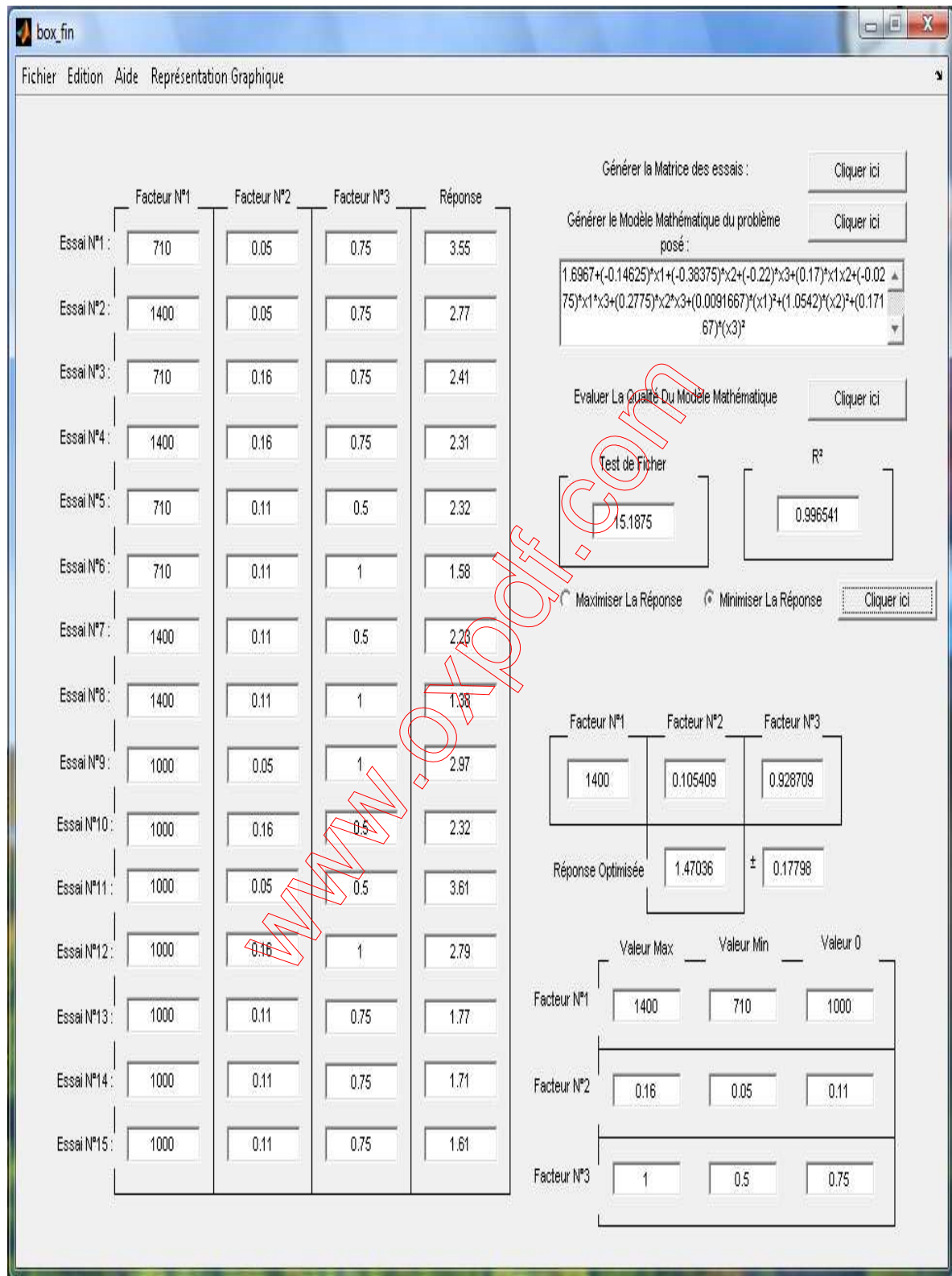


Figure II.10 Traitement informatique des données

Après traitement des données l'équation du modèle mathématique obtenue est:

$$Ra = 1.6967 + (-0.14625 \cdot x_1 + (-0.3837) \cdot x_2 + (-0.22) \cdot x_3 + (0.17) \cdot x_1 x_2 + (-0.0275) \cdot x_1 x_3 + (-0.2775) \cdot x_2 x_3 + (0.0091667) \cdot (x_1)^2 + (1.0542) \cdot (x_2)^2 + (0.17167) \cdot (x_3)^2$$

La qualité de ce modèle mathématique a été évaluée selon les critères statistiques R^2 et Fisher.

Les résultats sont considérés statistiquement valables au vu du critère d'ajustement R^2 qui tend vers 0.99, et le critère de Fisher $F_{cal}=15.1875$ qui est inférieur à celui du tableau $F_{tab}=19.2$ à ($v_1=3$ et $v_2=2$) à un niveau de confiance 95% voir annexe2 [39].

Ce modèle mathématique a permis d'obtenir des courbes d'iso-réponses illustrant la variation de Ra en fonction des paramètres des régimes de coupe (N, f et a) voir figure II.11.

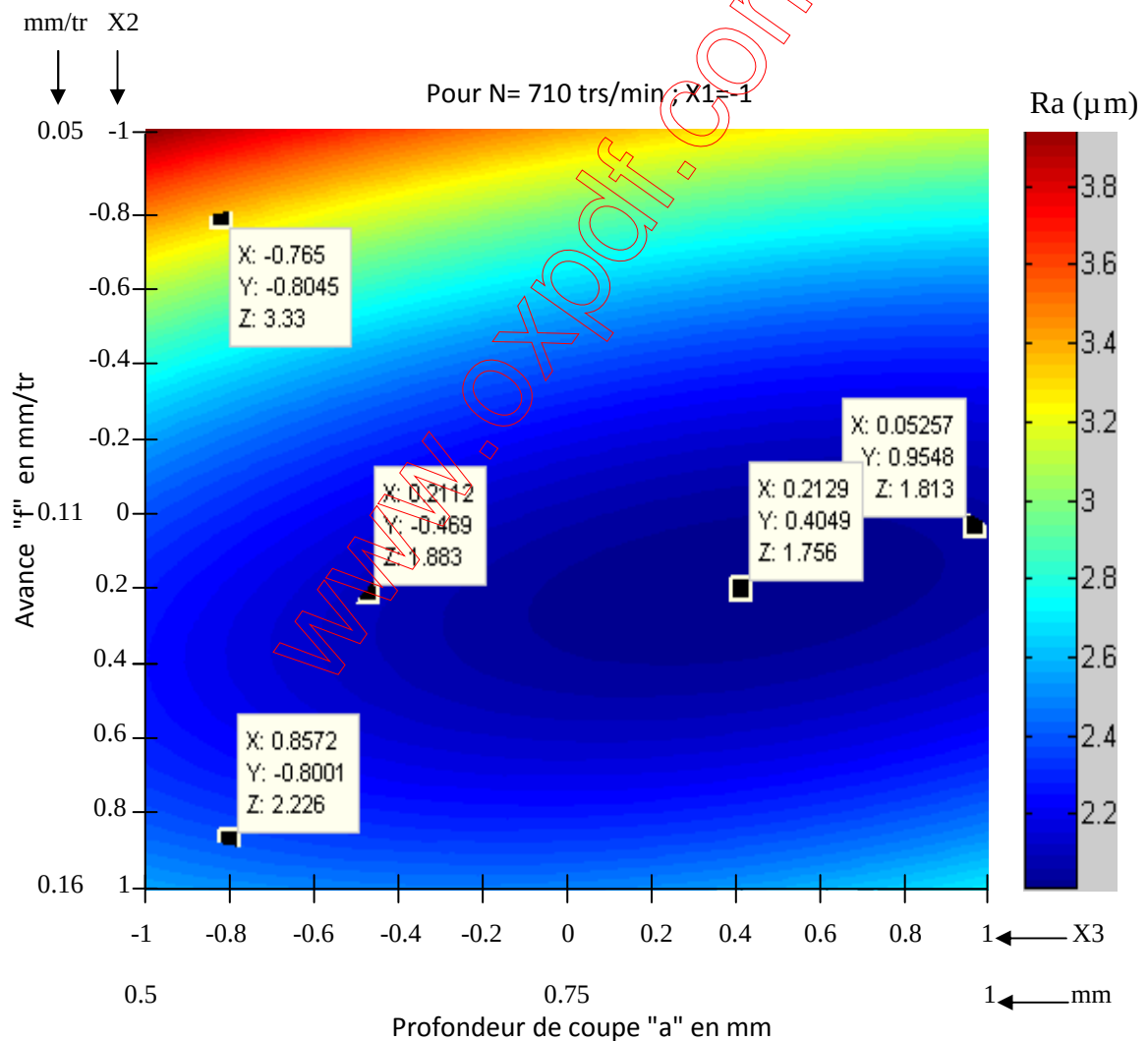


Figure II.11 Courbes d'isouréponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et la profondeur de coupe "a" au niveau de la fréquence de rotation N710 trs /min

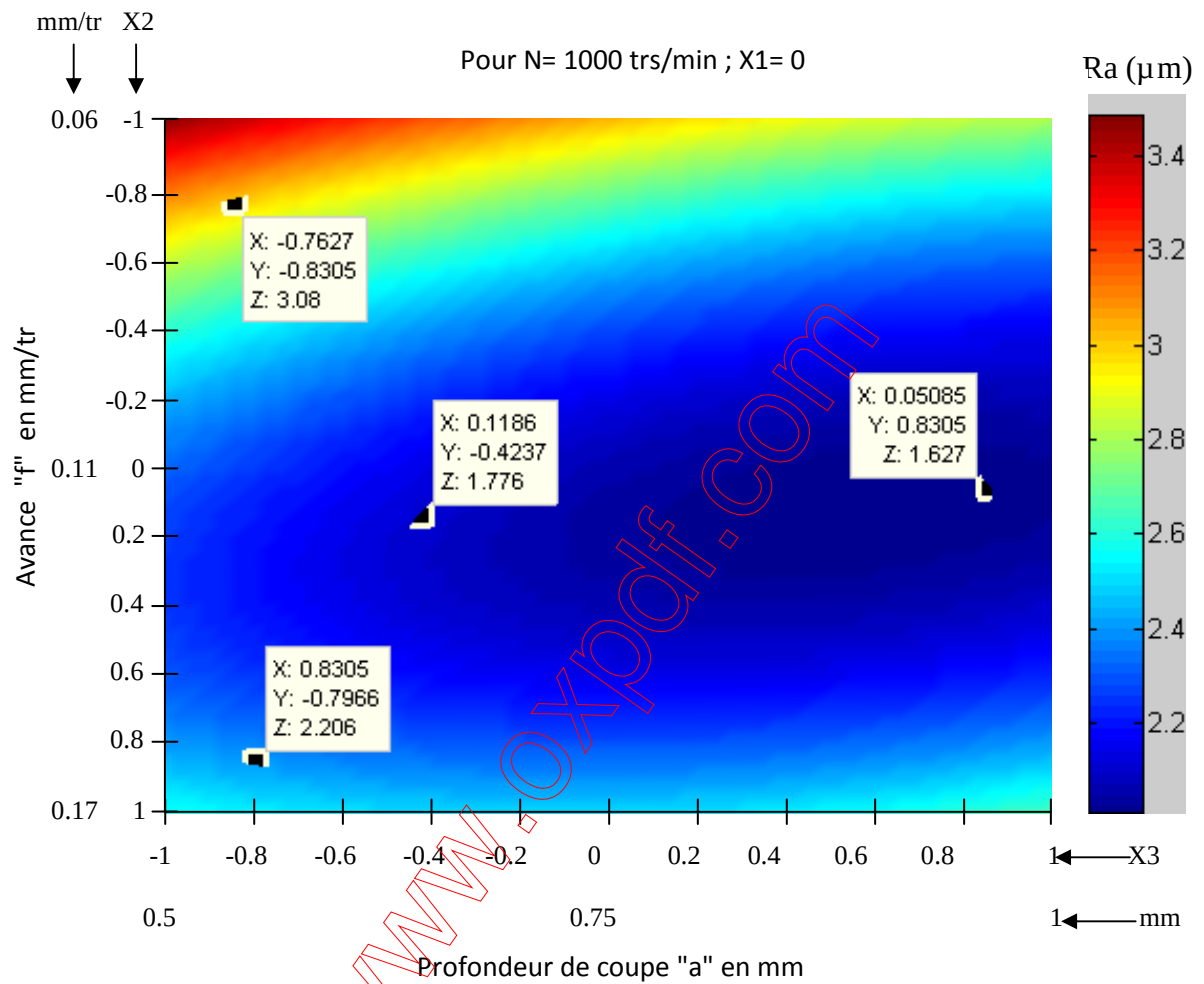


Figure II.12 Courbes d'isoréponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et la profondeur de coupe "a" au niveau de la fréquence de rotation N1000 trs/min

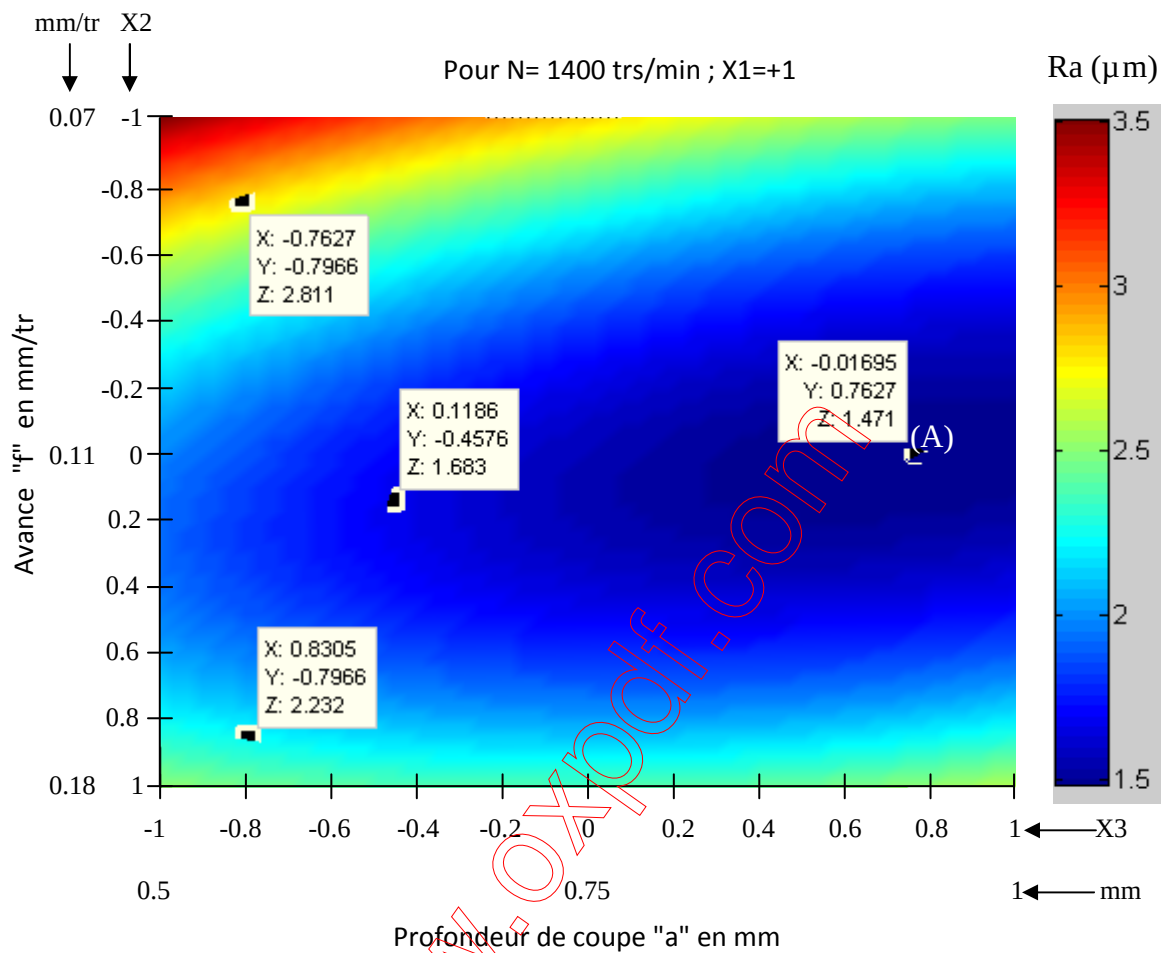


Figure II.13 Courbes d'isoréponses exprimant la variation de rugosité en fonction de l'avance "f" et la profondeur de coupe "a" au niveau de la fréquence de rotation N1400 trs/min

Les paramètres de régime permettant d'offrir une rugosité minimale $Ra_{\min} = 1,47 \pm 0,18 \mu\text{m}$, sont :

N= 1400 tr/mn

f= 0,105mm /tr

a= 0.92mm

Valeurs fournies par le programme et indiquées par le point (A) sur la figure II.13.

II.2.9 Interprétation des résultats

Les résultats peuvent être commentés comme suit :

- Pour la vitesse fixée à $N=710\text{ tr/min}$ (niveau -1), lorsque la profondeur de passe " a " augmente, et l'avance " f " variant autour de sa valeur moyenne, la rugosité tend à diminuer. Par contre avec l'augmentation de l'avance et la diminution de la profondeur de passe, la rugosité augmente, voir figure II.11.
- Pour la vitesse fixée à $N=1000\text{ tr/min}$ (niveau 0) voir figure II.12, quand la profondeur de passe " a " augmente, et pour les valeurs d'avance " f " moyennes, la rugosité est améliorée par rapport au cas précédant. Mais pour des valeurs d'avance élevées, et pour des faibles valeurs de profondeur de passe, la rugosité acquière des valeurs élevées.
- Pour la vitesse $N=1400\text{ tr/min}$ (niveau +1) voir figure II.13, on enregistre une amélioration de la rugosité par rapport aux cas précédents, pour des valeurs d'avance élevées, et même pour les faibles valeurs de profondeur de passe. Par ailleurs, cette amélioration de la rugosité peut atteindre ($R_a=1.47\mu\text{m}$). Ce résultat est acquis par une valeur d'avance " $f=0.105\text{ mm/tr}$ " proche de la moyenne et pour des valeurs de profondeur de passe " $a=0.92\text{ mm}$ ".

Donc en conclusion l'augmentation de la vitesse, ainsi que celle de la profondeur de passe ont un effet bénéfique sur l'amélioration de la qualité de surface, à l'inverse la forte augmentation de l'avance ainsi que sa diminution, agissent négativement.

II.3 Préparation de l'éprouvette d'essai

L'éprouvette d'essai de longueur $L=310\text{ mm}$ et de diamètre $D=45\text{ mm}$, est fixée dans un montage mixte suffisamment rigide, elle comporte 13 paliers de 20mm chacun, figure II.14. La finition de l'éprouvette est réalisée selon le régime de coupe obtenu par l'essai préliminaire, $N=1400\text{ tr/min}$; $f=0,105\text{ mm/tr}$; $a=0.92\text{ mm}$.



Figure II.14 Montage et préparation de l'éprouvette d'essai

A l'issue de l'opération de finition les valeurs de rugosité moyennes ont été relevé sur chaque palier voir tableau II.8.

Tableau II.8 : les valeurs mesurées de Ra

Rugosité	N° du palier												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ra_{moy}(μm)	1.23	1.21	1.09	1.01	1.17	1.03	1.49	1.55	1.41	1.29	1.03	0.97	0.86

II.3.1 Traitement par rectification

L'éprouvette ainsi préparée a subi une rectification en plongée au moyen d'une rectifieuse cylindrique universelle :

Type SA6/1UX300, Puissance 17KW avec 380V, 50Hz

Puissance du moteur d'entraînement de la meule : 2.2KW

-Caractéristiques de la meule

Dimension : 600X350X80

Nuance : 38A36L6V

-Régime de coupe

Le régime de coupe adopté [36] est :

Nmeule= 1200 trs /min

Nbroche= 100 trs/min

$f_t = 0,1\text{mm/trs}$ (avance transversale)

$a = 0,5\text{mm}$ (profondeur de coupe)

II.3.2. Brunissage à la bille en diamant

Ce procédé est réalisé sur tour par un brunissoir à pointe en diamant monté sur un dispositif voir figure II.15.

- Régime de traitement

Le régime adapté à ce type de traitement [40] et avec l'outil présenté sur la figure II.16 est :

$R_{bille} = 2,5\text{mm}$

$P = 140\text{N}$

$N = 500\text{tr/mn}$

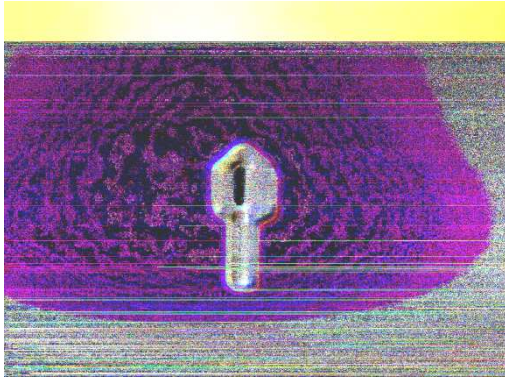


Figure II.16 Brunissoir en diamant

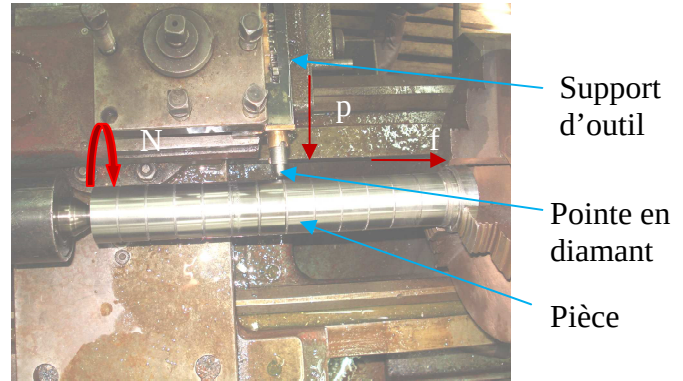


Figure II.15 Montage et traitement par brunissoir

Les différents paliers usinés sont présentés dans la figure II.17

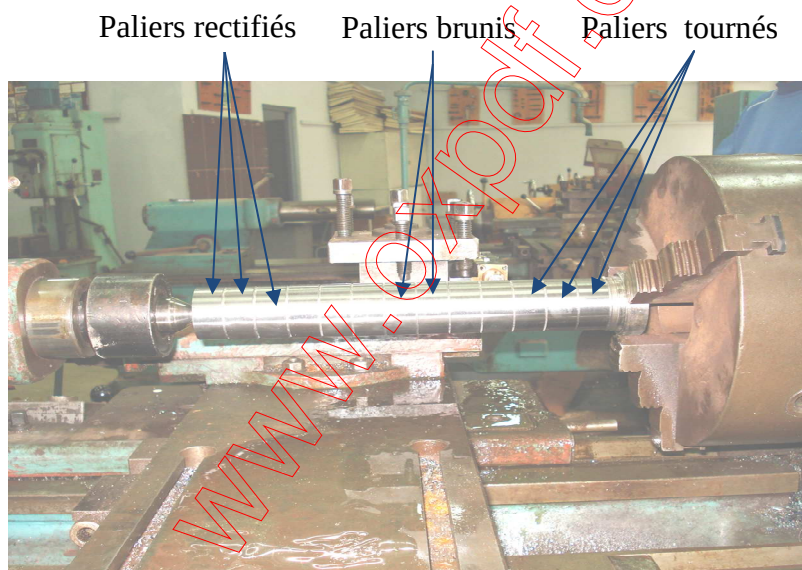


Figure II.17 Eprouvette traitée par différents procédés

Après traitement des mesures de rugosité ont été relevées sur chaque palier.

II.3.3 Procédure de mesure des rugosités et profils

II.3.3.1 Méthodologie de mesure

Des mesures de rugosité ont été effectuées sur huit génératrices de chaque palier comme indiqué sur la figure II.18

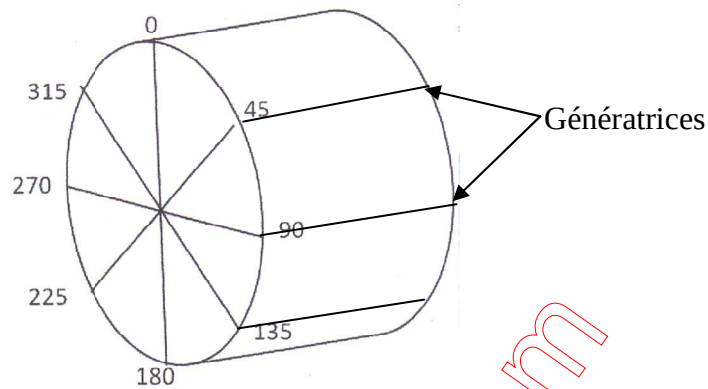


Figure II.18 : Génératrices de mesure de rugosité

La pièce est positionnée sur un vé et le palpeur repose sur le palier qu'on veut mesurer.

II.3.3.2 Appareil de mesure

L'appareil de mesure de rugosité utilisé est à palpeur en diamant, modèle MITUTOYO SJ-301 présenté sur la figure II.19. Les caractéristiques de l'appareil sont indiquées dans l'annexe3.



Figure II .19 Surf test sj-301

Les mesures des paramètres de rugosité (R_a , R_z , R_q et R_y) ainsi que les profilogrammes, obtenues pour les différentes surfaces réalisées par les différents procédés considérés sont présentées dans le paragraphe qui suit.

II.3.3.3 Rugosités et profils obtenus par les différents procédés de traitement

- Procédé de tournage

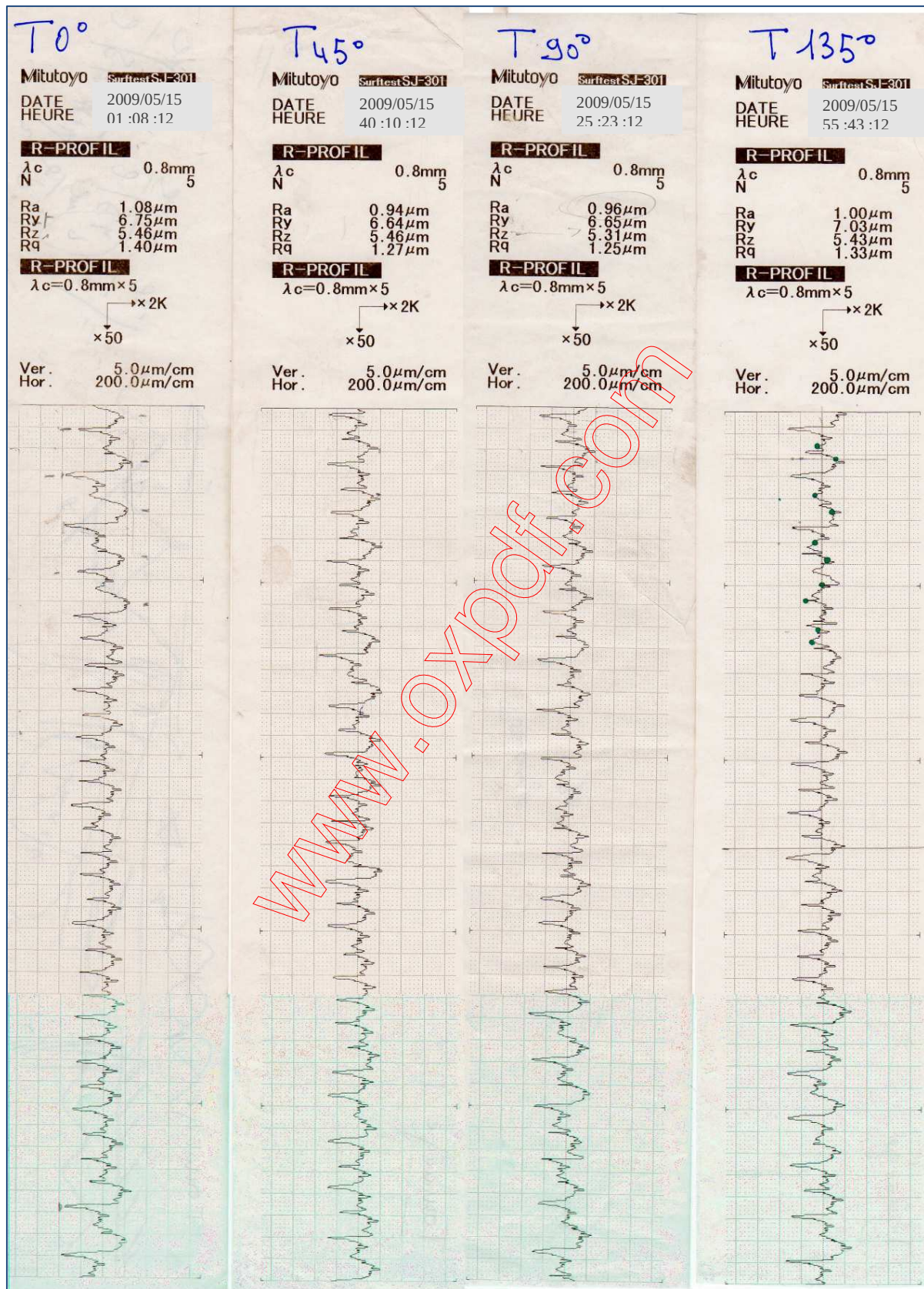


Figure II.20 Profils des rugosités pour le tournage entre 0° - 135°

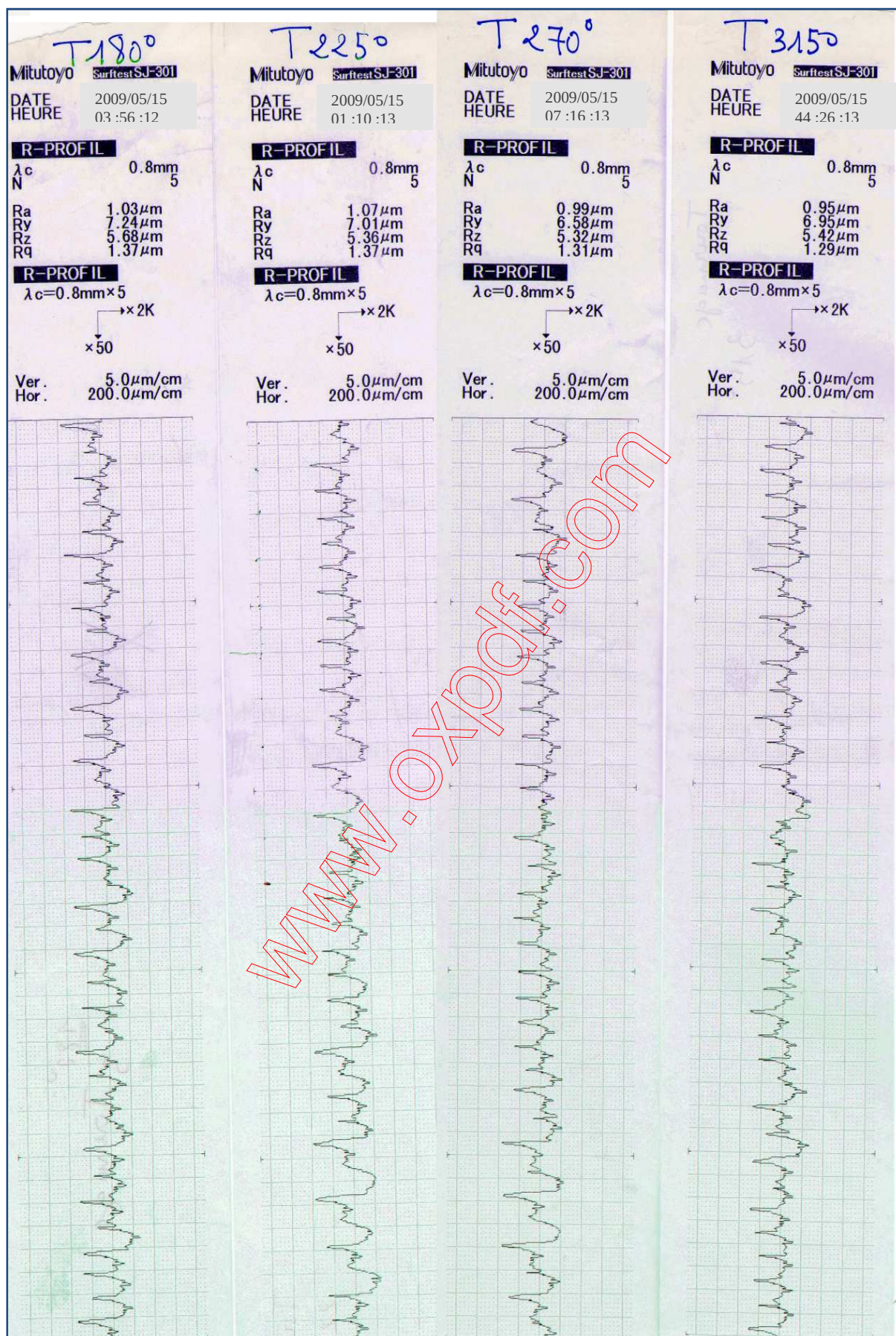


Figure II.21 Profils des rugosités pour le tournage entre 180° - 315°

- Procédé de rectification

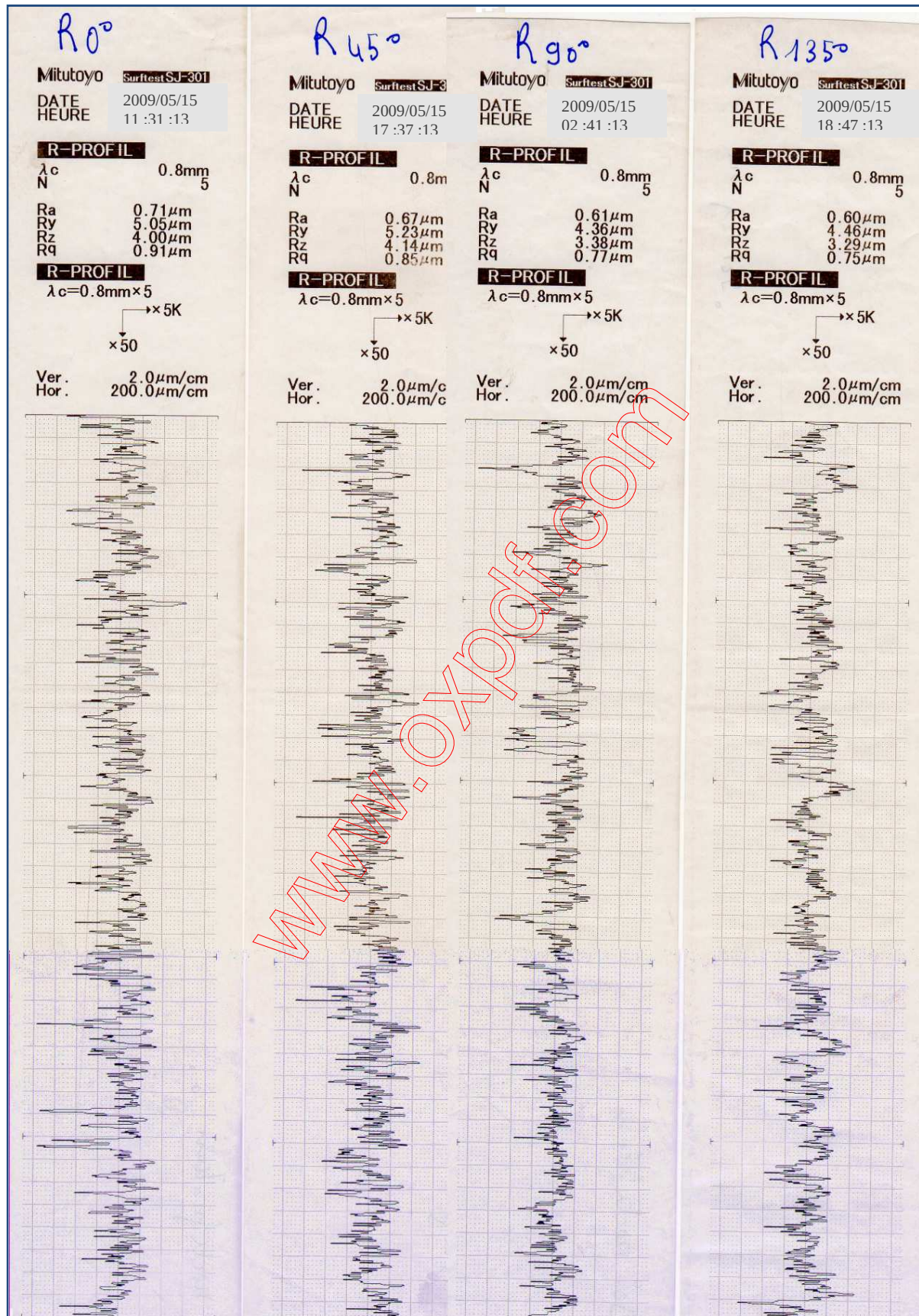


Figure II.22 Profils des rugosités pour la rectification entre 0° - 135°

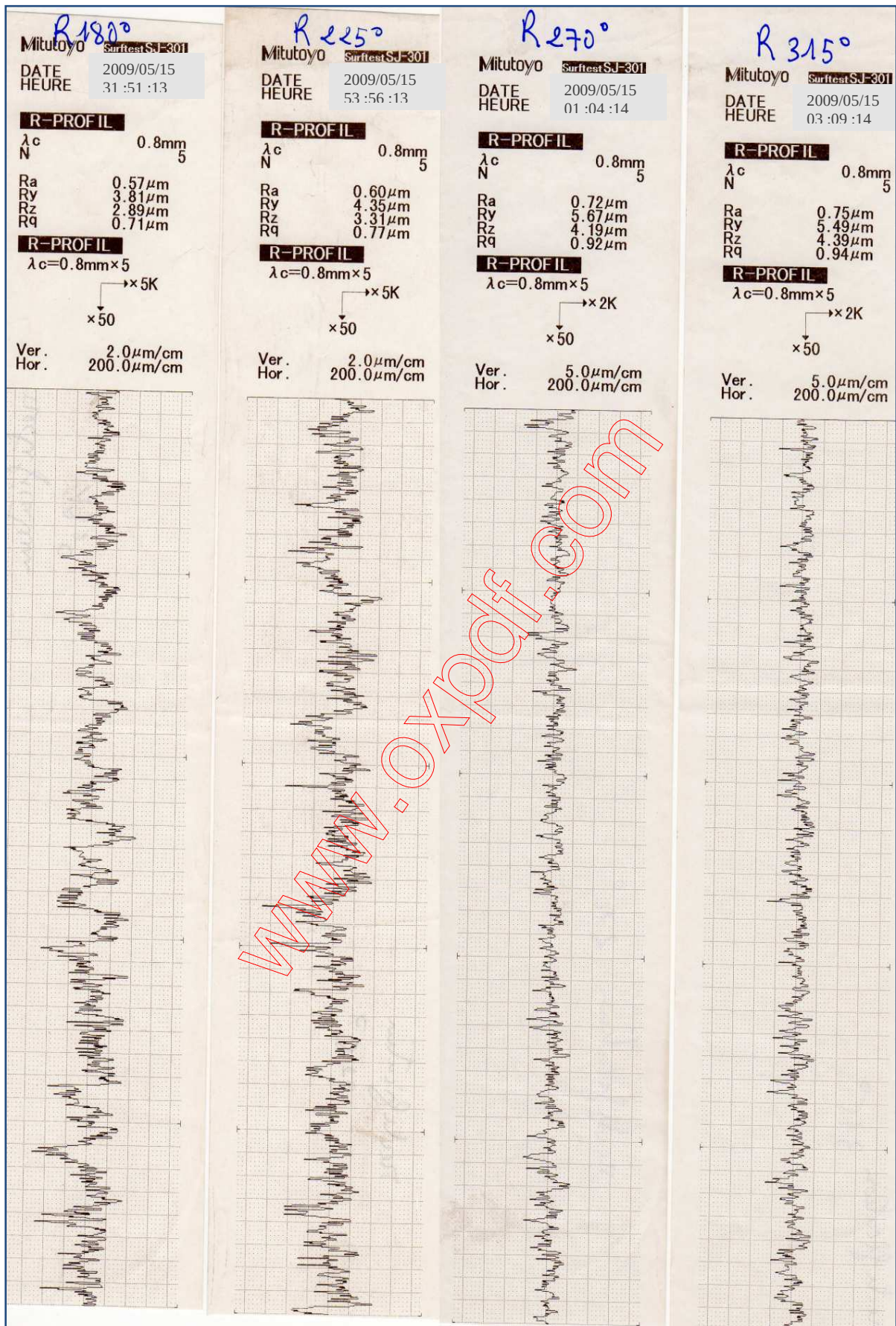


Figure II.23 Profils des rugosités pour la rectification entre 180°- 315°

- Procédé de brunissage

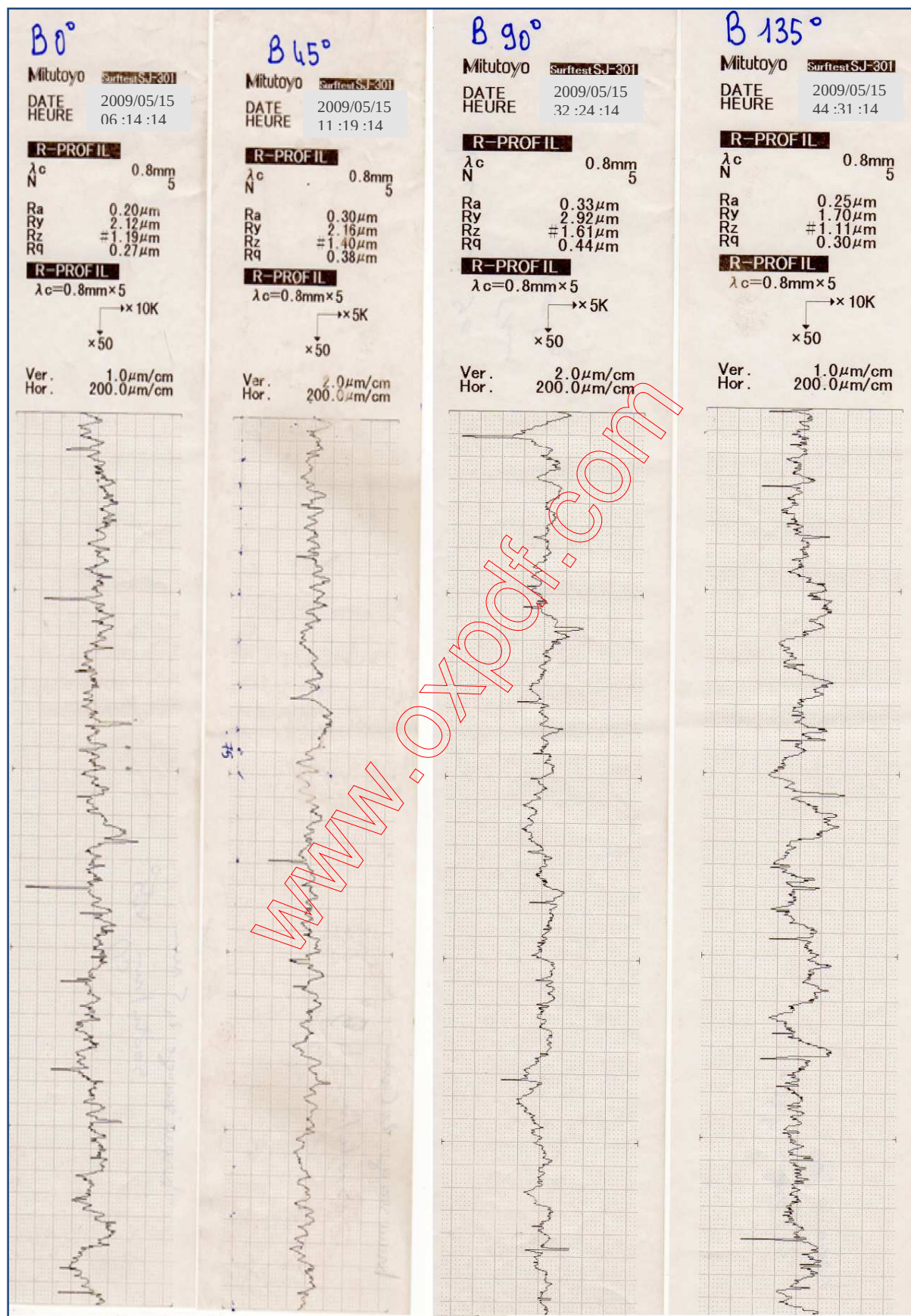


Figure II.24 Profils des rugosités pour le brunissage entre 0° - 135°

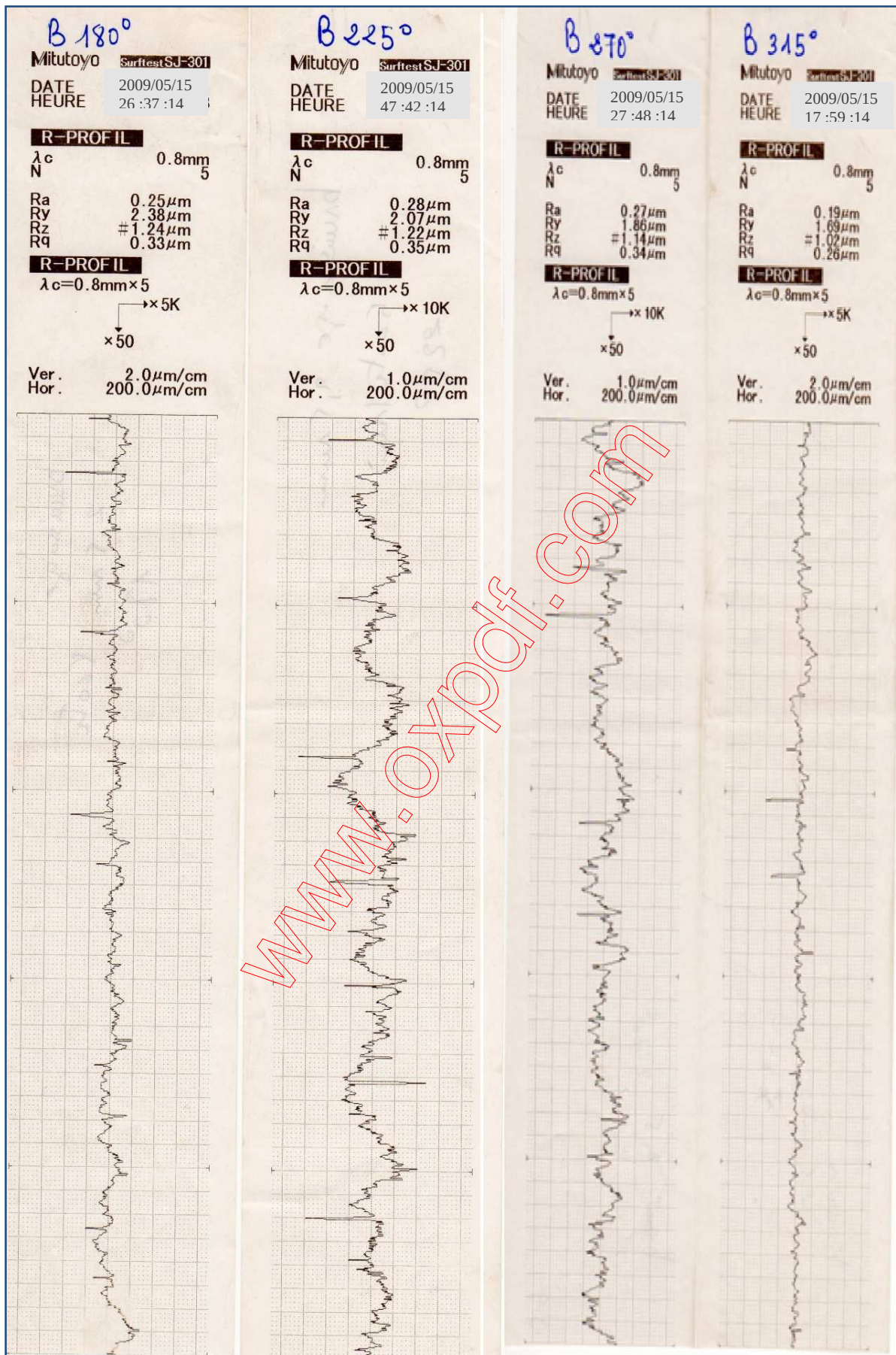


Figure II.25 profils des rugosités pour le brunissage entre 180°- 315°

-Valeurs des différentes rugosités pour chaque procédé

Tableau II.9: Valeurs de Ra, Ry, Rz, et Rq lors du tournage, rectification, brunissage

N° Génératrice	Traitement par tournage				Traitement par rectification				Traitement par brunissage			
	Ra	Ry	Rz	Rq	Ra	Ry	Rz	Rq	Ra	Ry	Rz	Rq
	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
1	1.08	6.75	5.46	1.40	0.71	5.05	4.00	0.91	0.20	2.12	1.19	0.27
2	0.94	6.64	5.46	1.27	0.67	5.23	4.14	0.85	0.30	2.16	1.40	0.30
3	0.96	6.65	5.31	1.25	0.61	4.36	3.38	0.77	0.33	2.92	1.61	0.44
4	1.09	6.88	5.58	1.42	0.60	4.46	3.29	0.75	0.25	1.70	1.11	0.30
5	1.03	7.24	5.68	1.37	0.57	3.81	2.89	0.71	0.25	2.38	1.24	0.33
6	1.07	7.01	5.36	1.37	0.60	4.35	3.31	0.77	0.28	2.07	1.22	0.34
7	0.99	6.58	5.32	1.31	0.72	5.67	4.19	0.92	0.27	1.86	1.14	0.34
8	0.95	6.95	5.42	1.29	0.75	5.49	4.39	0.94	0.19	1.69	1.02	0.26

-Variation de la rugosité sur les génératrices pour les différents traitements

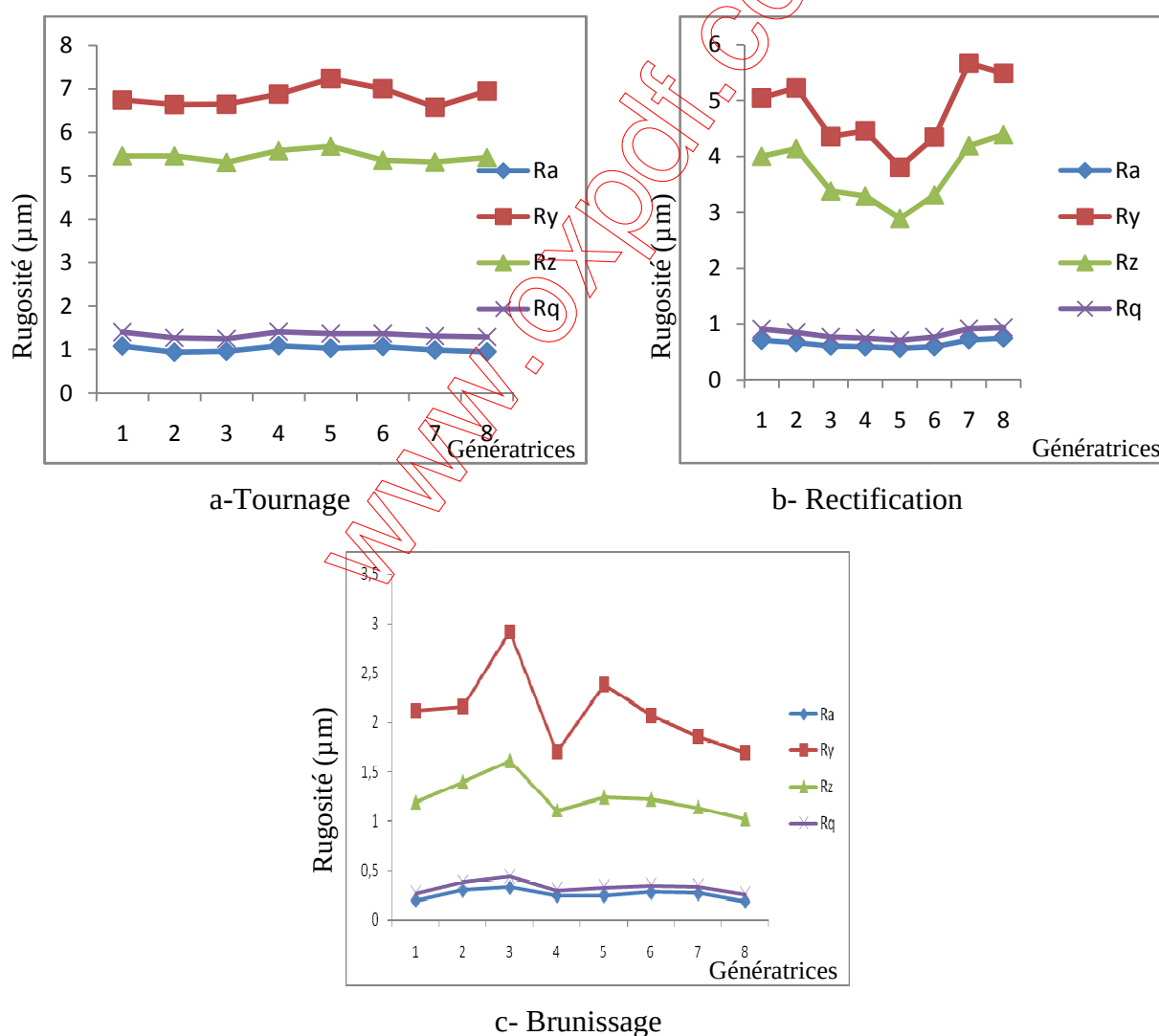
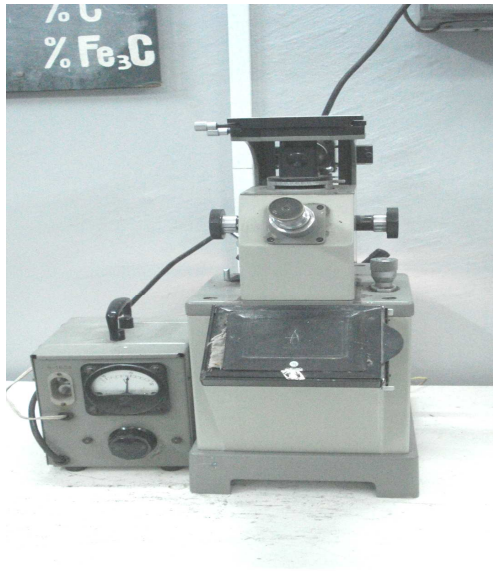


Figure II.26 Variation des rugosités lors des différents traitements

II.3.3.4 Observation macroscopique de l'aspect des surfaces usinées

L'observation de l'aspect macroscopique des surfaces obtenues par les différents traitements a été réalisée par un microscope métallographique voir figure II.27.



*Objectif : F= 23.2

*Oculaire : 15X

*Observation oculaire

*Objectif : F= 23.

Figure II.27 Microscope métallographique

Chaque procédé d'usinage a élaboré des surfaces d'aspect différent, voir figure II.28.

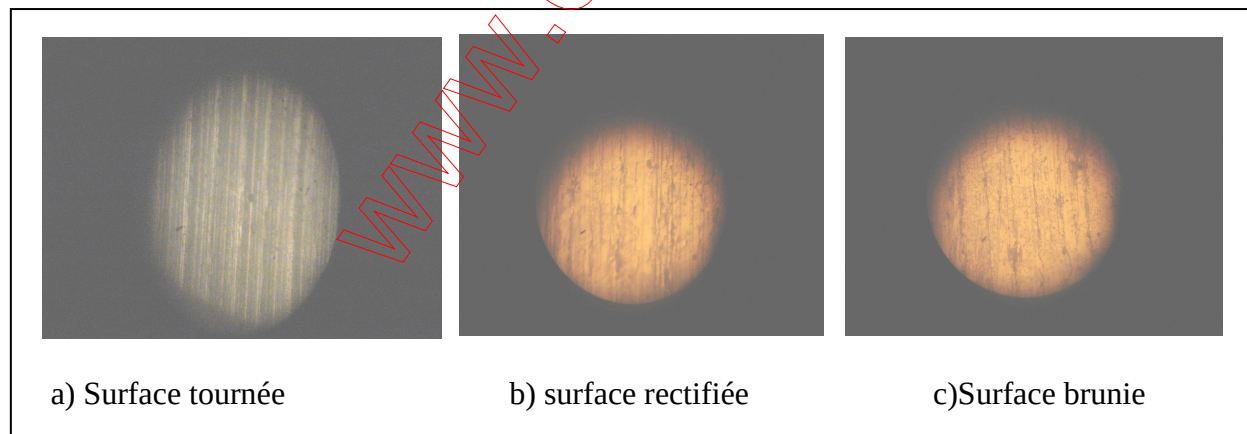


Figure II.28 Aspect macroscopique des surfaces, X130

Il ressort de ces observations que :

- La surface traitée par tournage est marquée par plusieurs sillons rapprochés les uns des autres avec des pics très prononcés ce qui est observé dans la figure II.28a. Ceci apparaît dans les figures II.20 et II.21, et où les valeurs de rugosité R_a et R_z atteignent respectivement

1.08 μm et 5.68 μm . Ceci peut s'expliquer par la pénétration de la pointe de l'outil dans le matériau de la pièce lors de la coupe, qui entraîne l'apparition des sillons, ce phénomène est connu lors des procédés de coupe à enveloppe (cas de chariotage).

- La surface traitée par rectification, les pics sont limés, où les rugosités R_z et R_a ont pour valeurs respectives 4.39 μm , 0.75 μm comme indiqué sur les figures II.22, et II.23. La qualité de surface est meilleure que le cas précédent ce qui est montré sur la figure II.28b. En effet, le passage des grains abrasifs (micro outils) de la meule sur la surface de la pièce, permet un usinage plus fin.

- Le brunissage qui agit par déformation plastique superficielle, permet le nivellement des crêtes des rugosités d'une part et la pénétration de la pointe en diamant de faible rayon dans les creux d'autre part, améliore la qualité de la surface comme présenté dans la figure II.28c. Cette amélioration est caractérisée par les valeurs de rugosités $R_a=0.33\mu\text{m}$ et $R_z=1.61\mu\text{m}$, enregistrées sur les figures II.24 et II.25. Par ailleurs, ce type de traitement engendre des ondulations dans l'aspect micro géométrique de la surface, ce qui peut présenter des avantages dans un contact mécanique.

II.4 Conclusion

D'après les résultats obtenus, le tournage a donné des surfaces de qualité, à titre d'exemple $R_a = 0.94\mu\text{m}$ voir figure II.20 profil à 45°, donc on peut conclure que si on arrive à maîtriser les paramètres d'usinage, a bien optimisé le régime de coupe, faire un bon choix de l'outillage, et de la machine outil, on peut obtenir des surfaces de bonne qualité et qui répondent aux exigences techniques et fonctionnels, sur les quelles on peut effectuer directement les opérations de traitement mécanique par déformation, sans passer par la rectification. Ce qui va permettre l'économie de la matière, la minimisation du coût de fabrication, et de guider le fabricant dans le choix du procédé d'élaboration de surface.

CHAPITRE III

TRAITEMENT INFORMATIQUE DES

DONNÉES

III.1 Introduction

La maîtrise des états de surface des produits manufacturés représente pour l'industrie un enjeu d'importance pour la réussite des opérations de transformation et la qualité de surface. Cette dernière constitue un des critères, exigée par l'utilisateur [41], en effet la topographie de surface qui est représentée en particulier par la rugosité est l'un des facteurs qui entre en jeu dans les phénomènes de corrosion, usure, frottements, lubrification. Donc la caractérisation de la rugosité et sa définition en 3 D correspond à un réel besoin [d'après M.MILLET], de nombreux industriels s'y voient des ouvertures pour mieux comprendre le comportement des surfaces [12]. Ceci permet de proposer à l'aide d'outils informatiques l'étude de la topographie de surface réalisé par les différents procédés. Dans ce contexte, on se propose dans ce chapitre de développer des programmes sous matlab7.0 [42], afin d'exploiter les profils des rugosités obtenus dans la partie expérimental. Le but de ces programmes, dans un premier temps est d'élaborer à partir des profils de rugosité des différentes surfaces, l'aspect réel en 3D ; en second temps d'estimer le pourcentage des points de contact entre deux surfaces afin de simuler une opération de rodage, ainsi que le calcul du rapport " $\frac{h}{\sigma}$ " définie selon [43], qui permet de déterminer l'importance de la rugosité sur la lubrification.

III.2 Programme réalisant les surfaces en 3D

Ce programme permet grâce aux données obtenues à partir des profils réels de rugosité en 2D, de générer les surfaces en 3D afin d'apprécier la texture microscopique des surfaces réalisées par les différents procédés utilisés [44]. Les valeurs de rugosité Z sont relevées point par point sur les profils sous forme de matrice suivant la longueur de la génératrice de mesure X, et le long de la ligne directrice Y.

III .2.1 Présentation des données

Les données d'entrées sont exposées dans ce qui suit :

X : Longueur de mesure (génératrice)

$$X = (0 : 0.25 \div 14,75) 10^4 (\mu\text{m})$$

$0.25 \cdot 10^4$: pas entre deux points (μm)

Y : La ligne directrice

$$Y = R(i) \pi / 4 \quad R : \text{rayon de la pièce } (\mu\text{m})$$

i: le numéro de la génératrice sur laquelle est effectuée la mesure voir figure III.1, $i = 0 : 7$

A chaque fois qu'on pivote la pièce d'un angle de 45° on incrémente $i = i + 1$

$$Y = [0 ; 1.7662 ; 3.5324 ; 5.2986 ; 7.0648 ; 8.8310 ; 10.5972 ; 12.3634] 10^4 \mu\text{m}$$

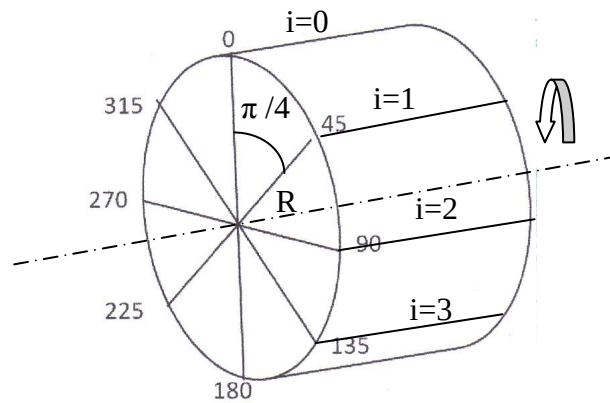


Figure III.1 Schéma de mesure des rugosités

Les valeurs de rugosité Z (μm) de chaque surface sont représentées par les matrices suivantes :

MT : matrice des valeurs de rugosité de la surface traitée par tournage

MR : matrice des valeurs de rugosité de la surface traitée par rectification

MB : matrice des valeurs de rugosité de la surface traité par brunissage

▪ **Matrice des valeurs de rugosité en tournage**

MT = [-1.5 2 0.5 1.5 0 2.5 0 -1 -1 1.5 2.5 -2.5 0 -1.5 2 0 1 -0.5 2.5 -1.5 0 -0.5 1 0.25 0 1.5 1 1 0 1.5 0.5 0.5 0 0.5 0 1 0.5 -1.5 -0.5 -1.5 1 -0.5 1 0 1 0.5 1 0 -0.5 0.5 0 1.5 -0.5 0.5 1 1.5 -1 1.5 0 1.5 ; 0 -1 -0.5 -1 1 2.5 1 0 1.5 2 -0.5 0 -1 1.5 0 1 0 2 0 1 0 2 1 -1.5 -0.5 1 2 -1.5 0.5 -0.5 0 1.5 -0.5 0 1 1.5 1.5 0 -0.5 0 1 -1 -0.5 0 2 0 -0.5 1 1 0 0.5 0.5 1 0 1 0.5 1 0 1 0 ; 1.5 -1.5 -0.5 1 1.5 0.5 0.5 0 -1.5 1.25 0.5 1 -1 -1 1.5 0.5 0 -0.5 0.5 -1 0.5 0.5 1.5 -1 1 0 1.5 1.5 -1 0 0 1 1.25 0.5 -1 0.5 0 -0.5 -1 1 0.5 -0.5 0.5 1 1.5 -1.5 1.5 0 0.5 -0.25 1 1 1 0.5 0.5 -1 -0.5 0.5 1 -1 ; 1 1 2 0 0.5 -1 0 0.75 -1 1 0.5 2 1 0 -0.5 2 1.5 -1 0 1 1.5 -1 1 -1 1.5 1 -0.5 0 0 1 1.5 1 -1 2 1.5 -0.5 -0.5 1 2 -1.5 0 1.5 1 -1 0 1 2 0.5 0 0.5 0 1 -0.5 0.5 -1 0.5 -1 1.5 0 1.5 ; 0 -0.5 -1 0 1 -1 1 -0.5 1.5 1 -1 2 -1 1.5 1 1 0.5 1 0 2 0 -0.5 0 -1 2 -2 1 1 0.5 1.5 -0.5 -0.5 0 1.5 0 0.5 0.5 1.5 -0.5 1.5 0 2 0 0.5 0 2 0.5 -1 0 -0.5 1.5 1.5 0 0.5 0.5 0.5 -1 1 0.5 1 ; 0 -1 1 1 -1 1 -1.5 1.5 0 0.5 -0.5 0 0.5 1 0.5 -0.5 1 -1 1.5 -1 1 0.5 1 0 0.5 0.5 -0.5 -1 1.5 1.5 -1.5 0.5 -1 -1 1.5 0 0.5 -1 1 1.5 0.5 1.5 0 0.5 -0.5 0.5 1 1 0.5 -0.5 1.5 1.5 1 1 0 1.5 1.5 -1.5 -1 0.5 ; -1 2 -1 0 0 1 -0.5 0.5 -1 1 1.5 -1 1 0.5 1.5 0 -0.5 1 -0.5 1.5 1 -0.5 0.5 -1 0.5 0 1 0 0.5 1 1 1.5 -0.5 1 0 0.5 -0.5 1 0.5 0.5 1 0.5 0.5 -1 0 -0.5 -0.5 1 1 1.5 0.5 1 0.5 1 0 0.5 0 1 1.5 0.5 ; 0 2 1.5 -1.5 1 -1.5 0 -1.5 1.5 -0.5 1 0.5 2 0 -0.5 -1 2 1.5 0 -1 1.5 1 0.5 0 0.5 1 0.5 0.5 -0.5 1.5 0.5 0. 50 1 2 0.5 -0.5 0 0.5 -1.5 0 0 1 -1.5 -0.5 -1 1.5 1.5 0.5 0 -0.5 0 -1.5 -0.5 -1 0.5 -0.5 1 1 1.5];

▪ **Matrice des valeurs de rugosité en rectification**

MR=[0 -0.4 0 0.2 -0.4 0.6 0 0.4 0.6 -0.4 -0.2 -0.6 0.8 0.8 0.2 -0.6 0.4 0.4 0 0.8 0.8 0.2 -0.2 0.6
0.4 0.8 0 -0.2 0.4 0.6 0.8 -0.4 -0.6 -0.4 0.6 0.6 0 -0.8 0.8 0.6 0.2 0.2 -0.2 0.4 0.6 -0.6 -0.2 0.8
0.8 -0.6 0.8 0.8 0.6 0.6 0 -0.4 0.8 -0.2 0.6 0.6; -0.6 0.8 0 -0.2 0 0.6 -0.4 0.2 0 0.2 0.8 0.4 0 -0.6
0.8 -0.2 0.6 0 0.6 0 -0.6 0.6 0.6 0.4 0.8 0.8 0.4 0.4 0.8 0 0.4 0.4 0.8 0.4 0.2 -0.4 0.8 -0.4 0.8 -
0.2 0 -0.4 0.8 -0.2 -0.6 0 0.2 0.8 0.8 -0.2 0.4 -0.8 -0.2 0.2 0.8 0.4 0 0.8 0.4 0.4; -0.2 -0.4 0.6
0.4 0 -0.8 0.4 0.6 0 0 0.4 0.4 -0.4 0.8 0 0.2 0 -0.2 0.8 -0.4 0 0.4 0.2 0.6 0.8 0.8 0 0.4 -0.8 0.8
0.6 0.2 0.2 -0.2 0.4 0.2 0.4 0.8 0.2 0.4 0.6 0.8 0.8 -0.8 0.8 0.6 0.2 0.6 0.2 0.4 0.8 -0.4 0.4 0.4
0.8 0 -0.4 0.6 0.4 0.4 ; 0.8 0 0.2 -0.6 0.8 0.6 0.8 -0.2 -0.2 0 0.4 0 -0.6 0 0.6 -0.4 0.6 -0.4 0.4 0
0.8 0 0.6 -0.2 -0.8 -0.4 0.4 0.6 0.6 0.4 0.4 0.6 0.6 0.8 -0.2 0 -0.4 0.8 0.4 -0.2 0.4 0.4 0.8 0 0.2 0
0.4 0.6 0.6 -0.2 -0.4 0.4 0.4 0.2 0 0.8 0.4 -0.4 0.4 0 ; 0.6 0.4 0 0.4 0.2 0.2 0 -0.4 0.4 0.8 0 0.4
0 0.8 0.4 -0.8 0 0.6 0.8 0.4 -0.6 -0.4 0 0.6 0.6 -0.2 0.8 -0.2 0.8 0.4 0.4 0 -0.4 0 0.8 -0.4 -0.2 -
0.6 0.8 0.8 0 -0.4 0.8 0.2 -0.4 -0.6 0.8 0.6 0.4 -0.8 0 0.6 0.4 0.4 0.2 0.8 0.2 0.4 0.2 0.4; 0 0.8
0.4 0 -0.2 0.4 0.2 0.4 0 -0.2 0.4 0.6 0 0 -0.6 -0.8 0 -0.2 0.6 0.6 0 0.2 0.6 0.8 0 -0.2 0.8 0.8 -0.4
-0.6 0 0.4 0.6 0 -0.2 0.4 0.4 0.4 -0.2 0.6 0.6 0.8 0.6 0.4 0 -0.4 -0.6 -0.2 -0.8 0.4 0 0.4 -0.8 0 0 -
0.2 0.8 0.4 0 -0.4; 1.5 -0.5 1 1 0.5 0 0 1 0 0.5 -0.5 0 0 1.5 1 -1 0.5 -0.5 0.5 1.5 -1.5 -0.5 1 -0.5
0 0.5 1 0.5 0 1 0 0.5 1 1 0.5 -1 0.5 1 0.5 1 -0.5 0.5 0.5 1 1.5 0.5 0 0.5 0 1 0 0 1 1.5 1 1 0 1
0.5 ; 0 0.5 -0.5 0 -1.5 1.5 -0.5 1 0.5 0.5 -1 1.5 0 0 1 -1 -0.5 1 1.5 1.5 -1 0.5 1 0.5 1 1.5 -0.5 -1
0 1.5 -0.5 0 -1 1 0.5 0 -0.5 0 -1 -1 0.5 1.5 0.5 0.5 0.5 1 -0.5 0.5 1 0 0.5 -0.5 1.5 0.5 0 1 0 0 0]

▪ **Matrice des valeurs de rugosité en brunissage**

MB = [-0.2 0.1 -0.1 -0.2 -0.2 0.2 0.1 0.2 0.2 0.1 0.2 0.2 -0.2 0 -0.1 0.1 0 -0.2 0.1 0.1 0 0.2 -
0.2 0 0 -0.2 -0.1 0 0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.1 0.2 0 0.2 0.2 0.2 -0.1 0 -0.1 0.1 -0.1 0 0.2 0.2 0.1 0
0.2 0 -0.1 0 -0.2 -0.1 0 0.1 -0.2 -0.2 0 ; 0.2 0 0.2 -0.2 -0.4 -0.5 0 0.4 -0.2 -0.2 0 -0.2 -0.2 0 0.2
0.4 0.2 0.4 0.2 -0.2 -0.4 0 0 0.4 0.2 -0.4 0.6 0.6 0.6 0.4 -0.2 -0.4 -0.6 -0.2 0.2 0.4 0.6 0.2 -0.2 -
0.4 -0.2 0 0 0.4 0.2 0.2 0 0.4 0.4 0.2 0.6 0 0.4 0.2 0.2 0 -0.2 -0.4 0.4 0.4; 0.4 0 -0.6 0 0.2 0.4 -
0.2 0.5 0 0.4 0 -0.2 0 0 -0.2 -0.2 -0.2 0 0 0.4 0.4 0 0 0 -0.4 -0.2 0 0.2 0.6 0.2 0 0.4 0 0.2 -0.2 -
0.4 -0.4 -0.4 0 0.4 0 0.2 0.6 0.2 0.4 0.2 0 0 -0.2 0.4 0.4 0.4 0 -0.2 0 0.4 0.4 -0.2 -0.4 0 ; -0.2 -
0.2 0 0.2 0.2 -0.2 0 0.2 0.2 0.2 0.1 0 0.1 0 -0.1 -0.2 0.1 0.3 0.3 0.3 -0.2 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.3 0
-0.3 -0.3 -0.4 -0.4 -0.3 0 0.1 0.3 0.2 0.1 0.2 0.3 0.2 0 0.2 0.2 0.3 0 -0.2 -0.3 0 0.3 0.3 0.3 0.2
0.2 0.1 -0.1 -0.2 -0.3 -0.4 0.1 ; -0.2 0.2 0.4 0.2 0 -0.2 0 -0.2 0 -0.2 0 -0.2 0.2 0 0.2 0.4 0.4 0.4
0.4 0.2 0 0 0.2 -0.2 0.2 0 0.2 -0.2 0.2 0 0.2 0.4 0 -0.2 -0.6 -0.4 0 0.2 0 0.2 0.4 0 -0.2 0 0 0 -0.2
0.2 -0.2 0.2 0.4 0.4 0.2 0.4 0.4 0.2 -0.2 -0.4 0 -0.4 ; -0.2 -0.2 0 0.2 0.2 -0.2 0 0.2 0.2 0.2 0.1 0
0.1 0 -0.1 -0.2 0.1 0.3 0.3 0.3 -0.3 -0.2 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.3 0 -0.3 -0.3 -0.4 -0.4 -0.3 0 0.1 0.3

0.2 0.1 0.2 0.3 0.2 0 0.2 0.2 0.3 0 -0.2 -0.3 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.2 0.1 -0.1 -0.2 -0.3 -0.4 ; 0 -0.3
-0.4 -0.2 0 0.2 0.2 0.1 0.1 -0.2 -0.2 0.2 0.2 -0.3 0 -0.1 0 -0.1 -0.2 0 0.2 0.3 -0.1 0 0 -0.2 -0.3 -
0.1 0 0.2 0.3 0.3 0.3 0.3 0.2 0 -0.1 0 -0.2 -0.4 -0.2 -0.2 0 0.1 0.2 0.1 0.3 0.3 0.1 0.1 0 -0.2 -0.3
-0.3 0 -0.1 -0.10 0.3 0.3 0.3 ; 0.4 0.4 0 0.4 0 0.4 0.2 -0.2 0 0.2 -0.2 -0.3 0 -0.2 -0.2 0.2 0.4 -0.2
0 0.4 0.6 0.4 0.2 -0.2 -0.4 -0.4 -0.2 0 -0.2 0 0 0.2 0 0 0 0.4 0.2 -0.2 0.2 0.4 0 0.4 0 0.2 -0.2 0.2
0.4 0.2 0 0.2 0.4 0.4 0.2 -0.2 0 0.2 0.2 0.2 0 0]

III.2.2 Organigramme

Le déroulement du programme est réalisé selon l'organigramme présenté sur la figure III.2.

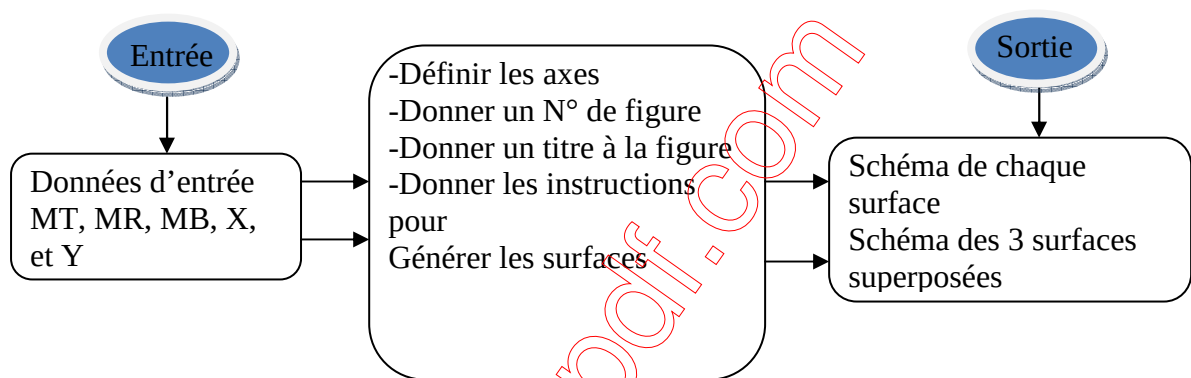


Figure III.2 Etapes d'élaboration des surfaces en3D

Indications

Surft : surface traitée par tournage
Surfr : surface traitée par rectification
Surfb : surface traitée par brunissage

III.2.3 Algorithme

Les différentes étapes d'exécution du programme sont indiquées sur la figure III.3, le programme est présenté dans l'annexe 4

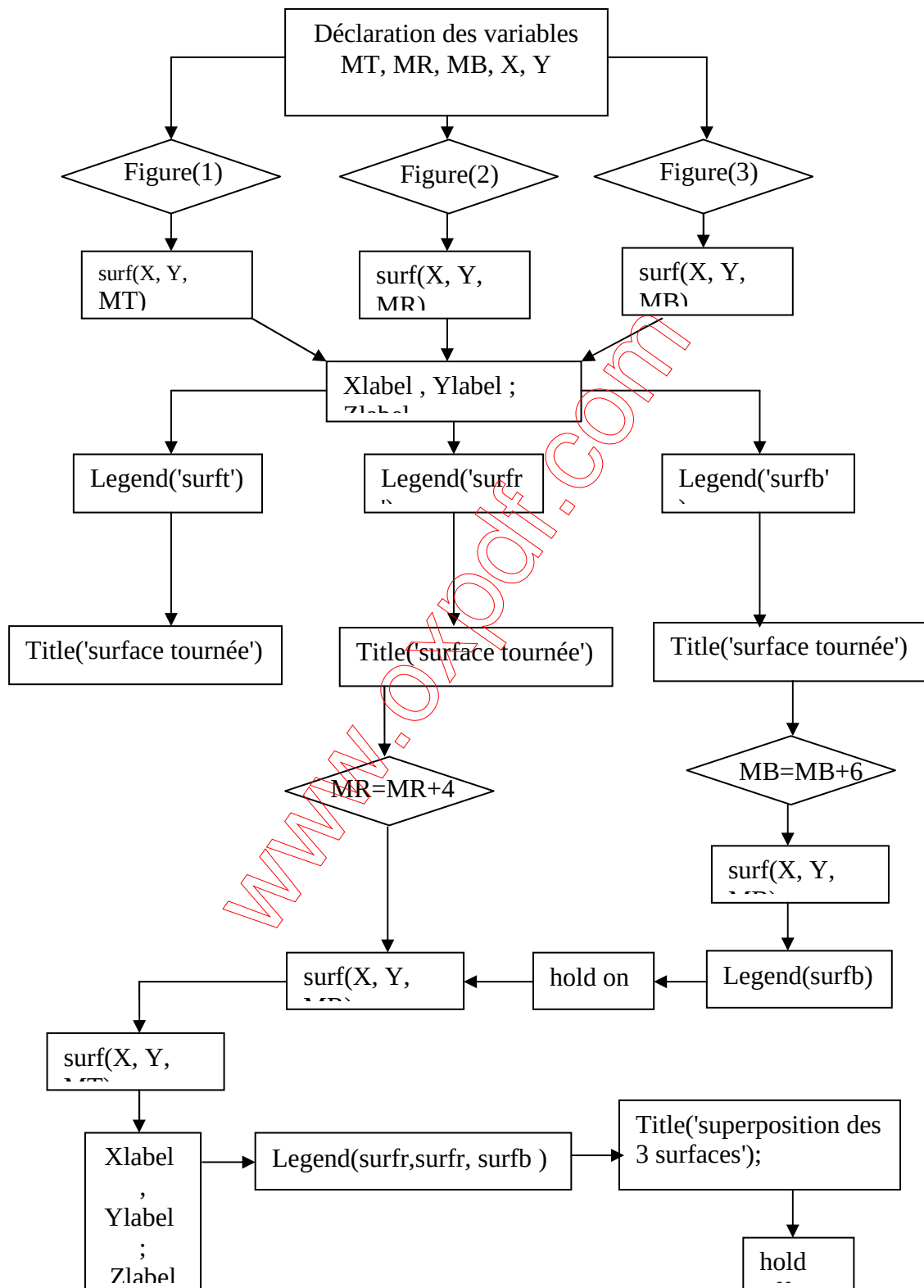
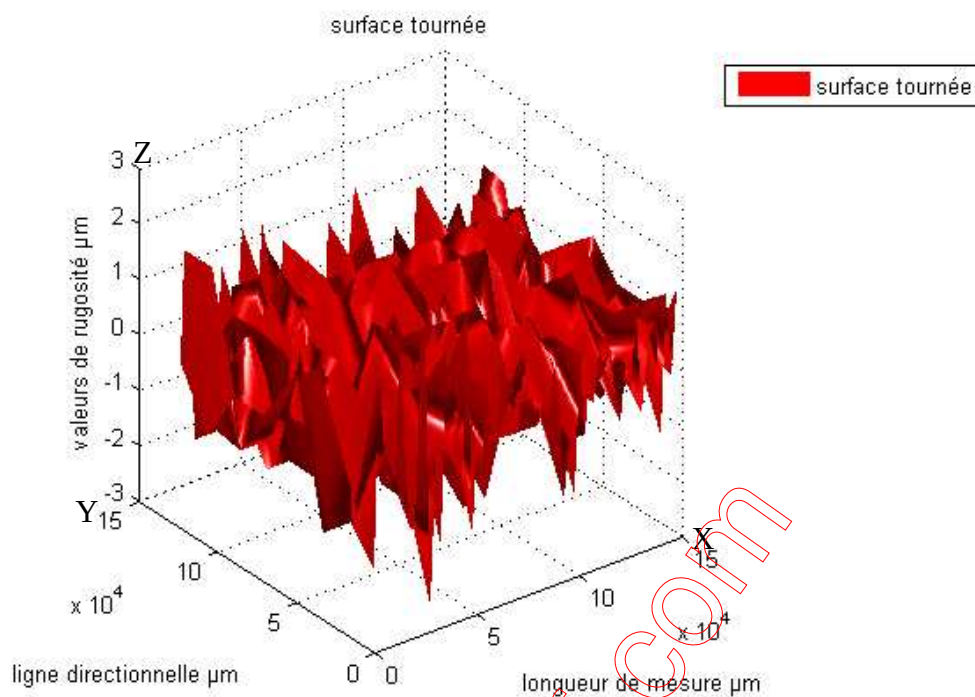


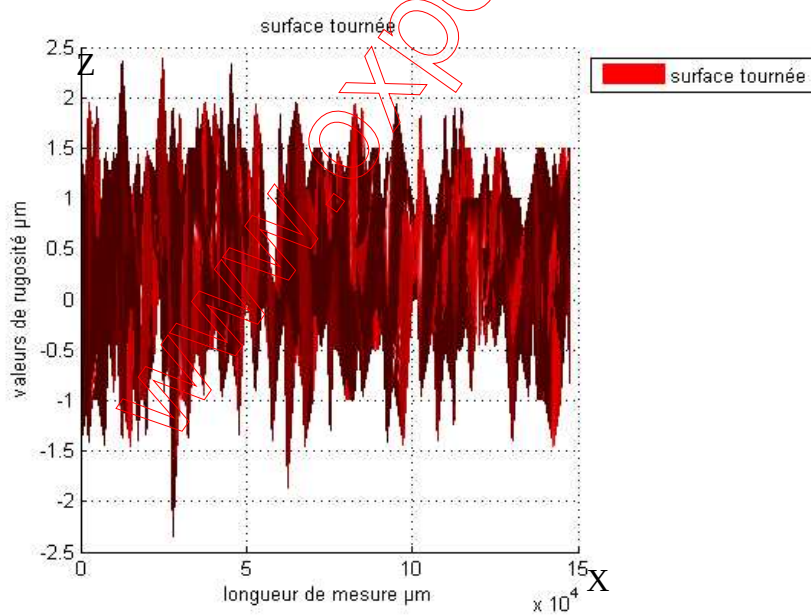
Figure III.3 Algorithme réalisant les surfaces en3D

III.2.4 Représentations graphiques des surfaces en 3D

III.2.4.1 Surface traitée par tournage



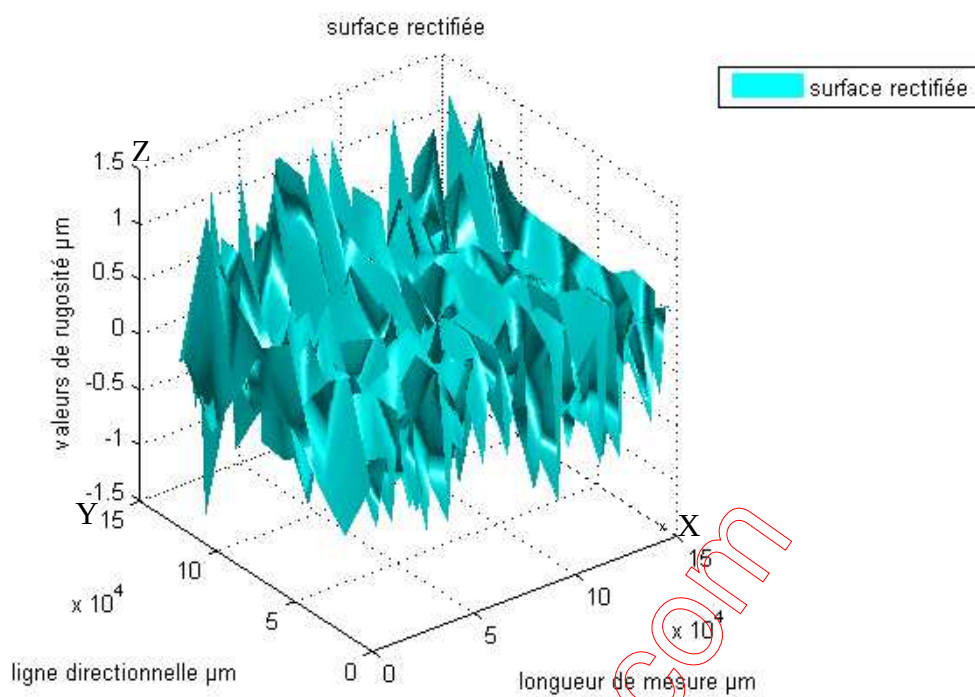
a- Vue en 3D



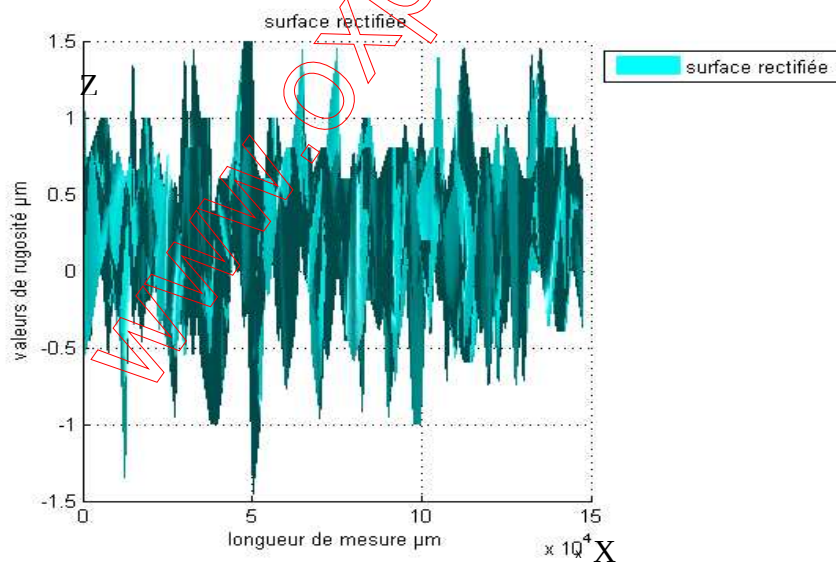
b-Vue selon XZ

Figure III.4 Représentation topographique de la surface réalisée par le procédé de tournage

III.2.4.2 Surface traitée par rectification



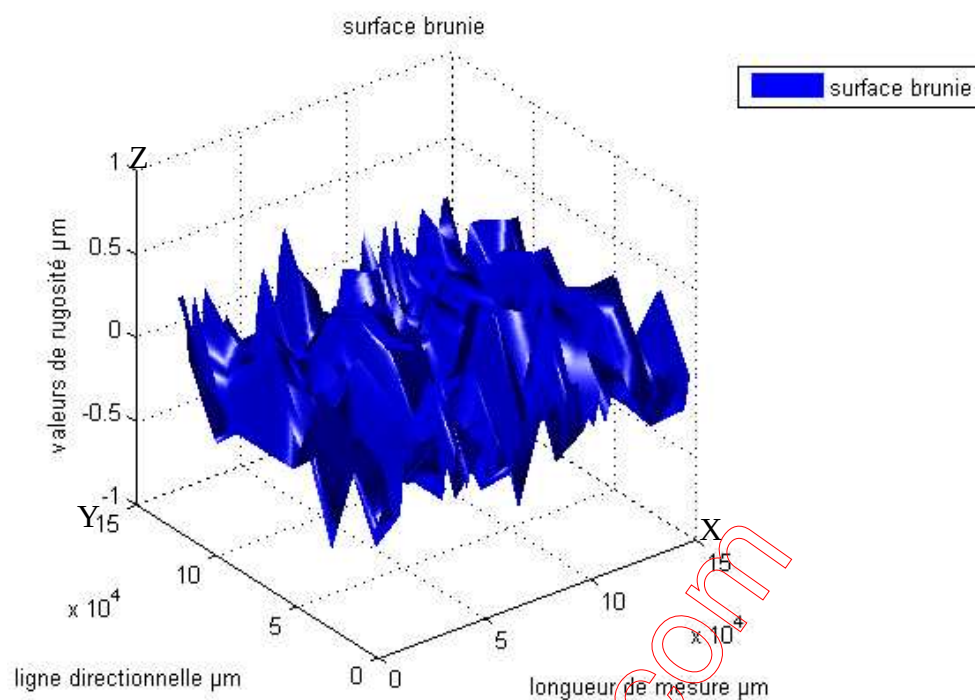
a- Vue en 3D



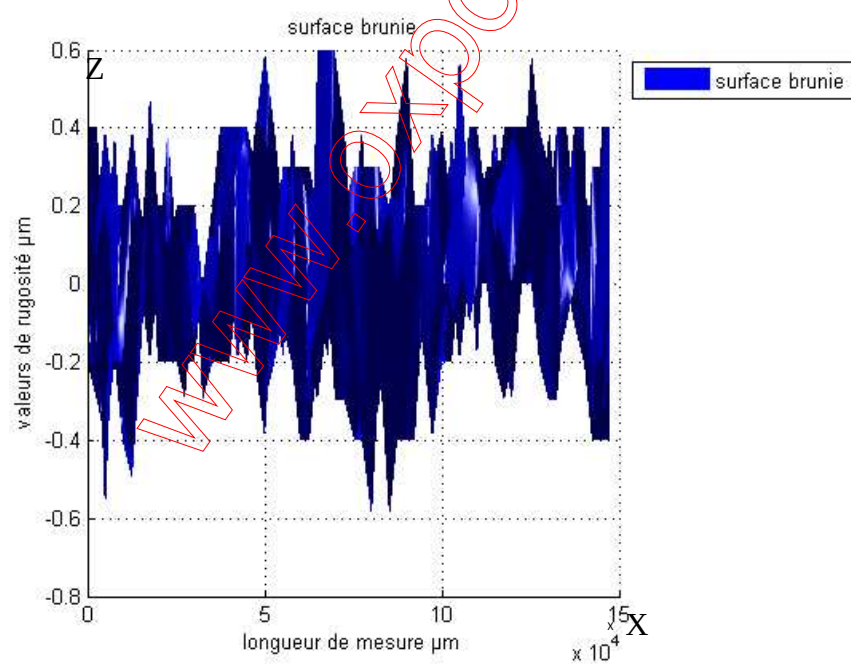
b- Vue selon XZ

Figure III.5 Représentation topographique de la surface réalisée par le procédé de rectification

III.2.4.3 Surface traitée par brunissage



a- Vue en 3D



b-Vue selon XZ

Figure III.6 : Représentation topographique de la surface réalisée par le procédé de brunissage

III.2.4.4 Surfaces superposées

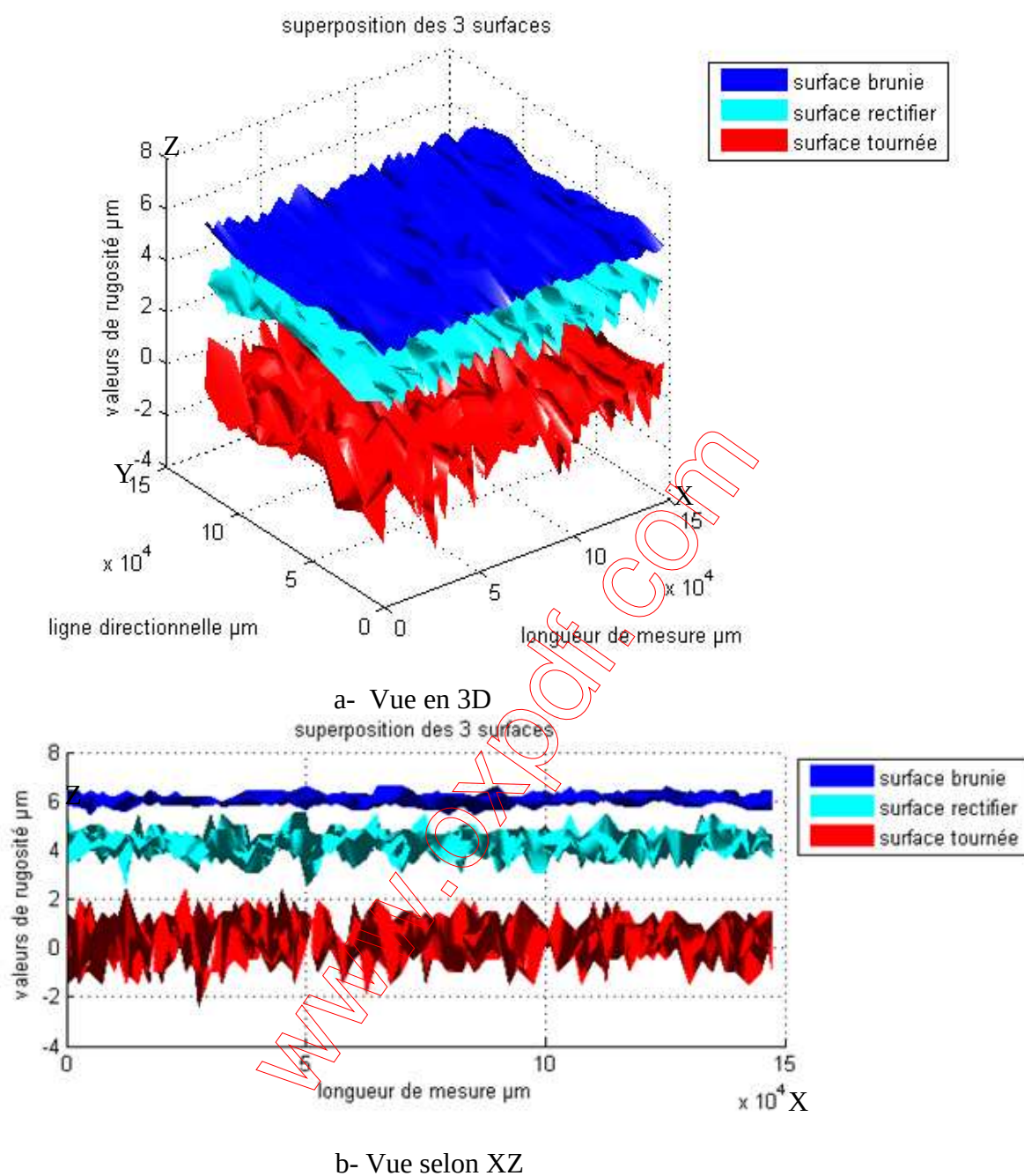


Figure III.7 Comparaison d'aspect de surfaces réalisées par les différents procédés.

III.2.4.5 Résultats et interprétation

La compilation de ce programme a permis de confronter les surfaces réalisées par les différents procédés, il en ressort les résultats suivants :

- D'après les profils obtenus, la surface la plus rugueuse est celle élaborée par tournage voir figure III.4a. En effet les pics sont très prononcés, dans une marge de valeurs de Z ($-2.5 \div 2.5$) μm voir figure III.4b, et de Ra ($0.94 \div 1.8$) μm .
- L'aspect de la surface rectifiée admet des aspérités qui sont moins prononcées, ayant pour valeurs de rugosité Z ($-1.6 \div 1.6$) μm et Ra ($0.26 \div 0.44$) μm . Ce résultat peut s'expliquer par l'action de la meule qui contribue à l'affinement des rugosités obtenues par tournage voir figure III.5.
- Le meilleur résultat a été observé lors du traitement par le procédé de brunissage à la pointe en diamant, voir figure III.6 avec des rugosités plus faibles que pour les cas précédents, pour les valeurs enregistrées de Z ($-0.6 \div 0.6$) μm et Ra ($0.19 \div 0.33$) μm . Ceci peut se justifier par l'action de la bille qui en agissant par déformation plastique, oblige les crêtes à s'enfoncer dans les creux, ce nivellement à pour conséquence l'amélioration de la qualité de surface, ce qui est en accord [26] [34] [38]. Néanmoins le procédé de brunissage engendre des ondulations sur la surface qui sont provoquées par la géométrie de la pointe et son mouvement d'avance.

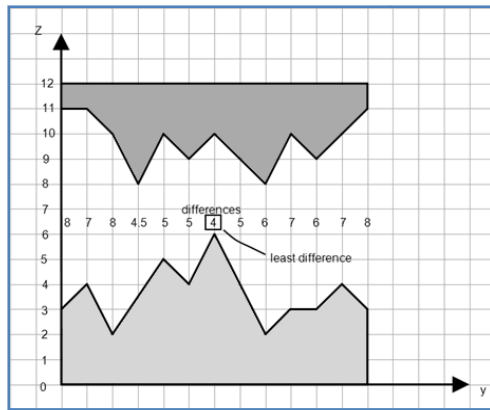
III.3 Programme d'analyse et d'estimation des paramètres de contact entre surfaces

Ce programme est composé de deux sous programmes, le premier permet d'estimer le nombre de points, et le pourcentage de contact pour une aire de contact déterminée entre deux surfaces superposées, en procédant par élimination de certains pics. Le deuxième estime

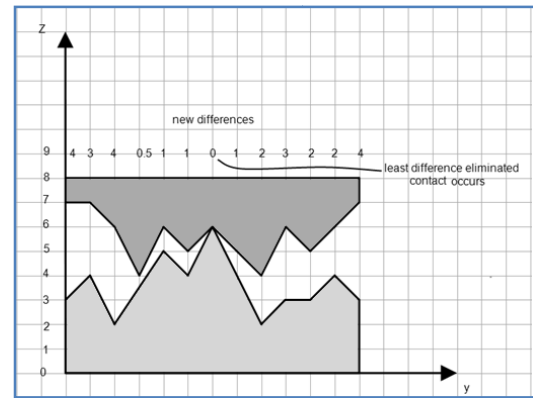
l'importance des rugosités dans un contact, en calculant le rapport $\frac{h}{\sigma}$ entre deux surfaces superposées pour les différents pics se trouvant sur le même plan d'après [43].

III.3.1 Sous programme 1 - contact entre surfaces

Le programme permet d'évaluer le taux de portance entre deux surfaces données, en calculant le nombre de points de contact. On procède par superposition des surfaces comme décrit sur la figure III.8a, b. Le contact est réalisé lorsque la différence entre la matrice de rugosités de la surface supérieure et celle de la surface inférieure est nulle comme indiqué sur la figure III.8 b.



a) approche de surfaces



b) contact entre deux surfaces

Figure III.8 Schémas de contact entre surfaces

La procédure d'élimination des pics est réalisée en rapprochant d'avantage les surfaces, et en calculant le minimum et le maximum de la matrice de différence. L'opération se poursuit jusqu'à une différence nulle, ce qui permet d'obtenir un nouveau contact. Ceci est réalisé par l'algorithme de la figure III.10.

III.3.1.1 Organigramme

L'enchaînement des séquences du programme sont indiquées sur l'organigramme selon la figure III.9

Différents contacts possibles sont:

Surface tournée / surface rectifiée = $\text{surft} / \text{surfr}$

Surface tournée/ surface brunie = $\text{surft} / \text{surfb}$

Surface rectifiée/ surface brunie = $\text{surfr} / \text{surfb}$

$\text{pct}(1, 2, 3)$: nombre de point de contact réel (sans élimination des pics)

$\text{Pc}(1, 2, 3)$: nombre de points de contact après élimination des pics

$\text{Pct}(1, 2, 3)$: nombre de points de contact total

$\text{Perr}(1, 2, 3)$: % réel de contact

$\text{Per}(1, 2, 3)$: % de contact après élimination des pics

Diff : matrice de différence entre les deux surfaces en contact

Per : % total de contact (surfr , surfb et surfbr)

A : point minimum de la matrice diff (i, j), indice de 1 à 3

B : point maximum de la matrice diff (i, j), indice de 1 à 3

On a utilisé l'instruction 'switch z et case z' sachant que z représente le choix du contact $z=1:3$

1= surft / surfr

2= surft / surfb

3= surfr / surfb

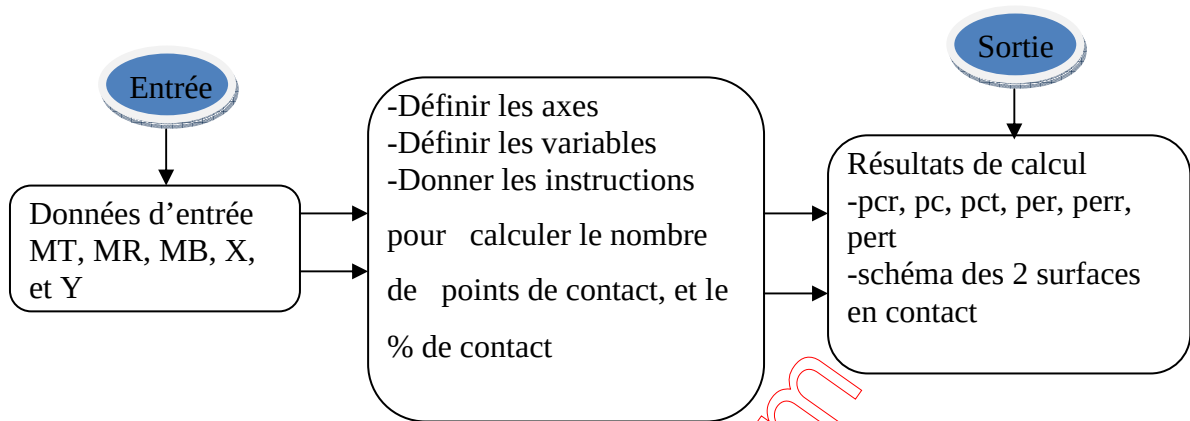
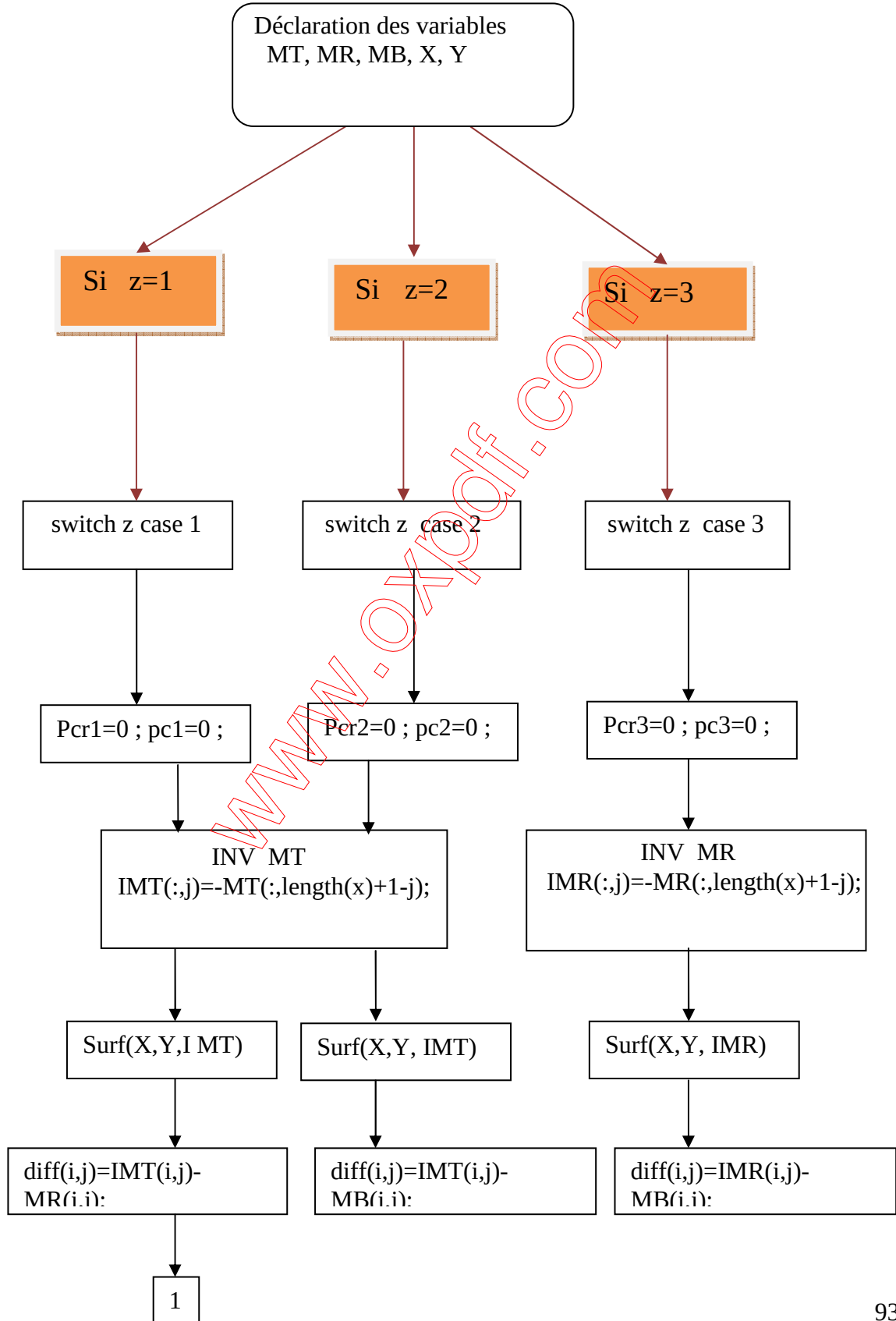


Figure III.9 Etapes de calcul du nombre de points de contact

III.3.1.2 Algorithme

L'exécution de ce programme se fait selon la procédure indiquée par l'algorithme présenté dans la figure III.10 le programme est exposé dans l'annexe 4.



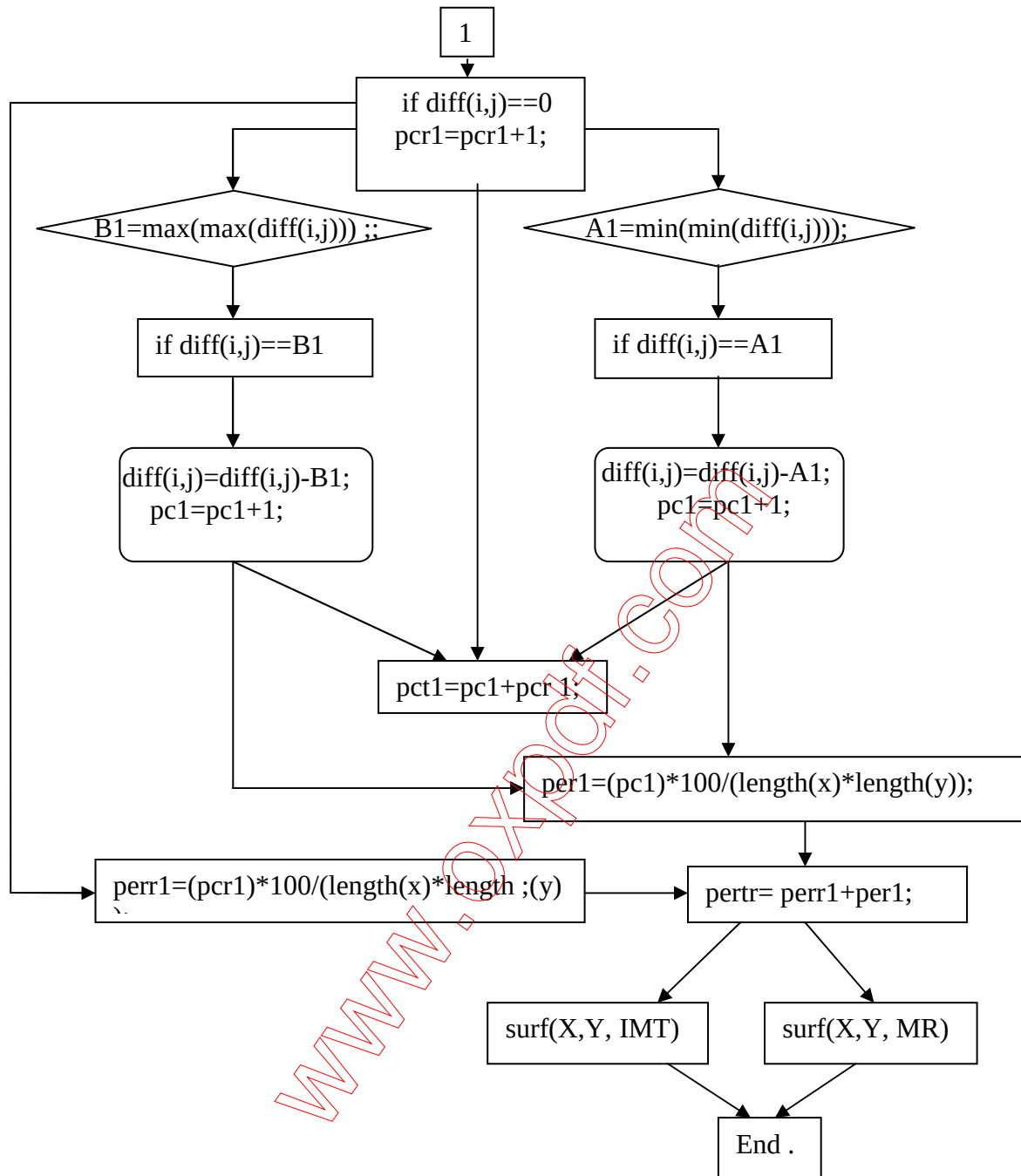
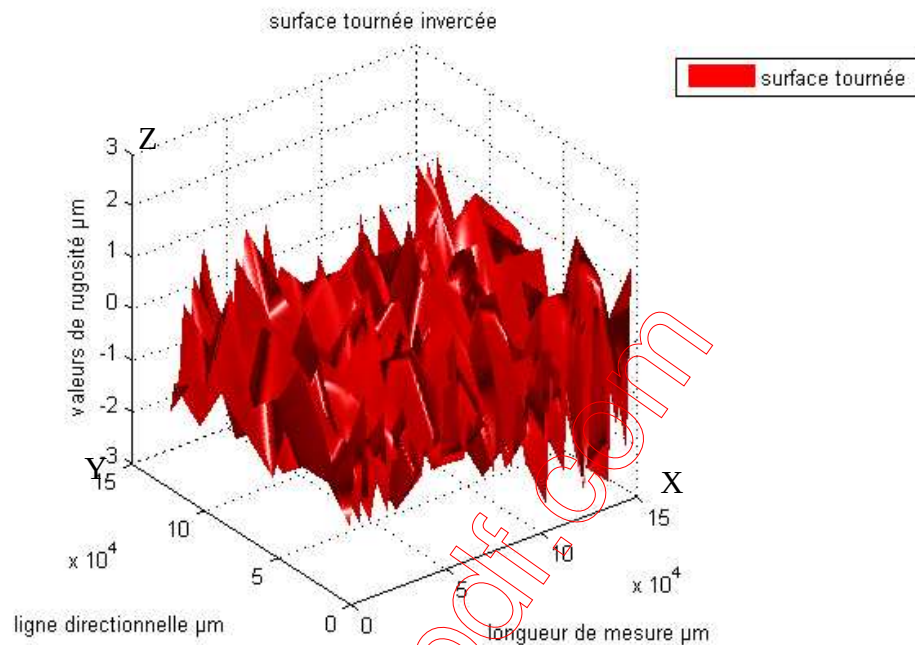


Figure III.10 Algorithme calculant le % de contact

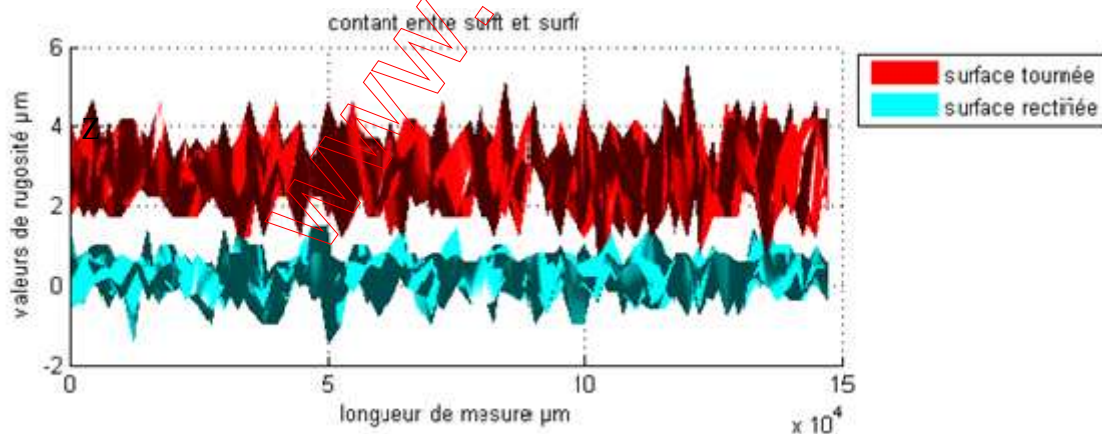
III.3.1.3 Simulation du contact

Avant de procéder à la superposition des surfaces, on procède à l'inversion de la surface supérieure.

- **Contact surface traitée par tournage / surface traitée par rectification**



a- Surface tournée inversée vue en 3D



b- superposition de surface tournée /surface rectifiée

Figure III. 11 Evaluation du contact surf / surf

- **Contact surface traitée par tournage / surface traitée par brunissage**

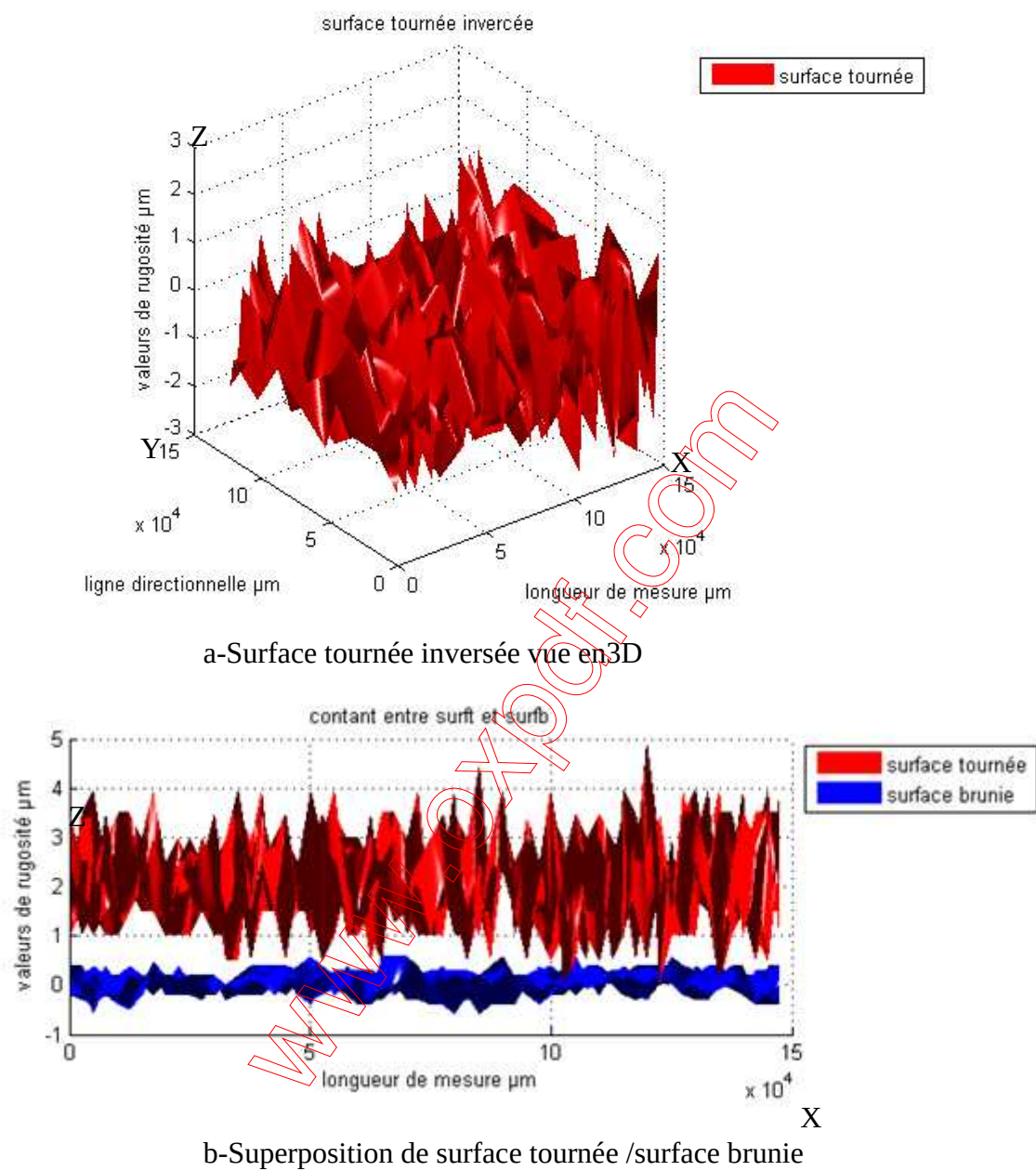
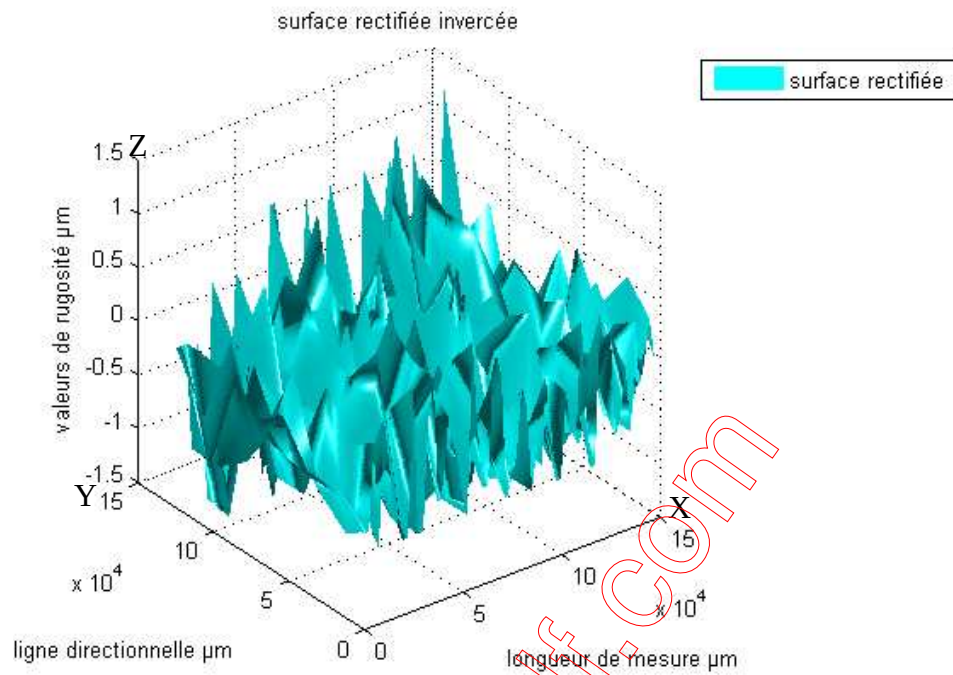
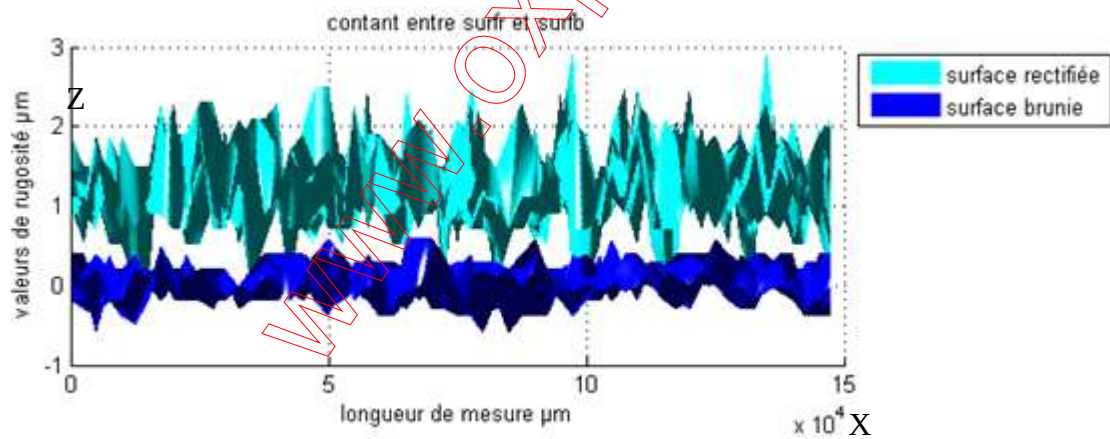


Figure III. 12 Evaluation du contact surf / surfb

- **Contact surface traitée par rectification / surface traitée par brunissage**



a- Surface rectifiée inverser vue en 3D



b- superposition de surface rectifiée /surface brunie

Figure III. 13 Evaluation du contact surfr / surfb

Les résultats exprimant le pourcentage d'aires de contact entre les surfaces réalisées par les différents procédés sont consignés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : résultats de calcul des points de contact du %de contact

Surfaces en contact	Nombre de point de contact total	% réel de contact	% de contact après élimination des pics
Surft/surfr	139	3.95%	28.95%
Surft/surfb	169	4.37%	35.20%
Surfr/surfb	263	7.29%	54.79%

III.3.1.4 Résultats et interprétation

D'après les graphes et les calculs fournis par le programme, il s'ensuit les résultats ci après.

- ✓ La surface traitée par tournage

Superposée avec la surface rectifiée permet un pourcentage de contact de 28.95%

- Superposée avec la surface brunie offre un pourcentage de contact de 35.20%

- ✓ La surface traitée par rectification comme indiqué sur la figure III.13 à donner le meilleur contact avec la surface traitée par brunissage (54.79%).

Le meilleur état de surface et les meilleurs % de contacts sont ceux obtenues avec la surface traitée par brunissage, car le procédé de déformation plastique superficielle permet d'aplatir les crêtes, donc le contact se produit sur des petites surfaces (avec faibles discontinuités du contact) plutôt que sur des pics aigus, ce qui n'est pas le cas de la surface traitée par tournage / surface rectifiée où le contact se fait sur les pics plus prononcés, ce qui explique le résultat de calcul obtenu $pc=139$ points de contact équivalent à 28.95% , et qui apparait sur la figure III.11.

Par contre la surface tournée / la surface brunie a donné un meilleur contact que le précédent, car la surface traitée par déformation offre une plus grande surface de contact, ce qui est justifié par le calcul des points de contact où le nombre de $pc=169$, équivalent à 35.20% voir figure III.12.

III.3.2 Sous programme 2 – Rugosités dans un contact lubrifié

III.3.2.1 Introduction

Ce programme permet de calculer le rapport $\frac{h}{\sigma}$ [43] pour chaque deux points en contact se trouvant sur le même plan transversal, voir figure III.14.

En considérant un contact lubrifié, la hauteur du film d'huile est donnée par l'expression suivante présentée dans le paragraphe I.6.4 :

$$h = h_0 + \delta_1 + \delta_2 \dots \dots \dots (1)$$

h_0 : hauteur du film nominale (μm)

δ_1 : amplitude des rugosités de la surface (1) par rapport à un niveau moyen (μm)

δ_2 : amplitude des rugosités de la surface (2) par rapport à un niveau moyen (μm)

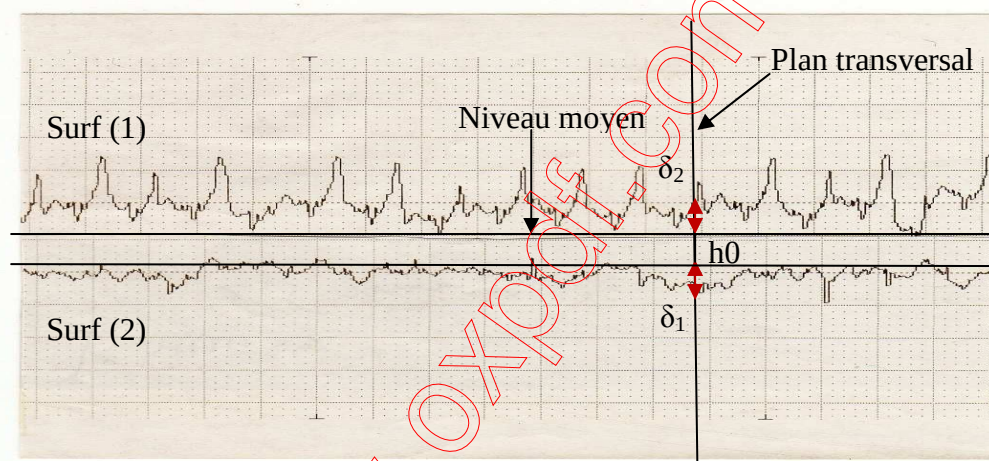


Figure III. 14 profils des surfaces superposées

σ^2 : Variance combinée des amplitudes de rugosité des deux surfaces exprimée par la formule suivante [1] :

$$\sigma^2 = (\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2 \dots \dots \dots (2)$$

D'ou $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$

$(\sigma_1)^2$: variance des amplitudes de rugosité de la surface (1)

$(\sigma_2)^2$: variance des amplitudes de rugosité de la surface (2)

Les matrices utilisées dans ce programme sont constituées des valeurs réelles relevées sur les profils des surfaces par rapport à niveau moyen comme indiqué sur la figure III.14.

▪ Matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par tournage

RyT=[3.5 2 2.5 1.5 3.5 0 2.5 0.5 1.5 0 1 1.5 2.5 3 2.5 2 2.5 2.5 2 3 1.5 1 0.5 0.5 2.5 2 3 1.5 2 3.5; 2.5 3 1.5 1 1 2.5 2 2.5 2 2 3 1.5 3 0 2 1 3 1 2.5 2 3.5 1 2.5 1 2 2.5 2.5 1 1.5 1.5; 0.5 2.5 0.5 1.5 2 1.5 2.5 1 2 1 1.5 0.5 1 0.5 2.5 2 0.5 3 2 3 1.5 1.5 0.5 0.5 1 1 0.5 0.5 3 1 ; 1 0 2.5 2 3.5 2 1

0 1 0 1.5 1.5 1 3 2.5 1 3 0 3 0.5 2.5 1 2.5 0 2.5 1.5 3 2.5 3 2.5; 2.5 3 1 1.5 1 2 3 1.5 2 2.5 1 2.5
0 1.5 1 3 1.5 0.5 2 3 1.5 0.5 2.5 1 2.5 0.5 1.5 1.5 2.5 1.5; 2.5 2 3.5 2.5 2.5 2.5 2 2 1.5 1 1 1 1.5
3 1 3.5 3 2 3 1 1 1.5 1.5 1.5 3 1.5 2.5 0.5 3.5 1 3.5 0 2.5 1.5 2 1.5 3 2 2.5 2.5 1 2 1 1 1.5 1.5
2.5 2 2.5 2 1.5 2 2.5 2 1 2 1.5 2.5 2.5 1; 2.5 1 1.5 2 0.5 0.5 0.5 3 0.5 2.5 0.5 2 2.5 2 3 2 2.5 0.5
3 2 2.5 1.5 2 0.5 1.5 2.5 3.5 3 3.5 1.5];

▪ **Matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par rectification**

RyR=[0 1.4 0.4 0.4 0 1.8 0 0.8 0.4 0.4 0 0.4 0.6 1.2 0.8 0.4 1.8 0 1.4 0.4 0.6 1 0.6 1.2 0 0 0 1.4
0 0.4; 1.6 0.4 0.8 1.4 0.6 0.4 1 0.6 0.2 0.6 1.6 0.6 0 1 0 0.6 0 0.6 0.4 0.4 1.4 0 0.2 0.2 0 0.6 1.8
0 0.4 0; 1.6 0.6 1.4 0.4 0 0.8 0.8 1 1.4 0.4 0.8 0.4 0.4 0.6 2.4 0.4 0.6 1.4 0.6 0.4 0.4 0.8 0.4 1.8
0.6 0.6 0.8 1.6 0.4 0.6; 0.2 1 0 0 1.4 0.4 0.6 0.8 0.6 0.4 0 0.2 2 1 0.2 0.4 0 1.6 1.6 0.8 0.6 0.2
0.4 0.6 0.6 1.4 0.8 1 0 1; 0.4 1.4 0.4 1.4 0.2 1.2 0.6 1 0.8 0.6 1.6 1.4 0.6 0.6 0 1 1.4 0.2 1.4 0
0.6 0.4 1.8 0 0.2 1.4 0.8 1 0.4 0.8; 0.8 1 0.8 0.4 0.6 1 0.8 1.8 1 0.4 1.2 0.4 0.8 0.4 1.6 1.4 0.4
1.6 0.4 1.4 0.2 0 1.2 1.8 1.4 1.2 2 1.2 0 0.2; 0.5 1.5 1.5 2 1.5 3 2.5 1.5 2 1.5 4 1.5 2 1 2.5 2 1
1.5 3.5 1.5 1.5 2 1.5 2 2.5 2.5 2.5 3.5 1 1.5; 2 2 2 0.5 1 1 0.5 1 1.5 0.5 0.5 1 1 1.5 3 0.5 1.5
0.5 0.5 2 2 0.5 1 1 1.5 2 2.5 1.5 0.5 2];

▪ **Matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par brunissage**

RyB=[0.7 0.7 0.6 0.1 0 0.2 0.2 0.6 0.5 0.2 0.4 0.7 0.5 0.6 0 0.2 0.2 0.2 0.2 0 0.5 0.3 0.4 0 0.5
0.5 0.5 0.6 0.5 0.6; 0.6 0.6 1.2 0.8 0.2 0.2 0.8 0.6 0.8 0.4 0.6 1.2 0.8 0.6 0 0 1 1.2 0.6 0.2 0.8
0.8 0.8 0.8 0.6 0.2 0 0.2 0.6 0.5; 0 2 0.8 1 0.8 0.8 0.8 1 1 0.4 0 0.8 1.2 0.8 0.4 0.8 0.8 1.2 0.8
0.8 0 0.2 0.8 0.4 0.2 0.4 0.6 0.4 0.6 0.4; 0.6 0.6 1.2 0.8 0.2 0.2 0.8 0.6 0.8 0.4 0.6 1.2 0.8 0.6 0
0 1 1.2 0.6 0.2 0.8 0.8 0.8 0.8 0.6 0.2 0 0.2 0.6 0.5; 1 0.4 0.8 0.8 0.8 0.8 0.6 0.6 0.4 0.2 0.6 0.6
0.6 0.6 0.4 0.4 0.4 1.2 0.6 0.8 0.8 0.4 1 0.6 0.8 1 0.2 0.6 0.2 0.2; 0.6 0.1 0 0.5 0.8 0.5 0 0.4 0.4
0.4 0.7 0.5 0 0.1 0.4 0.8 0.9 0.5 0 0.5 0.5 0.8 0.7 0.8 0 0.1 0.1 0.5 0.9 0.5; 0.5 0.9 0.5 0 0 0.7
0.7 0.4 0.2 0.6 0.3 0.6 0.5 0.7 0.5 0.2 0.1 0 0.5 0.8 0.2 0.1 0.2 0 0.3 0.5 0.7 0.2 0.6 0.7; 0.4 0.8
0.8 0.6 0.8 1 1 0.8 0.4 0.8 0 0.4 1.4 1.2 1.2 1 1 1 1 1 1.2 0 1 0.4 0.8 1 0.8 0.4];

III.3.2.2 Procédure de calcul

L'utilisation de l'instruction "switch case z" permet d'avoir le choix de contact, comme on a trois surfaces différentes, donc on aura 3 modèles de contact possible.

D'où $z = 1 : 3$

1= surft / surfr

2= surft / surfb

3= surfr / surfb

σ_1 : Ecart type des amplitudes de rugosité de la surface (1)

σ_2 : Ecart type des amplitudes de rugosité de la surface (2)

Dans le programme les écarts types pour chaque matrice sont indiqués comme suit :

ET : écart type des amplitudes de rugosité de la matrice RyT (surface traitée par tournage).

ER : écart type des amplitudes de rugosité représentées par la matrice RyR (surface traitée par rectification).

EB : écart type des valeurs des amplitudes de rugosité représenté par la matrice RyB (surface traitée par brunissage).

La procédure consiste à faire le choix de deux surfaces en contact, comme expliqué par l'exemple suivant :

Si $z=2$ alors les surfaces choisies sont : surfT / surfB.

- Sigma2(i) Correspond σ
- ET Correspond σ_1
- EB Correspond σ_2

$\text{Sigma2}(i)^2 = ET^2 + EB^2$ d'après (3) d'où $\text{sigma2}(i) = \sqrt{ET^2 + EB^2}$

Sigma2(i) est calculé sur chaque génératrice

Calcul de h d'après la formule (1)

Avec δ_1, δ_2 sont représentés par les matrices respectives RyT(i, j) et , RyB (i, j).

RyT(i, j) : matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par tournage

RyB (i, j) : matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par brunissage

i : compteur le long de Y i=1 :8

j : compteur le long de X j=1 :30

- Estimation de la hauteur h2 entre 2 points en contact, h2 (i, j) est sous forme d'une matrice avec $h_0 = 15\mu\text{m}$.

$$h_2(i, j) = h_0 + \text{RyT}(i, j) + \text{RyB}(i, j)$$

- Calcul du rapport $\frac{h_2(i, j)}{\text{sigma2}(i)}$

$$\text{Le rapport } \frac{h}{\sigma} = \frac{h_2(i, j)}{\text{sigma2}(i)} = Q_2(i, j)$$

- Après calcul du rapport $Q_2(i, j)$ on procède à la comparaison suivante [45] :

Si $Q_2(i, j) > 3$ les effets de la rugosité ne sont pas importants et l'équation de RENOLDS classique pour les surfaces lisses est suffisante avec $n=n+1$.

Si $Q_2(i, j) = 3$ Les effets de la rugosité commencent à devenir non négligeable avec $m=m+1$.

Si $Q_2(i, j) < 3$ les aspérités interagissent les une avec les autres, et le régime de lubrification est mixte avec $k=k+1$.

n, m, k sont des compteurs qui s'incrémentent à chaque fois que la condition est vérifiée.

- calcul du % pour chaque cas.

III.3.2.3 Organigramme

Les différentes démarches de ce programme sont représentées sur la figure III.15

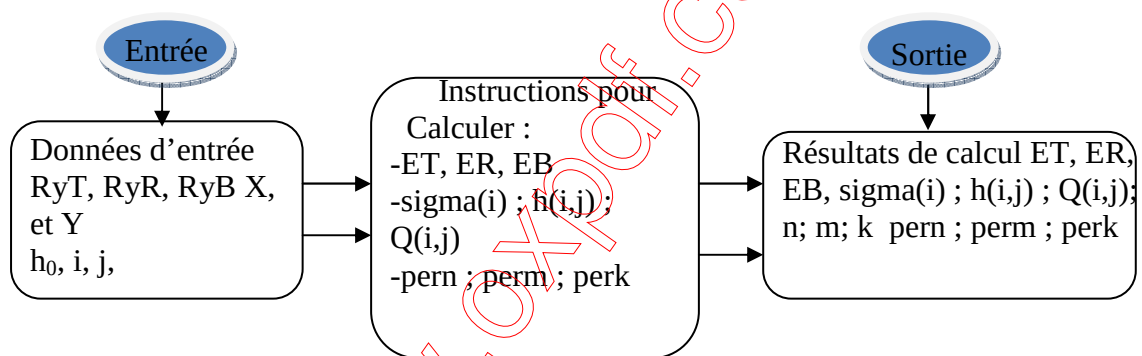
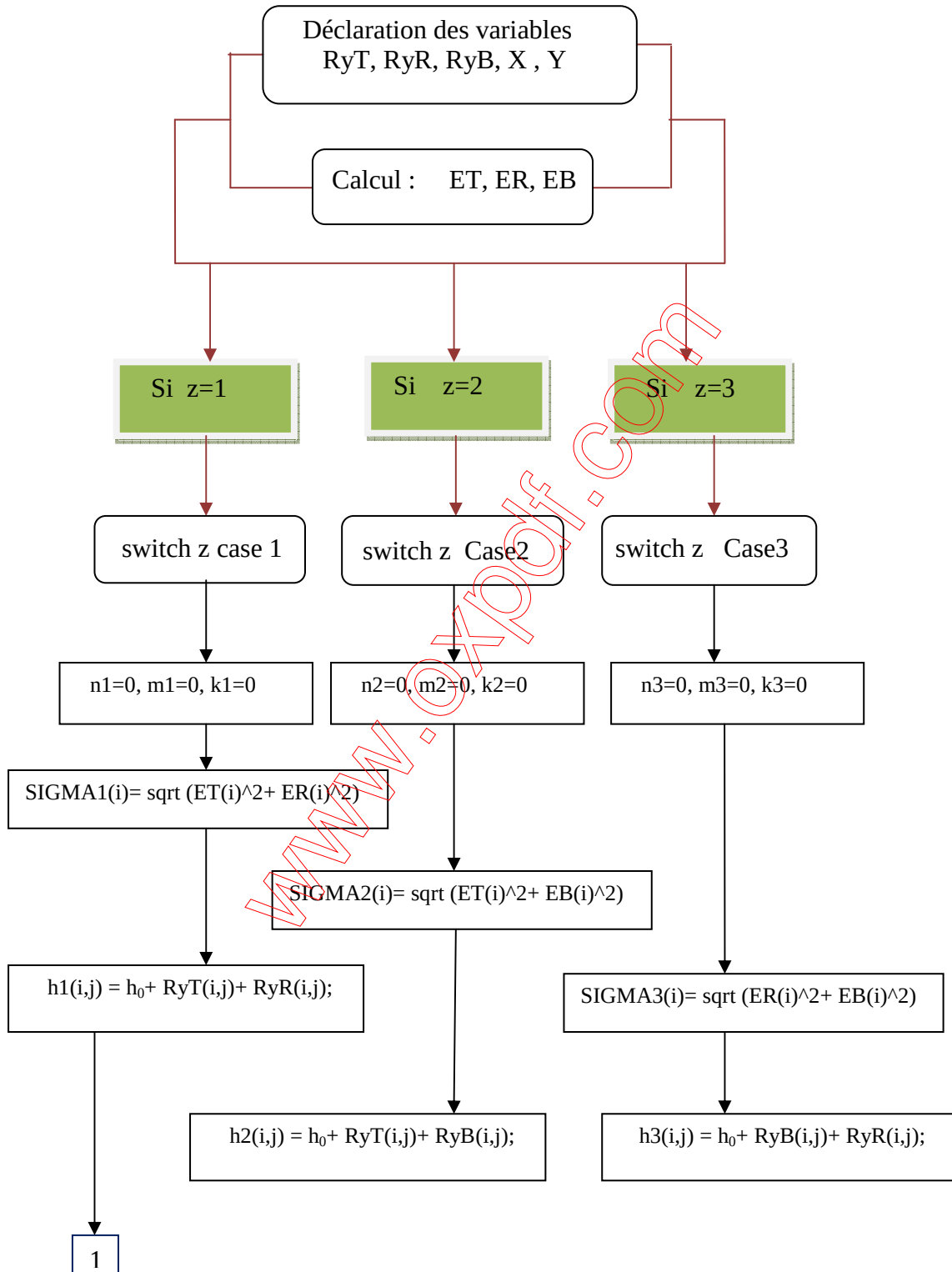


Figure III.15 Etapes du déroulement du calcul du rapport $\frac{h}{\sigma}$

III.3.2.4 Algorithme

L'algorithme décrivant les étapes d'exécution des différentes instructions est présenté sur la figure III.16, le programme est exposé dans l'annexe 4.



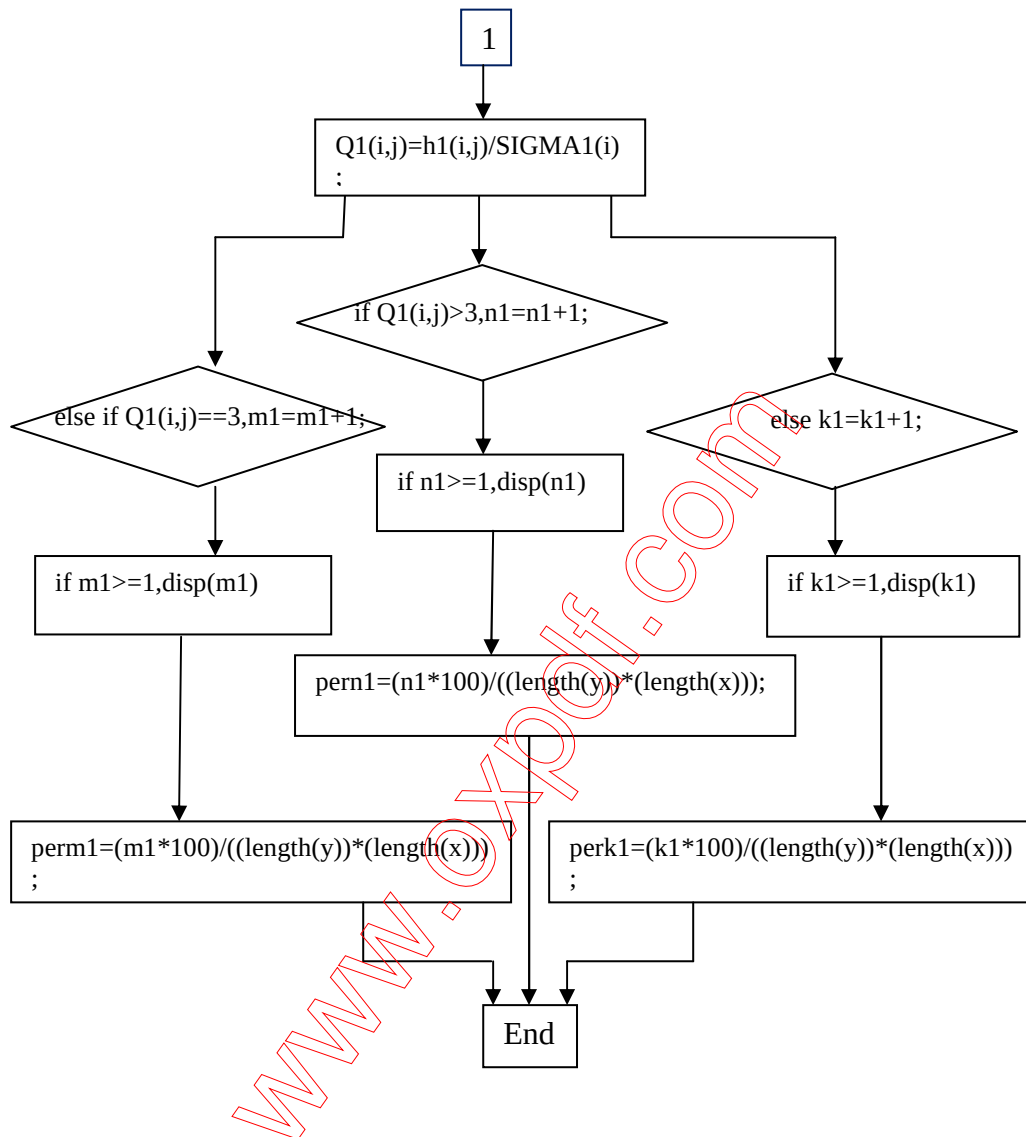


Figure III.16 Algorithme de calcul du rapport $\frac{h}{\sigma}$

Les choix pour les autres cas (case2 et case3) s'exécutent de la même manière que le cas (case1).

III.3.2.5 Résultats et interprétation

Ce calcul permet de déterminer l'importance des rugosités pour chaque contact envisagé entre deux surfaces, avec la hauteur nominale $h_0=15\mu\text{m}$.

-Lors du contact $z=1$ (surface tournée/surface rectifié), il a été enregistré que dans la zone où $Q>3$ un taux de 56.667% où les surfaces restent séparées, et dans la zone où $Q<3$ correspondant à un taux de 43.35% d'aire de contact des surfaces. Donc, la rugosité est non négligeable et doit être prise en compte dans les calculs de l'épaisseur du film lubrifiant, car un film mince peut ne pas être suffisant, alors le régime de lubrification mixte est recommandé [1].

-Lors du contact $z=2$ (surface tournée/surface brunie), il a été noté que dans la région où $Q>3$ un taux de 64.167% où les deux surfaces restent séparées, et dans la région où $Q<3$ correspondant à 35.833% d'aire où les surfaces sont en contact. En conséquence, dans ce cas la rugosité peut être négligée dans le calcul, un film mince de lubrification peut être suffisant tout en prenant en compte les conditions de sollicitations et de fonctionnement du contact.

-Pour le contact $z=3$ (surface rectifiée/surface brunie), il a été remarqué que dans la zone où $Q>3$ un taux de 84.583%, donc le lubrifiant sépare les deux surfaces, et dans la zone où $Q<3$ un taux de 15.417% où les aspérités interagissent entre elles. Les résultats obtenus dans ce cas sont nettement meilleurs que dans les cas précédents. Donc les rugosités peuvent être négligées, un film lubrifiant mince est suffisant, mais dans ce cas la pression hydrodynamique peut être importante, et engendrer des déformations élastiques sur les deux surfaces en contact d'où un régime élastohydrodynamique est préconisé [1].

III.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de déterminer l'intérêt des résultats obtenus par traitement informatique, qui peuvent orienter le fabricant dans le choix du procédé d'usinage. Ceci peut être réalisé par le sous programme1 en calculant le nombre de points de contact et le pourcentage de contact. Par ailleurs au moyen du sous programme2, l'estimation du rapport $\frac{h}{\sigma}$

contribue au choix du film lubrifiant, ceci est réalisé par le calcul du nombre de fois où $\frac{h}{\sigma} > 3$

ou < 3 , ce qui va permettre d'apprécier l'importance des rugosités dans le contact et sa prise en compte dans le calcul de l'épaisseur du film lubrifiant.

Donc on peut conclure que ses résultats aident à faire du choix judicieux du procédé d'élaboration de surface, en tenant compte du mode de fonctionnement des surfaces et des sollicitations auxquelles elles sont soumises.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux exposés dans la partie bibliographique mettent en évidence l'importance de l'état de surface, et les paramètres de rugosités, dans le domaine tribologique, et son impact sur le comportement d'un système mécanique. Ainsi que la relation entre procédés d'usinage et qualité des surfaces usinées.

Au regard des résultats expérimentaux, on peut retenir que le traitement par tournage a fourni un état de surface satisfaisant, qui peut être directement traité par déformation plastique superficielle. Avec une optimisation de la géométrie de l'outil et d'autres conditions, ainsi qu'un choix judicieux de la machine outil, ce procédé peut offrir des résultats plus intéressants.

L'utilisation des plans d'expériences permet de minimiser le nombre d'essai, et le traitement des données par le programme sous Matlab ayant l'avantage d'optimiser le régime de coupe qui est utilisé pour la préparation de l'éprouvette d'essai, car la réalisation d'une bonne finition repose sur la préparation minutieuse de la surface initiale. Donc suivre une méthodologie scientifique peut guider le fabricant dans l'élaboration des étapes d'usinage. Ceci a beaucoup d'avantages tels que : l'économie de matière, diminution du temps d'usinage, minimisation du coût de fabrication, et augmentation de la production, ce qui est l'objectif de tous les industriels. Par ailleurs, les valeurs de rugosité relevées sur les profils obtenus lors des essais ont été exploitées dans la partie traitement informatique des données au moyen deux programmes développés sous matlab, afin d'élaborer les topographies des surfaces réalisées par les procédés envisagés. Les résultats obtenus indiquent que l'aspect des surfaces simulé par programmation est en accord avec celui observé au microscope. L'évaluation du % de contact entre surfaces montre que la surface traitée par tournage et surface traitée par brunissage a donné un résultat acceptable et proche de celui du contact surface traitée par rectification et surface traitée par brunissage. En outre le calcul du rapport $\frac{h}{\sigma}$ a permis d'estimer l'importance des rugosités dans un contact lubrifié afin de choisir le mode de graissage adéquat. L'estimation et la simulation ont montré que dans le contact surface traitée par rectification et surface traitée par brunissage, que les rugosités peuvent être négligées.

Les résultats de ce travail ouvrent plusieurs perspectives :

- Etude plus approfondie des types de rugosités (orthotrope, transversal, anisotrope) et leur influence sur le comportement des surfaces en contact dans diverses conditions de travail (pression, température.....).
- Elargir l'étude en prenant en considération le rapport $\gamma = \frac{\lambda_{0.5x}}{\lambda_{0.5y}}$ qui détermine l'orientation des rugosités ainsi que leur influence sur un système tribologique.

www.oxpdf.com

ANNEXES

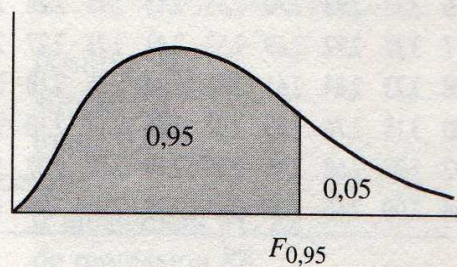
www.oxpdt.com

55

Rugosité R_a en microns		50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,20	0,10	0,05	0,025
RUGOSITÉ DE SURFACES BRUTES	Estampage												
	Forgeage												
	Grenaillage												
	Laminage												
	Matricage												
	Moulage												
	Sablage												
RUGOSITÉ DE SURFACES USINÉES	Alésage												
	Brochage												
	Brunissage												
	Découpage (à la presse)												
	Découpage fin (à la presse)												
	Électro-érosion												
	Fraisage												
	en bout												
	Fraisage												
	en roulant												
	Galetage												
	Grattage												
	Limage												
	Meulage												
	Mortaisage												
	Oxycoupage												
	Perçage au foret												
	Polissage												
	Rabotage												
	Rectification												
	Rodage												
	Sciage												
	Superfinition												
	Taillage												
	Tournage												
Rugosité R en microns		160	80	40	16	10	4	2	1	0,5	0,25	0,12	0,06
Signes de façonnage													

ANNEXE2 : Representation de la 95^{ème} pourcentiles pour la distribution F

95-ièmes pourcentiles pour la distribution F (v_1 degrés de liberté au numérateur et v_2 au dénominateur).



$v_1 \backslash v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,37
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73

ANNEXE3 :Caracteristiques des rugosimetres sj-201et SJ-301

Surftest SJ-201 / SJ-301 SERIES 178 — Portable Surface Roughness Tester



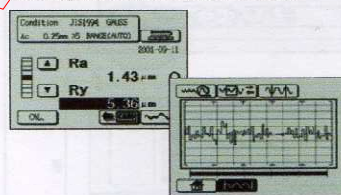
FEATURES: SJ-201

- The display unit demonstrates IP53 protection level and is proof against dripping water and dust.
- The built-in battery, if fully charged, allows approximately 500 measurements to be taken even on a site with no access to mains power.
- A convenient carrying case is supplied as standard for protecting the instrument in the field.
- Up to 10 measurement results can be saved in the built-in memory.
- Measurement results appear in large characters on the large LCD screen. Results can be confirmed at a glance.
- Detailed set-ups, such as change of standards and cutoff lengths, can be made by pressing the relevant buttons after sliding back the top cover.
- The SPC connector for Digimatic output and the RS-232C output connector are provided on the rear panel of the display unit for data output to external devices.
- Printout of recorded profiles is also possible if the tester is connected to the dedicated hand-held, built-in battery operated compact SJ-printer (optional).

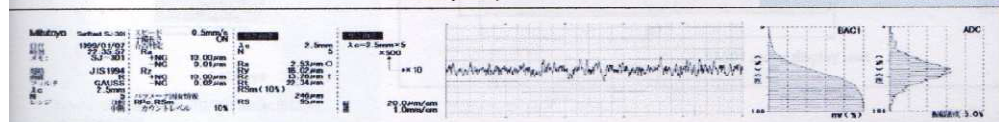


FEATURES: SJ-301

- Large characters are displayed on the large easy-to-view LCD.
- Simple operations performed with the large LCD touch-panel.
- The Measure-Start button and others frequently used are hard wearing and resistant to workshop contaminants.
- Equipped with a large capacity battery that, when fully charged, allows approximately 600 measurements to be made.
- A convenient carrying case is supplied as standard for protecting the instrument in the field.
- A high-resolution, high-speed printer is built in the main unit.
- Five sets of measurement set-ups can be saved in the measurement unit and the optional memory card (compact flash memory) allows saving of set-ups and measurements.
- Measurement data also can be saved in the memory card in CSV format and then loaded onto a personal computer for data handling with spread sheet software.



Printout (SJ-301)



Appendix 1

Technical Data

X-axis (drive unit)	12.5mm
Measuring range	0.25, 0.5mm/s (0.25mm/s: S-type)
Measuring speed	Backward
Traversing direction	
Detector	
Range	350μm (-200μm to +150μm)
Detecting method	Skid measurement
Measuring force	4mN or 0.75mN (low force type)
Stylus tip	Diamond, 90° / 5μmR (60° / 2μmR: low force type)
Skid radius of curvature	40mm
Skid force	less than 400mN
Detecting method	Differential inductance
Power supply	Via AC adapter / rechargeable battery
Battery life	Max. 600 measurements (two printing)
Recharge time	15 hours
Data output	Via RS-232C interface / SPC output
Dimensions (WxDxH)	
Control unit	307 x 165 x 94mm (SJ-301) 155.5 x 62 x 52mm (SJ-201)
Drive unit	113 x 23 x 26mm
Mass	
Control unit	Approx. 1.2kg (SJ-301) Approx. 0.3kg (SJ-201)
Drive unit	0.2kg

Evaluation Capability: SJ-301

Applicable standard:
JIS B2, JIS 94, JIS 01, DIN, ISO, ANSI

Assessed profile:
P (primary profile), R (roughness profile), DIN4776, roughness motif, waviness motif

Evaluation parameters:
Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Rq, Rv, Sm, S, Pc, R3z, mr (c), Rpk, Rvk, δc, Rk, Mr1, Mr2, Lo, Ppi, R, AR, R, A1, A2, Vo, HSC, mr, Sk, Ku, Δa, Δu, W, Wx, W, AW (can be customized)

Analysis graphs:
Bearing Area Curve (BAC1 / 2), Amplitude Distribution Curve (ADC)

Digital filter:
2CR, PC75, Gaussian

Cutoff length:
λc: 0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8mm
λs: 2.5, 8, 25mm

Number of sampling length: X1, X3, X5, XL

Arbitrary length: 0.3 to 12.5mm, 0.1mm increments

Sampling length (L): 0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8mm

Printer:
Thermal printer

Printing width:
48mm (paper width: 58mm)

Recording magnification:
Vertical magnification: 10X to 100,000X, Auto
Horizontal magnification: 1X to 1,000X, Auto

Function

Customization: Desired parameters can be selected for calculation and display.

Statistical processing: Maximum value, minimum value, mean value, standard deviation, pass rate, frequency distribution chart of each parameter

GO/NG judgment:
Upper/lower limits setting: 3 parameters
GO/NG judgment rule: mean value, 16% rule, maximum value rule

Measurement conditions saving: Maximum 5 sets

Data saving: Save/retrieval of measurement conditions (up to 20 sets), evaluation data, sampling data, and statistical data with a memory card (option).

Calibration: Auto-calibration with the entry of numerical value.

Power saving function: If the auto-power-off function ON: Power turns off if not operated for 5 minutes

ANNEXE4 :présentation des programmes réalisés

%Programme réalisant les surfaces en 3D

% initialisation de la matrice des valeurs de rugosité en tournage

```
MT = [-0.3 0.4 0.1 0.3 0 0.5 0 -0.2 -0.2 0.3 0.5 -0.5 0 -0.3 0.4 0 0.2 -0.1 0.5 -0.3 0 -0.1 0.2  
0.05 0 0.3 0.2 0.2 0 0.3 0.1 0.1 0 0.1 0 0.2 0.1 -0.3 -0.1 -0.3 0.2 -0.1 0.2 0 0.2 0.1 0.2 0 -0.1  
0.1 0 0.3 -0.1 0.1 0.2 0.3 -0.2 0.3 0 0.3 ;0 -0.2 -0.1 -0.2 0.2 0.5 0.2 0 0.3 0.2 -0.1 0 -0.2 0.3 0  
0.2 0 0.4 0 0.2 0 0.4 0.2 -0.3 -0.1 0.2 0.4 -0.3 0.1 -0.1 0 0.3 -0.1 0 0.2 0.3 0.3 0 -0.1 0 0.2 -0.2  
-0.1 0 0.4 0 -0.1 0.2 0.2 0 0.1 0.1 0.2 0 0.2 0.1 0.2 0 0.2 0 ;0.3 -0.3 -0.1 0.2 0.3 0.1 0.1 0 -0.3  
0.25 0.1 0.2 -0.2 -0.2 0.3 0.1 0 -0.1 0.1 -0.2 0.1 0.1 0.3 -0.2 0.2 0 0.3 0.3 -0.2 0 0 0.2 0.25 0.1  
-0.2 0.1 0 -0.1 -0.2 0.2 0.1 -0.1 0.1 0.2 0.3 -0.3 0.3 0 0.1 -0.05 0.2 0.2 0.2 0.1 0.1 -0.2 -0.1 0.1  
0.2 -0.2 ;0.2 0.2 0.4 0 0.1 -0.2 0 0.15 -0.2 0.2 0.1 0.4 0.2 0 -0.1 0.4 0.3 -0.2 0 0.2 0.3 -0.2 0.2  
-0.2 0.3 0.2 -0.1 0 0 0.2 0.3 0.2 -0.2 0.4 0.3 -0.1 -0.1 0.2 0.4 -0.3 0 0.3 0.2 -0.2 0 0.2 0.4 0.1 0  
0.1 0 0.2 -0.1 0.1 -0.2 0.1 -0.2 0.3 0 0.3 ;0 -0.1 -0.2 0 0.2 -0.2 0.2 -0.1 0.3 0.2 -0.2 0.4 -0.2 0.3  
0.2 0.2 0.1 0.2 0 0.4 0 -0.1 0 -0.2 0.4 -0.4 0.2 0.2 0.1 0.3 -0.1 -0.1 0 0.3 0 0.1 0.1 0.3 -0.1 0.3 0  
0.4 0 0.1 0 0.4 0.1 -0.2 0 -0.1 0.3 0.3 0 0.1 0.1 0.1 -0.2 0.2 0.1 0.2 ;0 -0.2 0.2 0.2 -0.2 0.2 -0.3  
0.3 0 0.1 -0.1 0 0.1 0.2 0.1 -0.1 0.2 -0.2 0.3 -0.2 0.2 0.1 0.2 0 0.1 0.1 -0.1 -0.2 0.3 0.3 -0.3 0.1  
-0.2 -0.2 0.3 0 0.1 -0.2 0.2 0.3 0.1 0.3 0 0.1 -0.1 0.1 0.2 0.2 0.1 -0.1 0.3 0.3 0.2 0.2 0 0.3 0.3 -  
0.3 -0.2 0.1 ; -0.2 0.4 -0.2 0 0 0.2 -0.1 0.1 -0.2 0.2 0.3 -0.2 0.2 0.1 0.3 0 -0.1 0.2 -0.1 0.3 0.2 -  
0.1 0.1 -0.2 0.1 0 0.2 0 0.1 0.2 0.2 0.3 -0.1 0.2 0 0.1 -0.1 0.2 0.1 0.1 0.2 0.1 0.1 -0.2 0 -0.1 -0.1  
0.2 0.2 0.3 0.1 0.2 0.1 0.2 0 0.1 0 0.2 0.3 0.1 ;0 0.4 0.3 -0.3 0.2 -0.3 0 -0.3 0.3 -0.1 0.2 0.1 0.4  
0 -0.1 -0.2 0.4 0.3 0 -0.2 0.3 0.2 0.1 0 0.1 0.2 0.1 0.1 -0.1 0.3 0.1 0.1 0 0.2 0.4 0.1 -0.1 0 0.1 -  
0.3 0 0 0.2 -0.3 -0.1 -0.2 0.3 0.3 0.1 0 -0.1 0 -0.3 -0.1 -0.2 0.1 -0.1 0.2 0.2 0.3];
```

% initialisation de la matrice des valeurs de rugosité en rectification

```
MR = [0 -0.4 0 0.2 -0.4 0.6 0 0.4 0.6 -0.4 -0.2 -0.6 0.8 0.8 0.2 -0.6 0.4 0.4 0 0.8 0.8 0.2 -0.2  
0.6 0.4 0.8 0 -0.2 0.4 0.6 0.8 -0.4 -0.6 -0.4 0.6 0.6 0 -0.8 0.8 0.6 0.2 0.2 -0.2 0.4 0.6 -0.6 -0.2  
0.8 0.8 -0.6 0.8 0.8 0.6 0.6 0 -0.4 0.8 -0.2 0.6 0.6;-0.6 0.8 0 -0.2 0 0.6 -0.4 0.2 0 0.2 0.8 0.4 0 -  
0.6 0.8 -0.2 0.6 0 0.6 0 -0.6 0.6 0.6 0.4 0.8 0.8 0.4 0.4 0.8 0 0.4 0.4 0.8 0.4 0.2 -0.4 0.8 -0.4  
0.8 -0.2 0 -0.4 0.8 -0.2 -0.6 0 0.2 0.8 0.8 -0.2 0.4 -0.8 -0.2 0.2 0.8 0.4 0 0.8 0.4 0.4;-0.2 -0.4  
0.6 0.4 0 -0.8 0.4 0.6 0 0 0.4 0.4 -0.4 0.8 0 0.2 0 -0.2 0.8 -0.4 0 0.4 0.2 0.6 0.8 0.8 0 0.4 -0.8  
0.8 0.6 0.2 0.2 -0.2 0.4 0.2 0.4 0.8 0.2 0.4 0.6 0.8 0.8 -0.8 0.8 0.6 0.2 0.6 0.2 0.4 0.8 -0.4 0.4  
0.4 0.8 0 -0.4 0.6 0.4 0.4 ;0.8 0 0.2 -0.6 0.8 0.6 0.8 -0.2 -0.2 0 0.4 0 -0.6 0 0.6 -0.4 0.6 -0.4  
0.4 0 0.8 0 0.6 -0.2 -0.8 -0.4 0.4 0.6 0.6 0.4 0.4 0.6 0.6 0.8 -0.2 0 -0.4 0.8 0.4 -0.2 0.4 0.4 0.8 0  
0.2 0 0.4 0.6 0.6 -0.2 -0.4 0.4 0.4 0.2 0 0.8 0.4 -0.4 0.4 0 ;0.6 0.4 0 0.4 0.2 0.2 0 -0.4 0.4 0.8 0  
0.4 0 0.8 0.4 -0.8 0 0.6 0.8 0.4 -0.6 -0.4 0 0.6 0.6 -0.2 0.8 -0.2 0.8 0.4 0.4 0 -0.4 0 0.8 -0.4 -0.2  
-0.6 0.8 0.8 0 -0.4 0.8 0.2 -0.4 -0.6 0.8 0.6 0.4 -0.8 0 0.6 0.4 0.4 0.2 0.8 0.2 0.4 0.2 0.4;0 0.8  
0.4 0 -0.2 0.4 0.2 0.4 0 -0.2 0.4 0.6 0 0 -0.6 -0.8 0 -0.2 0.6 0.6 0 0.2 0.6 0.8 0 -0.2 0.8 0.8 -0.4  
-0.6 0 0.4 0.6 0 -0.2 0.4 0.4 0.4 -0.2 0.6 0.6 0.8 0.6 0.4 0 -0.4 -0.6 -0.2 -0.8 0.4 0 0.4 -0.8 0 0 -  
0.2 0.8 0.4 0 -0.4;1.5 -0.5 1 1 0.5 0 0 1 0 0.5 -0.5 0 0 1.5 1 -1 0.5 -0.5 0.5 1.5 -1.5 -0.5 1 -0.5 0  
0.5 1 0.5 0 1 0 0.5 1 1 0.5 -1 0.5 1 0.5 1 -0.5 0.5 0.5 1 1.5 0.5 0 0.5 0 1 0 0 1 1.5 1 1 0 1 0.5  
;0 0.5 -0.5 0 -1.5 1.5 -0.5 1 0.5 0.5 -1 1.5 0 0 1 -1 -0.5 1 1.5 1.5 -1 0.5 1 0.5 1 1.5 -0.5 -1 0  
1.5 -0.5 0 -1 1 0.5 0 -0.5 0 -1 -1 0.5 1.5 0.5 0.5 0.5 1 -0.5 0.5 1 0 0.5 -0.5 1.5 0.5 0 1 0 0 0];
```

% initialisation de la matrice des valeurs de rugosité en brunissage

```
MB = [-0.2 0.1 -0.1 -0.2 -0.2 0.2 0.1 0.2 0.2 0.1 0.2 0.2 -0.2 0 -0.1 0.1 0 -0.2 0.1 0.1 0 0.2 -0.2  
0 0 -0.2 -0.1 0 0.2 -0.1 0.1 0.1 0.2 0.1 0.2 0 0.2 0.2 0.2 -0.1 0 -0.1 0.1 -0.1 0 0.2 0.2 0.1 0 0.2 0  
-0.1 0 -0.2 -0.1 0 0.1 -0.2 -0.2 0 ;0.2 0 0.2 -0.2 -0.4 -0.5 0 0.4 -0.2 -0.2 0 -0.2 -0.2 0 0.2 0.4 0.2
```

```

0.4 0.2 -0.2 -0.4 0 0 0.4 0.2 -0.4 0.6 0.6 0.6 0.4 -0.2 -0.4 -0.6 -0.2 0.2 0.4 0.6 0.2 -0.2 -0.4 -0.2
0 0 0.4 0.2 0.2 0 0.4 0.4 0.2 0.6 0 0.4 0.2 0.2 0 -0.2 -0.4 0.4 0.4;0.4 0 -0.6 0 0.2 0.4 -0.2 0.5 0
0.4 0 -0.2 0 0 -0.2 -0.2 -0.2 0 0 0.4 0.4 0 0 0 -0.4 -0.2 0 0.2 0.6 0.2 0 0.4 0 0.2 -0.2 -0.4 -0.4 -
0.4 0 0.4 0 0.2 0.6 0.2 0.4 0.2 0 0 -0.2 0.4 0.4 0.4 0 -0.2 0 0.4 0.4 -0.2 -0.4 0 ; -0.2 -0.2 0 0.2
0.2 -0.2 0 0.2 0.2 0.2 0.1 0 0.1 0 -0.1 -0.2 0.1 0.3 0.3 0.3 -0.2 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.3 0 -0.3 -0.3
-0.4 -0.4 -0.3 0 0.1 0.3 0.2 0.1 0.2 0.3 0.2 0 0.2 0.2 0.3 0 -0.2 -0.3 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.2 0.1 -0.1
-0.2 -0.3 -0.4 0.1 ; -0.2 0.2 0.4 0.2 0 -0.2 0 -0.2 0 -0.2 0 -0.2 0.2 0 0.2 0.4 0.4 0.4 0.4 0.2 0 0
0.2 -0.2 0.2 0 0.2 -0.2 0.2 0 0.2 0.4 0 -0.2 -0.6 -0.4 0 0.2 0 0.2 0.4 0 -0.2 0 0 0 -0.2 0.2 -0.2 0.2
0.4 0.4 0.2 0.4 0.4 0.2 -0.2 -0.4 0 -0.4 ; -0.2 -0.2 0 0.2 0.2 -0.2 0 0.2 0.2 0.2 0.1 0 0.1 0 -0.1 -
0.2 0.1 0.3 0.3 0.3 -0.3 -0.2 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.3 0 -0.3 -0.3 -0.4 -0.4 -0.3 0 0.1 0.3 0.2 0.1 0.2
0.3 0.2 0 0.2 0.2 0.3 0 -0.2 -0.3 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.2 0.1 -0.1 -0.2 -0.3 -0.4 ; 0 -0.3 -0.4 -0.2 0
0.2 0.2 0.1 0.1 -0.2 -0.2 0.2 0.2 -0.3 0 -0.1 0 -0.1 -0.2 0 0.2 0.3 -0.1 0 0 -0.2 -0.3 -0.1 0 0.2 0.3
0.3 0.3 0.3 0.2 0 -0.1 0 -0.2 -0.4 -0.2 -0.2 0 0.1 0.2 0.1 0.3 0.3 0.1 0.1 0 -0.2 -0.3 -0.3 0 -0.1 -
0.10 0.3 0.3 0.3;0.4 0.4 0 0.4 0 0.4 0.2 -0.2 0 0.2 -0.2 -0.3 0 -0.2 -0.2 0.2 0.4 -0.2 0 0.4 0.6 0.4
0.2 -0.2 -0.4 -0.4 -0.2 0 -0.2 0 0 0.2 0 0 0.4 0.2 -0.2 0.2 0.4 0 0.4 0 0.2 -0.2 0.2 0.4 0.2 0 0.2
0.4 0.4 0.2 -0.2 0 0.2 0.2 0.2 0 0 ];
y=[0 17662 35324 52986 70648 88310 105972 123634];
x = 0:2500:147500;
MT1=MT*5
figure(1)
surf(x,y,MT1,'facecolor','red','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
xlabel('longueur de mesure  $\mu\text{m}$ ');
Ylabel('ligne directionnelle  $\mu\text{m}$ ');
Zlabel('valeurs de rugosité  $\mu\text{m}$ ');
legend('surface tournée');
title('surface tournée');
figure(2)
surf(x,y,MR,'facecolor','cyan','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
xlabel('longueur de mesure  $\mu\text{m}$ ');
Ylabel('ligne directionnelle  $\mu\text{m}$ ');
Zlabel('valeurs de rugosité  $\mu\text{m}$ ');
legend('surface rectifiée');
title('surface rectifiée');
figure(3)
surf(x,y,MB,'facecolor','BLUE','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
xlabel('longueur de mesure  $\mu\text{m}$ ');
Ylabel('ligne directionnelle  $\mu\text{m}$ ');
Zlabel('valeurs de rugosité  $\mu\text{m}$ ');
legend('surface brunie');
title('surface brunie');
figure(4)
MR=MR+4
MB=MB+6
surf(x,y,MB,'facecolor','BLUE','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
legend('surface brunie');
hold on

```

```

surf(x,y,MR,'facecolor','cyan','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
legend('surface rectifier');
surf(x,y,MT1,'facecolor','red','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
xlabel('longueur de mesure  $\mu\text{m}$ ');
Ylabel('ligne directionnelle  $\mu\text{m}$ ');
Zlabel('valeurs de rugosité  $\mu\text{m}$ ');
legend('surface brunie','surface rectifier','surface tournée');
title('superposition des 3 surfaces');
hold off

```

% Programme d'analyse et d'estimation des paramètres de contact entre surfaces

%Sous programme 1 - contact entre surfaces

% initialisation de la matrice des valeurs de rugosité en tournage

```

MT = [-0.3 0.4 0.1 0.3 0 0.5 0 -0.2 -0.2 0.3 0.5 -0.5 0 -0.3 0.4 0 0.2 -0.1 0.5 -0.3 0 -0.1 0.2
0.05 0 0.3 0.2 0.2 0 0.3 0.1 0.1 0 0.1 0 0.2 0.1 -0.3 -0.1 -0.3 0.2 -0.1 0.2 0 0.2 0.1 0.2 0 -0.1
0.1 0 0.3 -0.1 0.1 0.2 0.3 -0.2 0.3 0 0.3 ;0 -0.2 -0.1 -0.2 0.2 0.5 0.2 0 0.3 0.2 -0.1 0 -0.2 0.3 0
0.2 0 0.4 0 0.2 0 0.4 0.2 -0.3 -0.1 0.2 0.4 -0.3 0.1 -0.1 0 0.3 -0.1 0 0.2 0.3 0.3 0 -0.1 0 0.2 -0.2
-0.1 0 0.4 0 -0.1 0.2 0.2 0 0.1 0.1 0.2 0 0.2 0.1 0.2 0 0.2 0 ;0.3 -0.3 -0.1 0.2 0.3 0.1 0.1 0 -0.3
0.25 0.1 0.2 -0.2 -0.2 0.3 0.1 0 -0.1 0.1 -0.2 0.1 0.1 0.3 -0.2 0.2 0 0.3 0.3 -0.2 0 0 0.2 0.25 0.1
-0.2 0.1 0 -0.1 -0.2 0.2 0.1 -0.1 0.1 0.2 0.3 -0.3 0.3 0 0.1 -0.05 0.2 0.2 0.2 0.1 0.1 -0.2 -0.1 0.1
0.2 -0.2 ;0.2 0.2 0.4 0 0.1 -0.2 0 0.15 -0.2 0.2 0.1 0.4 0.2 0 -0.1 0.4 0.3 -0.2 0 0.2 0.3 -0.2 0.2
-0.2 0.3 0.2 -0.1 0 0 0.2 0.3 0.2 -0.2 0.4 0.3 -0.1 -0.1 0.2 0.4 -0.3 0 0.3 0.2 -0.2 0 0.2 0.4 0.1 0
0.1 0 0.2 -0.1 0.1 -0.2 0.1 -0.2 0.3 0 0.3 ;0 -0.1 -0.2 0 0.2 -0.2 0.2 -0.1 0.3 0.2 -0.2 0.4 -0.2
0.3 0.2 0.2 0.1 0.2 0 0.4 0 -0.1 0 -0.2 0.4 -0.4 0.2 0.2 0.1 0.3 -0.1 -0.1 0 0.3 0 0.1 0.1 0.3 -0.1
0.3 0 0.4 0 0.1 0 0.4 0.1 -0.2 0 -0.1 0.3 0.3 0 0.1 0.1 0.1 -0.2 0.2 0.1 0.2 ;0 -0.2 0.2 0.2 -0.2
0.2 -0.3 0.3 0 0.1 -0.1 0 0.1 0.2 0.1 -0.1 0.2 -0.2 0.3 -0.2 0.2 0.1 0.2 0 0.1 0.1 -0.1 -0.2 0.3 0.3
-0.3 0.1 -0.2 -0.2 0.3 0 0.1 -0.2 0.2 0.3 0.1 0.3 0 0.1 -0.1 0.1 0.2 0.2 0.1 -0.1 0.3 0.3 0.2 0.2 0
0.3 0.3 -0.3 -0.2 0.1 ;-0.2 0.4 -0.2 0 0.2 -0.1 0.1 -0.2 0.2 0.3 -0.2 0.2 0.1 0.3 0 -0.1 0.2 -0.1
0.3 0.2 -0.1 0.1 -0.2 0.1 0 0.2 0 0.1 0.2 0.2 0.3 -0.1 0.2 0 0.1 -0.1 0.2 0.1 0.1 0.2 0.1 0.1 -0.2 0
-0.1 -0.1 0.2 0.2 0.3 0.1 0.2 0.1 0.2 0 0.1 0 0.2 0.3 0.1 ;0 0.4 0.3 -0.3 0.2 -0.3 0 -0.3 0.3 -0.1
0.2 0.1 0.4 0 -0.1 -0.2 0.4 0.3 0 -0.2 0.3 0.2 0.1 0 0.1 0.2 0.1 0.1 -0.1 0.3 0.1 0.1 0 0.2 0.4 0.1 -
0.1 0 0.1 -0.3 0 0 0.2 -0.3 -0.1 -0.2 0.3 0.3 0.1 0 -0.1 0 -0.3 -0.1 -0.2 0.1 -0.1 0.2 0.2 0.3];

```

% initialisation de la matrice des valeurs de rugosité en rectification

```

MR = [0 -0.2 0 0.1 -0.2 0.3 0 0.2 0.3 -0.2 -0.1 -0.3 0.4 0.4 0.1 -0.3 0.2 0.2 0 0.4 0.4 0.1 -0.1
0.3 0.2 0.4 0 -0.1 0.2 0.3 0.4 -0.2 -0.3 -0.2 0.3 0.3 0 -0.4 0.4 0.3 0.1 0.1 -0.1 0.2 0.3 -0.3 -0.1
0.4 0.4 -0.3 0.4 0.4 0.3 0.3 0 -0.2 0.4 -0.1 0.3 0.3;-0.3 0.4 0 -0.1 0 0.3 -0.2 0.1 0 0.1 0.4 0.2 0 -
0.3 0.4 -0.1 0.3 0 0.3 0 -0.3 0.3 0.3 0.2 0.4 0.4 0.2 0.2 0.4 0 0.2 0.2 0.4 0.2 0.1 -0.2 0.4 -0.2
0.4 -0.1 0 -0.2 0.4 -0.1 -0.3 0 0.1 0.4 0.4 -0.1 0.2 -0.4 -0.1 0.1 0.4 0.2 0 0.4 0.2 0.2;-0.1 -0.2
0.3 0.2 0 -0.4 0.2 0.3 0 0 0.2 0.2 -0.2 0.4 0 0.1 0 -0.1 0.4 -0.2 0 0.2 0.1 0.3 0.4 0.4 0 0.2 -0.4
0.4 0.3 0.1 0.1 -0.1 0.2 0.1 0.2 0.4 0.1 0.2 0.3 0.4 0.4 -0.4 0.4 0.3 0.1 0.3 0.1 0.2 0.4 -0.2 0.2
0.2 0.4 0 -0.2 0.3 0.2 0.2 ;0.4 0 0.1 -0.3 0.4 0.3 0.4 -0.1 -0.1 0 0.2 0 -0.3 0 0.3 -0.2 0.3 -0.2
0.2 0 0.4 0 0.3 -0.1 -0.4 -0.2 0.2 0.3 0.3 0.2 0.2 0.3 0.3 0.4 -0.1 0 -0.2 0.4 0.2 -0.1 0.2 0.2 0.4 0
0.1 0 0.2 0.3 0.3 -0.1 -0.2 0.2 0.2 0.1 0 0.4 0.2 -0.2 0.2 0 ;0.3 0.2 0 0.2 0.1 0.1 0 -0.2 0.2 0.4 0
0.2 0 0.4 0.2 -0.4 0 0.3 0.4 0.2 -0.3 -0.2 0 0.3 0.3 -0.1 0.4 -0.1 0.4 0.2 0.2 0 -0.2 0 0.4 -0.2 -0.1

```

```
-0.3 0.4 0.4 0 -0.2 0.4 0.1 -0.2 -0.3 0.4 0.3 0.2 -0.4 0 0.3 0.2 0.2 0.1 0.4 0.1 0.2 0.1 0.2;0 0.4
0.2 0 -0.1 0.2 0.1 0.2 0 -0.1 0.2 0.3 0 0 -0.3 -0.4 0 -0.1 0.3 0.3 0 0.1 0.3 0.4 0 -0.1 0.4 0.4 -0.2
-0.3 0 0.2 0.3 0 -0.1 0.2 0.2 0.2 -0.1 0.3 0.3 0.4 0.3 0.2 0 -0.2 -0.3 -0.1 -0.4 0.2 0 0.2 -0.4 0 0 -
0.1 0.4 0.2 0 -0.2;0.3 -0.1 0.2 0.2 0.1 0 0 0.2 0 0.1 -0.1 0 0 0.3 0.2 -0.2 0.1 -0.1 0.1 0.3 -0.3 -
0.1 0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.1 0 0.2 0 0 0.1 0.2 0.2 0.1 -0.2 0.1 0.2 0.1 0.2 -0.1 0.1 0.1 0.2 0.3 0.1 0
0.1 0 0.2 0 0 0.2 0.3 0.2 0.2 0 0.2 0.1 ;0 0 0.1 -0.1 0 -0.3 0.3 -0.1 0.2 0.1 0.1 -0.2 0.3 0 0 0.2 -
0.2 -0.1 0.2 0.3 0.3 -0.2 0.1 0.2 0.1 0.2 0.3 -0.1 -0.2 0 0.3 -0.1 0 -0.2 0.2 0.1 0 -0.1 0 -0.2 -0.2
0.1 0.3 0.1 0.1 0.1 0.2 -0.1 0.1 0.2 0 0.1 -0.1 0.3 0.1 0 0.2 0 0 0 ];
```

```
%initialisation de la matrice des valeurs de rugosité en brunissage
```

```
MB = [-0.2 0.1 -0.1 -0.1 -0.1 0 0.1 0.2 0.2 0.1 0.2 0.2 -0.2 0 -0.1 0.1 0 -0.2 0.1 0.1 0 0.2 -0.2 0
0 -0.2 -0.1 0 0.2 -0.1 0.1 0.1 0.2 0.1 0.2 0 0.2 0.2 0.2 -0.1 0 -0.1 0.1 -0.1 0 0.2 0.2 0.1 0 0.2 0 -
0.1 0 -0.2 -0.1 0 0.1 -0.2 -0.2 0 ;0.1 0 0.1 -0.1 -0.2 -0.25 0 0.3 -0.1 -0.1 0 -0.1 -0.1 0 0.1 0.2
0.1 0.2 0.1 -0.1 -0.2 0 0 0.2 0.1 -0.2 0.3 0.3 0.3 0.2 -0.1 -0.2 -0.3 -0.1 0.1 0.2 0.3 0.1 -0.1 -0.2
-0.1 0 0 0.2 0.1 0.1 0 0.2 0.2 0.1 0.3 0 0.2 0.1 0.1 0 -0.1 -0.2 0.2 0.2;0.2 0 -0.3 0 0.1 0.2 -0.1
0.25 0 0.2 0 -0.1 0 0 -0.1 -0.1 -0.1 0 0 0.2 0.2 0 0 0 -0.2 -0.1 0 0.1 0.3 0.1 0 0.2 0 0.1 -0.1 -0.2
-0.2 -0.2 0 0.2 0 0.1 0.3 0.1 0.2 0.1 0 0 -0.1 0.2 0.2 0.2 0 -0.1 0 0.2 0.2 -0.1 -0.2 0 ;-0.2 -0.2 0
0.2 0.2 -0.2 0 0.2 0.2 0.2 0.1 0 0.1 0 -0.1 -0.2 0.1 0.3 0.3 0.3 -0.2 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.3 0 -0.3 -
0.3 -0.4 -0.4 -0.3 0 0.1 0.3 0.2 0.1 0.2 0.3 0.2 0 0.2 0.2 0.3 0 -0.2 -0.3 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.2 0.1
-0.1 -0.2 -0.3 -0.4 0.1 ; -0.1 0.1 0.2 0.1 0 -0.1 0 -0.1 0 -0.1 0 -0.1 0.1 0 0.1 0.2 0.2 0.2 0.2 0.1
0 0 0.1 -0.1 0.1 0 0.1 -0.1 0.1 0 0.1 0.2 0 -0.1 -0.3 -0.2 0 0.1 0 0.1 0.2 0 -0.1 0 0 0 -0.1 0.1 -0.1
0.1 0.2 0.2 0.1 0.2 0.2 0.1 -0.1 -0.2 0 -0.2 ;-0.2 -0.2 0 0.2 0.2 -0.2 0 0.2 0.2 0.2 0.1 0 0.1 0 -
0.1 -0.2 0.1 0.3 0.3 0.3 -0.3 -0.2 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.3 0 -0.3 -0.3 -0.4 -0.4 -0.3 0 0.1 0.3 0.2 0.1
0.2 0.3 0.2 0 0.2 0.2 0.3 0 -0.2 -0.3 0 0.3 0.3 0.3 0.2 0.2 0.1 -0.1 -0.2 -0.3 -0.4 ;0 -0.3 -0.4 -
0.2 0 0.2 0.2 0.1 0.1 -0.2 -0.2 0.2 0.2 -0.3 0 -0.1 0 -0.1 -0.2 0 0.2 0.3 -0.1 0 0 -0.2 -0.3 -0.1 0
0.2 0.3 0.3 0.3 0.2 0 -0.1 0 -0.2 -0.4 -0.2 -0.2 0 0.1 0.2 0.1 0.3 0.3 0.1 0.1 0 -0.2 -0.3 -0.3 0
-0.1 -0.10 0.3 0.3 0.3 ;0.2 0.2 0 0.2 0 0.2 0.1 -0.1 0 0.1 -0.1 -0.15 0 -0.1 -0.1 0.1 0.2 -0.1 0 0.2
0.3 0.2 0.1 -0.1 -0.2 -0.2 -0.1 0 -0.1 0 0 0.1 0 0 0.2 0.1 -0.1 0.1 0.2 0 0.2 0 0.1 -0.1 0.1 0.2
0.1 0 0.1 0.2 0.2 0.1 -0.1 0 0.1 0.1 0 0 0];
```

```
y=[0 1.7662 3.5324 5.2986 7.0648 8.8310 10.5972 12.3634];
```

```
x = 0:0.25:14.75;
```

```
%*****
```

```
% 1= contact surface tournée et surface rectifiée
```

```
switch z
```

```
case 1
```

```
pcr1=0;pc1=0;
```

```
% inversedement de la surface rectifiée
```

```
for j=1:length(x)
```

```
IMT(:,j)=-MT(:,length(x)+1-j);
```

```
end;
```

```
figure(3)
```

```
surf(x,y,IMT,'facecolor','red','edgecolor','none')
```

```
camlight left;lighting phong
```

```
axis([0 20 0 15 -5 5]);
```

```
title('surface tournée invercée');
```

```
for i=1:8
```

```
for j=1:60
```

```
diff(i,j)=IMT(i,j)-MR(i,j);
```

```
if diff(i,j)==0
```

```
pcr1=pcr1+1;
```

```
end;end;end;
```

```

A1=min(min(diff(i,j)));
B1=max(max(diff(i,j)));
for i=1:8
    for j=1:60
        if diff(i,j)==A1
            diff(i,j)=diff(i,j)-A1;
            pc1=pc1+1;
        end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
        if diff(i,j)==B1
            diff(i,j)=diff(i,j)-B1;
            pc1=pc1+1;
        end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
if A1<diff(i,j)
        A1=diff(i,j);
        diff(i,j)=diff(i,j)-A1;
        pc1=pc1+1;
        end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
if A1>diff(i,j)
        A1=diff(i,j);
        diff(i,j)=diff(i,j)-A1;
        pc1=pc1+1;
        end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
if B1>diff(i,j)
        B1=diff(i,j);
        diff(i,j)=diff(i,j)-B1;
        pc1=pc1+1;
        end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
if B1<diff(i,j)
        B1=diff(i,j);
        diff(i,j)=diff(i,j)-B1;
        pc1=pc1+1;
        end;end;end;
pct1=pc1+pcr1;
disp('Le nombre de points de contact totale est pct1='),disp(pct1);
perr1=(pcr1)*100/(length(x)*length(y));
per1=(pc1)*100/(length(x)*length(y));
pertr= perr1+per1;
disp('le % de contact est pertr='),disp(pertr);
IMT=IMT+0.78;
figure(4)

```

```

surf(x,y,IMT,'facecolor','RED','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
axis([0 20 0 15 -5 5]);
xlabel('longueur de mesure');
Ylabel('ligne directionnelle');
Zlabel('Ra');
hold on
surf(x,y,MR,'facecolor','cyan','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
colormap([1 1 0; 0 1 1])
axis([0 20 0 15 -5 5]);
title('contant entre surft et surfr');
legend('surface tournée','surface rectifiée');
hold off
end ;
%*****
% 2= contact surface tournée et surface brunie
switch z
case 2
pcr2=0; pc2=0;
% inversement de la surface brunie
for j=1:length(x)
IMT(:,j)=-MT(:,length(x)+1-j);
end ;
figure(5)
surf(x,y,IMT,'facecolor','RED','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
axis([0 20 0 15 -5 5]);
title('surface tournée invercée');
for i=1:8
for j=1:60
diff(i,j)=IMT(i,j)-MB(i,j);
if diff(i,j)==0
pcr2=pcr2+1;
end;end;end;
A2=min(min(diff(i,j)));
B2=max(max(diff(i,j)));
for i=1:8
for j=1:60
if diff(i,j)==A2
diff(i,j)=diff(i,j)-A2;
pc2=pc2+1;
end;end;end;
for i=1:8
for j=1:60
if diff(i,j)==B2
diff(i,j)=diff(i,j)-B2;
pc2=pc2+1;
end;end;end;
for i=1:8

```

```

for j=1:60
if A2<diff(i,j)
    A2=diff(i,j);
    diff(i,j)=diff(i,j)-A2;
    pc2=pc2+1;
end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
if A2>diff(i,j)
    A2=diff(i,j);
    diff(i,j)=diff(i,j)-A2;
    pc2=pc2+1;
end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
if B2<diff(i,j)
    B2=diff(i,j);
    diff(i,j)=diff(i,j)-B2;
    pc2=pc2+1;
end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
if B2>diff(i,j)
    B2=diff(i,j);
    diff(i,j)=diff(i,j)-B2;
    pc2=pc2+1;
end;end;end;
pct2=pc2+pcr2;
disp('Le nombre de points de contact totale est pct2='),disp(pct2);
perr2=(pcr2)*100/(length(x)*length(y));
per2=(pc2)*100/(length(x)*length(y));
pertb= perr2+per2;
disp('le % de contact est pertb='),disp(pertb);
IMT=IMT+0.62;
figure(6)
surf(x,y,IMT,'facecolor','RED','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
axis([0 20 0 15 -5 5]);
xlabel('longueur de mesure');
Ylabel('ligne directionnelle');
Zlabel('Ra');
hold on
surf(x,y,MB,'facecolor','BLUE','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
colormap([1 1 0; 0 1 1])
axis([0 20 0 15 -5 5]);
title('contant entre surf1 et surfb');
legend('surface tournée','surface brunie');
hold off
end ;

```

```

% *****
% 3= contact surface rectifiée et surface brunie
switch z
    case 3
        pc3=0;
        pcr3=0;
% Inversement de la surface rectifiée
        for j=1:length(x)
            IMR(:,j)=-MR(:,length(x)+1-j);
        end ;
        figure(9)
        surf(x,y,IMR,'facecolor','CYAN','edgecolor','none')
        camlight left;lighting phong
        axis([0 20 0 15 -5 5]);
        title('surface rectifiée invercée');
        for i=1:8
            for j=1:60
                diff(i,j)=IMR(i,j)-MB(i,j);
                if diff(i,j)==0
                    pcr3=pcr3+1;
                end;end;end;
            A3=min(min(diff(i,j)));
            B3=max(max(diff(i,j)));
            for i=1:8
                for j=1:60
                    if diff(i,j)==A3
                        diff(i,j)=diff(i,j)-A3;
                        pc3=pc3+1;
                    end;end;end;
                for i=1:8
                    for j=1:60
                        if diff(i,j)==B3
                            diff(i,j)=diff(i,j)-B3;
                            pc3=pc3+1;
                        end;end;end;
                    for i=1:8
                        for j=1:60
                            if A3<diff(i,j)
                                A3=diff(i,j);
                                diff(i,j)=diff(i,j)-A3;
                                pc3=pc3+1;
                            end;end;end;
                        for i=1:8
                            for j=1:60
                                if A3>diff(i,j)
                                    A3=diff(i,j);
                                    diff(i,j)=diff(i,j)-A3;
                                    pc3=pc3+1;
                                end;end;end;
                            for i=1:8

```

```

for j=1:60
if B3<diff(i,j)
    B3=diff(i,j);
    diff(i,j)=diff(i,j)-B3;
    pc3=pc3+1;
end;end;end;
for i=1:8
    for j=1:60
if B3>diff(i,j)
    B3=diff(i,j);
    diff(i,j)=diff(i,j)-B3;
    pc3=pc3+1;
end;end;end;
A4=min(min(diff(i,j)));
for i=1:8
    for j=1:60
        if diff(i,j)==A4
            diff(i,j)=diff(i,j)-A4;
            pc3=pc3+1;
        end;end;end;
pct3=pc3+pcr3;
disp('Le nombre de points de contact totale est pct3='),disp(pct3);
perr3=(pcr3)*100/(length(x)*length(y));
per3=(pc3)*100/(length(x)*length(y));
perrb= perr3+per3;
disp('le % de contact est perrb='),disp(perrb);
IMR=IMR+0.65;
figure(10)
surf(x,y,IMR,'facecolor','CYAN','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
axis([0 20 0 15 -5 5]);
xlabel('longueur de mesure');
Ylabel('ligne directionnelle');
Zlabel('Ra');
% legend('surface tournée');
hold on
surf(x,y,MB,'facecolor','BLUE','edgecolor','none')
camlight left;lighting phong
colormap([1 1 0; 0 1 1])
axis([0 20 0 15 -5 5]);
title('contant entre surfr et surfb');
legend('surface rectifiée','surface brunie');
hold off
end.

```

%Sous programme 2 – Rugosités dans un contact lubrifié

% Matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par tournage

```
RyT=[3.5 2 2.5 1.5 3.5 0 2.5 0.5 1.5 0 1 1.5 2.5 3 2.5 2 2.5 2.5 2 3 1.5 1 0.5 0.5 2.5 2 3 1.5 2
3.5;2.5 3 1.5 1 1 2.5 2 2.5 2 2 3 1.5 3 0 2 1 3 1 2.5 2 3.5 1 2.5 1 2 2.5 2.5 1 1.5 1.5;0.5 2.5 0.5
1.5 2 1.5 2.5 1 2 1 1.5 0.5 1 0.5 2.5 2 0.5 3 2 3 1.5 1.5 0.5 0.5 1 1 0.5 0.5 3 1 ;1 0 2.5 2 3.5 2 1
0 1 0 1.5 1.5 1 3 2.5 1 3 0 3 0.5 2.5 1 2.5 0 2.5 1.5 3 2.5 3 2.5;2.5 3 1 1.5 1 2 3 1.5 2 2.5 1 2.5
0 1.5 1 3 1.5 0.5 2 3 1.5 0.5 2.5 1 2.5 0.5 1.5 1.5 2.5 1.5;2.5 2 3.5 2.5 2.5 2.5 2 2 1.5 1 1 1 1.5
3 1 3.5 3 2 3 1 1 1.5 1.5 1.5 3 1.5 2.5 0.5 3.5 1 3.5 0 2.5 1.5 2 1.5 3 2 2.5 2.5 1 2 1 1 1.5 1.5
2.5 2 2.5 2 1.5 2 2.5 2 1 2 1.5 2.5 2.5 1;2.5 1 1.5 2 0.5 0.5 0.5 3 0.5 2.5 0.5 2 2.5 2 3 2 2.5 0.5
3 2 2.5 1.5 2 0.5 1.5 2.5 3.5 3 3.5 1.5] ;
```

% Matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par rectification

```
RyR=[0 1.4 0.4 0.4 0 1.8 0 0.8 0.4 0.4 0 0.4 0.6 1.2 0.8 0.4 1.8 0 1.4 0.4 0.6 1 0.6 1.2 0 0 0 1.4
0 0.4; 1.6 0.4 0.8 1.4 0.6 0.4 1 0.6 0.2 0.6 1.6 0.6 0 1 0 0.6 0 0.6 0.4 0.4 1.4 0 0.2 0.2 0 0.6 1.8
0 0.4 0;1.6 0.6 1.4 0.4 0 0.8 0.8 1 1.4 0.4 0.8 0.4 0.4 0.6 2.4 0.4 0.6 1.4 0.6 0.4 0.4 0.8 0.4 1.8
0.6 0.6 0.8 1.6 0.4 0.6;0.2 1 0 0 1.4 0.4 0.6 0.8 0.6 0.4 0 0.2 2 1 0.2 0.4 0 1.6 1.6 0.8 0.6 0.2
0.4 0.6 0.6 1.4 0.8 1 0 1;0.4 1.4 0.4 1.4 0.2 1.2 0.6 1 0.8 0.6 1.6 1.4 0.6 0.6 0 1 1.4 0.2 1.4 0
0.6 0.4 1.8 0 0.2 1.4 0.8 1 0.4 0.8 ;0.8 1 0.8 0.4 0.6 1 0.8 1.8 1 0.4 1.2 0.4 0.8 0.4 1.6 1.4 0.4
1.6 0.4 1.4 0.2 0 1.2 1.8 1.4 1.2 2 1.2 0 0.2 ;0.5 1.5 1.5 2 1.5 3 2.5 1.5 2 1.5 4 1.5 2 1 2.5 2 1
1.5 3.5 1.5 1.5 2 1.5 2 2.5 2.5 2.5 3.5 1 1.5 ;2 2 2 0.5 1 1 0.5 1 1.5 0.5 0.5 1 1 1.5 3 0.5 1.5 0.5
0.5 2 2 0.5 1 1 1.5 2 2.5 1.5 0.5 2];
```

% Matrice des amplitudes des rugosités de la surface traitée par brunissage

```
RyB=[0.7 0.7 0.6 0.1 0 0.2 0.2 0.6 0.5 0.2 0.4 0.7 0.5 0.6 0 0.2 0.2 0.2 0.2 0 0.5 0.3 0.4 0 0.5
0.5 0.5 0.6 0.5 0.6;0.6 0.6 1.2 0.8 0.2 0.2 0.8 0.6 0.8 0.4 0.6 1.2 0.8 0.6 0 0 1 1.2 0.6 0.2 0.8
0.8 0.8 0.8 0.6 0.2 0 0.2 0.6 0.5;0 2 0.8 1 0.8 0.8 0.8 1 1 0.4 0 0.8 1.2 0.8 0.4 0.8 0.8 1.2 0.8
0.8 0 0.2 0.8 0.4 0.2 0.4 0.6 0.4 0.6 0.4;0.6 0.6 1.2 0.8 0.2 0.2 0.8 0.6 0.8 0.4 0.6 1.2 0.8 0.6 0
0 1 1.2 0.6 0.2 0.8 0.8 0.8 0.8 0.6 0.2 0 0.2 0.6 0.5;1 0.4 0.8 0.8 0.8 0.8 0.6 0.6 0.4 0.2 0.6 0.6
0.6 0.6 0.4 0.4 0.4 1.2 0.6 0.8 0.8 0.4 1 0.6 0.8 1 0.2 0.6 0.2 0.2;0.6 0.1 0 0.5 0.8 0.5 0 0.4 0.4
0.4 0.7 0.5 0 0.1 0.4 0.8 0.9 0.5 0 0.5 0.5 0.8 0.7 0.8 0 0.1 0.1 0.5 0.9 0.5;0.5 0.9 0.5 0 0 0.7
0.7 0.4 0.2 0.6 0.3 0.6 0.5 0.7 0.5 0.2 0.1 0 0.5 0.8 0.2 0.1 0.2 0 0.3 0.5 0.7 0.2 0.6 0.7;0.4 0.8
0.8 0.6 0.8 1 1 0.8 0.4 0.8 0 0.4 1.4 1.2 1.2 1 1 1 1 1 1 1.2 0 1 0.4 0.8 1 0.8 0.4];
```

```
ET=svd( RyT);
```

```
ER=svd(RyR);
```

```
EB=svd(RyB);
```

```
x=1:30;
```

```
y=1:8;
```

```
h0= 15;
```

```
%*****
```

% ' 1= contact entre surface tournée et surface rectifiée'

```
switch z
```

```
case 1
```

```
    n1=0;m1=0;k1=0;
```

```
    for i=1:length(y)
```

```
        SIGMA1(i)=sqrt (ET(i)^2+ ER(i)^2);
```

```
    end;
```

```
    for i=1:length(y)
```

```
        for j=1:length(x)
```

```

h1(i,j) = h0+ RyT(i,j)+ RyR(i,j);
Q1(i,j)=h1(i,j)/SIGMA1(i);
if Q1(i,j)>3,n1=n1+1;
else if Q1(i,j)==3,m1=m1+1;
else k1=k1+1;end;end;end;end;
if n1>=1,disp('rugosité peu importante avec n1='),disp(n1),end;
if m1>=1,disp('la régiosité n est pas négligeable avec m1='),disp(m1),end;
if k1>=1,disp('rugosité importante le régime de lubrification est mixte avec
k1='),disp(k1),end;
pern1=(n1*100)/((length(y))*(length(x)));
perm1=(m1*100)/((length(y))*(length(x)));
perk1=(k1*100)/((length(y))*(length(x)));
end;
%*****
% '2=contact entre surface tournée et surface brunie'
switch z
    case 2
        n2=0;m2=0;k2=0;
        for i=1:length(y)
            SIGMA2(i)=sqrt (ET(i)^2+ EB(i)^2);
            end;
        for i=1:length(y)
            for j=1:length(x)
                h2(i,j) = h0+ RyT(i,j)+ RyB(i,j);
                Q2(i,j)=h2(i,j)/SIGMA2(i);
                if Q2(i,j)>3,n2=n2+1;
                else if Q2(i,j)==3,m2=m2+1;
                else k2=k2+1;end;end;end;end;
                if n2>=1,disp('rugosité peu importante avec n2='),disp(n2),end;
                if m2>=1,disp('la régiosité n est pas négligeable avec m2='),disp(m2),end;
                if k2>=1,disp('rugosité importante le régime de lubrification est mixte avec
                k2='),disp(k2),end;
                pern2=(n2*100)/((length(y))*(length(x)));
                perm2=(m2*100)/((length(y))*(length(x)));
                perk2=(k2*100)/((length(y))*(length(x)));
                end;
                %*****
                % '3=contact entre surface rectifiée et surface brunie'
                switch z
                    case 3
                        n3=0;m3=0;k3=0;
                        for i=1:length(y)
                            SIGMA3(i)=sqrt (ER(i)^2+ EB(i)^2);
                            end;
                        for i=1:length(y)
                            for j=1:length(x)
                                h3(i,j) = h0+ RyR(i,j)+ RyB(i,j);
                                Q3(i,j)=h3(i,j)/SIGMA3(i);
                                if Q3(i,j)>3,n3=n3+1;
                                else if Q3(i,j)==3,m3=m3+1;

```

```

else k3=k3+1;end;end;end;end;
if n3>=1,disp('rugosité peu importante avec n3='),disp(n3),end;
if m3>=1,disp('la rugosité n'est pas négligeable avec m3='),disp(m3),end;
if k3>=1,disp('rugosité importante le régime de lubrification est mixte avec
k3='),disp(k3),end;
pern3=(n3*100)/((length(y))*(length(x)));
perm3=(m3*100)/((length(y))*(length(x)));
perk3=(k3*100)/((length(y))*(length(x)));
end.

```

www.oxpdf.com

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Kane Malal, contribution à l'étude de l'influence de la rugosité et des effets non newtoniens dans les contacts sévères lubrifiés, institue national des sciences appliquées de Lyon 2003.
- [2] Tourab Mouhamed, Influence des paramètres du régime de galetage sur les fonctions finales de rugosités et de dureté de surface des aciers, thèse de magister 2003, Département de Mécanique, Faculté des sciences de l'ingénieur ; Universté Badji Mokhtar.
- [3] <http://fr.wikipedia.org/wiki/frottement>.
- [4] G. Zambelli, L.Vincent, Approche tribologique publié sur www.eyssolles.com Sciences des matériaux.
- [5] A.Cornet et J.P Deville physique et ingénierie des surfaces EDP sciences. Strasbourg (1998).
- [6] M.Cartier, HEF Groupe, Guide d'emploi des traitements appliqués aux problèmes de frottement, Editions TEC et DOC, 2001.
- [7] Gérald Zambelli, Léo Vincent, Matériaux et contacts, presse polytechniques et universitaire romandes CH-1015 lausanne, 1998.
- [8] Jacques Boulanger, Tolérances et écarts dimentionnels, géométriques et d'états de surface, sous la direction Eric Felder, BM 74 technique de l'ingénieur janvier 2000.
- [9] wikipédia encyclopédie libre [http://fr.wikipedia.org/wiki/As % .état de surface](http://fr.wikipedia.org/wiki/As_%20%C3%A9tat_de_surface) catégorie usinage.
- [10] Y .Schoefs, s.Fournier, j-j Léon, productique mécanique, Delagrave 1999.
- [11] Martin Benjamin, publié sur <http://www.iFrance.com/espace-prepa/>
- [12] www.technique-ingenieur.fr/.../Introduction aux traitements de surface par impact. référence M1640 publié décembre 2000.
- [13] All cut instruments, principe de la mesure, www.mesures.com [www.all cut-biz](http://www.all-cut.biz).
- [14] Marie-Line Zani, Mesure de la rugosité, [www. Mesures.com/archives/758](http://www.Mesures.com/archives/758) rugosité publié octobre 2003.
- [15] Surface roughness effect outsider lubrication, ASLE transactions vol 10, pp334.

- [16] BOEDO, S. BOOKER, J.F. (1997), Surface Roughness and Structural Inertia in a Mode-Based Mass-Conserving Elastohydrodynamic Lubrification Model, *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*, 119, pp 449-455.
- [17] ZHANG, C., CHENG, H.S (2000), Transient Non-Newtonian Thermohydrodynamic Mixed Lubrification of Dynamically Loaded Journal Bearing *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*, 122, pp156-161.
- [18] WANG P, KEITH.T.G, (2001), Combined surface roughness of dynamically loaded journal bearings, STLE presentation.
- [19] www.usine-nouvelle.com/contact, JP, Notion de qualité.
- [20] A. CHEVALIER. J. BOHAN. Guide de technologie en fabrication mécanique, HACHETTE technique (1979).
- [21] www.evatec-tools.com/tournage-Catalogue-outils-coupant.
- [22] <http://fr.wikipedia.org/wiki/tournage/m%C3%A9catronique>
- [23] <http://fr.wikipedia.org/wiki/rectification/m%C3%A9catronique>
- [24] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Finition/rectification des surfaces \(meules à affûter les outils\).](http://fr.wikipedia.org/wiki/Finition/rectification_des_surfaces_(meules_%C3%A0_aff%C3%ACuter_les_outils))
- [25] P.Yves Manach, S.Thuillier, H.Laurent, N.Le Maoût, R.Grèze; Mise en forme des matériaux métalliques par déformation plastique: influence du comportement matériel, Laboratoire d'ingénierie des Matériaux de Bretagne LIMATB Université de Bretagne-Sud, 14^{ème} Colloque National de la recherche en IUT Lyon 2008.
- [26] L.Laouar, H.Hamadache, A.Bouaricha, S.Mekhilef, Effet du traitement mécanique de surface sur la rugosité et la dureté des couches superficielles de l'acier XC48, the first international conference on metallurgy 4-5 march 2009 ICM'2009, Biskra, Algérie.
- [27] <http://fr.wikipedia.org/wiki/galetage> catégorie traitement de surface.
- [28] A.C.E.MENDER, La technique du galetage, métaux, déformation N°47, avril 1978.
- [29] Tourab mohamed, et Bouchlaghem Abdelaziz, effets des paramètres du régime de galetage sur la rugosité et la dureté de surface des matériaux ferreux, Université Badji Mokhtar Annaba Département de Génie Mécanique.
- [30] Cogsdill Tools produits Inc. outil de précision 2002 www.cogsdill.com.
- [31] L. Laouar, H. Hamadache, S.Mekhilef, Influence du traitement mécanique par brunissage sur la tenue à l'usure de l'acier (RB40) produit à SIDER, revue des sciences et technologie "synthèse" n° 14, Université Badji Mokhtar Annaba 2005, pp.

- [32] H. Hamadache, L. Laouar, N.E. Zeghib, K. Chaoui, characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, journal of materials Technology 180-2006,130-136.
- [33] Gaceb Mouhamed et Brahmi Sadek, Etude de l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fatigue du XC48, (laboratoire de fiabilité des équipements pétroliers et matériaux) université M'hamed Bougarra de Boumerdes, Algérie.
- [34] YKHLEF Nora, Traitement par brunissage de l'acier XC48 simulation par plans d'expériences et par ABACUS encadré par Dr Laouar, session juin 2007, Département de Mécanique, Faculté des sciences de l'ingénieur; Universté Badji Mokhtar.
- [35] Nàvod na obsluhu, tour // universel SN40C Tos, tovàrne strojarskejn techniky.
- [36] R.Dietrich, D. Garsaudn précis de méthodes d'usinage Edition Fernand Nathan 1981.
- [37] Jaques Goupy, Plan d'expériences pour surface de réponse, collection Dunod 1999.
- [38] L. Laouar, traitement mécanique de surface par brunissage des aciers X48 et XC18- optimisation et caractérisation, thèse de doctorat d'Etat Annaba, Février 2007.
- [39] Murruy,R;Spiegel; Probabilité et statistique, Serie schaum 1983.
- [40] D.D. PALCHAV, traitement de finition et de durcissement par déformation plastique Superficielle, Moscow 1981.
- [41] M.Bridgelle, D.Nejjer, T.Correvits, A.Lost, Caractérisation fractale du transfert et rugosité lors du laminage à froid, Equipement Surfaces et Interfaces, laboratoire de métallurgie physique et laboratoire de métrologie et de mathématiques appliquées ENSAM Lille publié en 2002.
- [42] André Casadevall, Introduction à MATLAB, Paris 2004.
- [43] LEUNG M, HSIEH C.K, GOSWANI D.Y, 1997 Application of Boltzmann StaticalMechanics in the validation of Gaussian Summit Heightn Distribution In Rough Surfaces, jour. Of Trib, Vol. 119, n°,pp. 846-850.
- [44] HADJI, SAMIR Effect of machining techniques on surface roughness, by Dr Laouar session juin 2008, Département de Mécanique, Faculté des Sciences de l'ingénieur ; Universté Badji Mokhtar.
- [45] WU, C.ZHENG, L.An Average Reynolds Equation For Partial Film Lubrication With a contact Factor, ASME jour. of lubri. Tech, 111,pp 188-191.