

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOUKHTAR- ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté des sciences de l'ingénierat

Année : 2017

Département de génie mécanique

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur

---

---

**EFFET DE LA RUGOSITE SUR LES PERFORMANCES D'UN SYSTÈME MÉCANIQUE  
- APPROCHE PAR FRACTALE**

---

---

Option

Productique Mécanique

Par

**Mounira BOUREBIA**

**DIRECTEUR DE THÈSE :** Lakhdar LAOUAR

Pr. U. BADJI MOKHTAR ANNABA

**CO-DIRECTEUR DE THÈSE:** Hamid HAMADACHE

Pr. U. BADJI MOKHTAR ANNABA

**DEVANT LE JURY**

**PRESIDENT:** Amar HAIAHEM

Pr. U. BADJI MOKHTAR ANNABA

**EXAMINATEURS :** Ali BOUCHOUCHA

Pr. U. CONSTANTINE 1

Smail BOUTABBA

Pr. U. 8 MAI 45 GUELMA

Mahieddine ALI RACHEDI

Pr. E.S.T.I ANNABA

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma vive gratitude et mes vifs remerciements à mon Directeur de thèse, Professeur Lakhdar LAOUAR de l'université Badji Mokhtar Annaba d'avoir orienté mes recherches et croire en mes capacités ainsi que pour ses encouragements depuis mes études d'ingénieur jusqu'à présent.

J'exprime aussi ma reconnaissance et mes remerciements à mon co-encadreur, Professeur Hamid HAMADACHE pour son soutien durant mon parcours.

Je remercie le Professeur Amar HAIAHEM, Recteur de l'université Badji Mokhtar Annaba de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements vont également aux Membres de jury, Professeur Ali BOUCHOUCHA de l'université de Constantine, Professeur Smail BOUTABBA de l'université de Guelma et Professeur Mahieddine ALI RACHEDI de l'école supérieure de technologies industrielles Annaba, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Aussi, je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous ceux et celles qui m'ont consacré du temps en particulier :

- Professeur BOUCHELAGHEM A/Mahmoud directeur du Laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI) de l'Université Badji Mokhtar/Annaba ;
- Professeur Mohamed LABAIZ du département de métallurgie ;
- Brutunière Noël du département de mécanique et complexes des systèmes, ENSMA Université de Poitiers (France) ;
- Professeur ZAHZOUH directeur du Laboratoire de Génie des Matériaux de l'Université Badji Mokhtar/Annaba ;
- Serge DOMINIAK du laboratoire LEM3 de Metz/ France.

Mes remerciements vont également aux personnels d'essais mécaniques de URASM/CRTI-Alger.

Je tiens pareillement à remercier tous mes collègues et mes amis pour leur présence et leur soutien.

Enfin mes remerciements vont à mon mari, mes trois enfants, ma famille et ma belle famille pour leur soutien tout au long de ma formation.

Ce travail ne peut être présenté, sans exprimer mes vifs remerciements à toute l'équipe du laboratoire de mécanique industrielle (L.M.I.) et à tous les enseignants chercheurs du département de Génie Mécanique.

**Intitulé : Effet de la rugosité sur les performances d'un système mécanique**  
**- Approche par fractale**

**Résumé**

L'état de surface, en particulier la rugosité joue un rôle important dans l'évaluation de la qualité de surface et la détermination de l'aire de contact. La première partie de ce travail comprend une étude bibliographique sur la tribologie et sa relation avec le fini d'une surface, l'importance des paramètres de rugosité caractérisant un état de surface, l'introduction de l'approche fractale comme outil pour une évaluation plus objective devant les paramètres usuels ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,...) et l'intérêt des procédés de finition des surfaces par déformation plastique superficielle. La seconde partie revêt un caractère expérimental, dans la première phase sont décrits les moyens matériels, les techniques expérimentales ainsi que les outils méthodologiques adoptés telles que les plans d'expériences. Dans la seconde phase, des opérations de finition par le procédé de traitement mécanique de surface (TMS), en l'occurrence, le brunissage à la bille à différents régimes, a été réalisé sur des pièces en alliage d'aluminium. L'expérimentation a été menée au moyen des plans d'expériences de Box-Behnken. Les résultats ont été traités au moyen d'un programme sous Matlab, des modèles mathématiques ont été établis pour différentes réponses telles que : la rugosité, la dimension fractale, les paramètres de volume, l'indicateur d'isotropie ainsi que la dureté superficielle. Au regard des résultats expérimentaux et de simulation, l'approche fractale a prouvé son efficacité par rapport à la rugosité "Ra" dans la prédiction de la qualité de surface et son apport vis-à-vis des paramètres fonctionnels de la surface. Par ailleurs, les plans d'expériences s'adaptent aisément au procédé de finition choisi et ont été d'un grand intérêt pour l'optimisation des paramètres de traitement.

**Mots clés** : Etat de surface, Rugosité, Dimension Fractale, Plans d'Expériences, Brunissage, Isotropie, Paramètres de Volume.



**Title: Effect of roughness on performance of a mechanical system****- Fractal approach****Abstract**

The surface state, in particular the roughness plays an important role in evaluation surface quality and determination of contact area. The first part of this work includes a literature study on tribology and its relation with finished surface, the importance of roughness parameters characterizing a surface state, the introduction of fractal approach as a tool for evaluation more objective before usual parameters (Ra, Rz, Rt, ...) and the interest of finishing processes surfaces by superficial plastic deformation. The second part of an experimental nature, in first phase are described the material, experimental techniques well as methodological tools adopted such as design of experiments. In second phase, finishing operations by mechanical surface treatment process (TMS), in this case, burnishing ball at different regime was performed out on pieces of aluminum alloy. The experiment was conducted by means of the designs of experiments Box-Behnken. The results were processed using a Matlab program; mathematical models have been established for different responses such as roughness, fractal dimension, volume parameters, the isotropy indicator and superficial hardness. In light experimental and simulation results, fractal approach has proven its effectiveness in prediction of surface quality and his contribution overlooked functional surface parameters. Moreover, the designs of experiments easily adapt to select of finishing process and have been of great interest for optimization of treatment parameters.

**Keywords:** State of Surface, Roughness, Fractal Dimension, Design of Experiments, Burnishing, Isotropic, Volume Parameters.

**ملخص**

للخشونة دور مهم في دراسة حالة السطح لتقييم الجودة وتحديد منطقة التماس. فالجزء الأول من هذا العمل يشمل دراسة معمقة للمراجع المتعلقة بعلم احتكاك المفاصل وعلاقته بالسطح المشطب، والأهمية لمعالم الخشونة المميزة لحالة السطح، وكذلك مدخل المقاربة النمطي الهندسي كأداة أكثر موضوعية أمام المعالم الاعتيادية ( $Ra, Rz, Rt, \dots$ ) وفائدة طرق تشطيب الأسطح بالتنشويه اللدن السطحي. أما الجزء الثاني فهو ذو طابع تجريبي حيث تم في المرحلة الأولى وصف الموارد المادية وتقنيات التجارب والمنهجية المعتمدة على مخطط التجارب لـ "Box-Behnken"، أما المرحلة الثانية فهي انجاز معالجة ميكانيكية للسطح وهي التشطيب بواسطة الصقل بالكربيد بظروف تشغيل متفاوتة على عينات من سبيكة ألمنيوم. تمت معالجة النتائج المحصل عليها ببرامج حاسوب خاصة على "Matlab" وتم استنتاج نماذج رياضية مختلفة للخشونة والنمط الهندسي ومعالم الحجم ومؤشر توحيد الخواص وأخيرا الصلادة السطحية، وبالنظر إلى النتائج التجريبية والمحاكاة، أثبتت المقاربة النمطية الهندسية فعاليتها مقارنة بالخشونة "Ra" في التنبؤ بجودة السطح وإسهامه بالنسبة للمعالم الوظيفية للسطح، ومن جهة أخرى يتكيف مخطط تصميم التجارب بسهولة مع عملية التشطيب المختارة ذات الأهمية الكبيرة لتحسين معالم المعالجة.

**كلمات البحث:** للخشونة، حالة السطح، المقاربة النمطي الهندسي، مخطط التجارب، التشطيب بواسطة الصقل، معالم الحجم، مؤشر توحيد.

---

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : LA QUALITE DE SURFACE – SON IMPORTANCE EN TRIBOLOGIE</b>	
<b>I.1 Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>I.2 Historique sur la tribologie</b> .....	<b>6</b>
<b>I. 3 Contexte scientifique de la tribologie</b> .....	<b>9</b>
<b>I.4 La tribologie</b> .....	<b>10</b>
I.4.1 Les frottements.....	11
I.4.2 L'usure.....	12
I.4.2.1 Usure par abrasion.....	12
I.4.2.2 Usure par adhésion.....	13
I.4.2.3 Usure par corrosion.....	14
I.4.2.3 Usure par fatigue.....	14
I.4.3 Lubrification.....	15
<b>I.5 Rôle de la surface en tribologie</b> .....	<b>16</b>
<b>I.6 Etat de surface système mécanique</b> .....	<b>17</b>
I.6.1 Définition d'un état de surface .....	18
I.6.2 Relation entre qualité de surface (état de surface) et rugosité.....	18
I.6.3 Définition de la rugosité .....	19
I.6.4 Les différents paramètres de rugosité.....	19
I.6.4.1 Les principaux paramètres d'amplitude .....	19
▪ Ecart arithmétique moyen "Ra".....	19
▪ Rugosité moyenne quadratique "Rq".....	20
▪ Le coefficient de symétrie "S <sub>K</sub> ".....	20
▪ Le coefficient d'aplatissement "E <sub>K</sub> ".....	21
I.6.4.2 Les principaux paramètres d'espacement .....	22
• l'espacement moyen entre pics du profil "Rsm".....	22
• Le nombre de point hauts "Pc".....	22

I.6.4.3 Les paramètres Fonctionnels.....	23
I.6.5 Importance de la topographie et des paramètres (3D) d'une surface.....	24
I.6.5.1 Paramètres d'isotropie.....	25
I.6.5.2 Paramètres fonctionnels de volume.....	27
I.6.6 Relation entre l'état de surface et fonctionnalité d'une pièce.....	27
I.6.7 Différence entre Profil de rugosité de surface et l'indice de rugosité Ra.....	28
<b>I.7 Introduction sur la géométrie fractale.....</b>	<b>30</b>
I.7.1 Caractérisation fractale des profils de rugosité de surface.....	32
I.7.2 Introduction de la géométrie fractale dans la caractérisation des surfaces usinées.....	34
<b>I.8 Procédés de traitement mécanique.....</b>	<b>37</b>
<b>I.9 Conclusion.....</b>	<b>41</b>

## **CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES**

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>43</b>
<b>II.2 Matériels utilisés pour l'expérimentation .....</b>	<b>43</b>
II.2.1 Matériau .....	43
II.2.1.1 Composition chimique du matériau.....	43
II.2.1.2 Microstructure.....	44
II.2.1.3 Mesure de la Dureté .....	45
II.2.1.4 Mesure de la micro dureté.....	45
II.2.1.5 Essai de traction.....	46
II.2.2 Outil de coupe .....	48
II.2.3 Dispositif de brunissage .....	48
II.2.4 Machine outil .....	49
<b>II.3 Méthodologie expérimentale .....</b>	<b>50</b>
<b>II.4 Mesure de rugosité .....</b>	<b>53</b>
II.4.1 Mesure 2D (profil).....	53
II.4.2 Mesure 3D (surface).....	53
<b>II.5 Montage des pièces.....</b>	<b>54</b>
<b>II.6 Préparation des échantillons sur tour.....</b>	<b>55</b>
<b>II.7 Traitement par brunissage.....</b>	<b>57</b>
II.7.1 Traitement de la pièce 2.....	57

II.7.2 Traitement de la pièce 3 .....	58
<b>II.8 Conclusion .....</b>	<b>59</b>

## **CHAPITRE III : MESURE ET TRAITEMENT DES DONNÉES**

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>62</b>
<b>III.2 Procédure de mesure.....</b>	<b>62</b>
<b>III.3 Mesure et traitement des données relatifs à la pièce (1).....</b>	<b>63</b>
<b>III.4 Résultats de mesures relatifs à la pièce (2) après l'opération de brunissage.....</b>	<b>65</b>
III.4.1 Traitement des résultats de mesure (cas 2D) .....	69
III.4.1.1 Rugosité "Ra".....	69
III.4.1.2 Dimension fractale d'un profil "Dfp".....	70
III.4.2 Traitement des résultats de mesure (cas 3D) .....	71
III.4.2.1 Dimension fractale surfacique "Dfs".....	71
III.4.2.2 Paramètres de volume.....	72
- Le volume de la matière des pics "Vmp".....	72
- Le volume de matière du cœur "Vmc" .....	74
- Le volume du vide des vallées "Vvv" .....	75
III.4.2.3 L'indicateur d'isotropie "Str".....	76
III.4.3 Traitement des résultats de mesure de la dureté superficielle "Hv".....	77
<b>III.5 Résultats des mesures relatifs à la pièce (3) .....</b>	<b>79</b>
III.5.1 Surface non traitée.....	79
III.5.2 Surface traitée par brunissage.....	79
III.5.2.1 Régime optimal correspondant à "Ra".....	79
III.5.2.2 Régime optimal correspondant à "Dfp".....	80
<b>III.6 Conclusion.....</b>	<b>81</b>

## **CHAPITRE IV : INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS**

<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>84</b>
<b>IV.2 Discussion des résultats relatifs à la pièce (2).....</b>	<b>84</b>
IV.2.1 Effet des paramètres du brunissage sur la rugosité.....	84
IV.2.2 Effet des paramètres de traitement sur la dimension fractale .....	86
IV.2.2.1 Effet sur la dimension fractale de profil "Dfp".....	86

---

IV.2.2.2 Effet la dimension fractale d'une surface "Dfs" .....	88
IV.2.3 Effet des paramètres de traitement sur les paramètres de volume .....	90
IV.2.3.1 Effet sur le volume de la matière des pics "Vmp" .....	90
IV.2.3.2 Effet sur le volume de matière du cœur "Vmc" .....	91
IV.2.3.3 Effet sur le volume du vide des vallées "Vvv" .....	92
IV.2.4 Effet des paramètres de traitement sur l'indicateur d'isotropie "Str" .....	93
IV.2.5 Effet des paramètres de traitement sur la dureté superficielle "Hv" .....	95
<b>IV.3 Discussion des résultats relatifs à la pièce (3)</b> .....	<b>97</b>
IV.3.1 Topographie et profil de surface non traitée .....	97
IV.3.2 Traitement par le régime optimal correspondant à "Ra" .....	97
IV.3.2.1 Effets sur la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp" .....	97
IV.3.2.2 Effet sur les paramètres fonctionnels (Rk, Rpk, Rvk) .....	98
IV.3.2.3 Effet sur le taux de longueur portante "Rmr" .....	100
IV.3.2.4 Effet sur l'indicateur d'isotropie "Str" .....	100
IV.3.2.5 Effet sur la topographie et profil de surface .....	101
IV.3.2.6 Effet sur la dureté superficielle "Hv" .....	103
IV.3.3 Traitement par le régime optimal correspondant à "Dfp" .....	103
IV.3.3.1 Effets sur la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp" .....	103
IV.3.3.2 Effet sur les paramètres tribologiques .....	104
IV.3.3.3 Effet sur le taux de longueur portante "Rmr" .....	106
IV.3.3.4 Effet sur l'indicateur d'isotropie "Str" .....	106
IV.3.3.5 Effet sur la topographie et profil de surface .....	107
IV.3.3.6 Effet sur dureté superficielle "Hv" .....	109
<b>IV.4 Conclusion</b> .....	<b>110</b>
Conclusion générale .....	112
Références bibliographiques .....	114
Annexes .....	121

## Chapitre I : La qualité de surface – son importance en tribologie

I.1 Utilisation de la lubrification 2400 avant J-C.....	7
I.2 Concept de déplacement par glissement à l'époque des sumériens.....	7
I.3. Système bielle manivelle au moyen âge.....	8
I.4 Différents dispositifs de frottements à l'époque de la renaissance.....	8
I.5 Les éléments d'un contact mécanique [5].....	10
I.6 Contact entre deux solides en présence de frottement [7].....	10
I. 7 L'interface de contact de deux surfaces en mouvement [11].....	11
I.8 Influence de la rugosité sur les frottements [13].....	11
I.9 Les différents types d'usure et leurs importances [16].....	12
I.10 Mécanisme d'usure par abrasion [7].....	13
I.11 L'état de surface présentant une usure par abrasion.....	13
I.12 a) Usure par adhésion [7] b) Surface présentant un grippage.....	13
I.13 L'état de surface présentant une usure par corrosion.....	14
I.14 a) Différents mécanisme d'usure par fatigue	
b) Modification structurale dû à la fatigue .....	14
I.15 Les différents régimes de lubrification [7].....	16
I.16 L'état de surface dégradé [20].....	16
I.17 Macroscopie des surfaces rugueuses en contact [23].....	17
I.18 Les différents défauts de surface [25].....	18
I.19 Les types de surface selon le procédé de mise en forme [24].....	19
I. 20 a) L'écart arithmétique moyen "Ra" [29]	
b) Etat de surface différents et l'écart moyen identique $R_a = 2 \mu\text{m}$ .....	20
I.21 Le coefficient de symétrie "Sk".....	21
I.22 Le coefficient d'aplatissement "Ek" .....	21
I.23 Espacement entre pics "Rms" [32].....	22
I.24 Comptage des pics "Pc".....	22
I.25 Taux de longueur portante évalué sur la courbe d'Abbott-Firestone [31].....	23
I.26 Construction graphique des paramètres "Rk, Rpk, Rvk" [29] .....	24
I.27 a) Surface d'acier abrasée uni-directionnellement	
b) Bonne surface de support ayant du volume pour retenir le lubrifiant [30] .....	25

I.28 Surface isotrope (gauche) - surface anisotrope (droite).....	25
I.29 La topographie d'une surface à gauche et son auto-corrélation à droite [35].....	26
I.30 le lobe central avec Rmin et Rmax .....	26
I.31 Paramètres fonctionnels de volume d'une surface [29].....	27
I.32 Paramètres d'état de surface.....	29
I.33 Deux profils différents avec "Ra" identique de 0.2µm [30] .....	29
I.34 Le concept du pas de mesure .....	30
I.35 Etapes de la construction d'une courbe de Von Coch .....	31
I.36 Illustration des premières étapes de la construction de Sierpinski .....	32
I.37 Description qualitative des statistiques d'auto-affinité pour un profil de surface [40].....	32
I.38 Illustration du concept de la dimension fractale pour un profil de surface.....	33
I.39 Morphologie de surface, topographie de surface, analyse fractale et traces de rectification après plusieurs passes [59].....	36
I.40 Procédé de galetage [65].....	37
I.41 Procédé de brunissage [12].....	37
I.42 Principe de brunissage [27].....	38
I.43 Influence de la vitesse, l'avance et du nombre de passe sur la rugosité [75] .....	39
I.44 Pourcentage de contribution des paramètres de brunissage [77].....	39
I.45 Pourcentage de contribution des paramètres de brunissage sur : a) la rugosité, b) la fatigue [79].....	40

## **Chapitre II : Matériels et méthodes expérimentales**

II.1 Représentation des teneurs des différents éléments de l'alliage.....	44
II.2 Microstructure de l'alliage.....	44
II.3 Duromètre INDENTEC.....	45
II.4 Miro-duromètre Tester MXT70.....	45
II.5 Machine de traction ZWICK 1476.....	46
II.6 Eprouvette de l'essai de traction.....	46
II.7 Les étapes de déroulement de l'essai de traction.....	47
II.8 Courbe illustrant l'essai de traction.....	47
II.9 Outil de coupe .....	48
II.10 Dispositif de brunissage : .....	48
II.11 Tour 1k 62 N°00212.....	49



II.12	Tour 1A616.....	49
II.13	Schéma de l'expérimentation.....	50
II.14	Organigramme des algorithmes de calcul [68] .....	52
II.15	Rugosimètre MITUTOYO SJ-301.....	53
II.16	Profilomètre LIECA DCM3D.....	53
II.17	Rugosimètre Taylor Hobson,Taly surf CCI.....	53
II.18	Montage et préparation de la pièce 2/ 1)-mandrin 2)- contre pointe 3)- pièce.....	55
II.19	Préparation sur tour de la pièce (1).....	56
II.20	Opération de brunissage de la pièce (2).....	58
II.21	Opération de brunissage de la pièce (3).....	58
II.22	Organigramme de la procédure expérimentale.....	60

### Chapitre III : Mesure et Traitement des Données

Figure III. 1	a) Pièces (1, 2, 3)	
	b) positionnement de la pièce sur le vé et mesure de la rugosité.....	62
III.2	Variation de la rugosité selon les combinaisons des régimes.....	64
III.3	Courbes d'analyse des résidus .....	64
III.4	Comparaison entre réponses prédites et expérimentales de "Ra" en tournage.....	65
III.5	Effet des paramètres du régime de traitement sur la rugosité "Ra" et la dimension fractale du profil "Dfp".....	66
III.6	Effet des paramètres du régime de traitement sur La dureté superficielle "Hv" .....	67
III.7	Effet des paramètres du régime de traitement sur la dimension fractale de la surface "Dfs" et l'indicateur d'isotropie "Str".....	68
III.8	Effet des paramètres du régime de traitement sur :	
	-Volume de la matière des pics "Vmp",	
	-Volume de la matière du cœur "Vmc",	
	-Volume du vide des vallées "Vvv".....	68
III.9	Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Ra".....	68
III.10	Comparaison entre les réponses expérimentales et les réponses prédites de "Ra".....	69
III.11	Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Dfp".....	70
III.12	Comparaison entre les réponses expérimentales et les réponses prédites de "Dfp"....	70
III.13	Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Dfs".....	72
III.14	Comparaison entre les réponses expérimentales et les réponses prédites de "Dfs".....	72

III.15 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Vmp" .....	73
III.16 Comparaison entre les réponses expérimentales et les réponses prédites de "Vmp" ...	73
III.17 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Vmc" .....	74
III.18 Comparaison entre les réponses expérimentales et les réponses prédites de "Vmc" ...	75
III.19 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Vvv" .....	75
III.20 Comparaison entre les réponses expérimentales et les réponses prédites de " Vvv" ...	76
III.21 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Str".....	77
III.22 Comparaison entre les réponses expérimentales et les réponses prédites de "Str".....	77
III.23 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Hv".....	78
III.24 Comparaison entre les réponses expérimentales et les réponses prédites de " Hv" .....	78

## Chapitre IV : Interprétation et discussion des résultats

IV.1 Variation de la rugosité "Ra" en fonction de l'avance f et l'effort de pression Py, en fixant le diamètre de bille: a) Db=13.5 mm; b) Db=7 mm; c) Db=10.....	85
IV.2 Variation de la dimension fractale "Dfp" en fonction de l'avance f et l'effort de pression Py, en fixant le diamètre de bille a) Db= 7mm, b) Db=10mm, c)Db=13.5mm.....	87
IV.3 Effet de la force de pression et de l'avance sur la dimension fractale "Dfs" pour : Db=7mm, Db=10mm, Db=13.5mm.....	89
IV.4 Dimension fractale pour les topographies de surfaces traitées pour a) D=2.59, b) D=2.11, c) D=2.20.....	89
IV.5 Effet de la force de pression et de l'avance sur "Vmp" pour : Db=7mm, Db=10mm, Db=13.5mm.....	90
IV.6 Effet de la force de pression et de l'avance sur "Vmc" pour : Db=7mm, Db=10mm, Db=13.5mm.....	91
IV.7 Effet de la force de pression et de l'avance sur "Vvv" pour : Db=7mm Db=10mm, Db=13.5mm.....	92
IV.8 Effet de la force de pression et de l'avance sur "Str" pour : Db=7mm, Db=10mm, Db=13.5mm.....	94
IV.9 Variation de "Hv" en fonction de f et Py, avec Db=13.5 mm, Db=7mm, Db=10 mm...	96
IV.10 Surface réalisée par tournage a) Topographie de surface b) Profils de surface, c) Analyse fractale.....	97
IV.11 Variation de "Dfp" et "Ra" en fonction du nombre de passes(i).....	98

IV.12 Variation des paramètres fonctionnels en fonction du nombre de passes (i)	
a) pour le profil, b) pour la surface .....	99
IV.13 Variation de "Rmr", "Ra" et "Dfp" en fonction du nombre de passes (i).....	100
IV.14 Variation de "Str", "Ra" et "Dfp" en fonction du nombre de passes (i).....	101
IV.15 a) Topographies de surface b) Profils de surfaces c) Analyse fractale après différentes passes.....	102
IV.16 Variation la dureté superficielle "Hv" en fonction du nombre de passes (i).....	103
IV.17 Variation de "Dfp" et "Ra" en fonction du nombre de passes (i).....	104
IV.18 Variation de "Rk, Rpk, Rvk" en fonction du nombre de passes (i).....	104
IV.19 Variation des paramètres fonctionnels "Rk, Rpk, Rvk" en fonction de la dimension fractale "Dfp" .....	105
IV.20 Variation des paramètres fonctionnels "Sk, Spk, Svk" en fonction du nombre de Passes.....	105
IV.21 Variation de "Rmr", "Ra" et "Dfp" en fonction du nombre de passes (i).....	106
IV.22 Variation de "Str", "Ra" et "Dfp" en fonction du nombre de passes (i).....	107
IV.23 a) Topographies de surface b) Profils de surface c) Analyse fractale après différentes passes.....	108
IV.24 Influence du nombre de passes (i) sur la dureté superficielle "Hv" .....	109

## **Chapitre I : La qualité de surface – son importance en tribologie**

I.1 Relation entre les paramètres d'une surface et la fonction d'une surface.....	28
---	----

## **Chapitre II : Matériels et méthodes expérimentales**

II.1 composition chimique de l'aluminium.....	44
II.2 Conditions de l'essai de dureté .....	45
II.3 Les conditions de déroulement de l'essai de traction.....	46
II.4 Caractéristiques mécaniques .....	47
II.5 Caractéristiques de l'outil.....	48
II.6 Caractéristiques du tour 1k 62.....	49
II.7 Matrice de Box Behnken pour trois facteurs [87].....	51
II.8 Caractéristiques des objectifs optiques du Talysurf CCI 6000[2].....	54
II.9 Régime de coupe.....	55
II.10 Facteurs codés en tournage.....	55
II.11 Matrice d'expériences en tournage .....	56
II.12 Facteurs codés en brunissage.....	57
II.13 Matrice d'expériences en brunissage .....	57

## **Chapitre III : Mesure et Traitement des Données**

III.1 Résultats expérimentaux lors du tournage.....	63
III.2 Valeurs moyennes de "Ra", "Dfp" et "Hv" pour différents régimes.....	66
III.3 Résultats de mesure 3D pour différents régimes.....	67
III.4 Mesures 2D enregistrés pour la surface non traitée.....	79
III.5 Mesures 3D enregistrés pour la surface non traitée.....	79
III.6 Paramètres enregistrés pour les mesures 2D .....	79
III.7 Paramètres enregistrés pour les mesures 3D.....	79
III.8 Résultats de mesures 2 D pour les paramètres étudiés.....	80
III.9 Résultats de mesures 3D pour les paramètres étudiés.....	80

Symboles	Significations
$L_e$	Longueur de l'échantillon
$\varepsilon$	Pas de mesure
$D_{fp}$	Dimension fractale d'un profil ( $1 < D < 2$ )
$G$	Facteur d'échelle
$S(\omega)$	Densité spectrale ( $\text{mm}^3$ )
$\omega$	Fréquence (1/mm)
$m_0$	Moment zéro de la densité spectrale
$R_q$	Ecart moyen quadratique
$\sigma$	Ecart type des hauteurs des deux surfaces (1, 2) en contact
$\sigma_1$	Ecart type des hauteurs de la surface 1
$\sigma_2$	Ecart type des hauteurs de la surface 2
$\Lambda$	Rapport caractérisant le régime de lubrification
$h_{\min}$	Hauteur minimale du film au centre du contact
$\omega_l$	Basse fréquence
$\omega_h$	Haute fréquence
$L$	Longueur d'évaluation
$D_p$	Diamètre de la pièce
$D_b$	Diamètre de la bille
$i$	Nombre de passe
$P_y$	Force de pression
$f$	L'avance
$\hat{y}$	Réponse prédite par le modèle
$e$	L'erreur du modèle
$a_0$	Valeur de la réponse à l'origine du repère
$R_a$	Ecart arithmétique moyen ( $\mu\text{m}$ )
$\hat{R}_a$	Ecart arithmétique moyen prédit ( $\mu\text{m}$ )
$D_{fp}$	Dimension fractale du profil
$D_{fp_{\text{moy}}}$	Valeur moyenne de la dimension fractale du profil
$\hat{D}_{fp}$	Dimension fractale prédite du profil

Symboles	Significations
Rmr	Taux de longueur portante %
Rpk	Hauteur réduite des pics ( $\mu\text{m}$ )
Rvk	Profondeur réduite des creux ( $\mu\text{m}$ )
Rk	Profondeur de rugosité centrale ( $\mu\text{m}$ )
Sk	Profondeur de rugosité de noyau ( $\mu\text{m}$ )
Spk	Hauteur réduite des sommets ( $\mu\text{m}$ )
Svk	Profondeur réduite des vallées ( $\mu\text{m}$ )
Dfs	Dimension fractale de surface
$\hat{Dfs}$	Dimension fractale prédite de surface
Dfs <sub>moy</sub>	Valeur moyenne de la dimension fractale de surface
Vmp	Volume de matière des pics ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )
$\hat{Vmp}$	Volume prédit de matière des pics ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )
Vmc	Volume de la matière du cœur ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )
$\hat{Vmc}$	Volume prédit de la matière du cœur ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )
Vvv	Volume du vide des vallées ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )
$\hat{Vvv}$	Volume prédit du vide des vallées ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )
Str	Indicateur d'isotropie
$\hat{Str}$	Indicateur d'isotropie prédit
Hv	Dureté Vickers
$\hat{Hv}$	Dureté Vickers prédite
Rat	Ecart arithmétique moyen en tournage ( $\mu\text{m}$ )
Dfpt	Dimension fractale en tournage
Rmrt	Taux de longueur portante en tournage %
Strt	Indicateur d'isotropie en tournage
Hvt	Dureté Vickers en tournage

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les industriels et en particulier ceux en rapport avec l'industrie mécanique sont souvent préoccupés par la recherche de nouvelles solutions et des méthodes permettant l'amélioration de la qualité des surfaces des produits manufacturés. En effet, au cours de leurs mises en service, les surfaces des pièces sont les plus exposées aux agressions telles que l'usure, la corrosion et la fatigue, ce qui compromet leurs fonctionnements et réduit leurs durées de vie. En générale, lors du fonctionnement d'un système mécanique, c'est au niveau de la surface que se produisent les phénomènes de frottements, de grippage, où les couches superficielles sont fortement influencées par la qualité de finition de la surface ainsi que les conditions de fonctionnement telles que la lubrification, la température et les sollicitations.

Lors de leur fabrication, les surfaces présentent des irrégularités qui sont dues au passage de l'outil et aux vibrations de la machine-outil, ce qui se manifeste par des défauts de troisième et quatrième ordre, caractérisés par la rugosité. L'étude du comportement de cette dernière est un élément important et peut contribuer à augmenter les performances et la durée de vie des mécanismes, car la rugosité est un paramètre qui peut être contrôlé dès la conception des pièces [1]. Le plus souvent l'écart arithmétique moyen "Ra" constitue un paramètre pertinent et est considéré comme indicateur de la qualité de surface, or ce paramètre ne reflète pas réellement le profil de rugosité. En effet plusieurs profils différents peuvent avoir la même rugosité "Ra". Afin d'apporter une meilleure appréciation, l'état de surface peut être approché par la géométrie fractale. Cette approche a été déjà testée dans des applications concrètes comme le contact inter aspérités où une modification de la topographie de surface due à l'usure ou au procédé d'usinage peut se traduire par une simple variation de la dimension fractale "Df" [2]. Cette dernière permet d'estimer le degré des irrégularités et de brillance des surfaces usinées [3]. Elle a été introduite dans beaucoup de domaine de l'ingénierie en particuliers dans la mécanique de contact pour caractériser l'aire réelle des surfaces de contact et décrire l'endommagement de la topographie de surface engendrée par l'usure et les frottements. De nos jours le secteur industriel est plus exigeant sur le plan spécification des caractéristiques des surfaces réalisées par différents procédés de finition. Parmi ces procédés, les traitements mécaniques de surface (TMS) en l'occurrence, le brunissage qui en opérant sans perte de matière, confère aux surfaces traitées une amélioration des propriétés physique et géométrique grâce à la déformation plastique des couches superficielles.

Son application est conditionnée par l'aptitude des matériaux à subir une déformation plastique superficielle (D.P.S) [4]. Parmi ces matériaux les alliages non ferreux tels que les alliages d'aluminium qui sont reconnus pour leurs ductilité et aptitude à subir des déformations plastiques sous l'action d'une force de pression leur permettant d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Bien que ce procédé ait été utilisé dans beaucoup d'expérimentations, il est indispensable de les adapter et d'apporter d'autres perspectives afin de répondre aux exigences actuelles de l'industrie.

L'objectif de ce travail est d'évaluer la qualité de surface par la dimension fractale et d'observer le comportement de cette dernière avec les paramètres du régime de traitement par brunissage qui sont : la force de pression ( $P_y$ ), l'avance ( $f$ ) et le diamètre de bille ( $D_b$ ), ainsi que l'effet de ces derniers sur les paramètres fonctionnels de surface.

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres qui sont organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, est présentée une étude bibliographique mettant en relief la science de la tribologie, l'importance de l'état de surface dans les mécanismes, les effets des frottements, de l'usure ainsi que l'apport de la lubrification. Par la suite, une relation entre la qualité de surface et sa fonction est exposée, en mettant en valeur les différents paramètres de rugosité en 2D et 3D ainsi que l'importance de la topographie de surface. Egalement l'historique de la géométrie fractale et son opportunité dans la caractérisation des profils de rugosité sont exposés avec une synthèse des travaux de recherche concernant l'introduction de la géométrie fractale dans la caractérisation des surfaces usinées. La fin de ce chapitre est consacrée au traitement mécanique de surface (TMS), en l'occurrence le brunissage, incluant quelques travaux de recherches à l'aide de ce procédé et son application sur les alliages non ferreux.

Le deuxième chapitre comprend une description du matériel utilisé dans le travail expérimental, essentiellement les machines, les équipements de caractérisation ainsi que l'appareillage de mesure. Les différentes caractéristiques du matériau traité, les techniques expérimentales adoptées ainsi que la méthodologie suivie, ont été présentés. La dernière partie de ce chapitre comprend la préparation des différents échantillons par tournage et leurs traitements par brunissage.



Le troisième chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais réalisés en tournage et brunissage. Des modèles mathématiques utilisant les plans de Box-Behenken à trois facteurs pour la prédiction des réponses étudiées (Ra, Dfp, Dfs, Vmp, Vmc, Vvv, Str et Hv) ont été présentés ainsi que les réponses prédites (min ou max) avec les régimes optimaux correspondants. Par ailleurs, les résultats correspondants aux régimes optimaux de "Ra" et "Dfp" ont été exposés.

Le quatrième chapitre est consacré à la discussion des résultats de simulation afin d'évaluer l'influence des paramètres d'entrée (la force de pression (Py), l'avance (f), et le diamètre de bille (Db)) sur la rugosité de surface "Ra", la dimension fractale (Dfp, Dfs), les paramètres de volume (Vmp, Vmc, Vvv), l'indicateur d'isotropie "Str" et la dureté superficielle "Hv". Les résultats obtenus, en l'occurrence, la portance, les paramètres fonctionnels, l'isotropie, la dureté superficielle et les topographies, lors de l'application des régimes optimaux correspondant à la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp" sous différentes passes, ont été interprétés et comparés.

La thèse s'achève par une conclusion générale et des perspectives.

## *CHAPITRE I*

---

# *LA QUALITE DE SURFACE – SON IMPORTANCE EN TRIBOLOGIE*

## Tables des matières

<b>I.1 Introduction</b> .....	6
<b>I.2 Historique sur la tribologie</b> .....	6
<b>I.3 Contexte scientifique de la tribologie</b> .....	9
<b>I.4 La tribologie</b> .....	10
I.4.1 Les frottements.....	11
I.4.2 L'usure.....	12
I.4.2.1 Usure par abrasion.....	12
I.4.2.2 Usure par adhésion.....	13
I.4.2.3 Usure par corrosion.....	14
I.4.2.3 Usure par fatigue.....	14
I.4.3 Lubrification.....	15
<b>I.5 Rôle de la surface en tribologie</b> .....	16
<b>I.6 Etat de surface système mécanique</b> .....	17
I.6.1 Définition d'un état de surface .....	17
I.6.2 Relation entre qualité de surface (état de surface) et rugosité.....	18
I.6.3 Définition de la rugosité .....	19
I.6.4 Les différents paramètres de rugosité.....	19
I.6.4.1 Les principaux paramètres d'amplitude .....	20
▪ Ecart arithmétique moyen "Ra".....	20
▪ Rugosité moyenne quadratique "Rq".....	20
▪ Le coefficient de symétrie "S <sub>K</sub> ".....	20
▪ Le coefficient d'aplatissement "E <sub>K</sub> " .....	21
I.6.4.2 Les principaux paramètres d'espacement .....	22
• l'espacement moyen entre pics du profil "Rsm".....	22
• Le nombre de point hauts "Pc".....	22
I.6.4.3 Les paramètres Fonctionnels.....	23
I.6.5 Importance de la topographie et des paramètres (3D) d'une surface.....	24
I.6.5.1 Paramètres d'isotropie.....	25
I.6.5.2 Paramètres fonctionnels de volume.....	27
I.6.6 Relation entre l'état de surface et fonctionnalité d'une pièce.....	27
I.6.7 Différence entre Profil de rugosité de surface et l'indice de rugosité Ra.....	28

<b>I.7 Introduction sur la géométrie fractale.....</b>	<b>30</b>
I.7.1 Caractérisation fractale des profils de rugosité de surface.....	32
I.7.2 Introduction de la géométrie fractale dans la caractérisation des surfaces usinées.....	35
<b>I.8 Procédés de traitement mécanique.....</b>	<b>37</b>
<b>I.9 Conclusion.....</b>	<b>41</b>

## I-1 Introduction

L'état de la couche superficielle d'une surface et sa micro-géométrie (Rugosité) sont les principaux éléments qui définissent sa qualité [5,6], en conséquence la rugosité joue un rôle crucial dans l'évolution des phénomènes de frottement, usure, lubrification et fatigue [7] des contacts mécaniques. Par ailleurs, lors de la fabrication l'état de surface d'une pièce est quantifié par sa rugosité qui représente les irrégularités dues aux procédés de mise en œuvre. Au cours des dernières années des progrès technologiques ont été réalisés pour maîtriser de façon précise l'état de surface en l'occurrence la rugosité [8]. Le processus de finition joue un rôle important dans la détermination de la qualité des surfaces qui doivent être réalisées. Ce chapitre s'articule autour de l'importance de l'état de surface en tribologie faisant intervenir un aperçu sur l'historique de la tribologie, les frottements, l'usure et la lubrification. Les principaux paramètres de rugosité contribuant dans les fonctionnalités des surfaces ont été présentés. L'approche fractale a été introduite afin de caractériser la qualité de surface et montré son importance dans différents phénomènes (frottement, usure...etc) à travers les revues de littérature. A la fin de ce chapitre, l'importance des procédés de traitement mécanique superficielle (TMS) dans le fini de surface a été exposée, en particulier le brunissage à la bille où des revues de littératures ont été citées afin de montrer l'extension de son application.

## I-2 Historique de la tribologie

Au cours des dernières décennies la tribologie a pris un élan considérable [9], bien que ces effets se soient manifestés depuis la genèse de l'univers ce pendant les notions de frottement et d'usure remontent à la plus lointaine antiquité et ont accompagné les progrès de l'humanité. L'historique de la science est orné des faits marquants liés à la tribologie dont on peut citer les plus importants [6].

- Les égyptiens 2400 avant J-C avaient déplacé une statue dont le poids a pu être estimée à soixante tonnes sur un chemin de bois posé sur le sol sablonneux et lubrifié avec de l'eau versée à l'avant du traîneau Figure I.1. L'importance de la lubrification est ainsi déjà reconnue à cette lointaine époque.

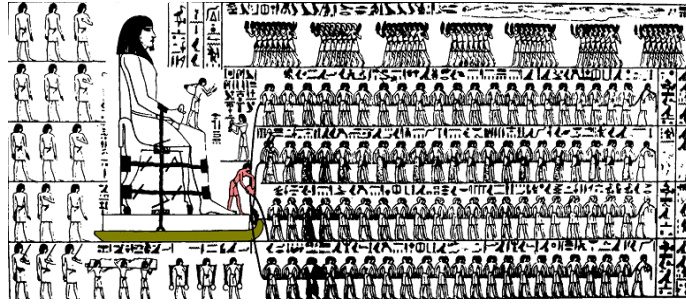


Figure I. 1 Utilisation de la lubrification 2400 avant J-C [8]

- Les sumériens 700 ans avant J-C avaient déplacé une statue lourde. La figure I.2 illustre ce concept où on peut observer à l'avant de la statue plusieurs personnes ayant la charge de glisser des rondins cylindriques sous la Statue afin de faciliter le déplacement de cette dernière [7].

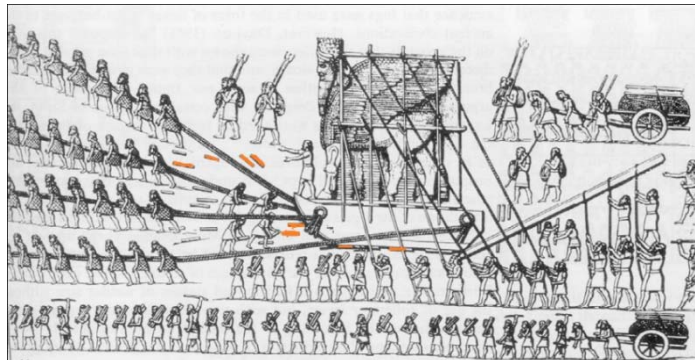


Figure I. 2 Concept de déplacement par glissement à l'époque des sumériens [8]

- La période moyen âge des progrès dans les technologies liées au contact ont réapparu ils portent sur l'utilisation du système bielle manivelle pour puiser de l'eau, entre XIII et XIV<sup>ème</sup> siècle (Figure I.3), et les huiles végétales et animales pour la lubrification.

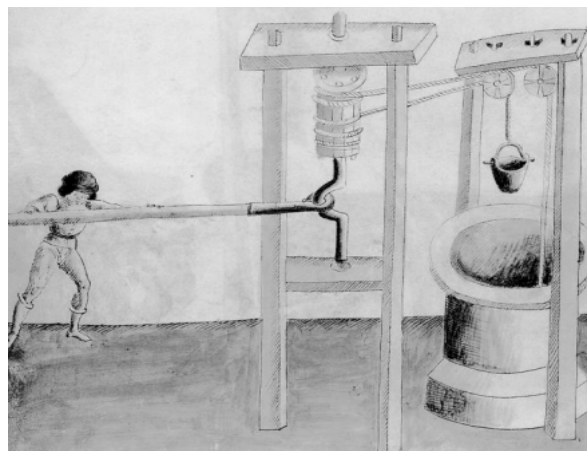


Figure I. 3 Systèmes bielle manivelle au moyen âge [8]

- A la renaissance des nouveaux concepts dans la science ont relancé la progression de la prise de conscience des problèmes de tribologie. En effet, Léonard de Vinci entre 1452-1519 et Coulomb entre 1737-1806 ont utilisé des dispositifs pour étudier le frottement de glissement (Figure I.4) [10].

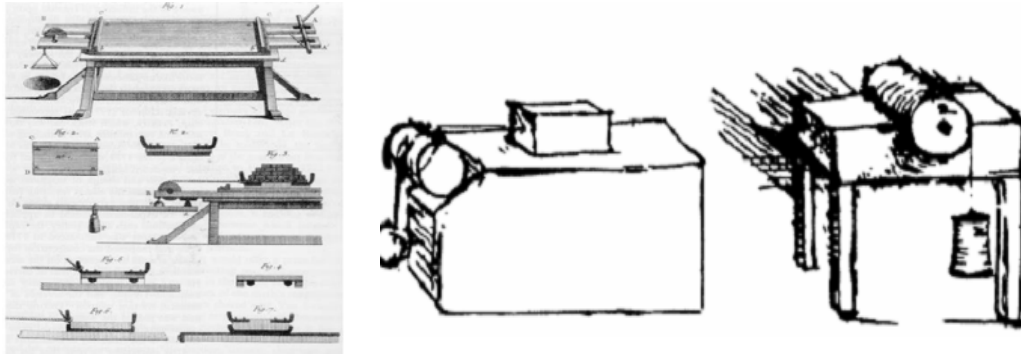


Figure I. 4 Différents dispositifs de frottements à l'époque de la renaissance [8]

- Plus récemment des scientifiques connus ont abordé les difficultés rencontrés en tribologie d'une façon descriptive puis quantitative tels que :
  - ✓ les expressions des premières lois de frottement ont été élaborées par AMONTONS en 1699.
  - ✓ La prise en considération de l'influence de l'état de surface sur les frottements par Belidor en 1737
  - ✓ L'introduction de l'angle de frottement par Léonard Euler 1750 en utilisant l'approche analytique.
  - ✓ Finalisation des lois de frottements par Coulomb en 1782.
- Au début du XIX<sup>ième</sup> siècle le domaine de lubrification fût développé par beaucoup de mathématiciens tels que Navier et Stoks en 1822 qui proposent les équations générales du mouvement des fluides en tenant compte leur frottement interne, Gustav Adolph Hirn 1847 qui a travaillé sur la lubrification hydrodynamique. C'est à la fin XIX<sup>ième</sup> siècle que Reynolds en 1886 apporta l'approche scientifique du roulement et la lubrification [9] et en 1971 l'équipe de Kenneth L. Johnson à Cambridge a réalisée le couplage entre élasticité et énergie superficielle permettant de comprendre le phénomène d'adhérence naturelle des solides [6].

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 longévité de ces équipements. La prédiction de la durée de vie d'un système frottant, ainsi que la compréhension des mécanismes du frottement et de l'usure constituent le problème actualité.

### **I.3 Le contexte scientifique de la tribologie**

La tribologie est une science pluridisciplinaire elle requiert des connaissances relatives aux surfaces, à la science des matériaux et à la mécanique [11]. 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 leur fabrication et de leur préparation. 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, ainsi que l'usure. En effet, pour sélectionner des couples de matériaux et prédire l'usure, les ingénieurs sont affrontés à plusieurs contraintes résultant 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) [12].

Le contact tribologique est constitué de quatre éléments principaux (Figure I.5) :

- Les solides A et B sont les corps en contact
- L'environnement E
- Le milieu inter facial I (3<sup>ime</sup> 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 [5].



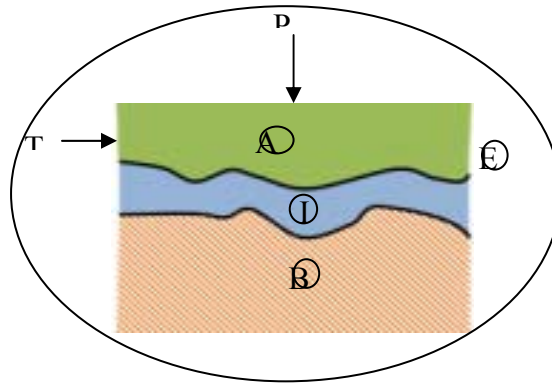


Figure I. 5 Les éléments d'un contact mécanique [5]

## I.4 Tribologie

La tribologie est définie comme étant l'étude des interactions entre surfaces solides en mouvement relatif (Figure I.6). Le mot tribologie a été proposé par Peter Jost en 1966 et est basé sur le mot grec "tribos" qui signifie frotter [7]. Il s'agit donc de la science du frottement, de l'usure et de la lubrification.

- le frottement constitue la cause primordiale de perte d'énergie et de l'usure ;
- l'usure est la cause de perte de matière et des performances mécanique des systèmes ;
- la lubrification a pour but de diminuer les frottements des solides en contact et de prédire leur endommagement.

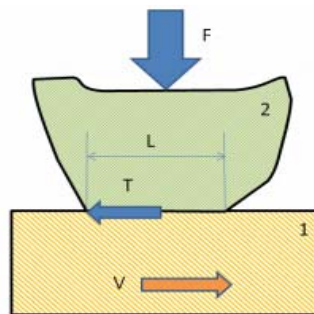


Figure I. 6 Contact entre deux solides en présence de frottement [7]

### I.4.1 Les frottements

Les phénomènes de frottement contribuent dans de nombreuses applications habituelles et industrielles. Le frottement se définit comme étant une résistance à un mouvement entre des surfaces en contact. 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 (Figure I.7).

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, entraînant ainsi l'usure plus ou moins rapide des corps en contact et par conséquent la modification de leurs surfaces [9].

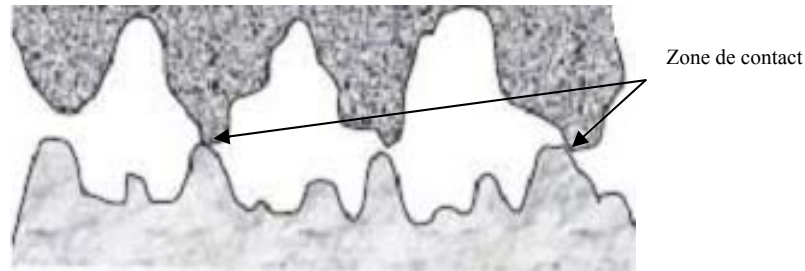


Figure I. 7 L'interface de contact de deux surfaces en mouvement [11]

C'est au niveau de la surface d'une pièce que naissent les frottements, les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles sont marquées par les traces dus aux procédés d'usinage (rugosité) engendrant ainsi des défauts [12]. La qualité de l'état de surface influe considérablement sur la tenue en service des systèmes mécaniques ainsi l'augmentation de la rugosité de surface provoque une élévation des frottements ce qui va nuire aux surfaces de contact, diminuant ainsi les performances du mécanisme (Figure I. 8).

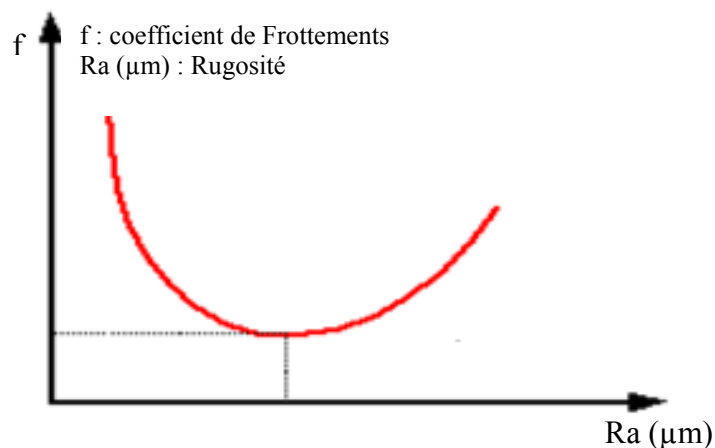


Figure I.8 Influence de la rugosité sur les frottements [13]

#### I.4.2 L'usure

L'usure constitue l'une des causes majeures de la destruction des matériaux et de la diminution des performances des systèmes mécaniques [14]. En effet l'usure des surfaces désigne le phénomène de dégradation des couches superficielles d'un solide sous l'action mécanique du milieu extérieur.

Cette dégradation est souvent associée à différents phénomènes (Figure I.9) soit chimiques dus à la corrosion, mécanique due au frottement ou électrique dus au phénomène d'arc, elle peut prendre la forme d'une perte de masse, de cote, de forme, ou encore d'une modification de la structure [15].

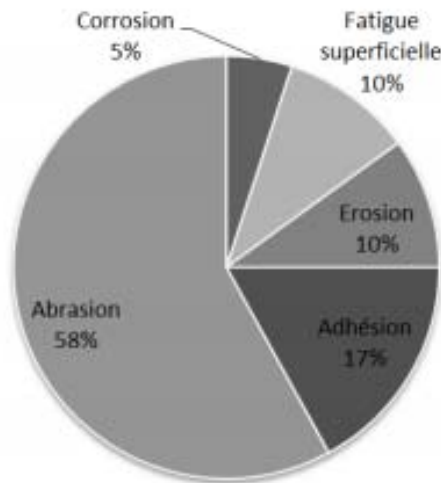


Figure I. 9 Les différents types d'usure et leurs importances [16]

Il existe plusieurs types d'usures mécaniques parmi eux :

- Usure par abrasion ;
- Usure par adhésion ;
- Usure par corrosion.

#### I.4.2.1 Usure par abrasion

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière produite par des particules dures ou des protubérances dures. Les particules dures peuvent se trouver encastrées dans l'une des surfaces ou être entre les deux surfaces en mouvement relatif (Figure I.10) [15]. Les surfaces endommagées (Figure I.11) par abrasion présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue. La dureté et la ductilité d'un matériau jouent un rôle important sur sa résistance à l'usure abrasive. Cette dernière est un processus dans lequel interviennent d'autres paramètres tels que la géométrie des pièces en contact, la topographie de surface (hauteur et forme des rugosités), les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des matériaux (fragilité, élasticité, plasticité), les caractéristiques physicochimiques résultant de l'environnement [16].

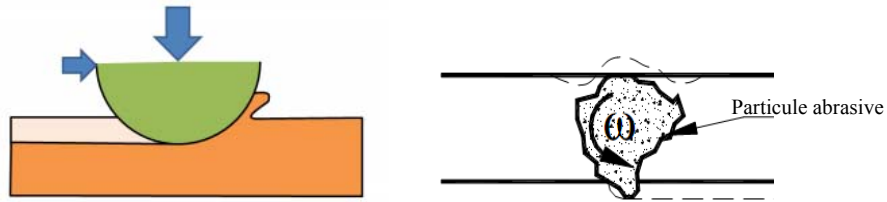


Figure I.10 Mécanisme d'usure par abrasion [17]

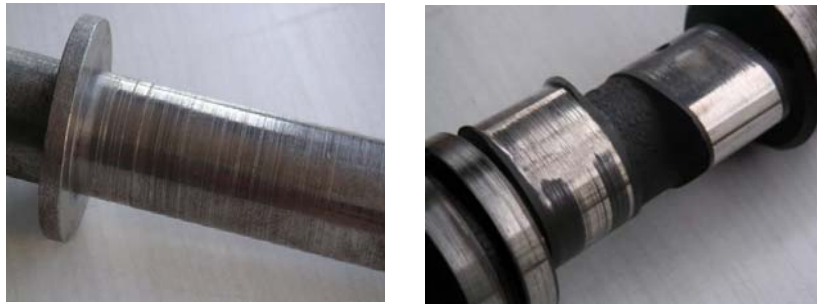


Figure I.11 L'état de surface présentant une usure par abrasion

#### I.4.2.2 Usure par adhésion

Le mécanisme d'adhésion est une usure par transfert de matière d'une surface sur l'autre pendant leur mouvement relatif, due à un processus de soudure en phase (Figure I.12a) [16]. L'adhésion dépend de l'énergie de surface des matériaux en effet lorsque les pressions de contact sont élevées et que les matériaux ont un travail d'adhésion élevée, il est possible d'atteindre un régime sévère d'adhésion où les surfaces sont soudées. Le mécanisme est alors complètement bloqué, on parle de grippage. La figure I.12b présente un exemple de grippage qui s'est produit entre deux solides en acier inoxydable [7].

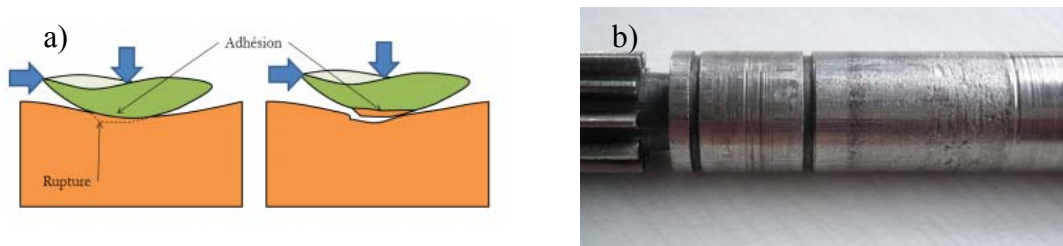


Figure I.12 a) Usure par adhésion [7]

b) Surface présentant un grippage

### I.4.2.3 Usure par corrosion

L'usure par corrosion n'est pas directement liée aux mouvements des pièces, mais elle intervient dans les situations où le contact fonctionne en environnement corrosif (Figure I.13). L'énergie dissipée dans le contact peut alors activer les phénomènes de corrosion et accélérer la dégradation des surfaces. Les surfaces réagissent avec les ambiances agressives, les lubrifiants altérés. L'attaque chimique ou électrochimique est en générale rapide, puis ralentie par la formation de films plus au moins protecteurs qui peuvent passiver les matériaux et stopper au moins provisoirement le processus. Outre le processus général de corrosion, des phénomènes de corrosion localisée peuvent se produire tels que la corrosion par piqûres (perforations), la corrosion caverneuse (dans des fissures ou des crevasses) et la corrosion bimétallique ou galvanique. Cette dernière se produit lorsqu'un métal est en contact avec un métal différent et qu'ils sont tous les deux dans une solution corrosive [17].

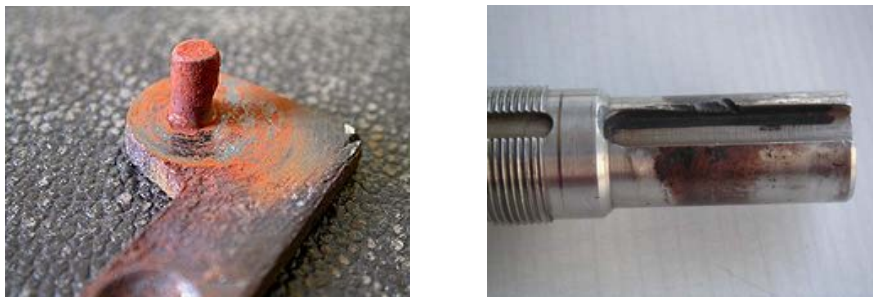


Figure I.13 L'état de surface présentant une usure par corrosion

### I.4.2.4 Usure par fatigue

La détérioration des surfaces par fatigue de contact (Figure I.14a) se manifeste lorsque les couches superficielles sont soumises à des contraintes répétées ou alternées qui conduisent à l'amorçage des fissures. Ces sollicitations peuvent être d'origine mécanique ou thermique. Les dégradations apparaissent sous forme des piqûres, fissures, écaillage et s'accompagnent par des modifications structurales (Figure I.14b).

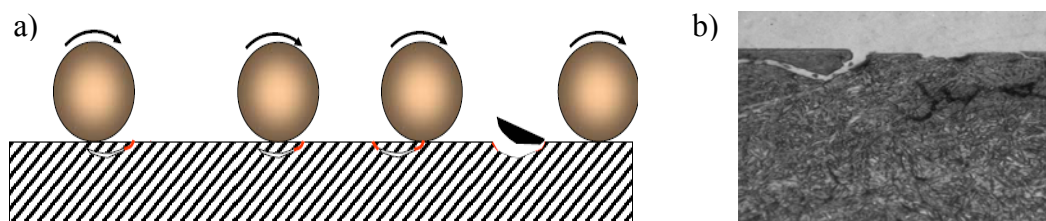


Figure I.14 a) Différents mécanisme d'usure par fatigue [17]  
b) Modification structurale dû à la fatigue

### I.4.3 Lubrification

La lubrification est l'un des moyens les plus efficaces actuellement connus pour réduire le frottement et contrôler l'usure. Cette technique consiste à créer un film mince de liquide, gaz ou solide entre deux surfaces pour faciliter le mouvement, en réduisant le minimum d'énergie et permettant de prévenir les endommagements possible [18].

Or ce film joue un rôle essentielle dans la séparation des aspérités des surfaces en contact facilitant ainsi le mouvement en réduisant les frottements ce qui permet d'éviter la détérioration des couches superficielles et d'augmenter la durée de vie des mécanismes. Ainsi c'est en fonction de l'importance de cette rugosité que vont être définis les régimes de lubrification qui sont en nombre de trois.

Généralement pour caractériser le régime de lubrification on utilise le rapport  $\Lambda$  définie par la relation suivante [1].

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sigma} \quad (\text{I.1})$$

$h_{\min}$  : hauteur minimale du film au centre du contact

$\sigma$  : écart type de la rugosité des deux surfaces en contact.

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (\text{I.2})$$

- Si  $\Lambda > 3$ , les effets de la rugosité sur le film ne sont pas importants, les surfaces sont totalement séparées donc on se positionne dans le cas d'une lubrification à film épais. Dans ce cas les deux surfaces sont complètement séparés par le film lubrifiant et les pressions générées dans le film sont faibles est caractérisé par le non parallélisme des surfaces, on parle alors de lubrification hydrodynamique (HD) [19] (Figure I.15).
- Si  $1.5 < \Lambda < 3$ , les rugosités commencent à devenir non négligeables, d'où on se situe en régime de lubrification mixte dans ce cas les surfaces sont parallèles, le lubrifiant est introduit sous pression pour assurer la portance et pouvoir séparer les surfaces. Dans ce régime la charge est supportée en même temps par le film lubrifiant et les aspérités en contact.

- Si  $\Lambda < 1.5$ , les aspérités interagissent les unes avec les autres, le contact métallique est sévère, alors il s'agit d'un régime de lubrification limite. Dans ces conditions de fonctionnement la charge est supportée entièrement par les aspérités des solides en contact, donc le film de lubrifiant est ultiment mince d'où l'apparition de frottement et l'usure des surfaces.

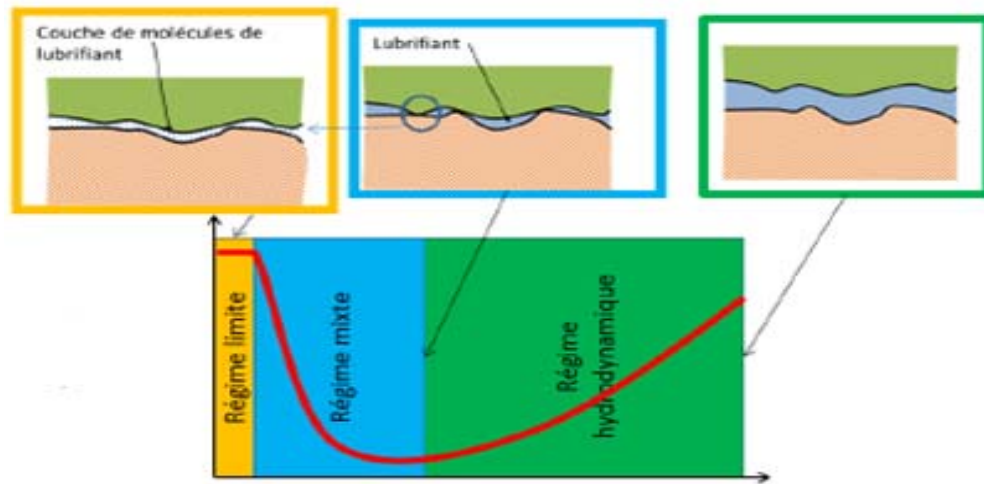


Figure I.15 Les différents régimes de lubrification [7]

## I.5 Rôle de la surface en tribologie

La surface joue un rôle important en tribologie par le fait qu'une surface mécanique représente non seulement les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi les caractéristiques géométriques des surfaces en contact. Elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux au travers des forces d'adhésion mais aussi sur le comportement du contact en régime lubrifié à travers les phénomènes de mouillage (Figure I.16) [20]. La rugosité de surface joue un rôle indispensable car elle détermine l'aire effective de contact ainsi que la distribution des pressions superficielles.

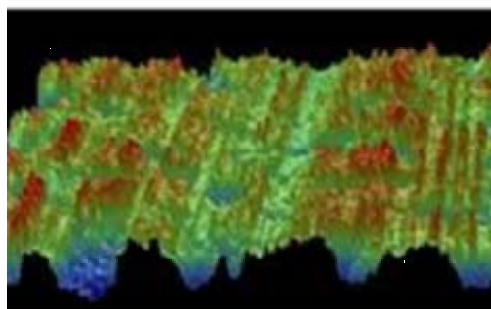


Figure I.16 Etat de surface dégradé [21]



## I.6 Etat de surface et système mécanique

La durée de vie d'un système mécanique est fortement influencée par l'état de surface en service, et les conditions de fonctionnement [1] (frottement, lubrification, température). Sachant que tout système mécanique est composé d'un ensemble de pièces liées entre elles et en mouvement les unes par rapport aux autres [9].

Généralement ces pièces sont soumises aux frottements nécessitant ainsi la lubrification des surfaces en contact pour éviter l'usure rapide et la détérioration de ces surfaces [22] (Figure I.17). En conséquence le bon fonctionnement des pièces à long terme dépend étroitement de la qualité de leurs usinages, ainsi que de leurs finitions.

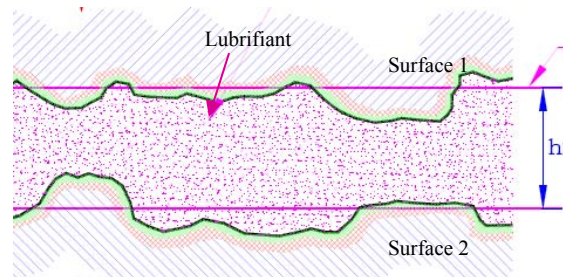


Figure I.17 Macroscopie des surfaces rugueuses en contact [17]

### I.6.1 Définition d'un état de surface

En mécanique, l'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées [23]. Lors de l'usinage, l'étude de l'état de surface d'une pièce se limite souvent à l'écart géométrique représenté par les irrégularités. Ce dernier est déterminé par l'écart de la surface réelle par rapport à la surface nominale, il est classé suivant 4 ordres (Figure I.18):

- Ordre 1 : écarts de forme et de profil (rectitude, circularité, profil, ...) généralement mesurés sur l'étendue globale de la pièce inspectée ;
- Ordre 2 : erreur d'ondulation, généralement mesurée sur une longueur pré déterminée ;
- Ordre 3 : stries, sillons périodiques ou pseudopériodiques ;
- Ordre 4 : arrachement, marque de l'outil, fente, piqure.



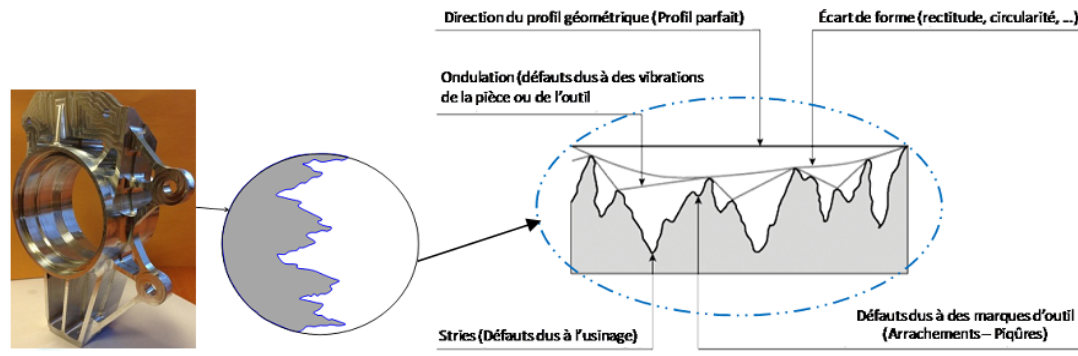


Figure I.18 Les différents défauts de surface [24]

### I.6.2 Relation entre qualité de surface (état de surface) et rugosité

Dans le domaine mécanique, la qualité de surface (rugosité et texture) est un requis très important pour les pièces, spécialement dans des secteurs tel que l'aéronautique et l'automobile, ce requis est critique pour la fiabilité en fatigue. En effet, l'amorce des fissures est directement liée à la qualité de surface [24]. Cette dernière joue un rôle très essentiel dans le fonctionnement et la durée de vie d'un système mécanique soumis au frottement et à l'usure. La surface peut donc, exiger une qualité particulière spécifiée par le concepteur, pour des raisons fonctionnelles (caractéristiques tribologiques) ou esthétique (lisse, brillante).

Par conséquent l'état de surface usinée en l'occurrence la rugosité est une spécification de conception indispensable par laquelle la qualité technologique de la pièce usinée peut être évaluée. La rugosité de surface a une grande influence sur la qualité des surfaces usinées et les propriétés fonctionnelles telles que la surface portante, les propriétés de frottement, résistance à l'usure et à la fatigue.

### I.6.3 Définition de la rugosité

Une surface quelque soit son procédé de fabrication n'est pas une surface parfaitement lisse selon la méthode d'usinage et les outils utilisés (Figure I.19), mais aussi selon le matériau, elle présente de nombreuses irrégularités micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par rapport à une ligne "moyenne" et sont classées en deux catégorie : des aspérités ou "pics" et des cavités ou "creux".

L'ensemble de ces défauts de surface constitue la rugosité. La rugosité d'une surface donnée peut être déterminée par la mesure d'un certain nombre de paramètres [25].

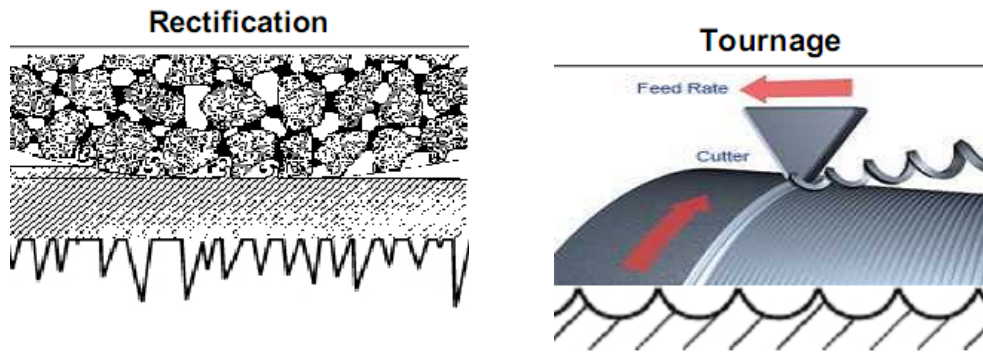


Figure I. 19 Les types de surface selon le procédé de mise en forme [26]

#### I.6.4 Les différents paramètres de rugosité

La rugosité constitue un élément fondamental dans les attributs fonctionnels des pièces, les performances et les coûts de production ainsi que les propriétés mécaniques (résistance à la fatigue et à l'usure). Elle est un paramètre essentiel pour la caractérisation de la qualité d'une surface et est un indice d'assurance qualité pour le processus de fabrication [23]. Les paramètres de rugosité peuvent être calculés soit pour des profils (2D) ou des surfaces (3D). En 2D, on considère un profil dont la hauteur de chaque point  $Z_i$  a été mesurée sur une ligne divisée en  $N$  points. En 3D, on considère une surface dont la hauteur de chaque point  $Z_{ij}$  a été mesurée sur une zone divisée selon une matrice  $M \times N$  points [27]. Ces paramètres peuvent être regroupés en 3 catégories suivant leur fonctionnalité : les paramètres d'amplitude, spatiaux et hybrides.

##### I.6.4.1 Les principaux paramètres d'amplitude

- **Ecart arithmétique moyen "Ra"**

L'écart arithmétique moyen "Ra", c'est la moyenne des valeurs absolues des écarts entre les pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale (Figure I. 20a). On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressants dans la rugosité. Les états de surface peuvent présenter des aspects très différents tout en ayant une valeur de "Ra" identique [28] (Figure I. 20b).

$$Ra = \frac{1}{L} \int_A^B |Y(x)| dx \quad (I.3)$$

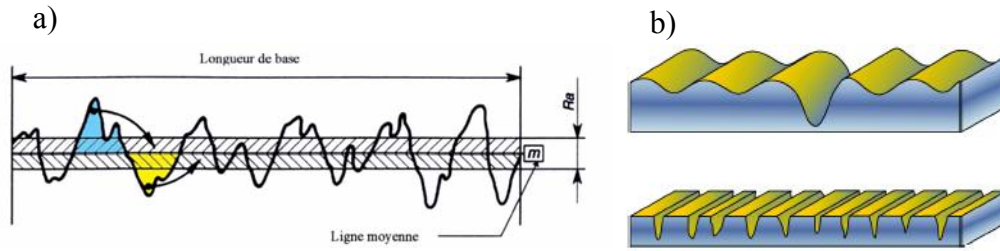


Figure I. 20 a) L'écart arithmétique moyen "Ra"[29]

b) Etat de surface différents et l'écart moyen identique Ra = 2 µm

- **Rugosité moyenne quadratique "Rq"**

La moyenne quadratique des écarts de hauteur du profil "Rq" est la valeur moyenne quadratique des écarts du profil par rapport à la ligne de référence des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base, "Rq" est souvent appelé RMS (root mean square) [30].

"Rq" est défini par l'équation (I.4) :

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L |Z^2(x)| dx} \quad (I.4)$$

- **Le coefficient de symétrie "Sk"**

Le coefficient de symétrie "Sk"(skewness en anglais) est défini sur la longueur d'évaluation, il correspond à la symétrie du profil par rapport à la ligne de référence et illustre la capacité portante ou la porosité du profil. Ce paramètre est important car il renseigne sur la morphologie de l'état de surface (Figure I.21). Une valeur positive de "Sk" correspond à une surface présentant des pics et protubérances dépassant au-dessus de la surface, et donc une distribution décalée vers les points les plus bas, alors qu'une valeur négative correspond à une surface en plateau avec des rayures ou des pores profonds, et une distribution décalée vers les points les plus hauts [31]. C'est donc un paramètre important pour caractériser les fonctions de contact ou de lubrification.

$$Sk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Zi^3 \quad (I.5)$$

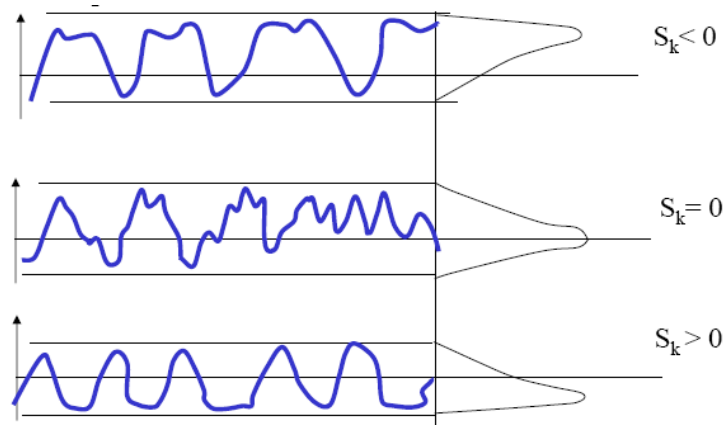


Figure I. 21 Le coefficient de symétrie "Sk" [32]

- **Le coefficient d'aplatissement "Ek"**

Le coefficient d'aplatissement "Ek" (kurtosis en anglais) caractérise la largeur de la distribution des hauteurs défini sur la longueur d'évaluation (Figure I.22).

$$Ek = \frac{1}{Rq^4} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Zi^4 \quad (I.6)$$

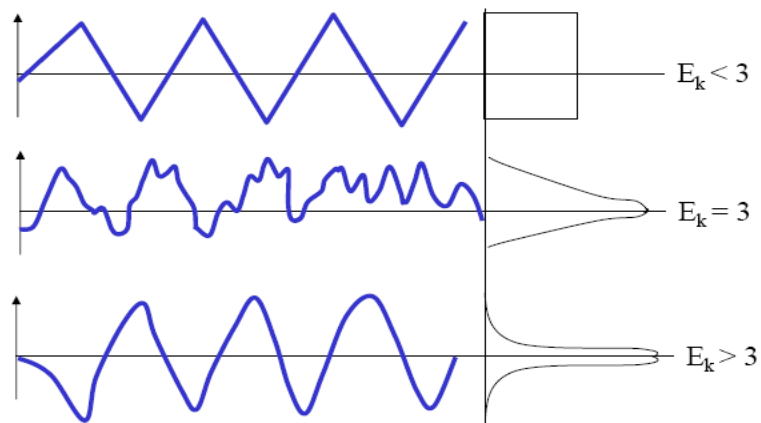


Figure I. 22 Le coefficient d'aplatissement "Ek" [32]

### I.6.4.2 Les principaux paramètres d'espacement

- l'espacement moyen entre pics du profil "Rsm"

L'espacement moyen entre pics du profil "Rsm" représente la distance moyenne entre les pics qui interceptent la ligne moyenne mesurée sur la longueur d'évaluation (Figure I.23). Ce paramètre peut être calculé par la formule suivante [32].

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m XSi \quad (I.7)$$

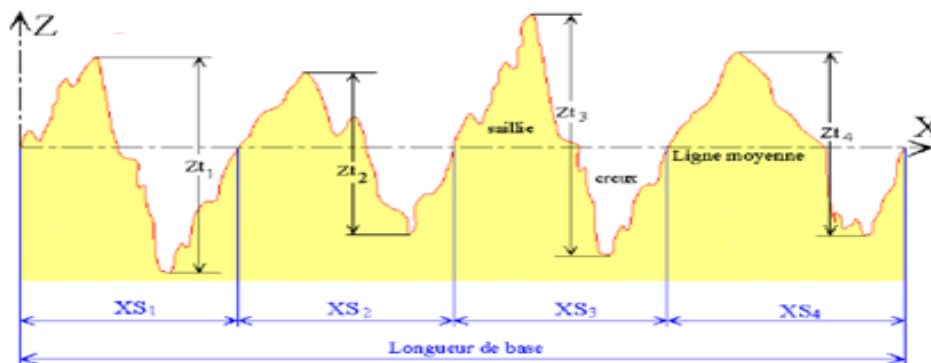


Figure I.23 Espacement entre pics "Rsm"[32]

- le nombre des points hauts "Pc"

Le nombre de points hauts "Pc" compte les pics qui dépassent de part et d'autre d'une bande centrée sur la ligne moyenne (Figure I. 24), il est exprimé en pics.cm<sup>-1</sup>[31].

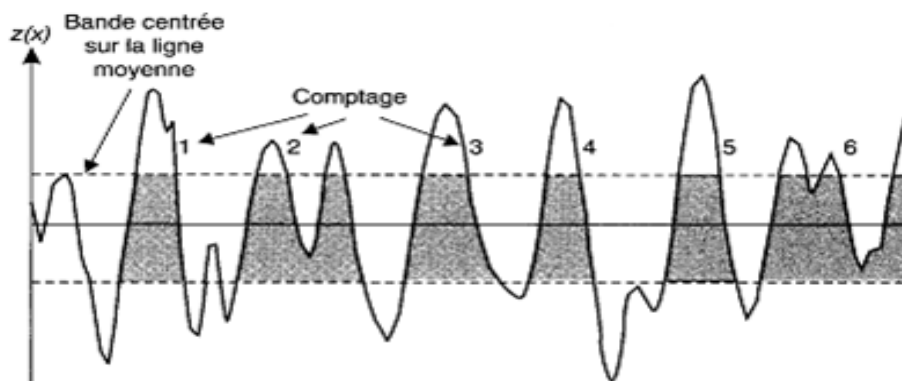


Figure I.24 Comptage des pics "Pc"

### I.6.4.3 Les paramètres fonctionnels

- **Taux de longueur portance "Rmr"**

Le taux de longueur portance "Rmr" (bearing ratio) est le rapport entre la longueur portante d'un profil de rugosité coupé à la profondeur P et la longueur d'évaluation à partir du pic le plus haut. Ce taux est estimé (%) sur la courbe d'Abbott-Firestone (Figure I. 25).

$$Rmr(\%) = \frac{100}{L} \sum_{i=1}^{i=n} b_i \quad (I.8)$$

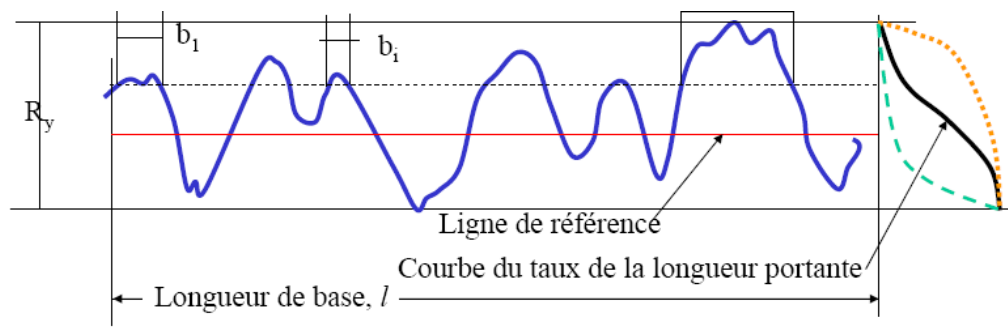


Figure I. 25 Taux de longueur portance évalué sur la courbe d'Abbott-Firestone [31].

Cette courbe permet de prévoir le comportement à l'usure des surfaces travaillant sous charge dynamique nécessitent des propriétés particulières en termes de résistance à la charge élevée, frottements réduits, tenue à l'usure et dans de nombreux cas une bonne capacité de rétention de fluide (huile), on peut distinguer 3 zones (Figure I. 26) [33].

- **Zone de rodage** : permet de caractériser la partie de la surface qui s'use pendant le rodage représenté par le critère de rodage "Rpk" désignant les pics saillants qui risquent d'être éliminés pendant les premières heures de fonctionnement de la pièce. Moins ce critère est important et plus le temps de rodage d'un moteur sera limité dans le temps.
- **Zone de fonctionnement** : définit la quantité de matière disponible à l'usure pendant le fonctionnement de la pièce, indiqué par le critère de fonctionnement "Rk", plus cette quantité est disponible, plus un moteur fonctionnera longtemps.

- Zone de lubrification : détermine les creux disponibles pour retenir un lubrifiant nécessaire pour maintenir le bon fonctionnement, elle est évaluée par le critère de lubrification "Rvk". L'absence ou la disparition des creux entraînera des pertes énergétiques et du grippage sur un moteur.

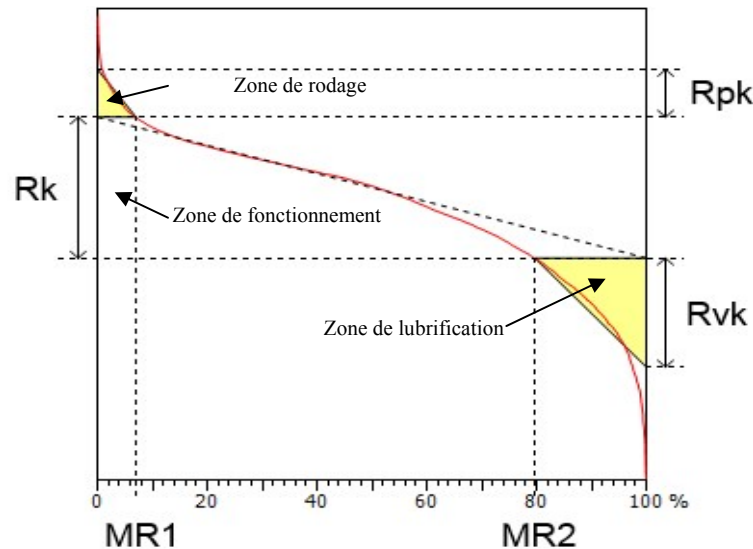


Figure I. 26 Construction graphique des paramètres "Rk, Rpk, Rvk" [33]

### I.6.5 Importance de la topographie de surface (3D)

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) [12].

La connaissance de la topographie est primordiale pour déterminer les propriétés tribologiques d'une surface. En effet la quantification de l'usure en termes de changements dans la morphologie de la surface peut offrir une image plus détaillée du processus d'usure par rapport à une simple pesée (Figure I. 27) [34].

D'où la topographie 2D traditionnelle a été remplacée par les techniques de mesure tridimensionnelle (3D) (paramètres surfaciques ISO 25178) ainsi la caractérisation des surfaces en 3D permet des interprétations faciles et intuitives.



Avec un jeu de paramètres adéquats, il est possible de quantifier la fonctionnalité de la surface pour une application donnée.

Donc le besoin de paramètres plus spécialisés a mené à l'introduction d'un grand nombre de paramètres (3D) [27] qui n'existe pas dans la mesure 2D tels que les paramètres d'isotropie (Str, Std..), et les paramètres de volume ( $V_{mc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ....) voir annexe (A).

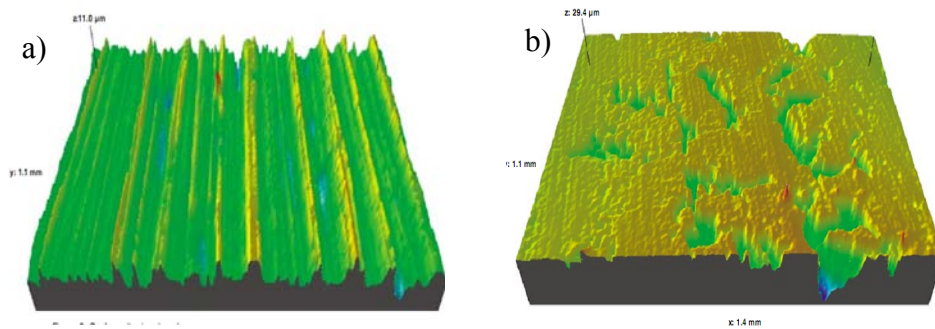


Figure I. 27a) Surface d'acier abrasée unidirectionnellement  
b) Bonne surface ayant du volume pour retenir le lubrifiant [34]

### I.6.5.1 Paramètres d'isotropie

Les paramètres d'isotropie sont aussi appelés les paramètres spatiaux, ils évaluent les informations latérales présentes sur les axes X et Y de la surface et décrivent les propriétés spatiales de celle-ci. Ils sont particulièrement utiles pour distinguer les surfaces isotropes des surfaces anisotropes (Figure I.28). Une surface est dite isotrope quand elle présente les mêmes caractéristiques quelque soit la direction de mesure, malheureusement elles sont assez rares et la plupart des surfaces utilisées dans l'industrie présentent une orientation privilégiée (Surfaces tournées, rectifiées, galetées) se sont des surfaces anisotropes [35].

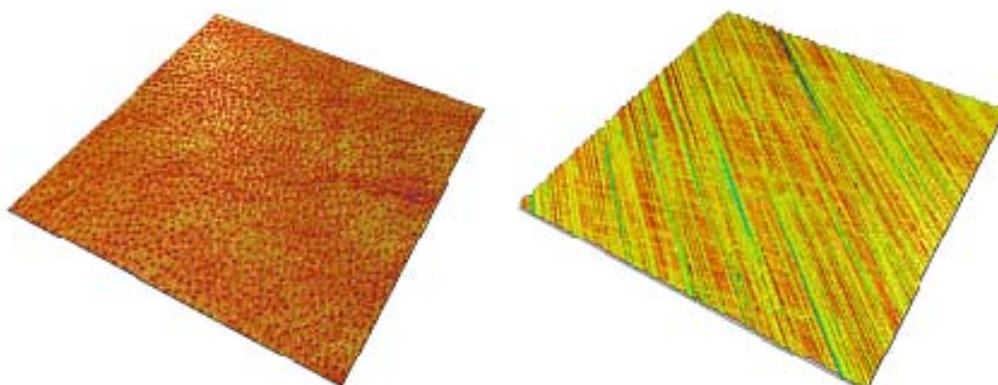


Figure I. 28 Surface isotrope (gauche) - surface anisotrope (droite) [30]



Ces paramètres sont basés sur l'analyse spectrale de la transformée de Fourier et de la fonction d'auto-corrélation (FAC) équation (I.9). Cette dernière caractérise le degré de ressemblance entre une surface et elle-même lorsqu'elle est translatée dans une direction

( $\tau x$ ,  $\tau y$ ) (Figure I. 29). Son calcul permet donc d'évaluer les dépendances internes de la surface considérée (motifs, périodicités...) [2]. Elle se définit comme suit:

$$ACF(\tau x, \tau y) = \frac{\iint_A Z(x,y)Z(x-\tau x,y-\tau y)dxdy}{\iint_A Z(x,y)Z(x,y)dxdy} \quad (I.9)$$

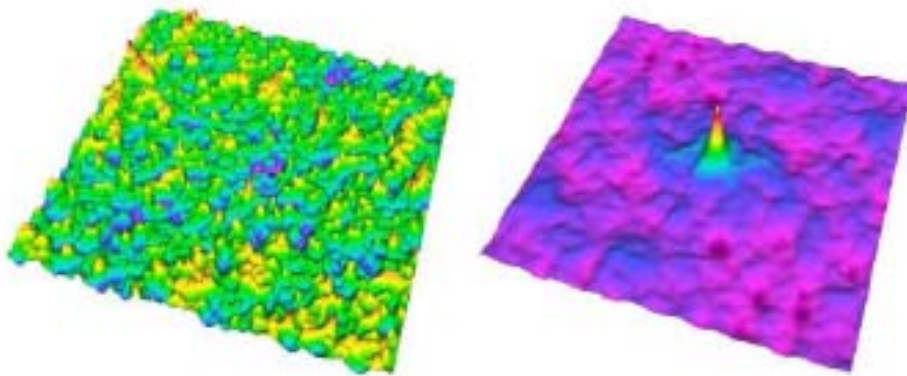


Figure I. 29 La topographie d'une surface à gauche et son auto-corrélation à droite [35]

L'image obtenue par l'auto-corrélation comporte un pic central, le rapport entre les rayons maximum et minimum ( $R_{min}$  et  $R_{max}$ ) du lobe (Figure I. 30) qu'on obtient à partir du seuillage du pic central d'auto-corrélation représente le paramètre " $Str$ " indicateur d'isotropie de la surface [35]. Ce paramètre représente l'orientation du motif de rugosité qui estime le rapport de la longueur sur la largeur d'une aspérité représentative, il prend une valeur entre 0 et 1 ou en pourcentage entre 0% et 100%. Une surface isotrope a une valeur de " $Str$ " proche de 1 (100%) alors qu'une surface fortement anisotrope aura une valeur de " $Str$ " proche de 0.

$$Str = \frac{R_{min}}{R_{max}} \quad (II.10)$$

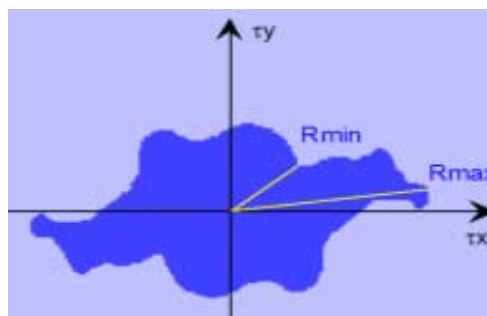


Figure I. 30 le lobe central avec  $R_{min}$  et  $R_{max}$

### I.6.5.2 Paramètres fonctionnels de volume

Ces paramètres sont jugés plus pertinents par rapport aux autres paramètres fonctionnels, ils sont calculés sur la courbe d'Abbott (à partir de deux seuils de taux de portance fixés à 10 et 80 %) [33]. Deux paramètres de volume de matière et deux paramètres de volume de vide sont définis (Figure I. 31).

- $V_{mp}$ , volume de matière des pics ;
- $V_{mc}$ , volume de matière du cœur ;
- $V_{vc}$ , volume de vide du cœur ;
- $V_{vv}$ , volume de vide des vallées.

Ces paramètres sont exprimés en unité de volume par unité de surface ( $\text{ml}/\text{m}^2$  ou  $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ).

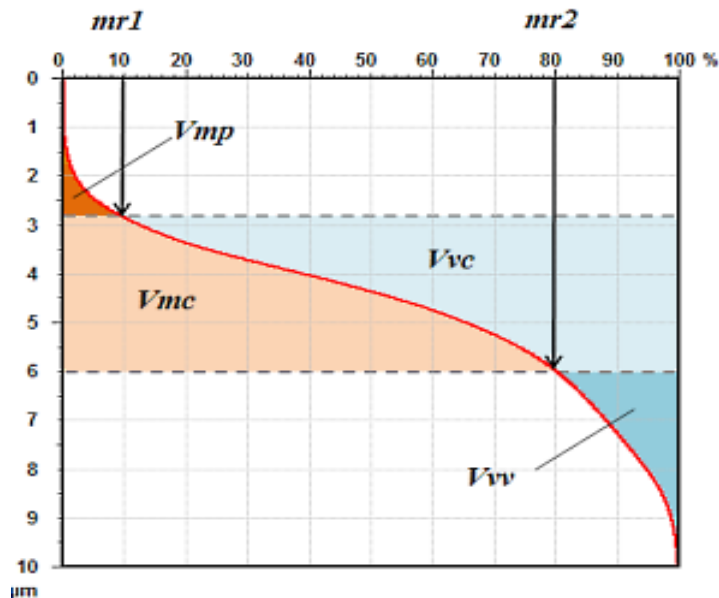


Figure I. 31 Paramètres fonctionnels de volume d'une surface [29]

### I.6.6 Relation entre l'état de surface et fonctionnalité d'une pièce

L'industrie mécanique et en particulier l'industrie aéronautique cherche toujours à optimiser les paramètres de surface afin d'améliorer leurs corrélations avec les phénomènes fonctionnels. Les surfaces des pièces ont une fonction bien précise, allant de la limitation de la matière à la réalisation des fonctions aussi complexes que l'étanchéité dynamique, des phénomènes de frottement et des pièces en mouvement relatif. L'aspect micro-géométrie de la surface intervient souvent de façon capitale dans son aptitude à satisfaire la fonction attendue.

Un bon choix d'un ou plusieurs paramètres de l'état de surface permettra d'assurer la qualité du fonctionnement pendant la durée de vie du produit. Donc la qualité de l'état de surface influe sur la fonction que doit remplir cette surface [24] tableau I.1.

Tableau I.1 Relation entre les paramètres d'une surface et la fonction d'une surface.

Surface		Fonctions appliquées à la surface		Paramètres									
				Profil de rugosité			Profil d'ondulation			Profil total			
		Désignations	Symbole	R	Rx	AR	W	Wx	Wte	AW	Pt	Pδc	
Contact de deux pièces	Avec déplacement relatif	Glissement lubrifié	FG	■			≤0,8R			□		■	
		Frottement à sec	FS	■		□		■		□			
		Roulement	FR	■			≤0,3R	■		□		□	
		Résistance au matage	RM	□		□	□			□		■	
		Frottement d'un fluide	FF	■		□				□			
		Étanchéité dynamique	Avec joint	ED	■	□	□	≤0,6R	■		□		
	Sans joint		□		■		≤0,6R					■	
	Assemblage fixe	Étanchéité statique	Avec joint	ES	□	■		≤ R		□	□		
			Sans joint		□	■		≤ R		■			
		Ajustement fixe avec contrainte	AD	□									■
	Adhérence (collage)	OC	■								□		
Surface indépendante	Avec contrainte	Outils (face de coupe)	EA	□		□	■			■			
		Résistance aux efforts alternés	EC	□	■	□							□
	Sans contrainte	Résistance à la corrosion	RC	■	■								
		Revêtement (peinture)	RE			□				□			
		Dépôt électrolytique	DE	■	≤	■							
		Mesurage	ME	■			≤ R						
		Aspect	AS	■		□	□				□		

■ Paramètres principaux : spécifier au moins l'un d'eux

□ Paramètres secondaires : spécifier éventuellement selon la fonction de la pièce

### I.6.7 Différence entre Profil de rugosité de surface et l'indice de rugosité "Ra"

En générale le paramètre statistique "Ra" est utilisé par les concepteurs pour caractériser le fini d'une surface. La rugosité moyenne arithmétique "Ra" est la hauteur moyenne arithmétique des irrégularités (hauteurs des pics et des vallées) par rapport à la ligne moyenne sur la longueur d'échantillonnage (Figure I.32). L'avantage de ce paramètre est qu'il est une référence sur le dessin technique et il est statistiquement stable et reproductible.

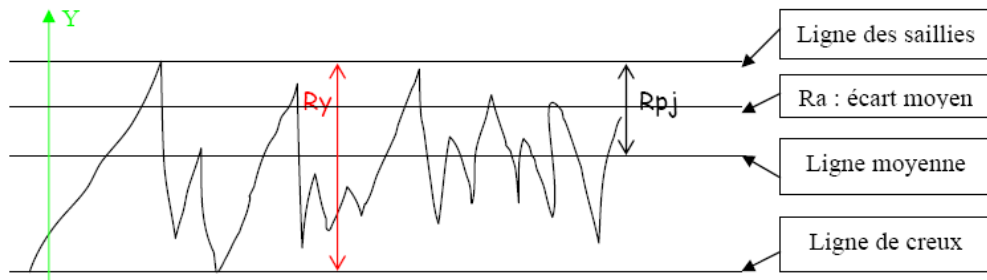


Figure I. 32 Principe de calcul de rugosité moyenne arithmétique "Ra"

Cependant l'inconvénient majeur du paramètre "Ra" est qu'il n'est pas un bon indicateur pour les différents types de surfaces (aucune distinction n'est faite entre les pics et les vallées) et ne reflète pas une image fidèle et physique du profil de la surface réelle. Des surfaces peuvent avoir le même "Ra" sans pour autant avoir le même profil fonctionnel. Le processus de finition ainsi que la fonction de la surface jouent un rôle important dans le résultat. Par exemple pour une pièce destinée à travailler avec une certaine étanchéité sur le plan fonctionnalité le profil ouvert (Figure I. 33a) peut affecter les performances d'étanchéité alors que le profil de forme fermée donne une meilleure performance d'étanchéité, car les vallées retiennent le lubrifiant dans la surface d'étanchéité en cours d'exécution (Figure I. 33b) [32]. En conséquence le paramètre statistique "Ra" ne peut pas donner une reproduction physique du profil de l'état de surface réelle, or pour les surfaces de haute qualité tels que les tôles dans l'industrie automobile ou aussi les surface de haute précision travaillant dans un système mécanique (frottement, lubrification...) comme ceux utilisés en aérospatiale, "Ra" semble moins significative pour estimer au mieux la qualité (brillance) d'une surface mécanique ainsi que certaines propriétés tribologiques. Ce problème d'état de surface a été approché par la géométrie fractale des profils de surfaces.

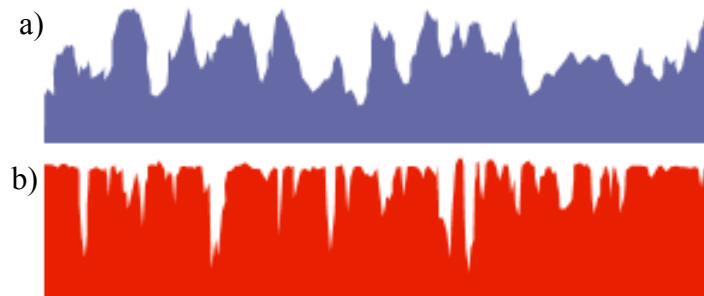


Figure I. 33 Deux profils différents avec "Ra" identique  $Ra = 0.2\mu m$  [34]

## I.7 Introduction sur la géométrie fractale

La géométrie fractale n'est pas qu'une théorie abstraite. En effet, les fractales se sont révélées adaptées à la représentation d'objets naturels complexes : montagnes, nuages, amas galactiques. Elles interviennent également dans le cadre de la théorie du chaos déterministe qui possède des applications dans de nombreux domaines (chimie, mécanique des fluides, biologie, etc.). Par ailleurs, la beauté des fractales en a fait un élément clé de l'infographie [34]. La géométrie fractale est un domaine de la géométrie qui s'intéresse aux objets présentant une structure naturelle ou artificielle très complexe et qui essaye de modéliser celle-ci selon des lois mathématiques [35]. Le mot fractal signifie à la fois « brisé » et « irrégulier » et sert à représenter géométriquement des objets dont la forme est extrêmement irrégulière [36]. Longtemps les fractales ont été des objets mathématiques incompris, ni vraiment des courbes, ni vraiment des surfaces [37]. La théorie des fractales a été introduite par Mandelbrot à partir de 1967 qui on se basant sur la linéarité, en représentation log-log, de la mesure  $L$  en fonction du pas de mesure " $\epsilon$ ", la longueur " $L$ " est exprimé par l'équation (I.11) (Figure I.34) [38].

$$L \propto \epsilon^{1-D} \quad (\text{I.11})$$

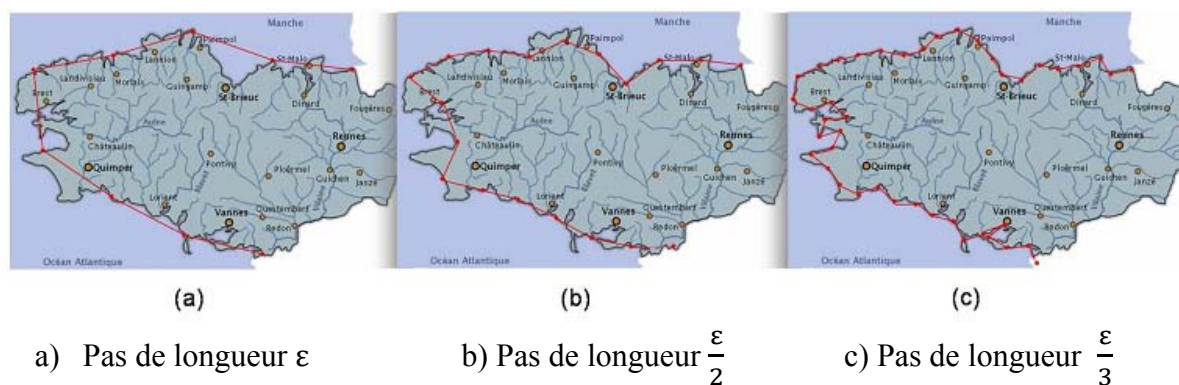


Figure I. 34 Le concept du pas de mesure ( $\epsilon$ )

Dans la géométrie classique, une ligne est un objet à une dimension, une surface est un objet à deux dimensions et un volume est un objet à trois dimensions. Nous sommes donc habitués à des objets dont la dimension ( $D$ ) est un nombre entier 1, 2 ou 3. Mais il n'est pas précisé quelle serait la dimension d'une série de points sur une ligne, une courbe irrégulière et plane ou une surface pleine de convolutions.

Dans ce but le terme de dimension fractale a été introduit par B. Mandelbrot en 1970 qui permet de mesurer le degré d'irrégularité ou de fragmentation d'un objet ou la rugosité d'une surface [39]. Par ailleurs les objets fractals sont caractérisés par la dimension non-entière appelée dimension fractale "Df" qui prend des valeurs fractionnaires, pour une courbe fractale on a  $1 < Df < 2$  et pour une surface on a  $2 < Df < 3$ , ne varie pas lors des changements d'échelle [40].

Les objets fractals sont définis comme rugueux ou fragmentés qui peuvent être subdivisés en plusieurs parties. Chaque partie est presque une copie réduite de l'objet entier. Ils ont la propriété auto-similarité ou d'auto-affinité de sorte que si une petite partie de l'objet est suffisamment agrandie il apparaît statistiquement très similaire à l'objet entier, on peut citer comme exemple de courbes fractales :

- La courbe de Von Koch indiquée dans Figure I.35 est construite en enlevant le troisième milieu d'un segment de droite d'une longueur unitaire ( $E_0$ ), et en le remplaçant par deux segments de longueurs égales ( $E_1$ ). Dans les stades ultérieurs de chaque segment droit est cassé en trois parties et la partie médiane de chaque segment est remplacé par deux parties ( $E_2, E_3, E_i$ ). Si ce processus est répété plusieurs fois infinie ( $E_\infty$ ), la courbe de Von Koch est obtenue. La dimension fractale "Df" de la courbe de Koch peut être calculée à partir de l'équation (I.12), où N est le nombre de parties égales ( $N = 4$ ) et m est la valeur d'agrandissement ( $m = 3$ ) [41].

$$Df = \frac{\text{Log}N}{\text{Log}m} \quad (I.12)$$

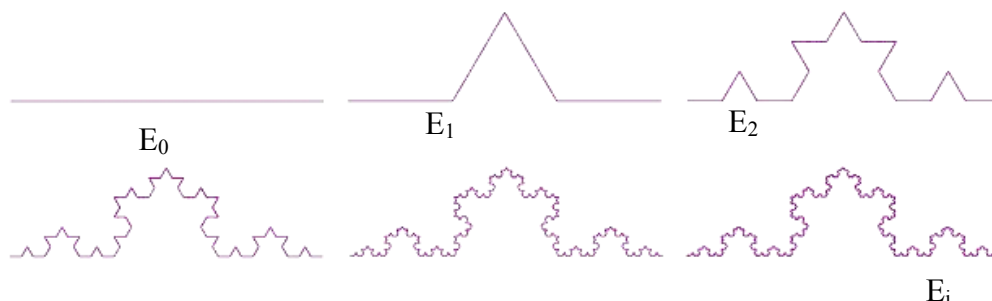


Figure I. 35 Etapes de la construction d'une courbe de Von Koch

- La construction de Sierpinski qui consiste à prendre un triangle quelconque et à lui retirer le triangle formé par les points milieux des es trois côtés. Pour chacun des trois triangles ainsi formés, on retire le triangle central de la même façon et on poursuit le procédé jusqu'à l'infini (Figure I. 36) jusqu'à l'obtention du triangle de Sierpinski [36].

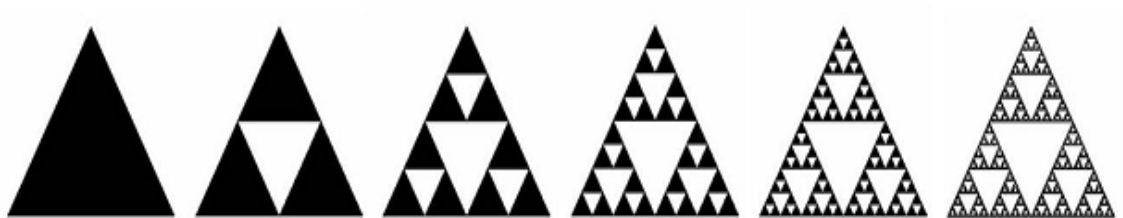


Figure I. 36 Illustration des premières étapes de la construction de Sierpinsky

### I.7.1 Caractérisation fractale des profils de rugosité de surface

Une caractéristique fondamentale des fractals est la propriété d'homothétie interne ou auto-similarité (self-similarity) comme le cas de la courbe de Von Koch (Figure I.35). En effet l'homothétie interne des objets fractals implique que l'échelle de ces objets est la même dans toutes les directions. La forme de ces objets ne change pas lorsqu'on modifie cette échelle. Cette invariance d'échelle de la dimension est une propriété importante [30] qui sera utilisée pour caractériser les surfaces rugueuses indiquées dans (Figure I. 37).

Cependant, les surfaces rugueuses (usinées) sont auto-affines et non auto-similaire [39]. Les profils de ces surfaces semblent aléatoires et multi-échelle. Ils sont continus partout mais non-différentiable en tous points. Donc l'équation (I.12) ne peut pas caractériser la dimension fractale de surfaces rugueuses [41].

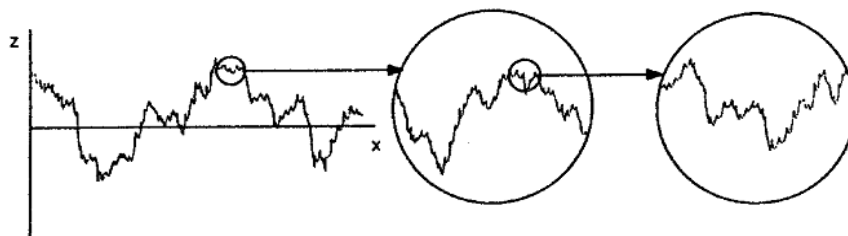


Figure I. 37 Description qualitative de l'auto-affinité pour un profil de surface [39]



En outre, il a été constaté que la fonction W-M (Weierstrass- Mandelbrot) (équation I.13) satisfait aux propriétés de continuité, non différentiabilité et d'auto-affinité. Par conséquent, elle peut être utilisée pour caractériser les profils des surfaces [42-43]. De nombreux travaux [44-45] montrent que beaucoup de surfaces peuvent être décrites à l'aide des outils de la géométrie fractale (bandes magnétiques films minces, dépôts diamant, certains usinages). Ainsi, Plusieurs auteurs [44, 45 et 46] ont montré que de telles surfaces peuvent être décrites par un jeu unique de deux paramètres fractals : la dimension fractale "Df" et le facteur d'échelle "G". Ces paramètres permettent la modélisation des surfaces et semblent pouvoir être reliés à certaines propriétés fonctionnelles.

$$Z(x) = G^{Df-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi\gamma^n x}{\gamma^{(2-Df)n}} \quad (I.13)$$

Plusieurs domaines de la science et de l'ingénierie ont utilisé la géométrie fractale pour simuler les profils des surfaces usinées [47] et décrire certains phénomènes, y compris les changements de la topographie de surface due à l'usure [48] et aux frottements [49,50]. L'industrie automobile se sert de la dimension fractale "Df" pour différencier la brillance des surfaces traitées (Figure I. 38a), notamment la qualité des tôles [49] ainsi que le degré relatif des irrégularités de surfaces (Figure I. 38b) [51,52].

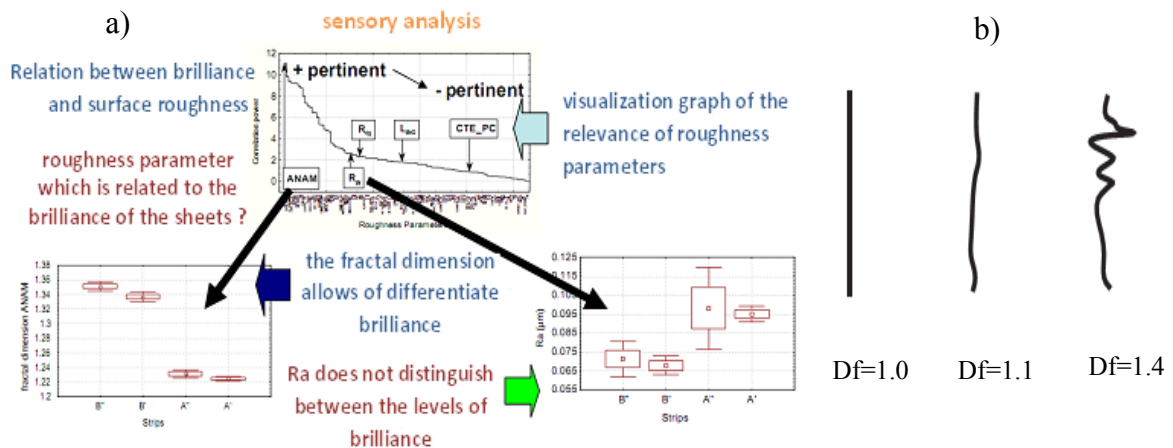


Figure I. 38 Illustration du concept de la dimension fractale pour un profil de surface



### I.7.2 Introduction de la géométrie fractale dans la caractérisation des surfaces usinées

De nombreux travaux ont été réalisés pour apprécier la qualité des surfaces usinées par la dimension fractale et dont on peut citer :

- W. Grzesik et S. Brol (2003) [53] ont essayé d'évaluer la qualité de surface usinée par tournage en utilisant 3 différentes méthodes de caractérisation de surface (statistique, fractale, réseaux de neurone). La conclusion qui résulte de ce travail est qu'il est possible d'appliquer l'analyse fractale pour caractériser une surface usinée. Les corrélations entre certains paramètres de rugosité et la dimension fractale "Df" ont été obtenues.
- Myung Kang Chang- Jeong Kim Suk- Kim Kwang H (2004) [54] ont démontré la relation entre rugosité de surface et la dimension fractale en fonction de l'usure de l'outil revêtu. Les résultats obtenus à partir de l'analyse de la dimension fractale de la surface usinée montrent que la dimension fractale "Df" et la rugosité "Ra" sont similaires en fonction des différentes conditions de coupe, en outre l'augmentation de la dimension fractale "Df" d'une longueur de coupe (usure de l'outil) montre une similarité associée à l'augmentation de la rugosité de surface en utilisant la méthode de diffusion lumière, la dimension fractale augmente avec l'augmentation de l'usure de l'outil.
- D. Goerke et K. Willner (2007) [55] ont décrit un modèle numérique qui permet de décrire le contact normal élasto-plastique des surfaces fractales isotropes. Ils ont abouti que les surfaces simulées des échantillons comprimés ont la même rigidité de contact pour la séquence de changement initiale, ce processus peut être prédit par les surfaces générées fractale.
- El Sombaty- Khashaba, Alsehnuy, Al Ali (2008) [41] ont développé un modèle de réseaux de neurone artificiel pour analyser et prédire la relation entre paramètres fractals des surfaces usinées "Df" et "G", ainsi les résultats ont montré que l'approche fractale peut être utilisée avec succès pour caractériser les surfaces usinées en plus les modèles 5-5-1 sont les mieux adaptés pour prédire les paramètres fractals "Df" et "G" les valeurs de ces derniers sont calculées par les modèles RNA et sont introduites dans la fonction de W-M pour prédire les profils de rugosité de surface correspondante appliqués aux différentes conditions de coupe. En conclusion les profils prédits sont statistiquement similaires aux profils réels mesurés.

- Yin. X et Komvopoulos. K (2010) [56] ont développé une analyse de l'usure qui prend en compte l'effet de l'adhérence interfaciale sur la charge totale pour des surfaces fractales en contact normal. Un critère d'usure en fonction de la zone de contact critique de déformation plastique des contacts d'aspérités a été utilisé pour modéliser l'enlèvement de matière à l'interface de contact. L'analyse donne un aperçu des effets des propriétés des matériaux de surface et adhérence interfaciale sur l'usure adhésive des surfaces fractales en contact normal.
- Bigerelle. M et al (2013) [57] ont présenté une approche fractale du rayon de courbure et des développements analytiques sur la base des simulations des mesures expérimentales. La nouvelle méthode est appliquée à un contact tribologique dans le processus de formage des métaux. Il a été constaté que cette méthode peut être d'un intérêt particulier en contact lubrifié pour analyser le régime de lubrification.
- Song. Z et Komvopoulos. K (2014) [58] ont utilisé l'analyse multi-échelle de rugosité de surface qui est décrite par la géométrie fractale, et la force d'adhérence interfaciale. L'interprétation des effets de la rugosité de la surface, la pression de contact, l'amplitude d'oscillation, et de l'adhérence interfaciale sur la déformation de contact est faite sur la base des résultats numériques de la dissipation d'énergie, la force (frottement) tangentielle maximale et de l'indice de glissement.
- Jun. Zhu Y, Wen. F D, Jiu. H et Yu. C F (2015) [59] ont réalisé des essais de rectification à haute vitesse sur nickel-superalliage à base d'Inconel 718. Ils ont abouti à une relation statistique entre la dimension fractale et l'usure par perte de matière du grain des arêtes de coupe (Figure I.39).

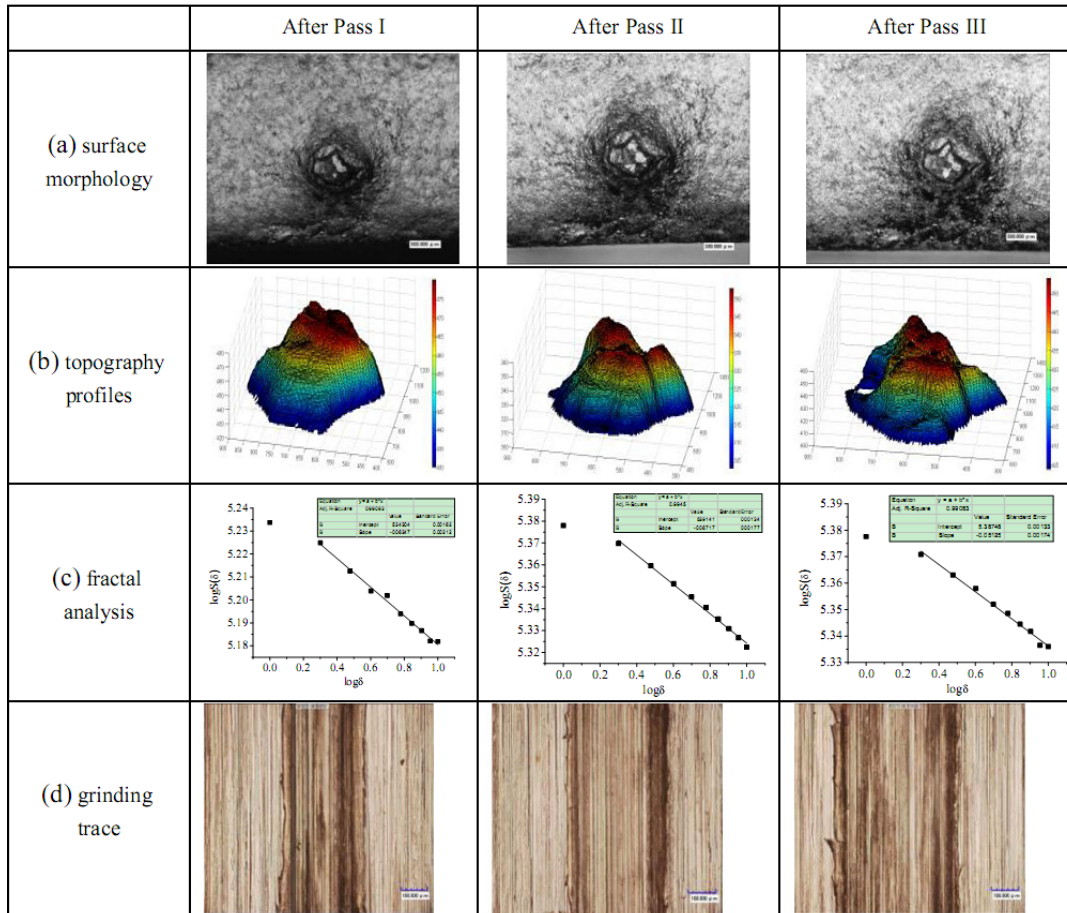


Figure I. 39 Morphologie de surface, topographie de surface, analyse fractale et traces de rectification après plusieurs passes [59]

- Qiupung. Y, Jianjun. S, Bo. Yu et Chenbo. Ma (2016) [60]. Sur la base de l'hypothèse selon laquelle la même rugosité fractale correspond aux mêmes propriétés d'usure ils ont introduit le théorème de Vaschy-Buckingham ou théorème Pi pour calculer la relation de l'usure dans des conditions expérimentales réelles. un modèle fractal a été mis en place pour prédire la durée de vie des garnitures mécaniques.
- Paggi. M et C. He Q (2016) [61] ont étudié en se basant sur les surfaces fractales l'évolution du volume libre en fonction de la séparation de plan moyen, sur la zone de contact réel et la pression appliquée en utilisant la méthode des éléments finis. l'effet de la dimension fractale de la surface sur les résultats prévus a été observé. Une formule de synthèse sur la base de la fonction de distribution de probabilité des volumes libres a été proposée afin d'interpréter numériquement et synthétiquement les tendances étudiées.

## I.8 Procédés de traitement mécanique

Les traitements mécaniques de surface sont des procédés qui permettent d'améliorer les caractéristiques géométriques et mécaniques 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 [62]. Le principe de base de ces procédés est la mise en application d'une pression à la surface d'un matériau pour provoquer une déformation plastique par un outil (ex : rouleau ou galet) (Figure I. 40). La 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 [63, 64].

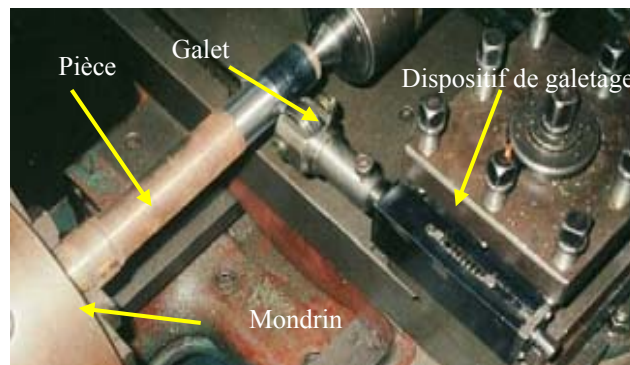


Figure I. 40 Procédé de galetage [65]

L'autre caractéristique particulière de ces traitements mécaniques est la qualité de surface des pièces traitées. En effet, après traitement l'état de surface et la géométrie locale des pièces sont modifiés et améliorés par rapport à l'état initial. Le brunissage (Figure I. 41) est aussi l'un des traitements mécaniques superficiels les plus répandus et est très utilisé en raison de sa forte productivité, il permet d'économiser la matière par rapport aux procédés classiques de finition [66, 67].

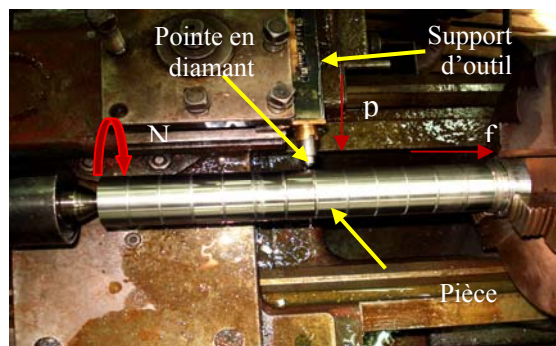


Figure I. 41 Procédé de brunissage [12]

Le principe de ce procédé est basé sur l'application d'une pression sur les crêtes de la surface au moyen d'une bille (Figure I.42), ce qui a pour conséquence un fluage de la matière dans les creux, au fur et à mesure de l'avance de la bille. Il permet de niveler les aspérités de la surface usinée en créant une zone de métal écrouie, indice d'une amélioration de l'état de surface [68,69]. De nombreux travaux de recherche [70-74] le préconisent pour le fini d'une surface.

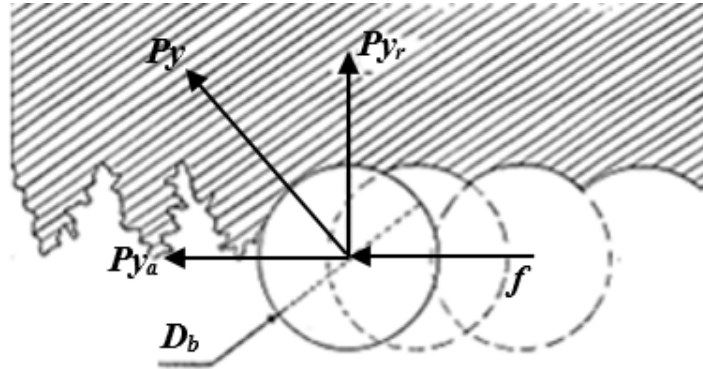


Figure I.42 Principe de brunissage [27]

Les effets bénéfiques du procédé sont conditionnés par l'aptitude des matériaux à subir une déformation plastique superficielle (D.P.S). Les alliages non ferreux, tel que les alliages d'aluminium sont reconnus par leur bonne ductilité et s'apprêtent bien à l'action du brunissage et ont été à l'origine de plusieurs travaux comme :

- ElAxir et A M. Abodiena (2008) [75] ont utilisé un alliage d'aluminium 2014 comme matériau pour l'expérimentation. La méthodologie de surface de réponse a été utilisée pour améliorer la conception d'expérimentation sans perte de précision des résultats. Les modèles mathématiques sont présentés pour la prédiction de cinq différents paramètres du profil de surface en corrélation avec les paramètres du régime de brunissage à savoir: la vitesse de brunissage, l'avance, la profondeur de pénétration et le nombre de passes. Les résultats montrent qu'à partir d'une rugosité initiale du spécimen d'environ  $4 \mu\text{m}$ , pourrait atteindre une rugosité moyenne de  $0,14 \mu\text{m}$ . La vitesse de brunissage, l'avance et le nombre de passes ont l'effet le plus significatif sur tous les paramètres du profil de surface étudiés (Figure I.43).

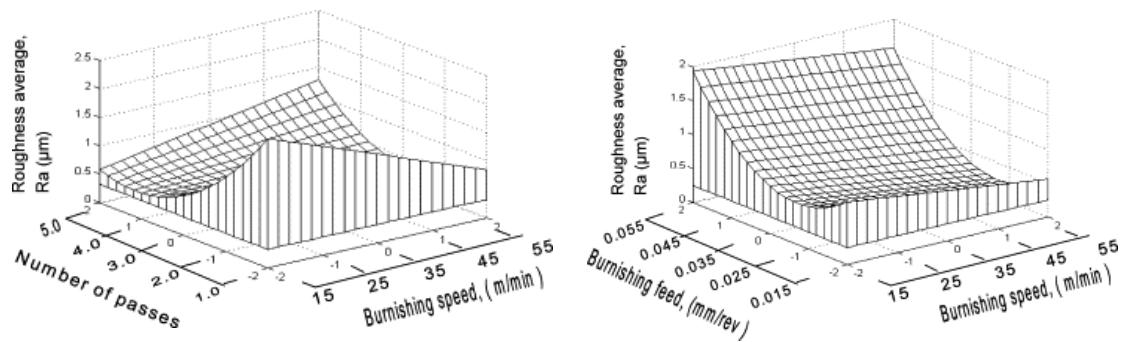


Figure I.43 Influence de la vitesse, l'avance et du nombre de passe sur la rugosité [75]

- N.S.M El-Tayeb (2007) [76] a appliqué le traitement par brunissage sur l'aluminium 6061 en raison de sa large gamme d'applications dans l'industrie tels que les raccords d'avions, des roues de camion, disque de frein, charnière broches, accouplements, pistons de frein et pistons hydrauliques. Le but était d'étudier l'impact de la vitesse, la force de pression et le diamètre de bille sur la qualité de surface et les propriétés tribologiques. Il a été constaté que la vitesse de brunissage de 330 tours par minute et la force de 212 N peuvent améliorer la rugosité de la surface jusqu'à 40% et la dureté jusqu'à 30%.
- Ugur. Esme (2010) [77] a optimisé la rugosité et la micro-dureté d'un alliage d'aluminium AA 7075 en appliquant le brunissage à la bille. Cet alliage est réputé pour ces bonnes propriétés mécaniques et il est très utilisé dans l'industrie aérospatiale. Cette étude a porté sur l'optimisation du processus de brunissage offrant une combinaison paramétrique optimale pour obtenir une rugosité de surface et une micro-dureté favorable en utilisant l'analyse relationnelle Grey et méthode Taguchi multi-réponse. Il a été remarqué que la force de pression est le principal facteur affectant la surface avec une contribution (71,59%) suivi du nombre de passes avec (15,75%), et l'avance avec (10,26%) (Figure I.44).

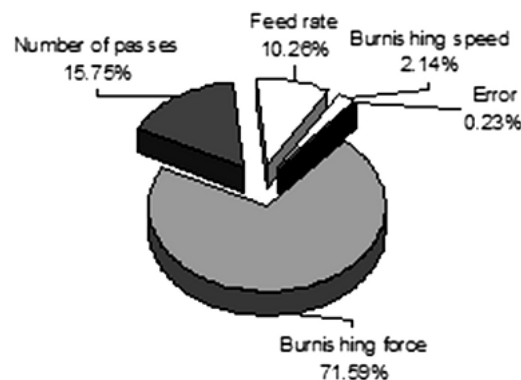


Figure I.44 Pourcentage de contribution des paramètres de brunissage [78]



- Dabeer. Ps et Purohit. Gk en (2010) [78] ont proposé un modèle mathématique pouvant être utilisé pour établir une corrélation entre les paramètres de brunissage et leurs interactions avec les paramètres de réponse et qui peuvent être facilement utilisés dans la sélection des paramètres optimaux du procédé pour produire les caractéristiques désirées de la surface contrôlées. Les résultats ont révélé une amélioration de l'état de surface et une augmentation de la dureté de surface suit à plusieurs repassages de l'outil de brunissage sur des éprouvettes en cuivre. Le régime optimal obtenu est : la vitesse de 425rpm, un diamètre de bille 7 mm, une force de pression de 70 N et un nombre de passes 2.
- M. H El-Axir et M M. El-Khabeery (2014) [79] ont étudié la relation entre la finition de surface, la fatigue et les paramètres du procédé de brunissage. La méthode de Taguchi a été utilisée pour identifier l'effet de quatre paramètres de brunissage, à savoir la vitesse de brunissage, lubrifiant, la profondeur de la pénétration et le nombre de passes sur le fini d'une surface et la fatigue d'un alliage d'aluminium 6061. les résultats obtenus montrent que l'avance a un l'effet dominant sur la rugosité de surface avec une contribution de 26,72% suivie par la vitesse, le nombre de passes, puis la profondeur de pénétration (Figure I.45a). La vitesse de brunissage a un effet significatif sur les cycles de fatigue avec une contribution de 45,33% suivie par le lubrifiant, la profondeur de pénétration et par le nombre de passes (Figure I.45b).

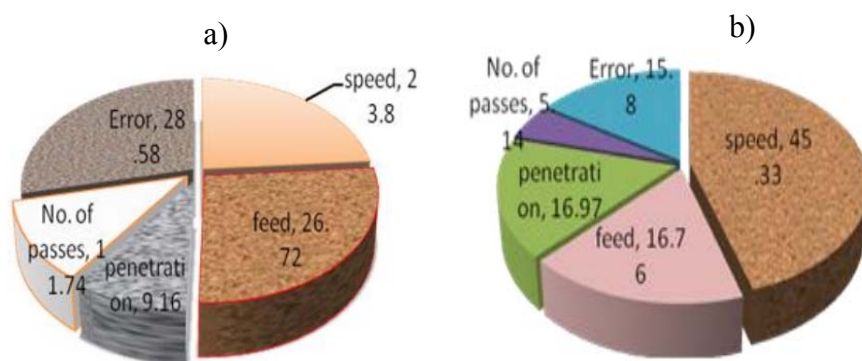


Figure I.45 Pourcentage de contribution des paramètres de brunissage sur :  
 a) la rugosité, b) la fatigue [79]

## **I.9 Conclusion**

D'après la recherche bibliographique, on peut conclure que l'état de surface contribue de façon considérable en tribologie (frottements, usure, lubrification). En effet, il a été montré dans plusieurs travaux [1, 22] l'importance de la surface, ainsi que les différents paramètres caractérisant la rugosité. La géométrie fractale et son rôle dans le domaine de mécanique a été mise en relief par plusieurs travaux, permettant de dévoiler une meilleure approche pour caractériser la rugosité de surface. Par ailleurs, de nombreux travaux [75-79] ont prouvé que le procédé de finition par TMS offre des effets bénéfiques dans l'amélioration des caractéristiques physiques et géométriques des surfaces des alliages non ferreux. Des travaux d'expérimentation et de simulation seront développés dans les prochains chapitres.



## *CHAPITRE II*

---

# *MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES*

## Table des matières

<b>II.1 Introduction</b> .....	43
<b>II.2 Matériels utilisés pour l'expérimentation</b> .....	43
II.2.1 Matériau .....	43
II.2.1.1 Composition chimique du matériau .....	43
II.2.1.2 Microstructure.....	44
II.2.1.3 Mesure de la Dureté .....	45
II.2.1.4 Mesure de la micro dureté.....	45
II.2.1.5 Essai de traction.....	46
II.2.2 Outil de coupe .....	48
II.2.3 Dispositif de brunissage .....	48
II.2.4 Machine outil .....	49
<b>II.3 Méthodologie expérimentale</b> .....	50
<b>II.4 Mesure de rugosité</b> .....	53
II.4.1 Mesure 2D (profil).....	53
II.4.2 Mesure 3D (surface).....	53
<b>II.5 Montage des pièces</b> .....	54
<b>II.6 Préparation des échantillons sur tour</b> .....	55
<b>II.7 Traitement par brunissage</b> .....	57
II.7.1 Traitement de la pièce 2.....	57
II.7.2 Traitement de la pièce 3 .....	58
<b>II.8 Conclusion</b> .....	59

## II.1 Introduction

Il a été montré dans la bibliographie que l'état de surface influe énormément sur le comportement d'un système mécanique et que les phénomènes de frottement, d'usure et de lubrification sont étroitement liés au fini de la surface. En effet, lors de la finition d'une pièce, beaucoup de facteurs du régime du procédé agissent sur les paramètres qui caractérisent l'état de surface. Dans ce chapitre, les équipements : les machines, les outils, les appareils de mesure de la dureté et de la rugosité (2D, 3D), sont exposés. La méthodologie suivie lors de l'expérimentation permettant d'évaluer les paramètres caractérisant la surface produite, particulièrement la rugosité "Ra", la dimension fractale du profil "Dfp", la dimension fractale de la surface "Dfs", le volume de la matière des pics "Vmp", le volume de la matière du cœur "Vmc", le volume du vide des vallées "Vvv", Rapport d'aspect de la texture "Str" et la dureté superficielle "Hv" a été explicitée.

## II. 2 Matériels utilisés pour l'expérimentation

### II. 2.1 Matériau

Le matériau utilisé pour cette étude expérimentale est un aluminium commercial fourni sous forme de barreau classé parmi les alliages de type aluminium non allié pur de la série 400. Les alliages de cette série sont essentiellement des aluminiums dont la pureté commerciale est d'au moins 99% Al. Ils sont répandus dans l'industrie automobile, aéronautique et aérospatiale [80], cryogénique [81]. A l'état recuit, leurs propriétés mécaniques sont faibles, mais on peut les améliorer par écrouissage. En générale, les alliages d'aluminium se prêtent facilement à la mise en forme par déformation plastique à froid, plusieurs travaux [77, 79] ont été réalisés sur ces types d'alliages, en opérant par traitement mécanique de surface.

#### II. 2.1.1 Composition chimique du matériau

L'analyse chimique du matériau a été réalisée dans le laboratoire LM3-Metz (université de Lorraine), au moyen d'un microscope électronique à balayage FEG.SUPRA 40, les éléments chimiques sont présentés dans le tableau II.1. La proportion en aluminium est de 99.18%, c'est un alliage à durcissement par écrouissage non trempant avec des teneurs de 0.19% en Fe et 0.34% en Si et qui sont présentés dans la figure II.1. Les traces de Ca, et potassium (K) peuvent provenir du fait que le matériau ait été trempé dans l'eau ou autre.

Tableau II.1 composition chimique de l'aluminium

Elément	Aluminium	Silicium	Potassium	Calcium	Fer
Teneur (%)	99.18	0.34	0.08	0.21	0.19

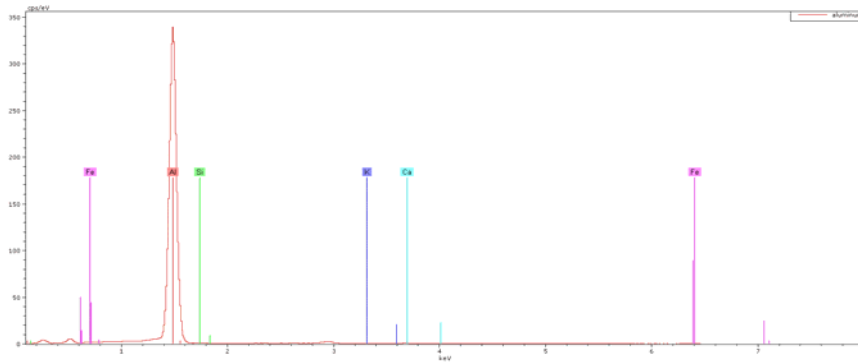


Figure II.1 Représentation des teneurs des différents éléments de l'alliage

### II. 2.1.2 Microstructure

La microstructure de la surface a été obtenue par microscope optique type LOM, REICHERT Poly Var 2, elle révèle des grains allongés dans le sens de sollicitation montrant une dispersion de phases (phases de durcissement) type Al-Si-Fe 5 (Figure II.2).

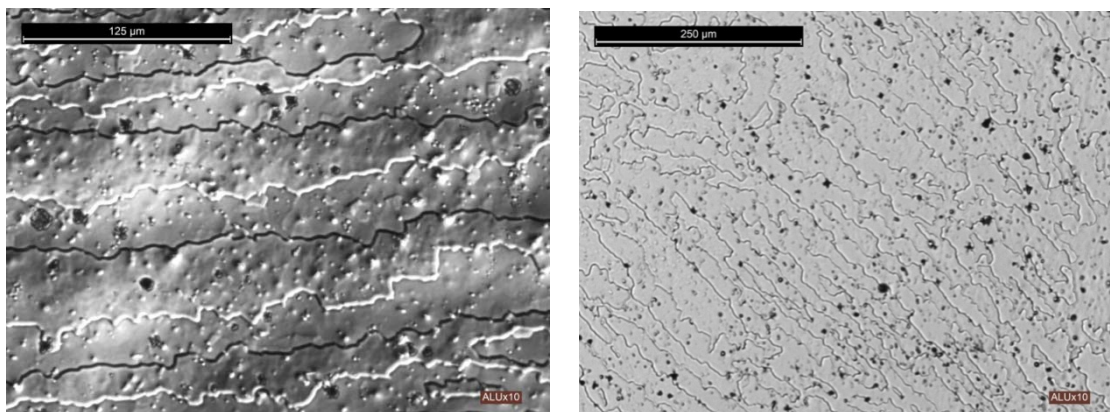


Figure II.2 Microstructure de l'alliage

### II. 2.1.3 Mesure de la Dureté

L'essai de dureté a été réalisé sur un duromètre de type INDENTEC (Figure II.3) avec une bille en tungstène de diamètre  $d=2,5\text{mm}$ . Les conditions de mesure et le résultat sont indiqués sur le tableau II.2.

Tableau II.2 Conditions de l'essai de dureté

Temps de maintient	Empreinte d1	Charge	HB
10s	1,5379mm	62,5N	30,4



Figure II.3 Duromètre INDENTEC

### II. 2.1.4 Mesure de la dureté superficielle

La mesure de micro dureté a été réalisée à l'unité URASM-CRTI Annaba, sur un appareil de type (Controlab-Digital microhardness, Tester MXT70) (Figure II.4) avec une charge d'indentation de 300grs, ce qui a révélé  $Hv= 34,6$ .



Figure II.4 Miroduromètre Tester MXT70

### II. 2.1.5 Essai de traction

L'essai de traction a été effectué au niveau du laboratoire des essais mécaniques URASM-CRTI, sur la machine (ZWICK 1476 LET1-Material prufung - F=100KN) montrée sur la Figure II.5.



Figure II.5 Machine de traction ZWICK 1476

L'éprouvette de traction présentée sur la Figure II.6 a été façonnée sur un tour selon la norme NF EN 10002-1. L'opération s'est déroulée dans les conditions qui sont enregistrées sur le tableau II.3.

Tableau II.3 Les conditions de déroulement de l'essai de traction

Température	Ecart entre mâchoire	Vitesse jusqu'à Rp, Re	Vitesse sur étendu d'écoulement	Vitesse d'essai
24°c	68,6 mm	1,02 Kg /mm <sup>2</sup> s	0,009L <sub>0</sub> /mm <sup>2</sup> s	0,4 L <sub>0</sub> /mm <sup>2</sup>

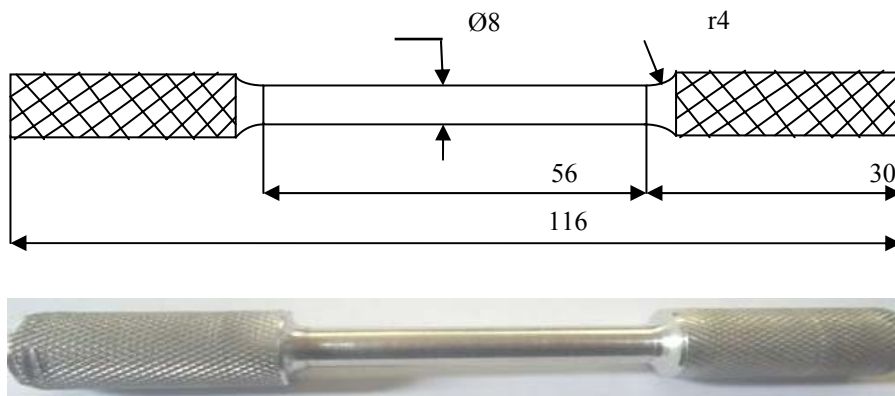


Figure II.6 Epreuve de l'essai de traction

En appliquant les conditions indiquées dans le tableau II.3, l'éprouvette maintenue entre les mors de la machine (Figure II.7) commence à s'étrangler au point 1 sous l'effet de l'effort de traction appliqué, jusqu'à striction au point 2. Le déroulement de l'opération s'est traduit selon la courbe de la figure II.8, les résultats obtenus sont enregistrés sur le tableau II.4.

Tableau II.4 Caractéristiques mécaniques

$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
124.7	121.4	21.717

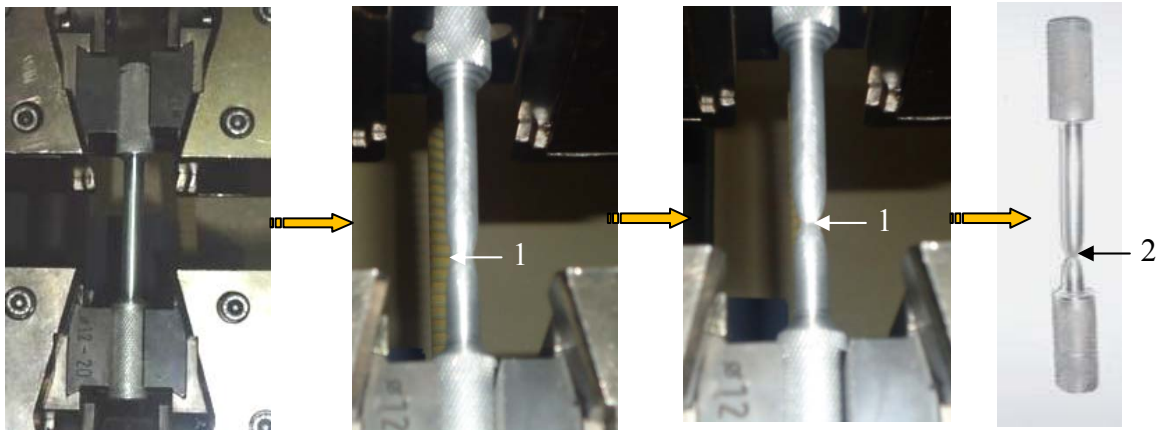


Figure II.7 Les étapes de déroulement de l'essai de traction

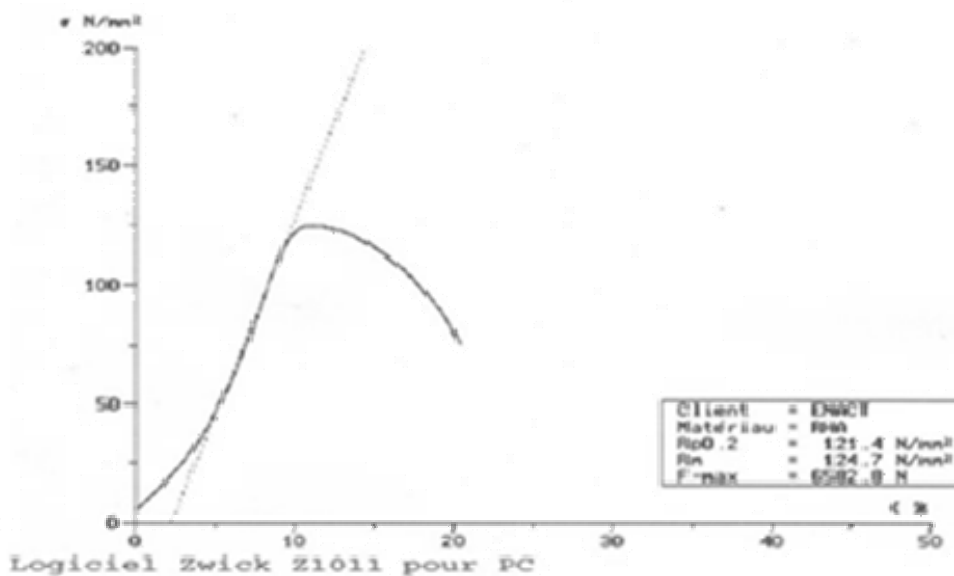


Figure II.8 Courbe illustrant l'essai de traction

### II.2.2 Outil de coupe

Les opérations de tournage ont été réalisées au moyen d'un outil de coupe à plaquette en carbure de forme triangulaire P7-GNR-2020-K16 [82] (Figure II.9), dont les caractéristiques sont indiquées sur le tableau II.5.

Tableau II.5 Caractéristiques de l'outil de coupe

h (mm)	b (mm)	l (mm)	Kr	d (mm)
20	20	125	91°	16



Figure II. 9 Outil de coupe

### II.2.3 Dispositif de brunissage

L'opération de brunissage est réalisée à l'aide d'un dispositif adapté aux diamètres de billes utilisées, respectivement 7 mm, 10 mm, 13.5mm (Figure II.10) et dont la dureté superficielle est :  $Hv_{Db7}=886.7Hv$ ,  $Db_{10}=611.9Hv$ ,  $Db_{13,5}=712.1Hv$ .

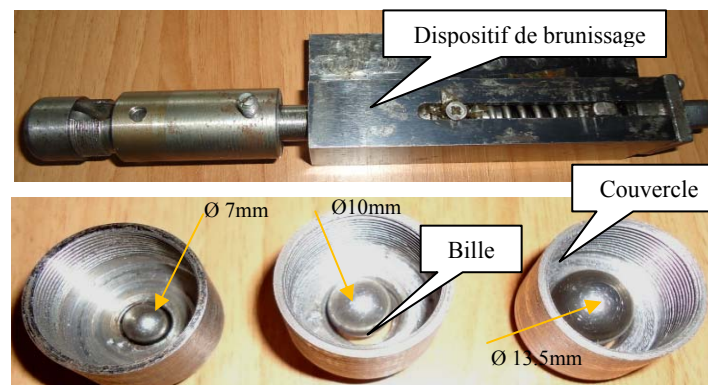


Figure II .10 Dispositif de brunissage



## II. 2.4 Machine outil

Les opérations de tournage ont été effectuées sur un tour modèle 1k 62 N°00212 (Figure II.11), dont les caractéristiques sont indiquées sur le tableau II.6. Les opérations de brunissage sont réalisées sur un tour modèle 1A616 de puissance 4,6 kW (Figure II.12).



Figure II 11. Tour 1k 62 N°00212

Tableau II.6 Caractéristiques du tour 1k 62

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	0,037- 1	12.5-2000	7.2 Kw



Figure II 12. Tour 1A616

### II.3 Méthodologie expérimentale

Toute expérimentation se déroule selon des étapes précises afin de faciliter son enchaînement. Dans ce travail, une méthodologie des plans d'expériences a été adoptée (Figure II.13), ce qui permet de minimiser le nombre d'expériences tout en ayant le maximum de renseignements, de gagner du temps et d'économiser la matière première. Les plans d'expériences présentent beaucoup d'avantages tels que :

- La possibilité d'utiliser un grand nombre de facteurs ;
- L'évaluation des représentations graphiques des réponses de sortie en fonction des paramètres d'entrée ;
- L'utilisation d'un modèle mathématique répondant aux objectifs à atteindre suivant le besoin [83, 84] ;
- L'optimisation des paramètres d'entrée relatifs aux paramètres de sortie envisagés.

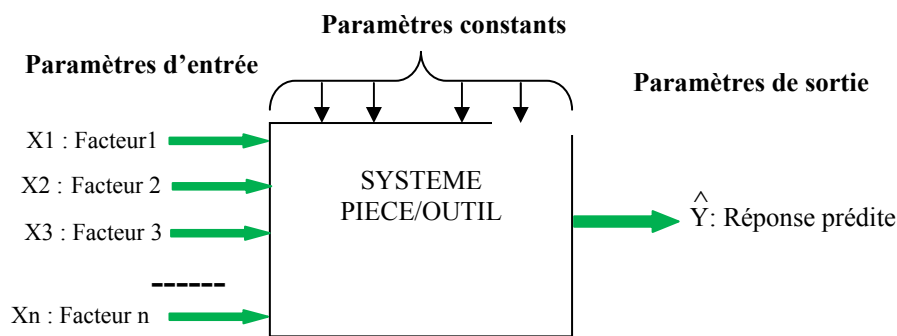


Figure II 13. Schéma de l'expérimentation

Les essais expérimentaux ont été conduits selon les plans de Box Behnken à trois facteurs en vue d'évaluer l'influence des différents paramètres du régime et leurs interactions sur les réponses considérées. Ce type de plans d'expériences, possède la propriété de séquentialité et permet de :

- ✓ modéliser les réponses avec un modèle du second degré tout en respectant certains critères d'optimalité ;
- ✓ Une mise en œuvre facile.

Ces plans prennent en compte trois facteurs à trois niveaux : -1 ; 0 ; +1, ils permettent à l'aide d'une matrice de 15 essais (tableau II.7) de formuler un modèle un modèle du second degré avec les interactions d'ordre deux présenté dans l'équation (II.1).

$$\hat{y} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \quad (\text{II.1})$$

Où e: erreur de prédiction

Tableau II.7. Matrice de Box Behnken pour trois facteurs [86]

Essai N°	Facteur N° 1	Facteur N° 2	Facteur N° 3
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Dans ce travail, un programme sous Matlab [85] dont le déroulement se fait selon l'organigramme indiqué sur la Figure II.14 a été utilisé pour déterminer les équations de prédiction des réponses, simuler leurs évolutions en fonction des paramètres d'entrée et d'établir le régime optimal.

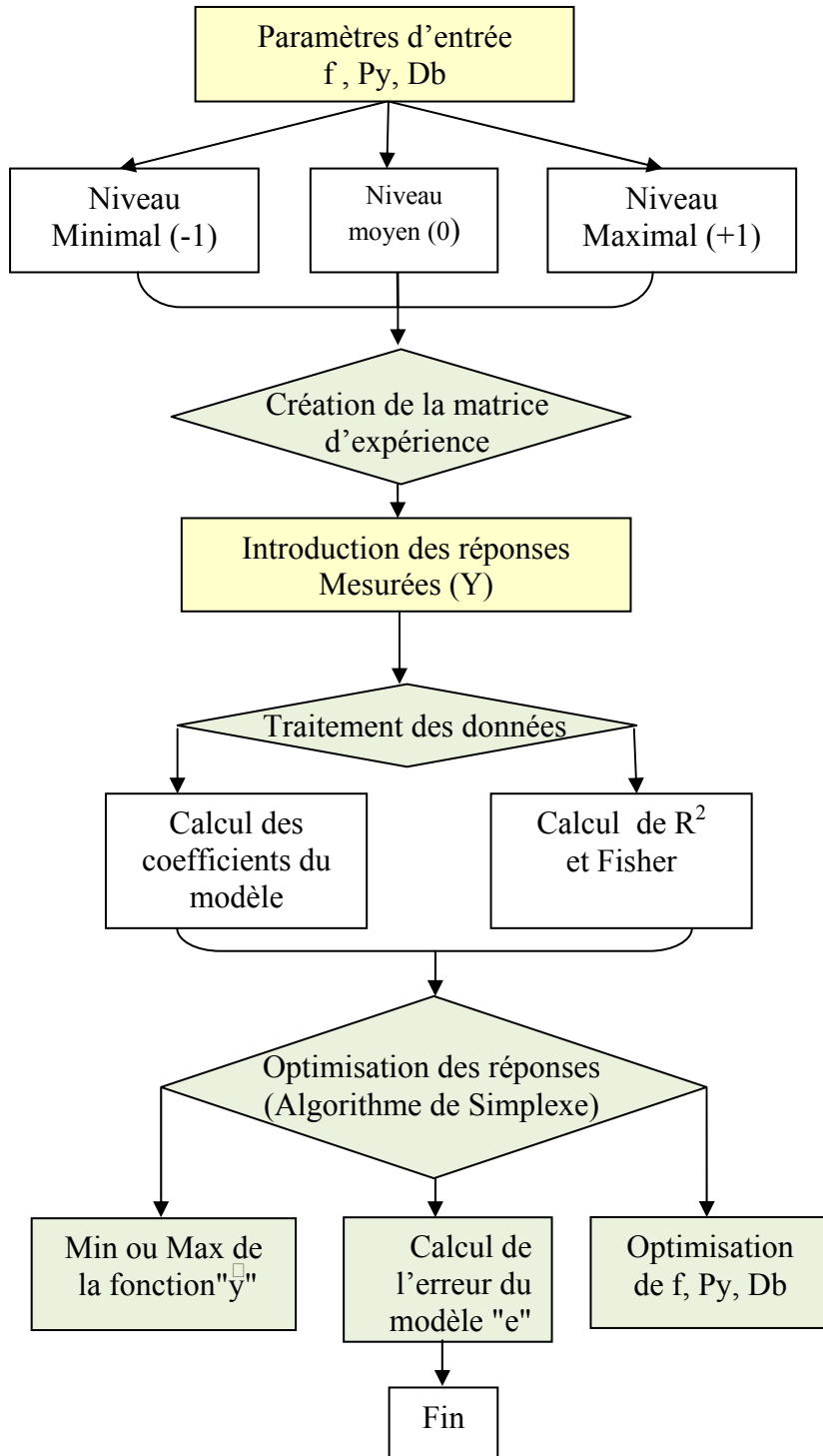


Figure II .14 Organigramme de calcul [68]

## II. 4 Mesure de rugosité

### II. 4.1 Mesure 2D (profil)

L'état de surface des échantillons pré-usinés et traités par brunissage, a été caractérisé par des mesures de rugosité au moyen d'un rugosimètre de modèle MITUTOYO SJ-301 (Figure II.15) au laboratoire de métallurgie, université Badji Mokhtar, Annaba et un profilomètre modèle LEICA DCM3D (Figure II.16) au laboratoire LEM3 à l'université de Lorraine, Metz, France.



Figure II .15 MITUTOYO SJ-301



Figure II .16 LEICA DCM3D

### II. 4.2 Mesure 3D (Surface)

Les topographies et les paramètres surfaciques des surfaces pré-usinées et traitées par brunissage ont été caractérisés au niveau de l'institut P. prime, université de Poitiers, France par un rugosimètre modèle " Taylor Hobson, Taly surf CCI" présenté sur la Figure II.17, doté d'un logiciel d'analyse de surface Montains 4.0. Cet appareil de mesure optique de la topographie des surfaces Taly surf CCI 6000 utilise le principe d'interférométrie confocale voir annexe (B), les caractéristiques des objectifs optiques sont consignés sur le tableau II.8.

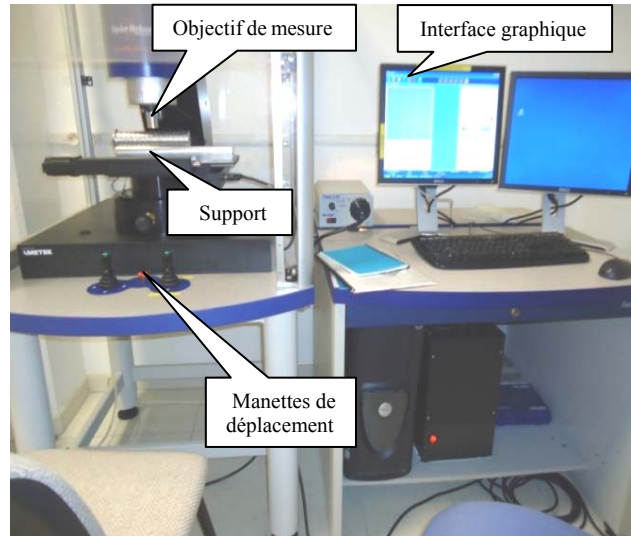


Figure II .17 Rugosimètre Taylor Hobson, Taly surf CCI

Tableau II. 8 Caractéristiques des objectifs optiques du Talysurf CCI 6000[2]

Objectif	Aire mesurée (mm <sup>2</sup> )	Pas d'échantillonnage (µm)	Distance de travail (mm)	Pente maximale (°)
5x	3,6 x 3,6	3,5	9,3	3,5
20x	0,9 x 0,9	0,88	4,7	14,5
50x	0,363 x 0,363	0,35	3,4	22,0

## II. 5 Montage des pièces

Au cours des expériences (opération de tournage, opération de brunissage), afin de garantir la rigidité du système (équation II.2), les pièces (1), (2) et (3) sont fixées dans un montage mixte (Figure II.18).

$$L^{0,75} / D \leq 2 \quad [82] \quad (II.2)$$

Pièce (1)  $L_1=230\text{mm}$ ,  $D_1= 32 \text{ mm}$   $L_1^{0,75} / D_1 = 1,84 < 2$

Pièce (2)  $L_2=189\text{mm}$   $D_2= 48\text{mm}$   $L_2^{0,75} / D_2 = 1,06 < 2$

Pièce (3)  $L_3=182\text{mm}$   $D_3= 27\text{mm}$   $L_3^{0,75} / D_3 = 1,83 < 2$

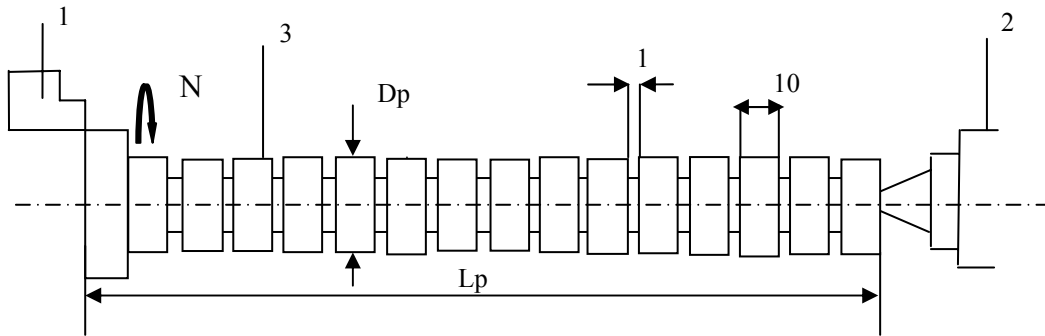


Figure II.18 Montage de la pièce 1)-mandrin 2)- contre pointe 3)- pièce

## II.6 Préparation des échantillons sur tour

L'opération de brunissage nécessite une bonne préparation des surfaces afin d'obtenir les résultats souhaités. Une première pièce (1) a été réalisée afin de dégager le régime optimal qui sera utilisé pour préparer les pièces (2) et (3) qui vont servir à l'expérimentation. La méthodologie expérimentale adoptée tout au long de l'étude est basée sur les plans d'expériences de Box Behnken.

Lors de cette opération le régime de coupe a été choisi en fonction du matériau à usiner, de l'outil et des caractéristiques de la machine outil [82] tableau II. 9.

Tableau II.9 Régime de coupe

Profondeur de passe a (mm)	Avance f (mm/tr)	Vitesse de rotation N (tr/mn)
0,5 ÷ 1	0,07 ÷ 0,12	1250 ÷ 2000

Les plans de Box Behnken à trois facteurs et trois niveaux tableau II.10, prévoient une matrice d'expérience de 15 combinaisons. La pièce (1) est réalisée en 15 paliers de 10 mm de largeur, séparés par des gorges de 2mm x 3 mm (Figure II.19). Les régimes appliqués sur chaque palier sont présentés dans le tableau II.11.

Tableau II.10 Facteurs codés en tournage

Facteurs	Paramètres	Niveaux		
		-1	0	+1
X <sub>1</sub>	N (tr/mn)	1250	1600	2000
X <sub>2</sub>	f (mm/tr)	0,07	0,097	0,12
X <sub>3</sub>	a (mm)	0,5	0,75	1

Tableau II. 11: Matrice d'expériences en tournage

N° d'essai	Paramètres d'entrée		
	N (tr /min)	f (mm /tr)	a (mm)
1	1250	0.07	0.75
2	2000	0.07	0.75
3	1250	0.12	0.75
4	2000	0.12	0.75
5	1250	0.097	0.5
6	1250	0.097	1
7	2000	0.097	0.5
8	2000	0.097	1
9	1600	0.07	0.5
10	1600	0.12	0.5
11	1600	0.07	1
12	1600	0.12	1
13	1600	0.097	0.75
14	1600	0.097	0.75
15	1600	0.097	0.75

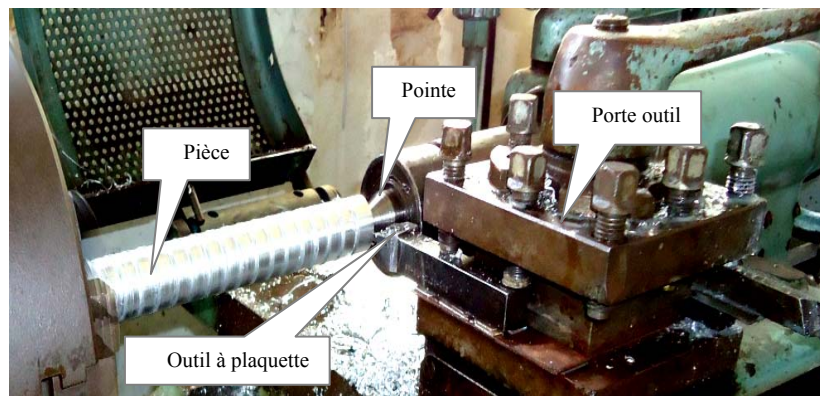


Figure II.19 Préparation sur tour de la pièce (1)

Le régime optimal retenu pour préparer les pièces (2) et (3) est :

$N = 1250 \text{ tr/min}$  ;  $f=0,11 \text{ mm/trs}$  ;  $a=1 \text{ mm}$ .

Remarque : la fréquence de rotation adoptée pour la pièce (3) est  $N=1400 \text{ tr/min}$ , afin de préserver la même vitesse de coupe.



## II. 7 Traitement par brunissage

### II. 7.1 Traitement de la pièce (2)

On procède au traitement par brunissage conformément aux plans d'expériences de Box, le régime adopté est choisi en fonction du matériau et des caractéristiques de la machine outil tableau II.12. L'opération a été réalisée selon les régimes indiqués sur le tableau II.13 avec une fréquence de rotation de la pièce " $n=224\text{tr/mn}$ ", en une seule passe sous une lubrification abondante au moyen d'une émulsion d'huile SAE20 [87].

Tableau II.12 Facteurs codés en brunissage

Facteurs	Paramètres	Niveaux		
		-1	0	+1
X <sub>1</sub>	f (mm/tr)	0.065	0.148	0.22
X <sub>2</sub>	Py (N)	50	120	200
X <sub>3</sub>	D <sub>b</sub> (mm)	7	10	13.5

Tableau II.13 Matrice d'expériences en brunissage

N° d'essai	Paramètres d'entrées		
	f (mm/tr)	Py (N)	D <sub>b</sub> (mm)
1	0.065	50	10
2	0.22	50	10
3	0.065	200	10
4	0.22	200	10
5	0.065	120	7
6	0.065	120	13.5
7	0.22	120	7
8	0.22	120	13.5
9	0.148	50	7
10	0.148	200	7
11	0.148	50	13.5
12	0.148	200	13.5
13	0.148	120	10
14	0.148	120	10
15	0.148	120	10

La déformation plastique des couches superficielles de la pièce est le résultat de l'action de la bille avec une force de pression "Py" combinée à une avance longitudinale "f" illustré sur la Figure II.20.

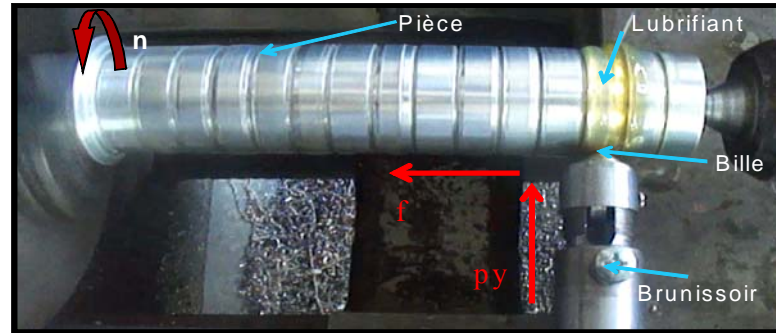


Figure II.20 Traitement par brunissage de la pièce (2)

### II. 7.2 Traitement de la pièce 3

Pour évaluer l'influence des paramètres du régime de traitement sur certaines caractéristiques de l'état de surface, de nouveaux essais ont été réalisés en faisant varier le nombre de passes ( $i=1\div 3$ ). L'opération s'est déroulée sous les mêmes conditions que la pièce (2) avec les régimes optimisés pour la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp" (Figure II.21).

Le régime optimal obtenu pour la rugosité "Ra"  $f = 0.065$  (mm/tr),  $Db = 13.5$  (mm)  $Py = 150$  (N) a été appliqué sur (03) paliers avec  $i = 1-3$ .

Les paramètres du régime optimal correspondant à la dimension fractale du profil "Dfp"  $f = 0.22$  (mm/tr),  $Db = 13.5$  (mm),  $P = 50$  (N) ont été exécuté sur trois paliers avec  $i = 1-3$ .

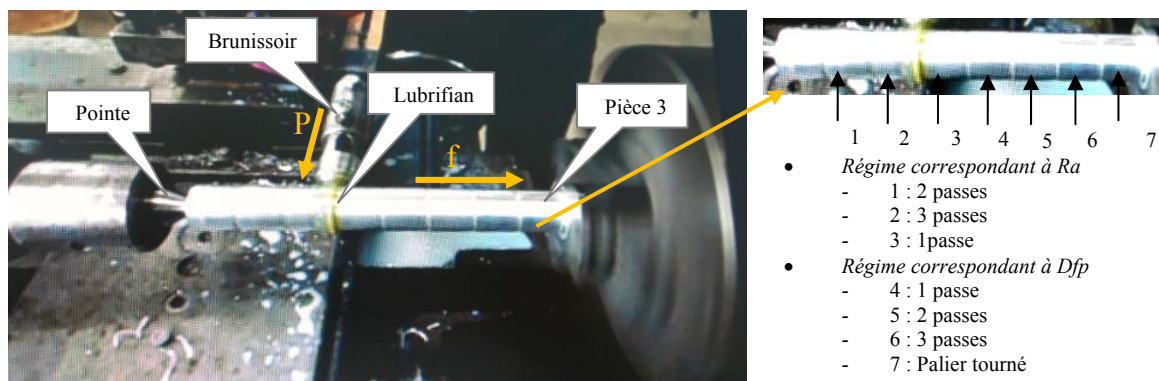


Figure II.21 Traitement par brunissage de la pièce (3)

## II.8 Conclusion

La méthodologie des plans de Box à trois facteurs a été utilisée pour ce travail expérimental pour les buts suivants :

- L'évaluation des effets des différents paramètres du régime de traitement et leurs influences sur les réponses envisagées ;
- Aboutir à des modèles mathématiques de prédiction pour les différentes réponses ;
- L'optimisation des paramètres du régime de traitement pour chaque réponse considérée ;
- La représentation graphique en 2 dimensions et 3 dimensions des effets des paramètres d'entrée du processus sur les paramètres de sortie.

Un résumé sur les différentes étapes expérimentales (matériels, opérations réalisés) a été illustré sur la figure II.22.

Tous les équipements qui ont servis durant le travail expérimental ont été exposés ainsi que le plan expérimental utilisé pour les opérations de tournage et brunissage. Les étapes de préparation des pièces (1), (2) et (3) ainsi que la réalisation de l'opération de brunissage des pièces (2) et (3), ont été présentées. Dans le chapitre suivant, les mesures de rugosité et de dureté de la couche superficielle, vont être réalisées, les résultats vont servir de réponses de sortie pour le modèle de Box. Pour chaque réponse étudiée il y'aura un modèle postulé ainsi qu'un régime de traitement optimal.

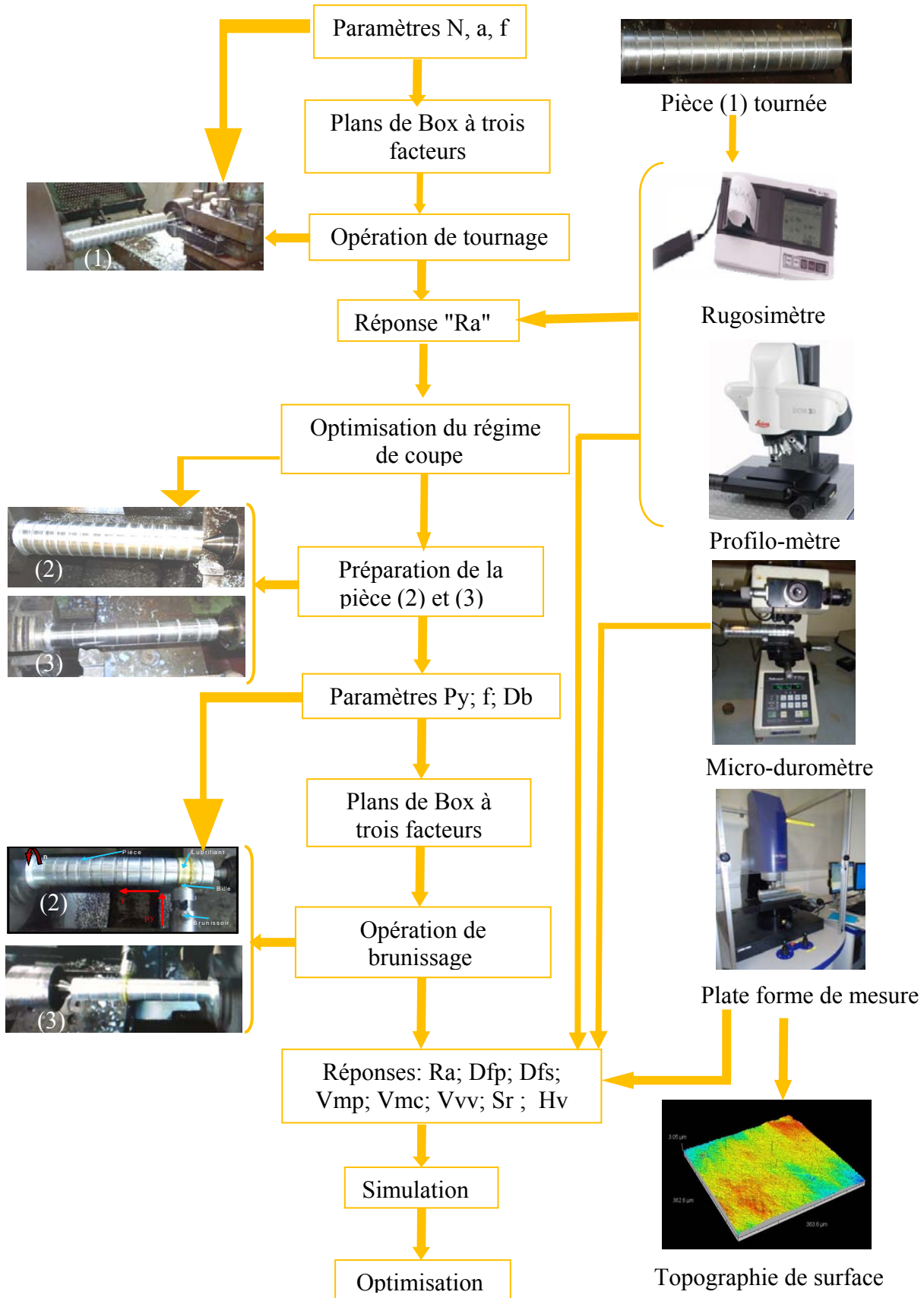


Figure II .22 Organigramme de la procédure expérimentale

## *CHAPITRE III*

---

# *MESURES ET TRAITEMENT DES RESULTATS*

## Table des matières

<b>III.1 Introduction</b> .....	62
<b>III.2 Procédure de mesure</b> .....	62
<b>III.3 Mesure et traitement des données relatifs à la pièce (1)</b> .....	63
<b>III.4 Résultats de mesures relatifs à la pièce (2) après l'opération de brunissage</b> .....	65
III.4.1 Traitement des résultats de mesure (cas 2D) .....	69
III.4.1.1 Rugosité "Ra".....	69
III.4.1.2 Dimension fractale d'un profil "Dfp".....	70
III.4.2 Traitement des résultats de mesure (cas 3D) .....	71
III.4.2.1 Dimension fractale surfacique "Dfs".....	71
III.4.2.2 Paramètres de volume.....	72
- Le volume de la matière des pics "Vmp".....	72
- Le volume de matière du cœur "Vmc" .....	74
- Le volume du vide des vallées "Vvv" .....	75
III.4.2.3 L'indicateur d'isotropie "Str".....	76
III.4.3 Traitement des résultats de mesure de la dureté superficielle "Hv".....	77
<b>III.5 Résultats des mesures relatifs à la pièce (3)</b> .....	79
III.5.1 Surface non traitée.....	79
III.5.2 Surface traitée par brunissage.....	79
III.5.2.1 Régime optimal correspondant à "Ra".....	79
III.5.2.2 Régime optimal correspondant à "Dfp".....	80
<b>III.6 Conclusion</b> .....	81

### III.1 Introduction

Actuellement les mesures surfaciques (3D) constituent un volet important et complémentaire aux mesures des profils (2D), car elles permettent d'apprécier de façon rationnelle les surfaces mécaniques (usinées, traitées par déformation plastique,...) et de faire ressortir les paramètres les plus appropriés selon la fonctionnalité de la surface. Ce chapitre est consacré, en premier lieu à la présentation des résultats de mesure des différentes réponses étudiées engendrées lors des opérations de tournage et brunissage. Ces résultats sont ensuite utilisés comme réponses de sortie dans la matrice d'expérience avec et les paramètres de régime comme facteurs d'entrée. Un programme sous Matlab [85] utilisant le modèle des plans d'expériences de Box-Behenken à trois facteurs à trois niveaux de second degré avec les interactions d'ordre deux est employé pour établir une relation entre les paramètres d'entrée et les réponses de sortie envisagées. Des modèles mathématiques de prédiction pour chaque réponse seront formulés avec les tests statistiques, où les valeurs optimales des régimes de traitement correspondant à chaque réponse étudiée ont été déterminées. En second lieu, les résultats de mesure correspondant aux régimes optimaux relatifs à la rugosité "Ra" et à la dimension fractale "Dfp" seront présentés.

### III.2 Procédure de mesure

Les pièces (1), (2) et (3) (figure III.1a) sont positionnées sur un vé (Figure III. 1b) les mesures de rugosité (2D) ont été effectuées sur six génératrices de chaque palier (figure III.2) et les mesures (3D) ont été réalisées sur trois positions. Les valeurs moyennes pour chaque paramètre étudié ont été calculées. Les mesures (2D) ont été effectuées, en prenant une longueur d'évaluation ( $L=4,0$  mm), une longueur de coupure de ( $\lambda=0,8$ ) mm et une résolution horizontale ( $d_0= 0.5$   $\mu\text{m}$ ), ainsi la dimension fractale du profil "Dfp" a été déterminée d'après les formules présentées dans l'annexe (C) où les fréquences ont pour valeurs  $\omega_l= 0.25\text{mm}^{-1}$  et  $\omega_h= 1000\text{mm}^{-1}$ .

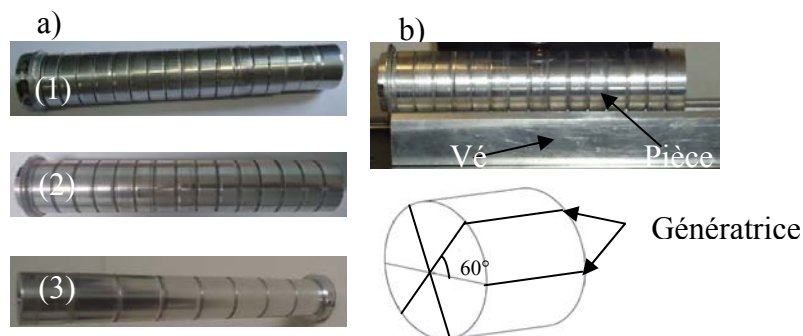


Figure III. 1 a) Pièces (1, 2, 3) b) positionnement et procédure de mesure

### III.3 Mesure et traitement des données relatifs à la pièce (1)

L'objectif de ces essais est d'optimiser les paramètres de coupe en tournage afin de préparer les surfaces des pièces (2) et (3) qui vont subir le traitement par brunissage. L'opération de tournage se déroule sous lubrification abondante. Les facteurs d'entrées du modèle correspondent à : la vitesse de rotation "N" ; l'avance "f" et la profondeur de passe "a". La rugosité "Rat" constitue la réponse de sortie (tableau III.1). Les résultats obtenus après traitement par le programme permettent de définir le régime optimal offrant la valeur minimale de la rugosité.

Tableau III.1 Résultats expérimentaux lors du tournage

N° d'essai	Paramètres d'entrée			Paramètre de sortie
	N (tr /min)	f (mm /tr)	a (mm)	Rat <sub>moy</sub> (μm)
1	1250	0.07	0.75	1,1
2	2000	0.07	0.75	1,07
3	1250	0.12	0.75	0,86
4	2000	0.12	0.75	0,87
5	1250	0.097	0.5	0,85
6	1250	0.097	1	0,89
7	2000	0.097	0.5	0,86
8	2000	0.097	1	0,88
9	1600	0.07	0.5	1,19
10	1600	0.12	0.5	0,88
11	1600	0.07	1	0,90
12	1600	0.12	1	0,79
13	1600	0.097	0.75	0,93
14	1600	0.097	0.75	1
15	1600	0.097	0.75	1,007

La figure III.2 illustre la variation de la rugosité "Rat" obtenue en tournage selon les combinaisons des régimes indiqués sur le tableau III.1, la réponse étudiée "Rat" varie dans l'intervalle suivant :

Rat min =0.79 μm correspondant au régime N=1600 tr/min, f= 0.12 mm/tr, a=1 mm

Rat max=1.19 μm correspondant au régime N=1600 tr/min, f= 0.07 mm/tr, a=0.5 mm



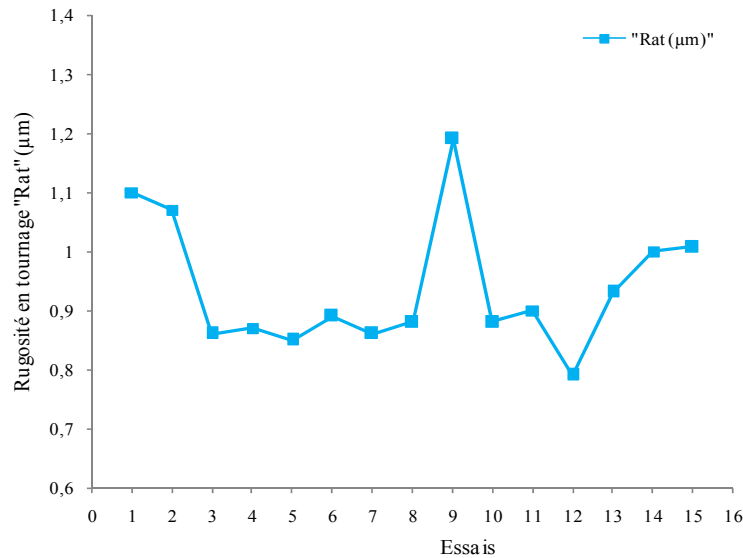


Figure III.2 Variation de la rugosité selon les combinaisons des régimes

Le modèle mathématique permettant de prédire Rat est exprimé par l'équation III.1 :

$$\hat{Rat} = 0.979 + (-0.0025)X1 + (-0.1075)X2 + (-0.04)X3 + (0.01)X1 X2 + (-0.005)X1X3 + (0.05)X2X3 + (-0.037)(X1)^2 + (0.033)(X2)^2 + (-0.072)(X3)^2 + e \quad (III.1)$$

Le coefficient de corrélation du modèle  $R^2 = 0.99$ , ce qui confirme que le modèle explique bien les résultats. Le critère de Fisher calculé est  $F_{cal} = 4.467$  inférieur à  $F_{théo} = 19.2$  [88] (Annexe D) ce qui indique que le modèle est bien ajusté.

L'analyse des résidus est illustrée sur la Figure III.3, elle montre une répartition au hasard, ce qui affirme que le modèle établi explique bien les résultats expérimentaux.

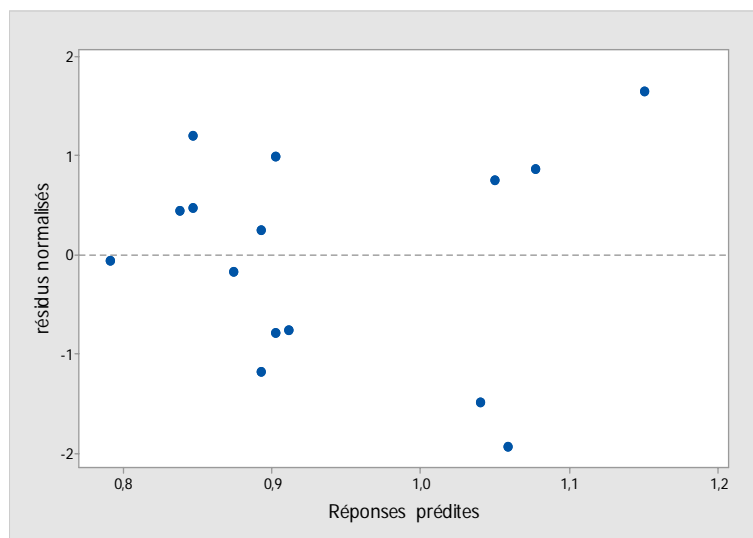


Figure III.3 Courbes d'analyse des résidus

Les courbes des valeurs expérimentales et prédites de la rugosité Rat figure III.4 montrent qu'elles ont la même allure.

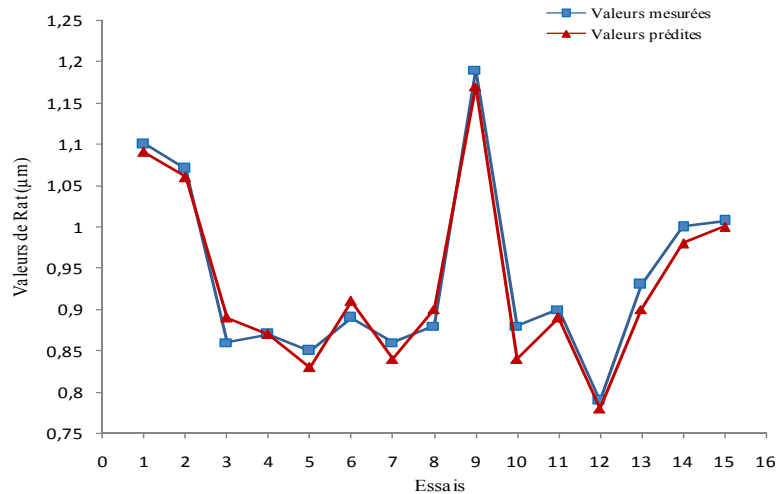


Figure III.4 comparaison entre les rugosités prédites et expérimentales "Rat" en tournage

Le régime optimal offrant une rugosité minimale de  $Ra = 0.803 \pm 0.08 \mu\text{m}$  est  $N = 1250 \text{ tr/min}$ ,  $f = 0.11 \text{ mm/tr}$ ,  $a = 1 \text{ mm}$ . Ce dernier est employé comme évoqué au §II.6 pour la préparation des pièces (2) et (3).

### III.4 Résultats de mesures relatifs à la pièce (2) après l'opération de brunissage

Le procédé de brunissage comme montré dans le §II.7 est une opération de finition par déformation plastique qui consiste à appliquer une charge sur les couches superficielles, ayant pour résultat des modifications micro-géométrique et structurale au niveau de la surface. Les paramètres étudiés des surfaces traitées sont : la rugosité "Ra"; la dimension fractale du profil "Dfp", la dimension fractale de la surface "Dfs" ; les paramètres de volumes ("Vmp", "Vmc", "Vvv"), l'indicateur d'isotropie "Str" et la micro-dureté "Hv". L'effet des facteurs d'entrées ( $f$ ,  $P_y$ ,  $D_b$ ) sur les réponses étudiées a été établi par des modèles mathématiques.

Les résultats de mesure 2D de la rugosité "Ra", les valeurs de la dimension fractale du profil "Dfp" ainsi que les mesures de la micro-dureté "Hv", sont consignés respectivement sur le tableau III.2 pour les 15 essais. Il a été observé que la valeur minimale de "Ra" a été enregistrée lors de l'essai N° 6 et la valeur maximale lors de l'essai N° 10 (Figure III.5).

La dimension fractale du profil atteint son minimum lors de l'essai N° 1 et N° 12 alors que son maximum est approché lors de l'expérience N° 10 (Figure III.5). Par ailleurs la microdureté converge vers la valeur maximum pendant l'essai N° 11, or son minimum est obtenu pour l'expérience N° 1 (Figure III.6).

Tableau III.2 Valeurs moyennes de "Ra", "Rq", "Dfp" et "Hv" pour différents régimes

N° D'essai	Paramètres d'entrées			Paramètres de sortie			
	f (mm/trs)	Py (N)	Db (mm)	Ra <sub>moy</sub> (μm)	Rq <sub>moy</sub> (μm)	Dfp <sub>moy</sub>	Hv <sub>moy</sub>
1	0.065	50	10	0.6	0.54	1.10	45.2
2	0.22	50	10	0.71	0.78	1.11	48.5
3	0.065	200	10	1.0	0.55	1.45	45.2
4	0.22	200	10	1.22	0.98	1.49	46.5
5	0.065	120	7	1.35	1.75	1.45	42.9
6	0.065	120	13.5	0.48	1.91	1.15	43.4
7	0.22	120	7	1.25	0.89	1.31	44.3
8	0.22	120	13.5	0.71	2.89	1.12	46.9
9	0.148	50	7	0.52	0.67	1.13	49
10	0.148	200	7	2.12	1.15	1.64	44.5
11	0.148	50	13.5	0.85	1.10	1.22	50
12	0.148	200	13.5	0.58	1.39	1.10	42.3
13	0.148	120	10	0.76	0.70	1.44	45.7
14	0.148	120	10	0.81	0.86	1.26	43.8
15	0.148	120	10	0.90	1.31	1.43	44.8

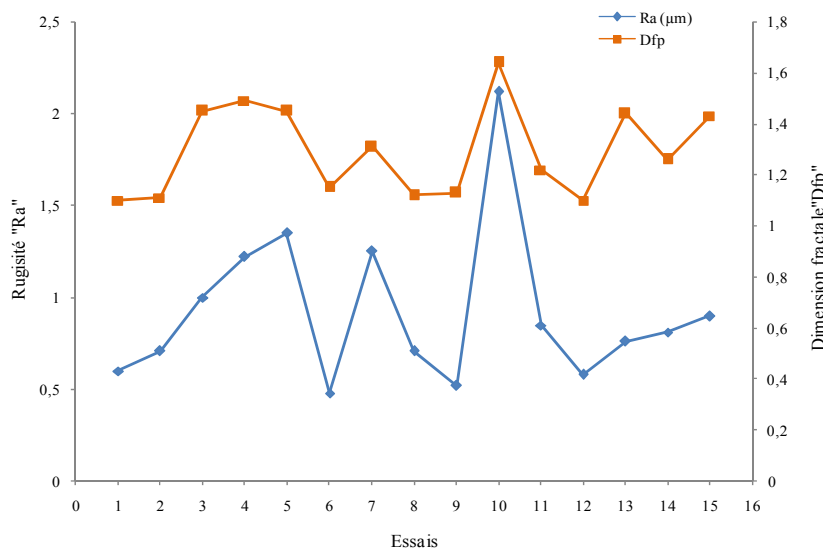


Figure III. 5 Effet des paramètres du régime de traitement sur la rugosité "Ra" et la dimension fractale du profil "Dfp"

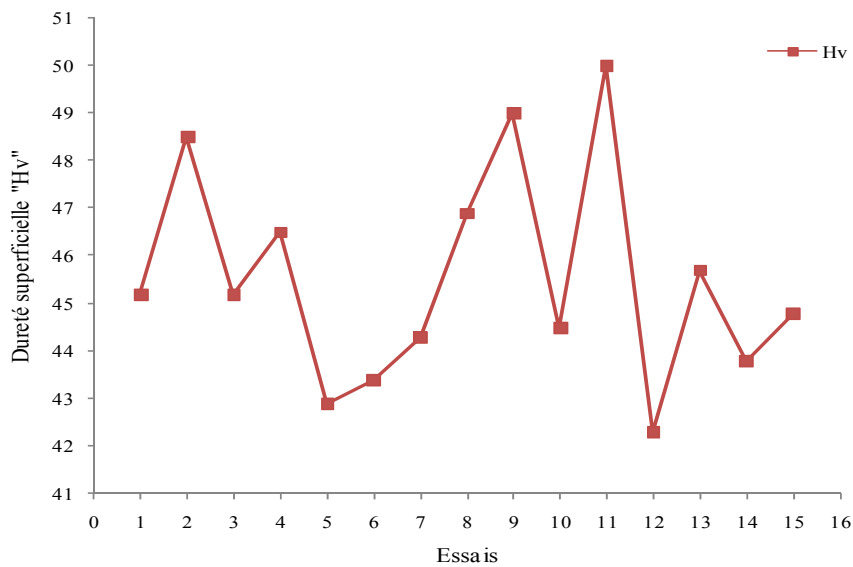


Figure III. 6 Effet des paramètres du régime de traitement sur la dureté superficielle "Hv"

Les mesures surfaciques (3D) effectuées sur les 15 surfaces traitées sont enregistrées sur le tableau III.3. L'influence du régime de traitement (f, Py, Db) sur les paramètres surfaciques étudiés (Dfs, Str, Vmp, Vmc, Vvv) est illustrée sur les figures III. 7 et 8.

Tableau III.3 Résultats de mesure 3D pour différents régimes

N° D'essai	Paramètres d'entrée			Paramètres de sortie				
	f (mm/tr)	Py (N)	Db (mm)	Dfs <sub>moy</sub>	Str <sub>moy</sub>	Vmp <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )	Vmc <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )	Vvv <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )
1	0.065	50	10	2.37	0.3812	0.0226	0.637	0.0835
2	0.22	50	10	2.20	0.2939	0.0392	0.7391	0.0744
3	0.065	200	10	2.45	0.3981	0.0613	1.5855	0.2193
4	0.22	200	10	2.59	0.2017	0.0932	1.561	0.1860
5	0.065	120	7	2.49	0.3168	0.0718	1.643	0.1407
6	0.065	120	13.5	2.42	0.4383	0.0185	0.473	0.0588
7	0.22	120	7	2.44	0.2906	0.0657	1.455	0.0918
8	0.22	12	13.5	2.35	0.2869	0.0226	1.248	0.0948
9	0.148	50	7	2.33	0.3016	0.0127	0.787	0.1373
10	0.148	200	7	2.51	0.2769	0.0313	2.721	0.3200
11	0.148	50	13.5	2.44	0.3866	0.013	0.486	0.0736
12	0.148	200	13.5	2.53	0.3365	0.0228	0.846	0.1181
13	0.148	120	10	2.32	0.2647	0.0586	0.789	0.1332
14	0.148	120	10	2.11	0.2733	0.0451	0.814	0.1005
15	0.148	120	10	2.29	0.2158	0.0602	2.036	0.1364

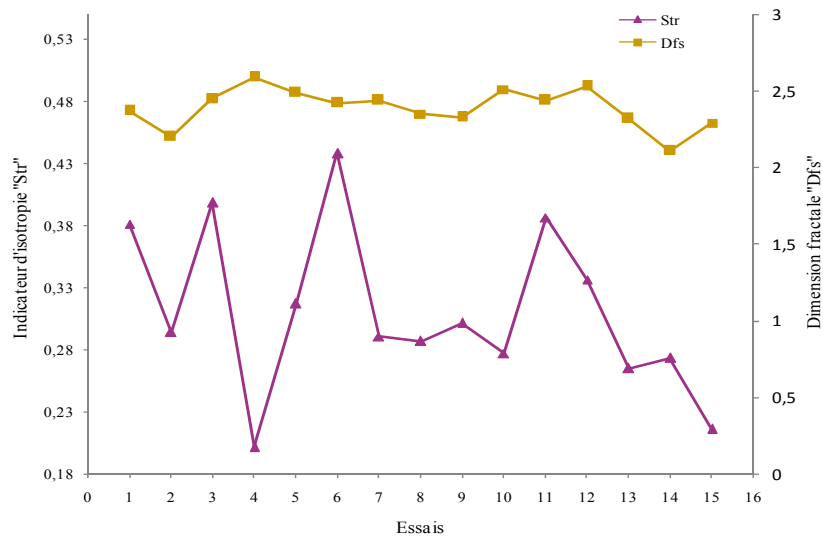


Figure III. 7 Effet des paramètres du régime de traitement sur la dimension fractale de la surface "Dfs" et l'indicateur d'isotropie "Str"

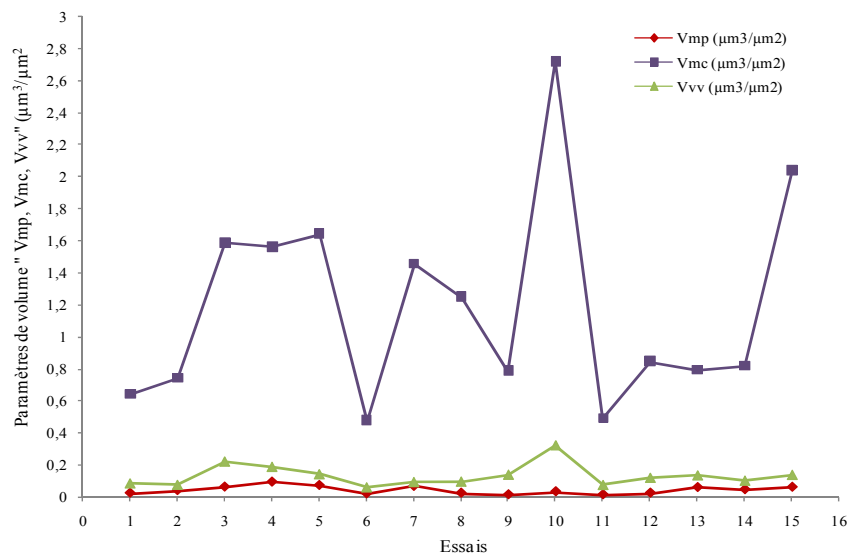


Figure III. 8 Effet des paramètres du régime de traitement sur :  
 -Volume de la matière des pics "Vmp",  
 -Volume de la matière du cœur "Vmc",  
 -Volume du vide des vallées "Vvv"

### III.4.1 Traitement des résultats (cas 2D)

L'introduction des réponses mesurées de la rugosité "Ra" ainsi que des valeurs calculées de la dimension fractale de profil "Dfp" (tableau III.2) dans le programme de calcul figure II.14 (voir §II.3) ont permis l'élaboration des modèles mathématiques en fonction des trois paramètres considérés du régime de traitement (f, Py, Db).

#### III.4.1.1 Rugosité "Ra"

L'interaction des paramètres du régime du traitement codés (X1, X2, X3) avec la rugosité "Ra" s'exprime par l'équation (III.2) :

$$\hat{Ra} = 0.82 + (0.0575)X_1 + (0.28)X_2 + (-0.43)X_3 + (0.0275)X_1X_2 + (0.825)X_1X_3 + (-0.3025)X_2X_3 + (-0.0054)(X_1)^2 + (0.0646)(X_2)^2 + (0.1296)(X_3)^2 + e \quad (III.2)$$

Ce modèle est obtenu avec les coefficients de corrélation  $R^2$  est de 0.99,  $R^2$  (adj)= 0.98 et  $R^2$  (préd)=0.98, ce qui explique bien le modèle [86]. Le test de Fisher  $F_{cal} = 3.54$  est inférieur  $F_{théo} = 19.2$  [88] voir annexe (D), ce qui montre que le modèle est bien ajusté. Par ailleurs, la Figure III.9 montre que les résidus sont disposés au hasard donc le modèle peut être utilisé pour interpréter les résultats expérimentaux.

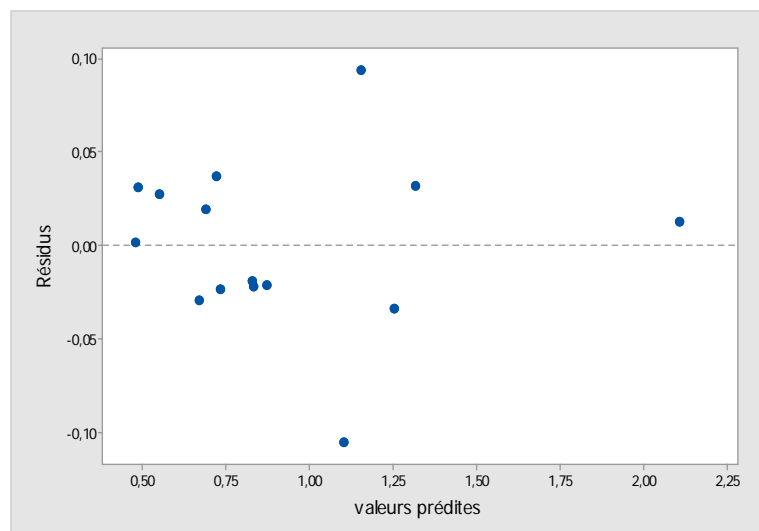


Figure III.9 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Ra"

Selon la figure III.10, on peut constater que l'évolution des valeurs prédites suit la même allure que celle des valeurs expérimentales.

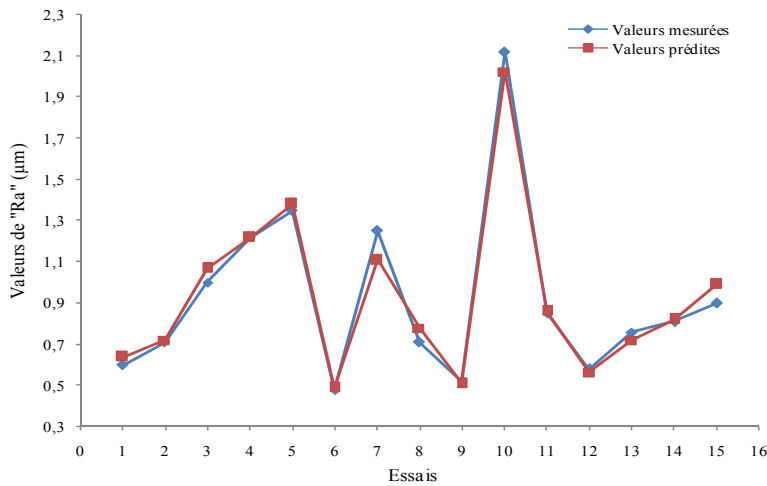


Figure III.10 Comparaison entre les réponses expérimentales et prédites de "Ra"

Le régime optimale prédit, engendrant la rugosité minimale  $Ra = 0.38 \pm 0.1 \mu\text{m}$  est :  
 $f = 0.065\text{mm/tr}$ ;  $Py = 150\text{ N}$ ;  $Db = 13.5\text{ mm}$ .

### III.4.1.2 Dimension fractale du profil "Dfp"

La valeur prédite de la dimension fractale "Dfp" est exprimée par l'équation (III.3) :

$$\hat{D}_{fp} = 1.3767 + (-0.015)X_1 + (0.14)X_2 + (-0.1175)X_3 + (0.0075)X_1X_2 + (0.0275)X_1X_3 + (-0.1575)X_2X_3 + (-0.0521)(X_1)^2 + (-0.0371)(X_2)^2 + (-0.0671)(X_3)^2 + e \quad (III.3)$$

Ce modèle est obtenu avec les coefficients de corrélation  $R^2$  est de 0.99,  $R^2(\text{adj}) = 0.99$  et  $R^2(\text{préd}) = 0.99$ , ce qui signifie que le modèle est bien interpréter [86].

Le test de Fisher  $F_{\text{cal}} = 0.674$  est inférieur  $F_{\text{théo}} = 19.2$  [88] ce qui montre que le modèle est bien ajusté. Par ailleurs, la figure III.11 montre que les résidus sont disposés au hasard, d'où le modèle obtenu peut être adopté pour l'interprétation des résultats expérimentaux [86].

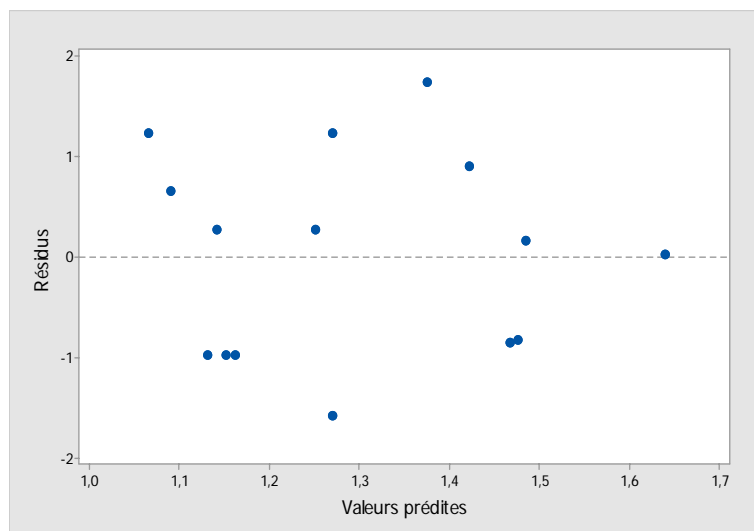


Figure III.11 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Dfp"

Les courbes des valeurs expérimentales et prédites de la dimension fractale (Figure III.12) montrent de manière générale qu'elles ont la même tendance.

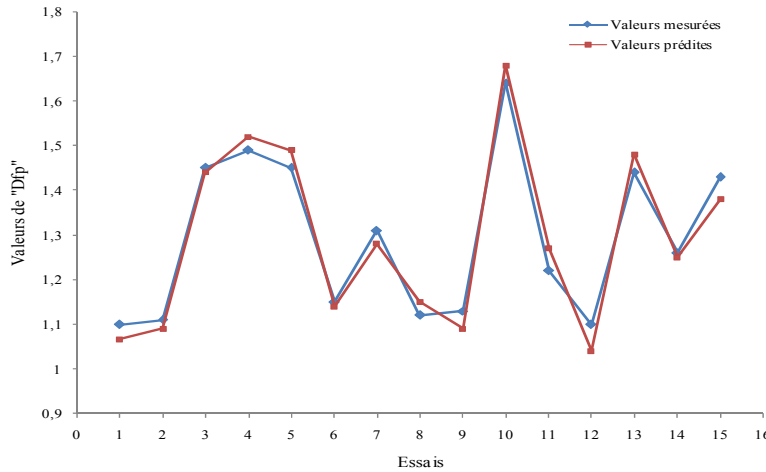


Figure III.12 Comparaison entre les réponses expérimentales et prédites de "Dfp"

Il en résulte une solution optimale de l'équation (III.3) caractérisée par une dimension fractale minimale  $D_{fp} = 1.12 \pm 0.10$  avec un régime  $f = 0.22 \text{ mm/tr}$  ;  $P_y = 50 \text{ N}$  ;  $D_b = 13.5 \text{ mm}$ .

### III.4.2 Traitement des résultats de mesure (cas 3D)

#### III.4.2.1 dimension fractale surfacique "Dfs"

L'équation (III.4) représentant le modèle de prédiction de la dimension fractale "Dfs" en fonction des paramètres d'entrée ( $f$ ,  $P_y$ ,  $D_b$ ), est donnée par l'expression :

$$\hat{D}_{fs} = 2.2633 + (-0.0188)X_1 + (0.055)X_2 + (0.0263)X_3 + (0.0775)X_1X_2 + (-0.005)X_1X_3 + (-0.0225)X_2X_3 + (0.0858)(X_1)^2 + (0.0533)(X_2)^2 + (0.0758)(X_3)^2 + e \quad (III.4)$$

Les tests statistiques effectués révèlent un coefficient de corrélation  $R^2$  égale à 0.99, un  $R^2$  (adj) qui équivaut à 0.98 et un  $R^2$  (préd) égale à 0.98, ce qui explique bien le modèle. Le test de Fisher  $F_{cal} = 0.63$  inférieur à  $F_{théo} = 19.2$  [88] confirme le bon ajustement du modèle.

La figure III.13, montre qu'ils sont répartis au hasard (Figure III.13), d'où le modèle établi explique bien les résultats expérimentaux.



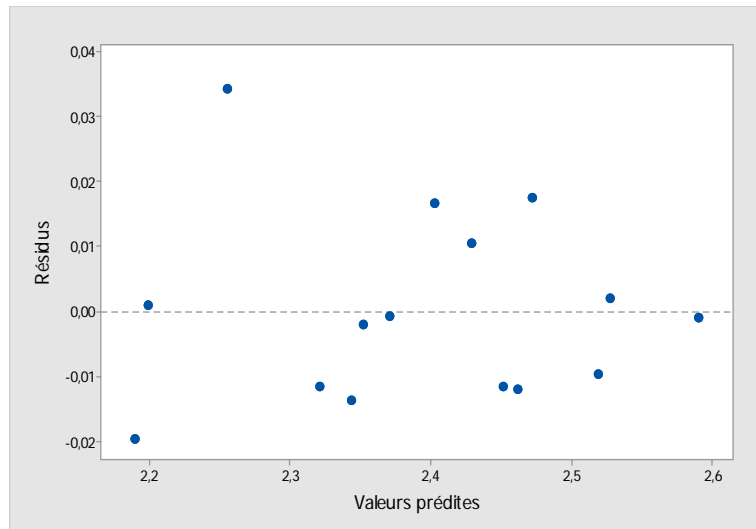


Figure III.13 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de " Dfs"

Selon la figure III. 14, on peut constater que la courbe des valeurs prédites suit la même allure que celle des valeurs expérimentales.

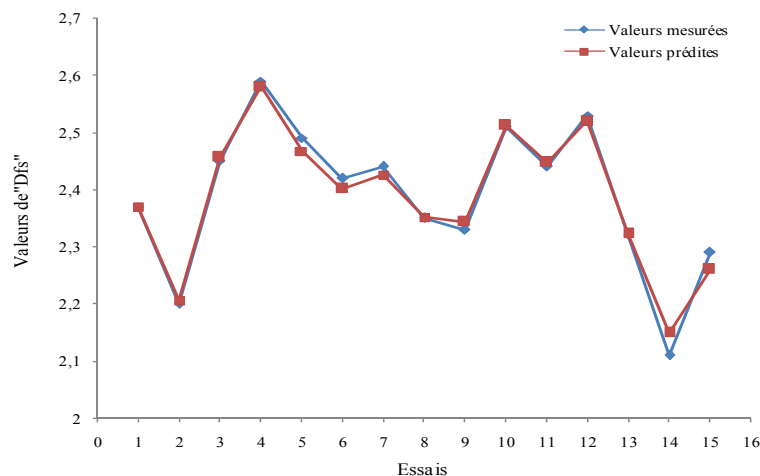


Figure III.14 Comparaison entre les réponses expérimentales et prédites de " Dfs"

La résolution de l'équation (III.4) aboutis à une solution minimale "Dfs", caractérisée par :  $Dfs=2.23\pm 0.069$  pour un régime de traitement équivalent à  $f=0.181$  mm/trs,  $P_y=59.89N$  et  $D_b=10.44mm$ .

### III.4.2.2 Paramètres de volume

#### - Le volume de la matière des pics "Vmp"

L'équation (III.5) illustre la relation entre les paramètres de traitement et "Vmp".

$$\hat{V}_{mp} = 0.0546 + (0.0058)X_1 + (0.0151)X_2 + (-0.0131)X_3 + (0.0038)X_1X_2 + (0.0026)X_1X_3 + (-0.0022)X_2X_3 + (0.0121)(X_1)^2 + (-0.0126)(X_2)^2 + (-0.0220)(X_3)^2 + e \quad (III.5)$$

Les tests statistiques effectués révèlent un coefficient de corrélation  $R^2$  égale à 0.94, un  $R^2$  (adj) qui équivaut à 0.94 et  $R^2$  (préd) égale à 0.93, sont relativement faibles aux résultats précédents, néanmoins le test de Fisher  $F_{cal} = 8.75$  inférieur à  $F_{théo} = 19.2$  [88] confirme le bon ajustement du modèle.

La figure III.15 montre que la répartition des résidus en fonction des réponses prédites ne présente pas une tendance particulière, donc le modèle peut être adopté.

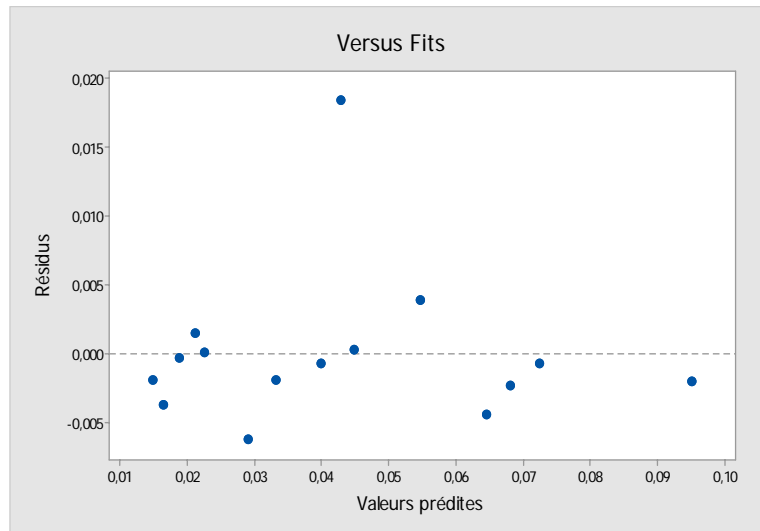


Figure III.15 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Vmp"

La figure III. 16 dévoile que la courbe des valeurs prédites suit la même tendance que celle des valeurs expérimentales à l'exception de quelques points de l'essai où il y a des faibles divergences.

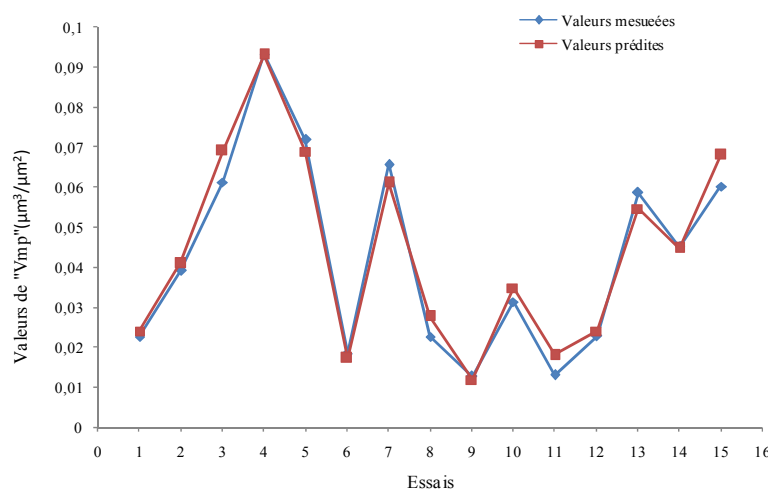


Figure III.16 Comparaison entre les réponses expérimentales et prédites de "Vmp"

La résolution de cette équation (III.5) a abouti à un volume minimal des pics  $V_{mp} = -0.00648 \pm 0.017$  ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) correspondant au régime de traitement :  $f = 0.127\text{mm/tr}$ ,  $P_y = 50\text{N}$  et  $D_b = 13.5\text{mm}$ .

**- Le volume de matière du cœur "Vmc"**

L'équation (III.6) du modèle mathématique reliant le paramètre "Vmc" avec les paramètres du régime ( $f$ ,  $P_y$  et  $D_b$ ), est donnée par l'expression :

$$\hat{V}_{mc} = 1.213 + (0.0831)X_1 + (0.508)X_2 + (0.4441)X_3 + (0.0315)X_1X_2 + (0.2407)X_1X_3 + (-0.3935)X_2X_3 + (-0.0439)(X_1)^2 + (-0.0386)(X_2)^2 + (0.0356)(X_3)^2 + e \quad (III.6)$$

Les valeurs des coefficients de corrélation  $R^2 = 0.95$ ,  $R^2(\text{adj}) = 0.94$  et  $R^2(\text{préd}) = 0.93$  sont réduites, le test de Fisher confirme le bon ajustement du modèle au vu de  $F_{\text{cal}} = 0.096$  qui est nettement inférieur  $F_{\text{théo}} = 19.2$  [88]. La distribution des résidus par rapport aux réponses prédites est présentée sur la Figure III. 17, où on observe une dispersion hasardeuse, ce qui explique que les résultats expérimentaux sont bien représentés par le modèle [86].

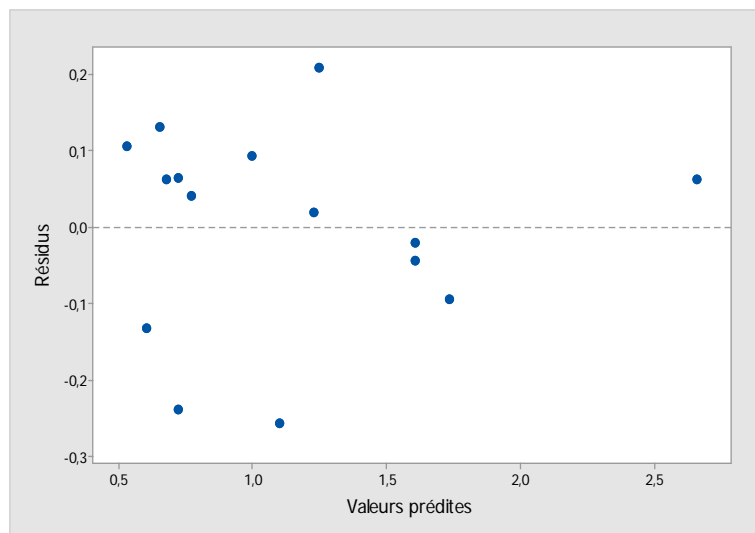


Figure III.17 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Vmc"

La courbe des valeurs prédites de "Vmc" suit la même allure que celle des valeurs expérimentales, ce qui est illustré sur la figure III.18.

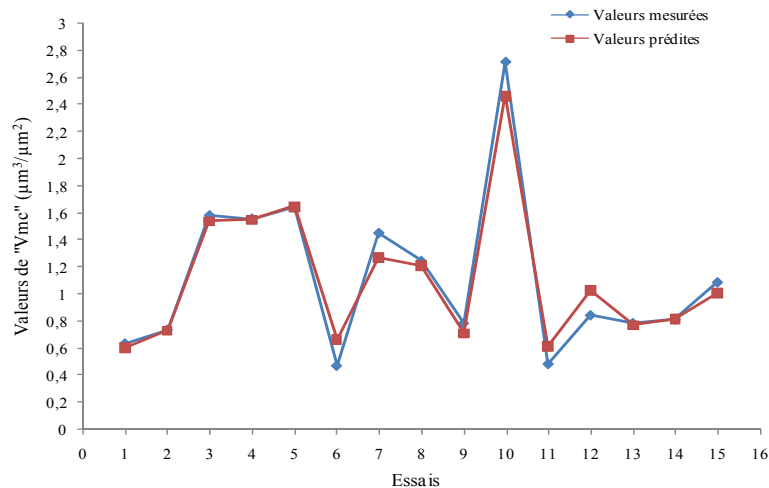


Figure III.18 Comparaison entre les réponses expérimentales et prédites de "Vmc"

La valeur du volume maximale "Vmc" correspond est  $V_{mc}=2.70\pm 0.57$  ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) et est obtenu par le régime de traitement :  $f=0.065\text{mm/tr}$ ,  $P_y=200\text{N}$  et  $D_b=7\text{mm}$ .

- le volume du vide des vallées "V<sub>vv</sub>"

Le modèle représentant la réponse prédite du volume du vide des vallées "V<sub>vv</sub>" est concrétisé par le modèle mathématique présenté par l'équation (III.7).

$$\hat{V}_{vv} = 0.1234 + (0.0069)X_1 + (0.0593)X_2 + (0.0431)X_3 + (0.0060)X_1X_2 + (0.0212)X_1X_3 + (-0.0345)X_2X_3 + (0.0242)(X_1)^2 + (0.0416)(X_2)^2 + (0.0027)(X_3)^2 + e \quad (\text{III.7})$$

Le modèle est vérifié avec les coefficients de corrélation  $R^2$  est égale à 0.98,  $R^2(\text{adj})$  équivaut à 0.98 et  $R^2(\text{préd})=0.97$ . D'après le test de Fisher  $F_{\text{cal}} = 3.74$  est inférieur  $F_{\text{théo}}=19.2$  [88], ce qui montre que le modèle est bien ajusté. Les résidus sont répartis sans tendance particulière (Figure III.19), ce qui assure que le modèle explique parfaitement les résultats expérimentaux.

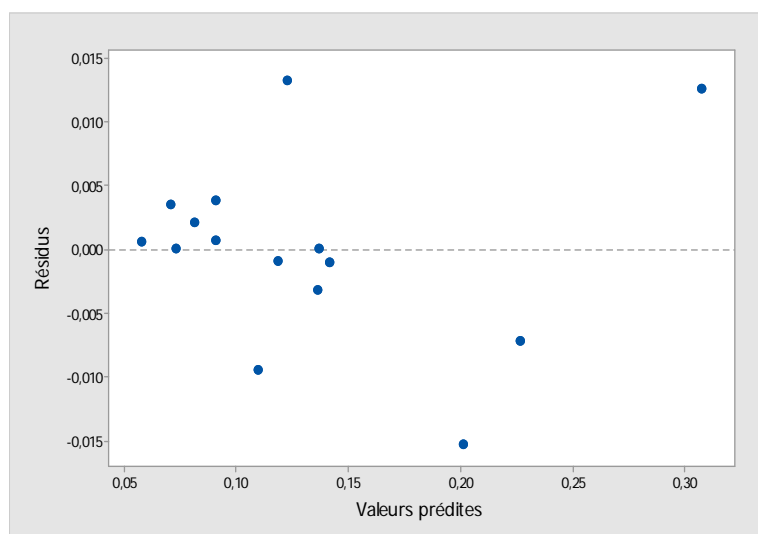


Figure III.19 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "V<sub>vv</sub>"

Selon la figure III.20, on peut remarquer que la courbe des valeurs prédites coïncide avec celle des valeurs expérimentales

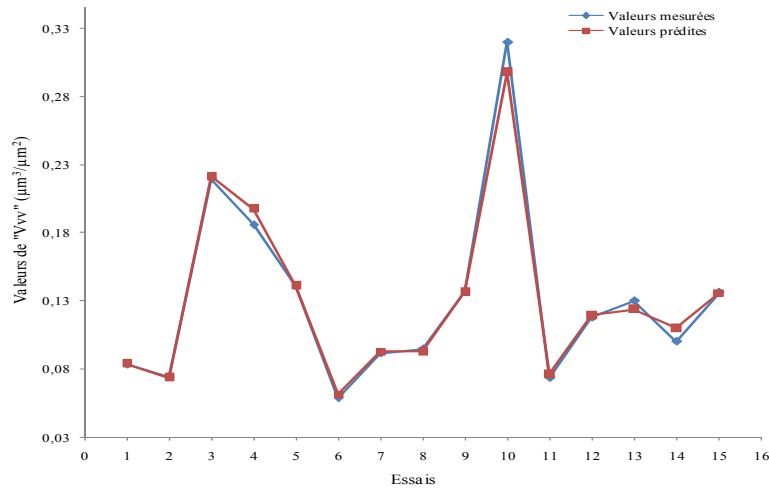


Figure III.20 Comparaison entre les réponses expérimentales et prédites de " Vvv"

La valeur maximale du volume du vide des vallées "Vvv" correspond à  $V_{vv}=0.314\pm 0.032$  ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ), obtenue par le régime de traitement :  $f= 0.087\text{mm/tr}$ ,  $P_y=200\text{N}$  et  $D_b=7\text{mm}$ .

#### III.4.2.3 L'indicateur d'isotropie " Str"

Le rapport d'aspect de texture " Str" ou indicateur d'isotropie de la surface a une grande importance afin d'observer l'influence du procédé sur la texture de la surface, le modèle mettant en évidence la relation entre les paramètres du régime de traitement ( $f$ ,  $P_y$ ,  $D_b$ ) et "Str" est illustré par l'équation (III.8).

$$\hat{Str} = 0.2513 + (-0.0577)X_1 + (-0.0188)X_2 + (0.0328)X_3 + (-0.0273)X_1X_2 + (-0.0313)X_1X_3 + (-0.0063)X_2X_3 + (0.0376)(X_1)^2 + (0.0298)(X_2)^2 + (0.0443)(X_3)^2 + e \quad (III.8)$$

La qualité de ce modèle est évaluée avec les coefficients de corrélation du modèle  $R^2= 0.99$   $R^2$  (adj)= 0.99 et  $R^2$  (préd) =0.99, le test de Fisher  $F_{cal} = 0.51$  qui est inférieur  $F_{théo}=19.2$  [88]. Par ailleurs, la courbe de répartition des résidus en fonction des réponses prédites (Figure III. 21) montre que ces résidus sont répartis au hasard.

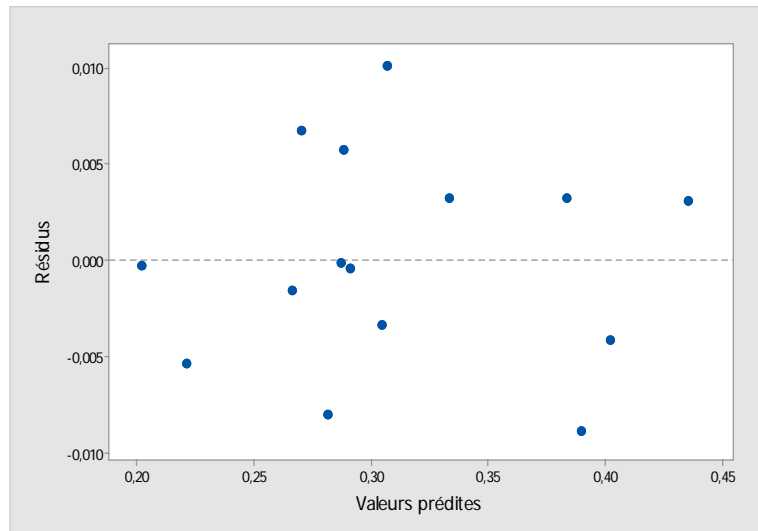


Figure III.21 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Str"

Suivant la figure III.22 la courbe des valeurs prédites suit le même aspect que celle des valeurs expérimentales avec de très faibles divergences.

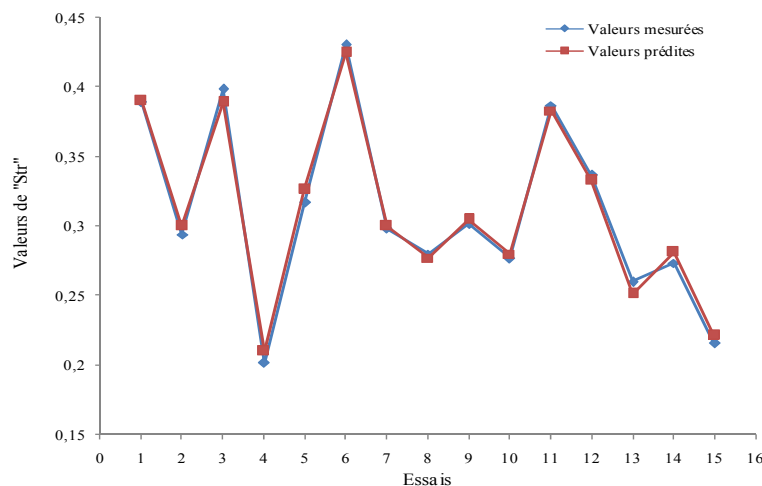


Figure III.22 Comparaison entre les réponses expérimentales et prédites de "Str"

Le modèle établi explique convenablement les résultats expérimentaux. La valeur maximale de l'indicateur d'isotropie est  $Str = 0.482 \pm 0.030$  est obtenue sous le régime de traitement optimal :  $f = 0.065 \text{ mm/tr}$  ;  $P_y = 50 \text{ N}$  ;  $Db = 13.5 \text{ mm}$ .

### III.4.3 Traitement des résultats de mesure de la dureté superficielle "Hv"

La dureté de la couche superficielle des pièces est un paramètre qui joue un rôle important dans la durée de vie et la résistance à l'usure et aux frottements. L'application du brunissage qui en agissant par DPS a pour effet de provoquer un écrouissage de la surface traitée.

L'influence des paramètres du régime de traitement (f, Py, Db) sur la dureté superficielle "Hv" est exprimé par l'équation III.9.

$$\hat{H}_v = 44.77 + (1.19)X_1 + (1.78)X_2 + (0.013)X_3 + (0.5)X_1X_2 + (0.53)X_1X_3 + (0.3)X_2X_3 + (0.25)(X_1)^2 + (1.8292)(X_2)^2 + (0.15)(X_3)^2 + e \quad (III.9)$$

Le modèle est apprécié par les coefficients de corrélation du modèle  $R^2 = 0.99$ ,  $R^2(\text{adj}) = 0.98$  et  $R^2(\text{préd}) = 0.98$  [86]. Le test de Fisher reflète le bon ajustement du modèle où  $F_{\text{cal}} = 6.63$  est inférieur  $F_{\text{théo}} = 19.2$  [88]. Le diagramme des résidus (Figure III.23) indique que leur dispersion ne présente pas une allure particulière, donc les réponses expérimentales peuvent être interprétées par ce modèle.

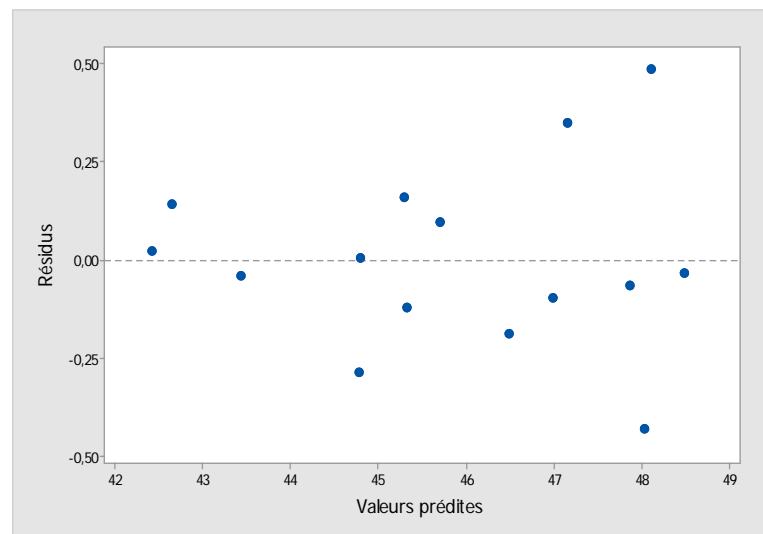


Figure III.23 Diagramme des résidus en fonction des réponses prédites de "Hv"

La Figure III.24 montre que la courbe des valeurs prédites est en accord avec celle des valeurs expérimentales.

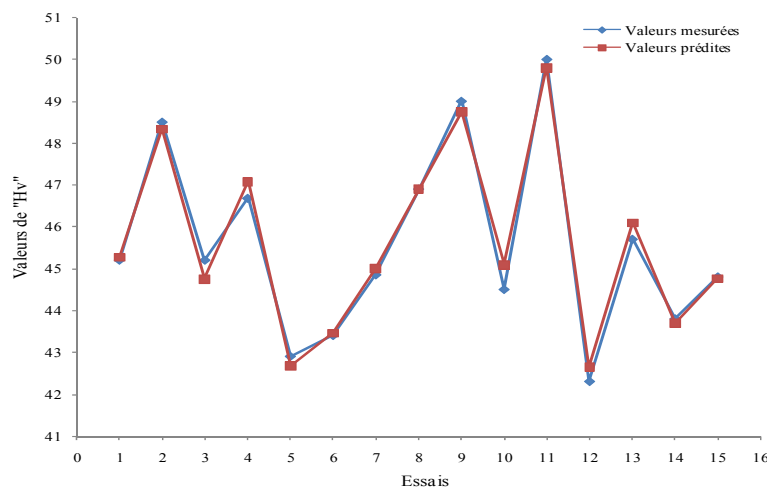


Figure III.24 Comparaison entre les réponses expérimentales et prédites de "Hv"

La valeur prédite maximale de la dureté superficielle  $Hv=50.5 \pm 2.35$  est acquise par le régime optimal:  $f=0.22\text{mm/tr}$  ;  $P=50\text{ N}$  ;  $Db=13.5\text{ mm}$ .

### III.5 Résultats de mesures relatives à la pièce (3)

#### III.5.1 Surface non traitée

Les résultats de mesure des paramètres de rugosités pour profil et surface réalisés par tournage sont consignés sur les tableaux III.4 et III.5.

Tableau III.4 Paramètres (2D) de la surface non traitée

Ra ( $\mu\text{m}$ )	Dfp	Rmr %	Rpk ( $\mu\text{m}$ )	Rk ( $\mu\text{m}$ )	Rvk ( $\mu\text{m}$ )	Hv
1.06	1.46	1	0.90	3.31	1.50	46.3

Tableau III.5 Paramètres (3D) de la surface non traitée

Str	Spk ( $\mu\text{m}$ )	Sk ( $\mu\text{m}$ )	Svk ( $\mu\text{m}$ )
0.41	2.31	5.56	0.65

#### III.5.2 Surface traitée par brunissage

##### III.5.2.1 Régime optimal correspondant à "Ra"

Après une série d'essai conduite sur différents paliers voir figure II.21 §II.7.2 au régime optimal ( $f=0.065\text{ mm/tr}$ ,  $Py=150\text{N}$ ,  $Db=13.5\text{mm}$ ), correspondant à la rugosité minimale "Ra" sous diverses passes ( $i=1, 2$  et  $3$ ) à une fréquence de rotation " $n=224\text{ tr/min}$ " [75].

Les résultats des valeurs moyennes mesurées des paramètres de rugosité de profil et de surface et de la dureté superficielle sont consignées sur les tableaux III.6 et III.7.

Tableau III.6 Paramètres enregistrés pour les mesures 2D

i (Nbre de passe)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Dfp	Rmr %	Rpk ( $\mu\text{m}$ )	Rk ( $\mu\text{m}$ )	Rvk ( $\mu\text{m}$ )	Hv
1	0.28	1.09	3	0.24	1.20	0.31	46.02
2	0.35	1.16	1	0.39	1.24	0.46	43.43
3	0.30	1.10	2	0.22	1.11	0.40	46.67



Tableau III.7 Paramètres enregistrés pour les mesures 3D

i (Nbre de passe)	Str	Spk ( $\mu\text{m}$ )	Sk ( $\mu\text{m}$ )	Svk ( $\mu\text{m}$ )
1	0.635	0.21	0.95	0.32
2	0.399	0.36	1.139	0.52
3	0.360	0.33	1.12	0.39

### III.5.2.2 Régime optimal correspondant à "Dfp"

De même, le régime optimale  $f = 0.22 \text{ mm / trs}$ ;  $P_y = 50 \text{ N}$ ;  $Db = 13.5 \text{ mm}$ , correspondant à la dimension fractale "Dfp" a été appliqué sous une, deux et trois passes à la fréquence de rotation " $n=224 \text{ tr/min}$ " [75], figure II.21§II.7.2.

Les valeurs des paramètres de rugosité profil et surface, ainsi que la dureté superficielle sont sur les tableaux III.8 et III.9.

Tableau III.8 Résultats de mesures 2 D pour les paramètres étudiés

i (Nbre de Passe)	Hv	Dfp	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rmr %	Rpk ( $\mu\text{m}$ )	Rk ( $\mu\text{m}$ )	Rvk ( $\mu\text{m}$ )
1	49.38	1.16	0.30	2.50	0.65	1.22	0.90
2	50.46	1.14	0.33	2.75	0.67	1.12	0.88
3	55.1	1.08	0.27	5.25	0.53	1.14	0.93

Tableau III.9 Résultats de mesures 3 D pour les paramètres étudiés

i (Nbre de Passe)	Str	Spk ( $\mu\text{m}$ )	Sk ( $\mu\text{m}$ )	Svk ( $\mu\text{m}$ )
1	0.4918	0.3248	1.742	0.5468
2	0.6324	0.385	1.286	0.4902
3	0.7997	0.2399	1.316	0.5513

### III.6 Conclusion

Les modèles mathématiques de prédiction des réponses formulés avec leurs différents tests (Fischer,  $R^2$  et les diagrammes des résidus) ont permis d'optimiser les régimes dans le but de minimiser la rugosité ( $R_{at}$ ,  $R_a$ ), la dimension fractale ( $D_{fp}$ ,  $D_{fs}$ ) et le volume de la matière des pics " $V_{mp}$ " et de maximiser les paramètres suivants : " $H_v$ ", " $V_{mc}$ ", " $V_{vv}$ " et " $Str$ ". D'après les résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être énoncées :

1. le régime optimal obtenu lors de l'opération de tournage offrant une rugosité minimale  $R_{at} = 0.803 \pm 0.08 \mu\text{m}$  pour un régime de coupe :  $N=1250 \text{ tr/min}$ ,  $f= 0.11 \text{ mm/tr}$  et  $a=1 \text{ mm}$  a permis de préparer les surfaces pour une finition par brunissage.
2. Lors des opérations de brunissage :
  - le modèle de prédiction de la rugosité " $R_a$ " a dégagé le régime optimal de traitement  $f= 0.065 \text{ mm/tr}$  ;  $P_y=150 \text{ N}$  ;  $D_b=13.5 \text{ mm}$ , offrant une rugosité minimale  $R_a = 0.38 \pm 0.1 \mu\text{m}$ .
  - la dimension fractale du profil  $D_{fp}$  prédite converge vers son minimum  $D_{fp}= 1.12 \pm 0.10$  pour le régime  $f= 0.22 \text{ mm /tr}$  ;  $P_y=50 \text{ N}$  ;  $D_b=13.5 \text{ mm}$ .
  - la dimension fractale surfacique " $D_{fs}$ " atteint son minimum, soit  $D_{fs}=2.23 \pm 0.069$  pour une charge faible  $P_y=59.89 \text{ N}$ , une avance  $f=0.181 \text{ mm/trs}$  et un diamètre de bille moyen  $D_b=10.44 \text{ mm}$ .
  - les modèles mathématiques correspondant aux paramètres de volume ( $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$ ) montrent que le paramètre " $V_{mp}$ " atteint son minimum, soit  $V_{mp}=-0.00648 \pm 0.017 (\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2)$  pour un régime de traitement :  $f= 0.127 \text{ mm/tr}$ ,  $P_y=50 \text{ N}$  et  $D_b=13.5 \text{ mm}$ . La tendance générale pour " $V_{mc}$ " révèle que ce paramètre atteint sa valeur maximale  $V_{mc}=2.70 \pm 0.57 (\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2)$  avec le régime de traitement :  $f= 0.065 \text{ mm/tr}$ ,  $P_y=200 \text{ N}$  et  $D_b=7 \text{ mm}$ . De manière similaire, le paramètre " $V_{vv}$ " atteint son maximum  $V_{vv}=0.314 \pm 0.032 (\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2)$ , pour un régime de traitement :  $f= 0.087 \text{ mm/tr}$ ,  $P_y=200 \text{ N}$  et  $D_b=7 \text{ mm}$ .
  - le paramètre de texture ou indicateur d'isotropie " $Str$ " parvient à son maximum  $Str= 0.482 \pm 0.030$  avec le régime de traitement optimal :  $f= 0.065 \text{ mm /tr}$  ;  $P_y=50 \text{ N}$  ;  $D_b=13.5 \text{ mm}$ .
  - la dureté superficielle prédite acquière une valeur maximale de  $50.5 \text{ Hv} \pm 2.35$  avec le régime optimal:  $f= 0.22 \text{ mm/tr}$  ;  $P=50 \text{ N}$  ;  $D_b=13.5 \text{ mm}$ .

3. Les résultats expérimentaux obtenus pour les régimes optimaux correspondant à "Ra" et "Dfp" dévoilent qu'il y a une nette amélioration des paramètres : "Ra", "Dfp", "Rmr", "Rpk", "Rk", "Rvk", "Str" et "Hv" par rapport à l'état initial.

Dans le chapitre suivant, une analyse par simulation de l'évolution des réponses envisagées, sera réalisée par des courbes d'iso-réponses où l'influence des paramètres du régime est mise en relief. Par ailleurs, les graphes montrant l'effet du nombre de passes sous les régimes optimaux correspondant aux paramètres "Ra", "Dfp", seront discutés.

## *CHAPITRE IV*

---

# *INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS*

## Table des matières

<b>IV.1 Introduction</b> .....	84
<b>IV.2 Discussion des résultats relatifs à la pièce (2)</b> .....	84
IV.2.1 Effet des paramètres du brunissage sur la rugosité.....	84
IV.2.2 Effet des paramètres de traitement sur la dimension fractale .....	86
IV.2.2.1 Effet sur la dimension fractale de profil "Dfp".....	86
IV.2.2.2 Effet la dimension fractale d'une surface "Dfs".....	88
IV.2.3 Effet des paramètres de traitement sur les paramètres de volume.....	90
IV.2.3.1 Effet sur le volume de la matière des pics "Vmp".....	90
IV.2.3.2 Effet sur le volume de matière du cœur "Vmc".....	91
IV.2.3.3 Effet sur le volume du vide des vallées "Vvv".....	92
IV.2.4 Effet des paramètres de traitement sur l'indicateur d'isotropie "Str".....	93
IV.2.5 Effet des paramètres de traitement sur la dureté superficielle "Hv".....	95
<b>IV.3 Discussion des résultats relatifs à la pièce (3)</b> .....	97
IV.3.1 Topographie et profil de surface non traitée.....	97
IV.3.2 Traitement par le régime optimal correspondant à "Ra".....	97
IV.3.2.1 Effets sur la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp".....	97
IV.3.2.2 Effet sur les paramètres fonctionnels (Rk, Rpk, Rvk).....	98
IV.3.2.3 Effet sur le taux de longueur portante "Rmr".....	100
IV.3.2.4 Effet sur l'indicateur d'isotropie "Str".....	100
IV.3.2.5 Effet sur la topographie et profil de surface .....	101
IV.3.2.6 Effet sur la dureté superficielle "Hv".....	103
IV.3.3 Traitement par le régime optimal correspondant à "Dfp".....	103
IV.3.3.1 Effets sur la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp".....	103
IV.3.3.2 Effet sur les paramètres tribologiques .....	104
IV.3.3.3 Effet sur le taux de longueur portante "Rmr".....	106
IV.3.3.4 Effet sur l'indicateur d'isotropie "Str".....	106
IV.3.3.5 Effet sur la topographie et profil de surface .....	107
IV.3.3.6 Effet sur dureté superficielle "Hv".....	109
<b>IV.4 Conclusion</b> .....	110

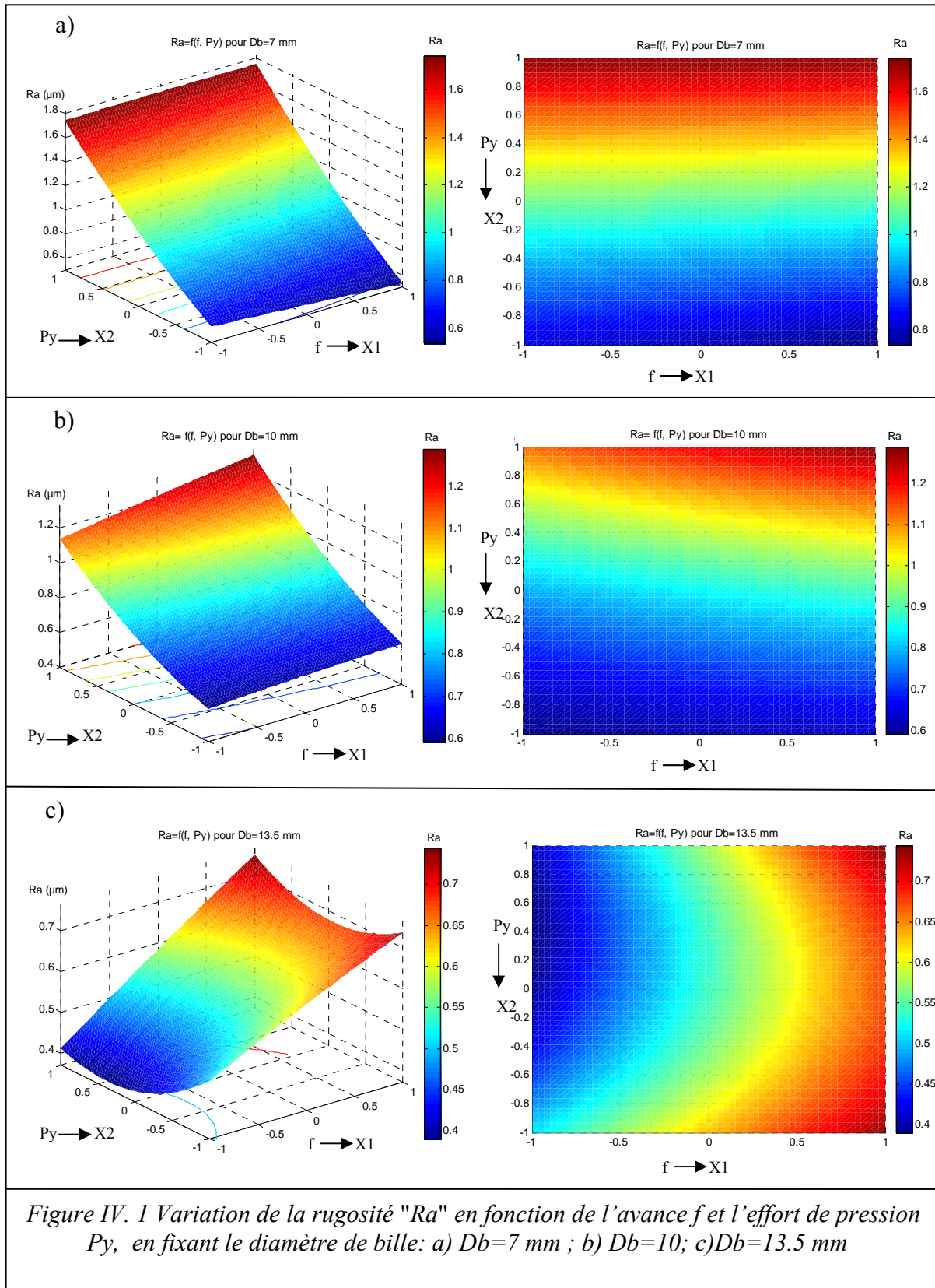
## IV.1 Introduction

A partir des modèles obtenus précédemment, nous procédons par simulation en vue d'analyser les paramètres de rugosité les plus pertinents qui influent sur l'état de surface et son comportement dans un système mécanique. Dans un premier temps, seront présentés les courbes et les graphiques obtenus par les plans d'expériences du modèle de Box-Behnken, illustrant l'influence des paramètres d'entrée, en l'occurrence, la force de pression ( $P_y$ ), l'avance ( $f$ ) et le diamètre de bille ( $D_b$ ) sur les réponses de sortie étudiées : la rugosité  $R_a$ , la dimension fractale du profil " $D_{fp}$ ", la dimension fractale de surface " $D_{fs}$ ", les paramètres de volume ( $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$ ), l'indicateur d'isotropie " $Str$ " et la dureté superficielle " $H_v$ ". En second temps, l'importance de l'approche fractale sera mise en relief par une analyse comparative entre l'application des régimes spécifiques au paramètre de rugosité " $R_a$ " et à la dimension fractale " $D_{fp}$ ".

## IV.2 Discussion des résultats relatifs à la pièce (2)

### IV.2. 1 Effet des paramètres de traitement sur la rugosité " $R_a$ "

La figure IV.1 représente les courbes d'évolution de la rugosité en fonction de l'effort de pression " $P_y$ " et de l'avance " $f$ " pour un diamètre de bille fixé " $D_b$ " 7mm et 10mm (Figure IV.1 a, b), on remarque que l'avance n'a pas d'effet significatif sur la rugosité, mais c'est la charge qui influe considérablement [77]. Concernant, le diamètre de bille 13.5mm (Figure IV.1c), la rugosité diminue avec une faible avance conjuguée à un effort de pression moyen, par contre l'augmentation de l'avance avec la réduction ou même l'augmentation de l'effort de pression, la rugosité " $R_a$ " s'accroît en dépassant  $0.7 \mu\text{m}$ . Donc on peut constater que l'utilisation d'une bille de grand diamètre avec de faible effort de charge fait décroître la rugosité " $R_a$ " jusqu'à  $0.4 \mu\text{m}$ , ceci peut être expliqué par le fait que un grand diamètre permet le lissage d'une plus grand surface d'où l'amélioration de l'état de surface. Par contre les fortes charges associées au faible diamètre influe considérablement sur la rugosité, ceci est dû l'effet d'indentation de la bille de faible diamètre qui pénètre dans le matériau ce qui altère la qualité de la surface, d'où un accroissement de  $R_a > 1.7 \mu\text{m}$ .



## IV.2.2 Effet des paramètres de traitement sur la dimension fractale

La dimension fractale de profil ou de surface ( $D_{fp}$ ,  $D_{fs}$ ) permet de déterminer la brillance ainsi que les irrégularités des surfaces usinées.

### IV.2.2.1 Effet sur la dimension fractale de profil " $D_{fp}$ "

La variation de la dimension fractale " $D_{fp}$ " avec le régime de traitement ( $P_y$ ,  $f$ ,  $D_b$ ) est illustrée par les courbes de la figure IV.2, à travers les quelles, il est constaté que pour les billes de diamètre 7mm ou 10 mm (Figure IV.2a et 2b), la tendance d'évolution de la dimension fractale est la même. En effet, pour ces deux tailles de la bille et peu importe l'avance du brunissage, les faibles charges ont un effet positif sur l'aspect de surface par suite d'une réduction de la dimension fractale. Ceci, s'explique par le fait que pour les faibles pressions de brunissage, l'effort axial ( $P_{y_a}$ ) (Figure I.43, § I.8) est plus dominant devant l'effort radial ( $P_{y_r}$ ), par conséquent, la déformation des aspérités est beaucoup plus prononcée dans le sens longitudinal, permettant ainsi un meilleur lissage de la couche superficielle, ce qui n'est pas le cas pour les faibles efforts axiaux où l'importance de la composante radiale ( $P_{y_r}$ ) favorise la bille à pénétrer dans la matière qui par effet d'indentation altère l'état de surface. A l'inverse, le diamètre de bille  $D_b = 13.5\text{mm}$  (Figure IV.2c) associée aux valeurs extrêmes de l'avance " $f$ ", quelque soit la charge " $P_y$ " tendent à faire diminuer la dimension fractale. L'effet du brunissage est encore plus bénéfique pour les fortes charges sous de faibles vitesses d'avance, pour ces conditions, la dimension fractale " $D_{fp}$ " tend vers une valeur minimale " $D_{fpmin} = 1.08$ ". Ce résultat se doit à l'importance du rayon de la bille " $D_b$ " qui offre la possibilité de repousser une plus grande surface. En revanche les valeurs moyennes de " $P_y$ " et " $f$ " favorisent l'augmentation de " $D_{fp}$ " pouvant atteindre 1.18, quoique cette valeur n'affecte en rien l'état de surface traitée par brunissage.



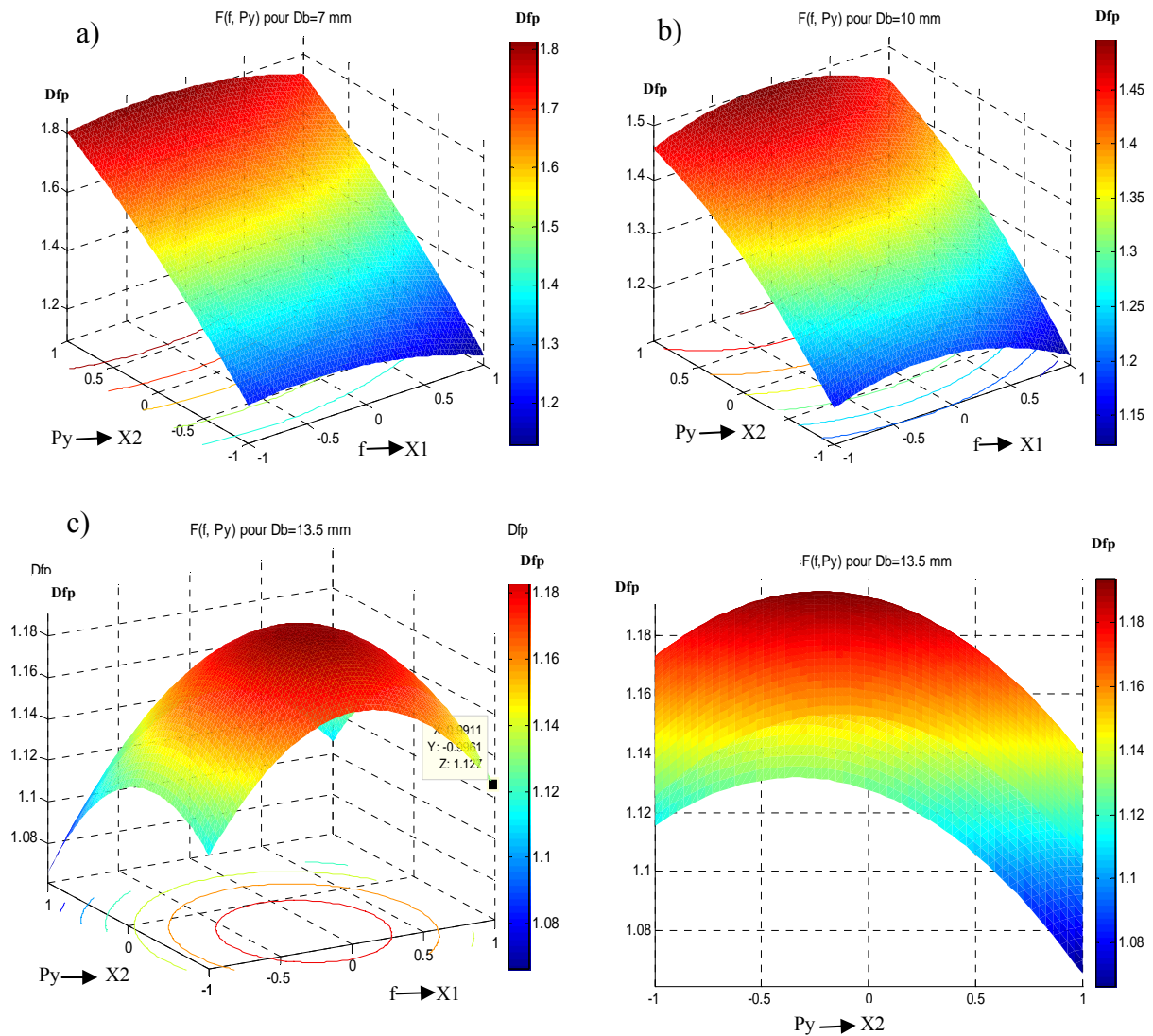


Figure IV.2 Variation de la dimension fractale "Dfp" en fonction de l'avance  $f$  et l'effort de pression  $P_y$ , en fixant le diamètre de bille : a)  $D_b=7$ mm, b)  $D_b=10$ mm, c)  $D_b=13.5$ mm

#### IV.2.2.2 Effet sur la dimension fractale de surface "Dfs"

L'évaluation de l'effet du diamètre de la bille sur la dimension fractale "Dfs" à différentes charges "Py" et vitesses d'avance "f" est illustrée sur les courbes (Figure IV.3). On remarque que pour une bille de diamètre  $D_b = 7\text{mm}$  (Figure IV.3a), la dimension fractale "Dfs" tend à diminuer sous les faibles charges ( $P_y = 50\text{N}$ ) associées aux avances moyennes et même maximales, atteignant une valeur inférieure à 2.35 d'où une amélioration de l'état de surface. Par contre, quel que soit la vitesse d'avance combinée avec les grandes charges ( $P_y = 200\text{N}$ ), la dimension fractale "Dfs" converge vers une valeur maximale supérieure à 2.6, engendrant ainsi des irrégularités au niveau de la surface traitée, ce qui est constaté sur la topographie de surface (Figure IV.4a).

Ceci peut être expliqué par l'importance de la composante radiale ( $P_{y_r}$ ) (Figure I.43, § I.8) favorisant la bille de petit diamètre à pénétrer dans la matière, qui par effet d'indentation altère l'état de surface. Toutefois, l'utilisation d'une bille de diamètre  $D_b = 10\text{mm}$  (Figure IV.3b) confirme le fait que les faibles charges et les valeurs d'avances moyennes et maximales ont un effet bénéfique sur la surface. Ceci est dû à l'importance de l'effort axiale ( $P_{y_a}$ ) par rapport à l'effort radiale ( $P_{y_r}$ ), favorisant ainsi la déformation des aspérités dans le sens longitudinal en permettant un meilleur lissage de la couche superficielle où la dimension fractale atteint sa valeur minimale de 2.25, ce qui est observé sur la topographie de surface (Figure IV.4b). En revanche les fortes charges sont défavorables pour la surface et tendent à augmenter la dimension fractale "Dfs" dépassant 2.5. L'emploi d'une bille de 13.5mm (Figure IV.3c) à des effets similaires aux cas précédents où "Dfs" peut atteindre une valeur minimale de 2.32, donc un grand diamètre de la bille offre la possibilité de repousser plus de matière permettant le nivellement des aspérités au niveau de la surface traitée, ce qui est constaté sur la cartographie de surface (Figure IV.4c).

En général, la dimension fractale "Dfs" est comprise entre  $2 < D_{fs} < 3$  pour une surface, plus "Dfs" tend vers 2 plus la surface est lisse et régulière [38]. Pour minimiser "Dfs", il est recommandé d'utiliser un diamètre de bille moyen  $D_b = 10\text{mm}$  avec des faibles charges ( $P_y = 50\text{N}$ ), des avances moyennes et même maximales ( $f = 0.148\text{mm/tr}$ ,  $f = 0.22\text{mm/tr}$ ), ce qui apparaît sur la cartographie (Figure IV.4b).

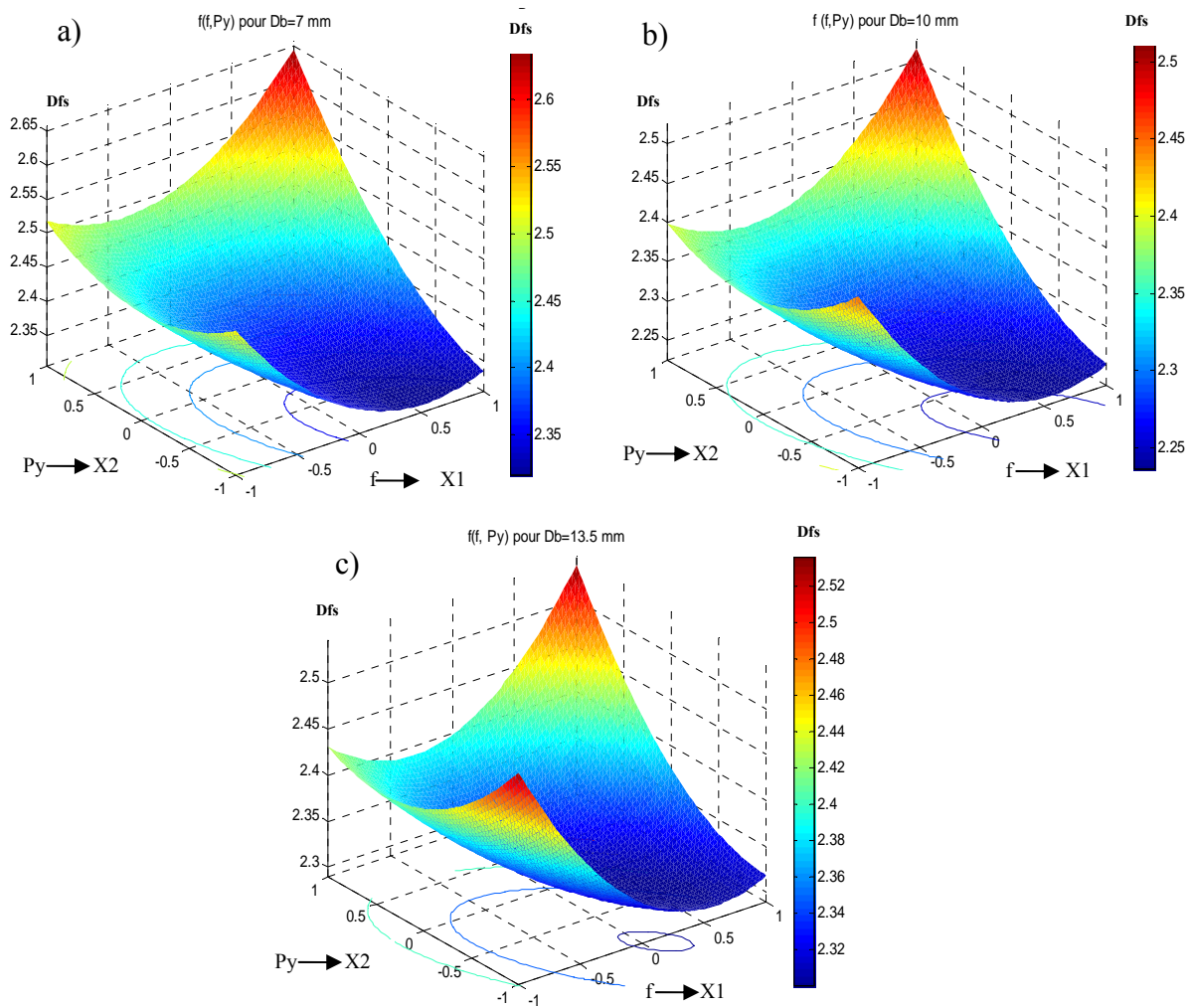


Figure IV.3 Effet de la force de pression et de l'avance sur la dimension fractale "Dfs" pour :  $D_b=7$ mm,  $D_b=10$ mm,  $D_b=13.5$ mm

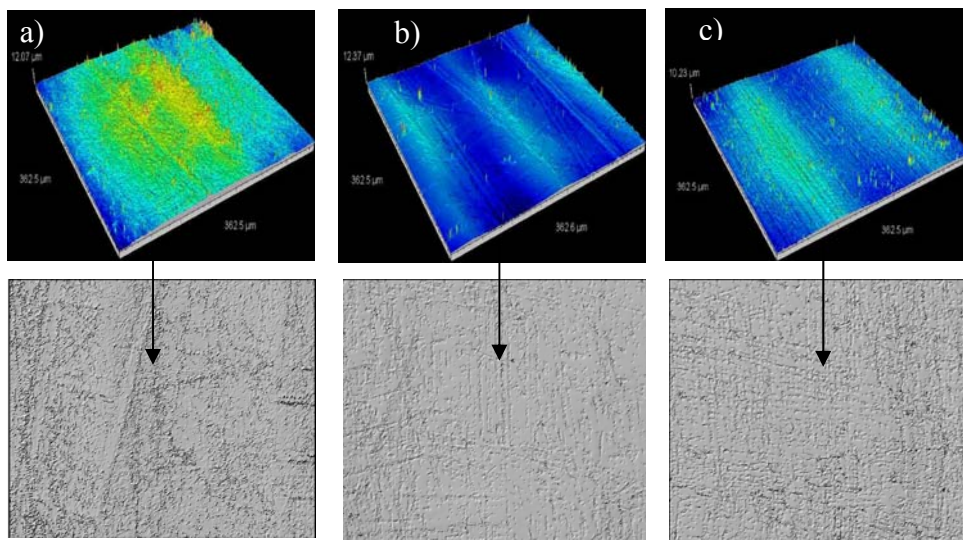


Figure IV.4 Dimension fractale pour les topographies de surfaces traitées pour a)  $D_{fs}=2.59$ , b)  $D_{fs}=2.11$ , c)  $D_{fs}=2.20$

### IV.2.3 Effet du régime de traitement sur les paramètres de volume

#### IV.2.3.1 Effet sur le volume de matière des pics "Vmp"

Le volume de matière des pics "Vmp" est un paramètre très important en tribologie, en particulier pour les surfaces travaillant en contact afin d'augmenter la portance, ce qui est bénéfique lors du rodage. A travers cette expérimentation, nous mettons en relief l'effet des éléments du régime de traitement ( $f$ ,  $P_y$ ,  $D_b$ ) sur ce paramètre. A partir des courbes de la figure IV.5, on constate que l'avance n'a pas d'influence significative par rapport à la charge, la diminution de cette dernière favorise l'élimination des pics d'où la diminution de "Vmp". En effet, on remarque une diminution importante de "Vmp" avec une bille de 13.5mm associée à une charge  $P_y=50N$  (figure IV.5 c). Ceci peut être interprété par le fait qu'un diamètre de bille important permet de lisser une plus grande surface en écrasant un plus grand nombre de pics, générant ainsi une surface plus régulière.

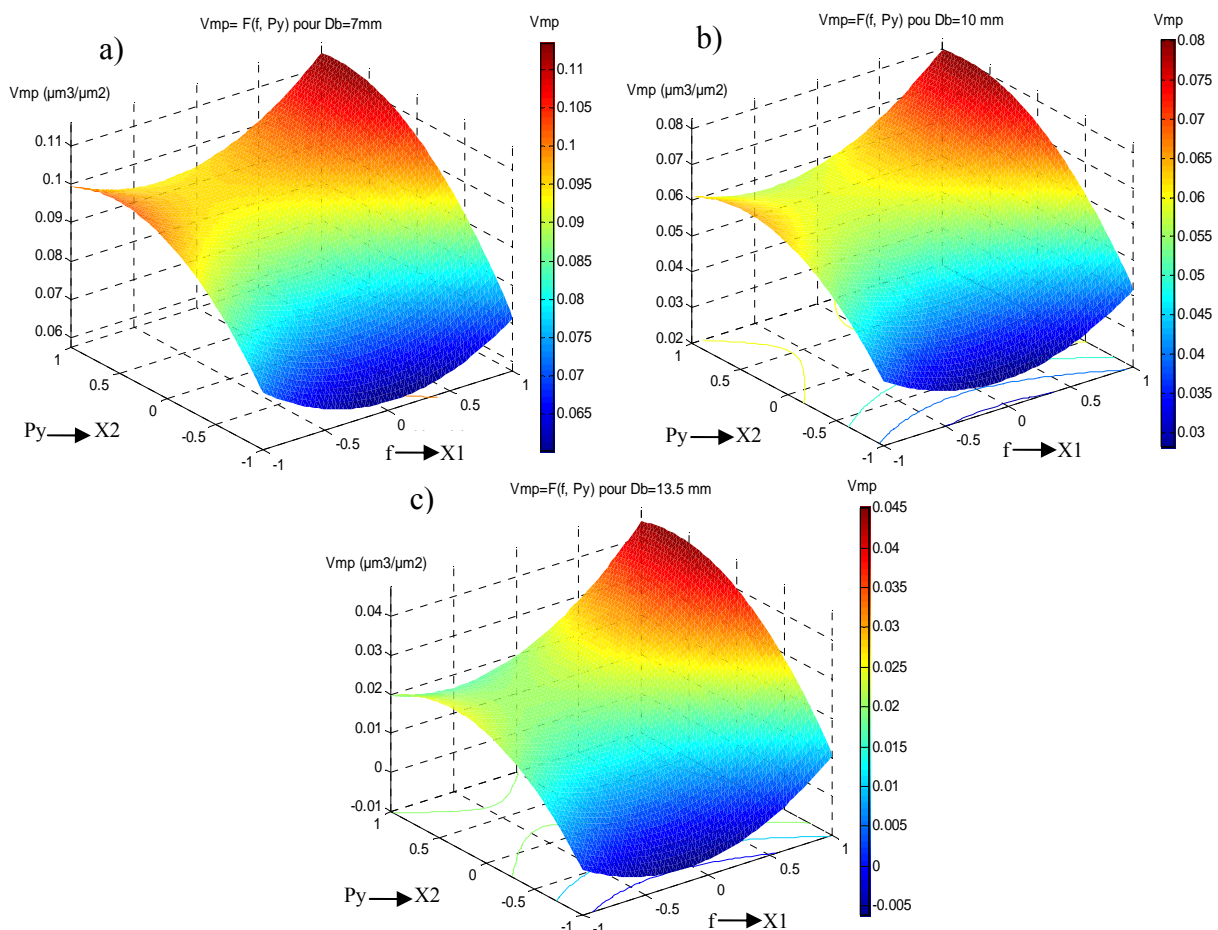


Figure IV.5 Effet de la force de pression et de l'avance sur "Vmp" pour :  $D_b=7mm$ ,  $D_b=10mm$ ,  $D_b=13.5mm$



### IV.2.3.2 Effet sur le volume de matière du cœur "Vmc"

Le paramètre "Vmc" est capital car il détermine la quantité de matière qui résiste à la fatigue et à l'usure durant le fonctionnement de la surface [30], plus "Vmc" augmente plus la surface résiste mieux à la fatigue. L'effet des paramètres du régime de traitement sur "Vmc" peut être estimé à partir des courbes illustrées sur la figure IV.6. La tendance générale des résultats révèle que pour les diamètres de bille  $D_b = (7\text{mm}, 10\text{mm})$  respectivement (Figure IV.6a, b), la vitesse d'avance n'est pas significative. Le paramètre "Vmc" peut atteindre une valeur supérieure à  $2.5\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$  lors de l'utilisation des charges importantes ( $P_y = 200\text{N}$ ) combinées à une avance ( $f = 0.065\text{mm/tr}$ ) et un diamètre ( $D_b = 7\text{mm}$ ). Par conséquent, les fortes charges sont favorables car l'action de la bille de brunissage est plus grande et l'écoulement de la matière est plus régulier à des faibles avances. Par ailleurs l'application de la bille de diamètre  $D_b = 13.5\text{mm}$  (Figure IV.6c) associée à une vitesse d'avance maximale ( $f = 0.22\text{mm/t}$ ), quel que soit la charge occasionne des valeurs de "Vmc" plus importantes. Ce qui n'est pas le cas pour les faibles valeurs d'avance, où on observe une diminution considérable de "Vmc"; ce qui s'explique par le fait, qu'un rayon important de la bille associé à une faible avance, sous la pression provoque un écrasement des crêtes d'où un entassement des couches superficielles, provoquant la diminution de "Vmc".

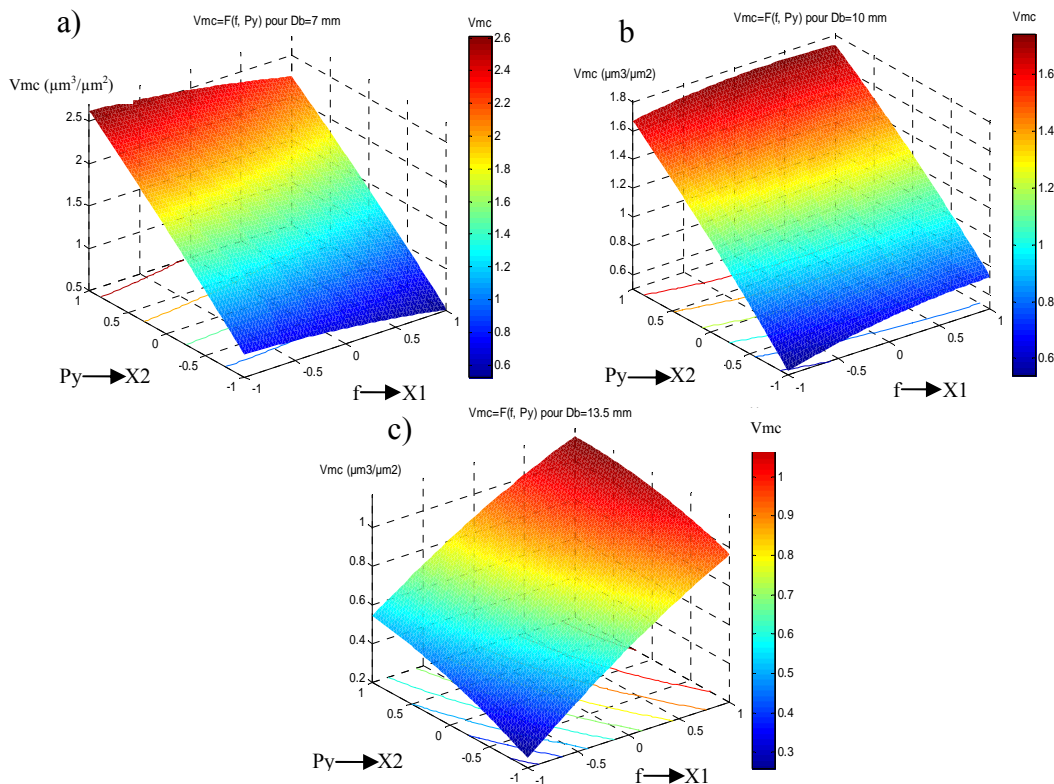


Figure IV.6 Effet de la force de pression et de l'avance sur "Vmc" pour :  $D_b = 7\text{mm}$ ,  $D_b = 10\text{mm}$ ,  $D_b = 13.5\text{mm}$

### IV.2.3.3 Effet sur le volume du vide des vallées "V<sub>v</sub>"

Dans le domaine de lubrification, le volume du vide des vallées "V<sub>v</sub>" est un élément d'envergure, plus il augmente plus la surface a des réserves pour retenir le lubrifiant, ce qui permettra de diminuer les frottements et de préserver l'état des surfaces en contact.

La figure IV.7 présente l'effet des paramètres de brunissage ( $f$ ,  $P_y$ ,  $D_b$ ) sur "V<sub>v</sub>". Les résultats montrent que la charge et le diamètre de la bille, sont les facteurs les plus importants, affectant le paramètre "V<sub>v</sub>". L'allure générale de ces courbes indique que la vitesse d'avance n'a pas d'effet significatif, par contre, les charges élevées ( $P_y=200\text{N}$ ) associées au faible diamètre de bille ( $D_b=7\text{mm}$ ) (Figure IV.7a) engendrent une valeur "V<sub>v</sub>" importante atteignant  $0.3\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ . Ceci s'explique par le fait que les fortes charges assurent une meilleure pénétration des billes de petit diamètre, ce qui a pour effet de générer des poches servant de retenue de lubrifiant indispensable aux surfaces travaillant en frottement [30]. A l'inverse, l'application des diamètres importants de bille (10mm, 13.5mm), le paramètre de volume "V<sub>v</sub>" diminue par le fait que la matière est beaucoup plus repoussée dans les vallées sous l'effet de la charge (Figure IV.7b et c) provoquant ainsi un entassement des couches superficielles de l'alliage.

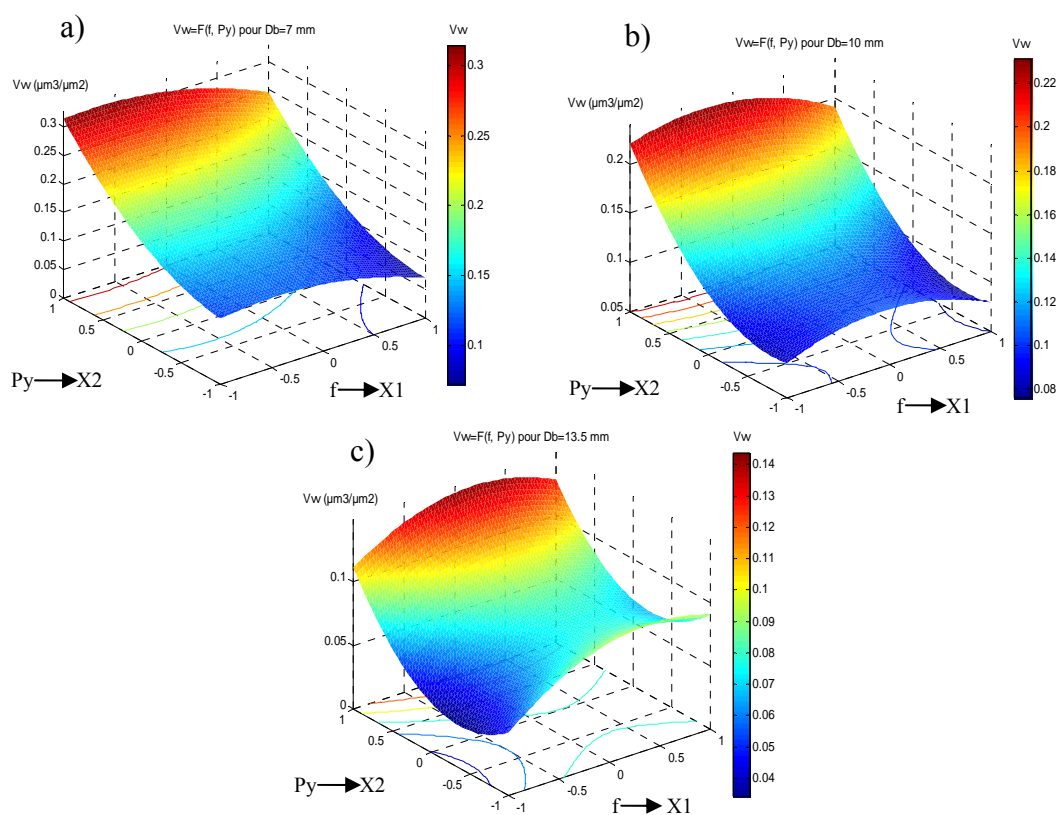
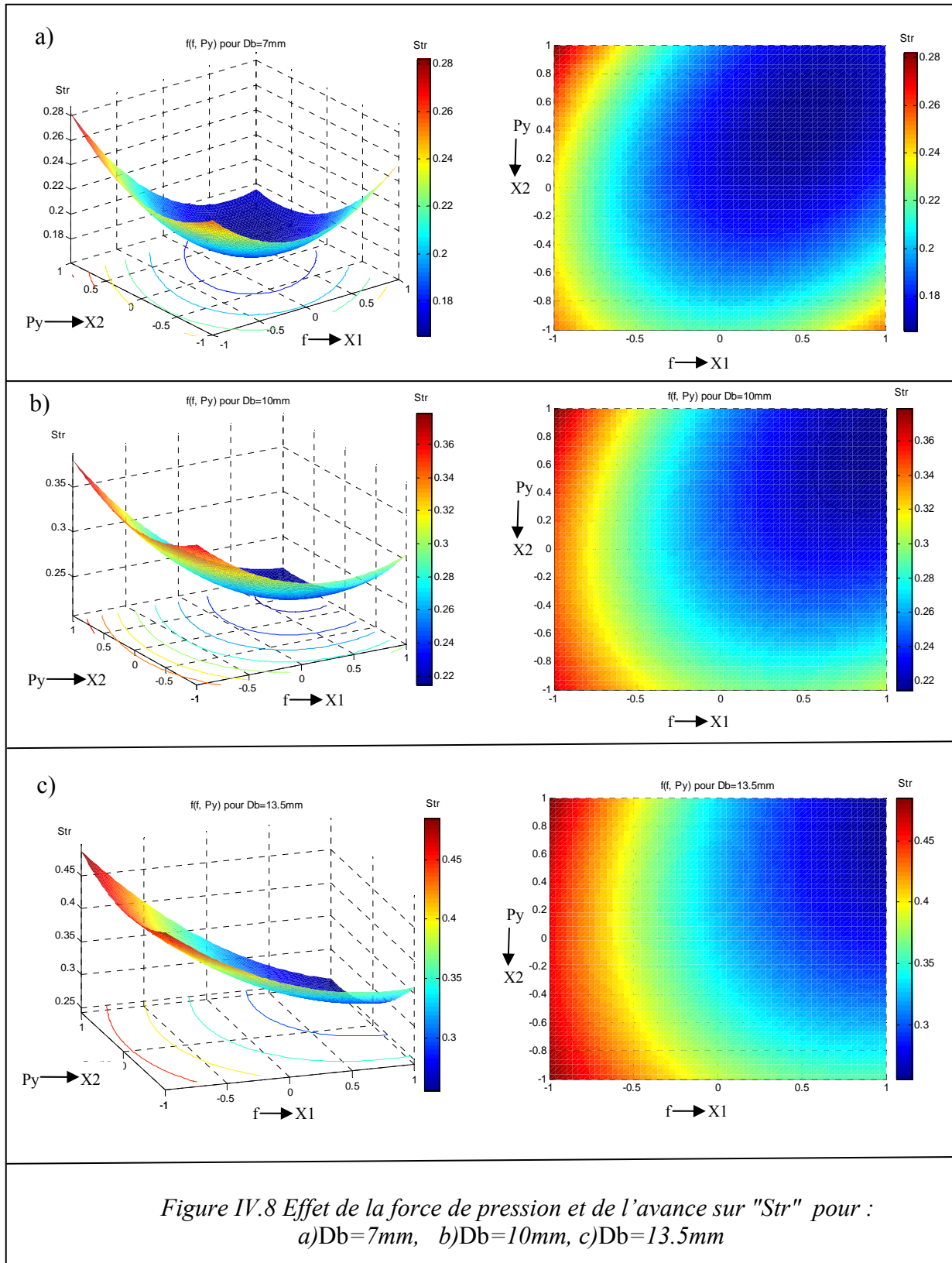


Figure IV.7 Effet de la force de pression et de l'avance sur "V<sub>v</sub>" pour :  $D_b=7\text{mm}$ ,  $D_b=10\text{mm}$ ,  $D_b=13.5\text{mm}$

#### IV.2.4 Effet sur l'indicateur d'isotropie "Str"

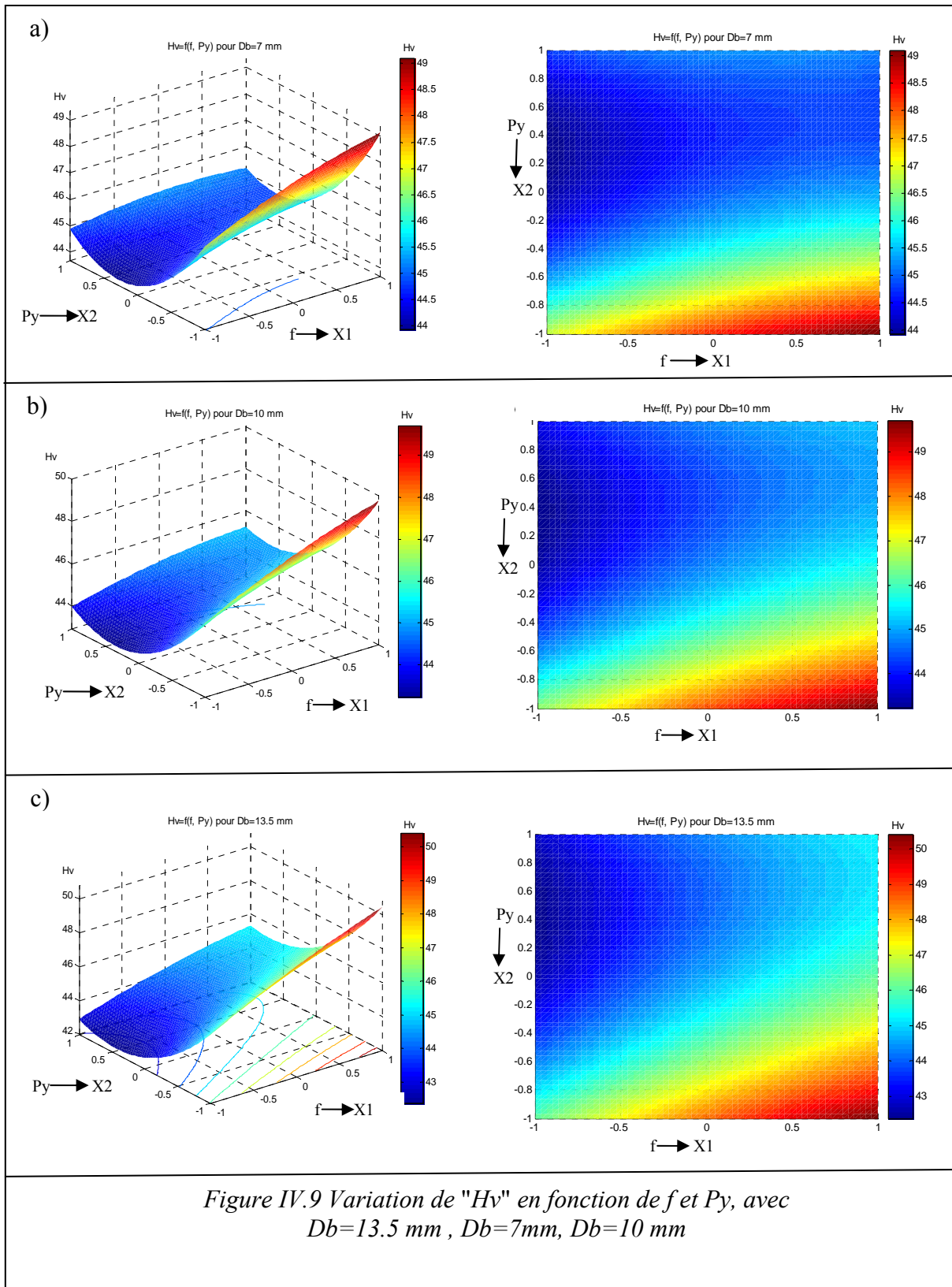
Ce paramètre représente l'orientation du motif de rugosité, il permet d'identifier l'isotropie des surfaces réalisées par l'estimation du rapport de la longueur sur la largeur d'une aspérité représentative, ce rapport varie entre 0 et 1. L'effet du procédé sur ce paramètre est montré sur la figure IV.8, où on constate que pour un diamètre de bille  $Db=7\text{mm}$ , les faibles vitesses d'avances associées à une forte charge tendent plus à augmenter "Str" avec une valeur ne dépassant pas 0.28 (Figure IV.8a). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les fortes pressions axiales de brunissage exercées sur cet alliage favorisent la déformation de la couche superficielle de la surface. Par ailleurs, lors de l'application d'un diamètre  $Db=10\text{mm}$  (Figure IV.8b) avec de faibles vitesses d'avances et quelque soit la charge, il est remarqué une augmentation de "Str" de 0.08 par rapport au cas précédant. L'effet du brunissage est encore plus bénéfique avec l'augmentation du diamètre de la bille  $Db=13.5\text{mm}$  (Figure IV.8c), où l'indicateur d'isotropie "Str" tend vers une valeur supérieur à 0.45 avec plus de stabilité, malgré la variation de la charge. Ce résultat se doit à l'importance du rayon de la bille qui offre la possibilité de repousser une plus grande surface et d'orienter la texture vers une forme plus au moins isotrope, à l'opposé la bille de faible diamètre affecte l'aspect de surface, sous l'effet d'indentation pour ce matériau.





#### IV.2.5 Effet sur la dureté superficielle "Hv"

La dureté superficielle est un paramètre essentiel au vu de son impact sur la résistance des surfaces travaillant en contact (résistance à la fatigue, à l'usure,...). Les traitements mécaniques superficiels permettent d'augmenter la dureté de la couche superficielle de la surface sous l'effet de la déformation plastique. L'influence des paramètres de traitement sur la dureté superficielle "Hv" est indiquée sur la figure IV.9. Lors de l'emploi de la bille de diamètre ( $D_b=7\text{mm}$ ) (Figure IV.9a), l'effet de la charge n'est pas significatif, par contre l'augmentation de l'avance influe considérablement sur la dureté superficielle, ceci est dû à l'effet de l'écrasement des grains dans le sens de l'avance et leur écrouissage grâce à la forte pénétration de la bille, soit un accroissement de la dureté superficielle au delà de 48 Hv. Dans le cas de l'usage de la bille de diamètre 10mm (Figure IV.9b), la variation de l'avance associé aux efforts de pression élevés offrent une dureté superficielle dans la plage (43 ÷46 Hv), par contre l'augmentation de l'avance avec une diminution de la charge, améliorent considérablement la dureté superficielle qui tend vers 50 Hv. Lors de l'application de la bille de diamètre 13.5mm (Figure IV.9c), la diminution de l'avance et la réduction ou même l'augmentation de l'effort, la dureté superficielle décroît vers des valeurs inférieures à 44 Hv. Par contre avec une l'augmentation de l'avance et un effort de pression moyen ou faible engendrent une élévation de la dureté superficielle atteignant des valeurs supérieures à 50 Hv ce résultat est en accord avec les travaux [76].



### IV.3 Discussion des résultats relatifs à la pièce (3)

Afin d'apprécier les régimes optimaux correspondant aux paramètres : rugosité "Ra" et dimension fractale "Dfp" obtenus dans le chapitre précédent (§III.5.1.1 et §III.5.1.2), une série d'essai a été réalisée sur la pièce (3) sous plusieurs passes voir figure II.21 § II.7.2

#### IV.3.1 Topographie et profil de surface non traitée

La pièce a été préalablement usinée sur tour, les effets de l'outil de coupe sont visiblement apparents sur la topographie de surface (Figure IV.10a), où il est observé que les hauteurs des pics sur les profils dépassent la valeur de  $1.2\mu\text{m}$  (Figure IV.10b) et une dimension fractale de surface qui équivaut à 2.57 (Figure IV.10c), ce qui explique la présence des irrégularités de surface.

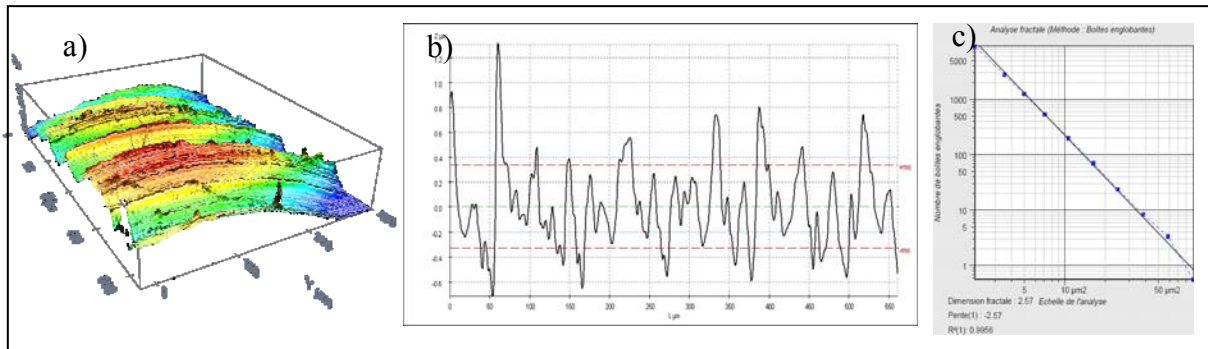


Figure IV.10 Surface réalisée par tournage  
a) topographie de surface b) Profils de surface, c) Analyse fractale

#### IV.3.2 Traitement par le régime optimal correspondant à "Ra"

##### IV.3.2.1 Effets sur la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp"

Les résultats du brunissage sont illustrés sur la figure IV.10, où on observe que pour une seule passe ( $i=1$ ), la valeur de la rugosité "Ra" est proche de celle de la valeur prédite  $Ra = (0.38 \pm 0.1) \mu\text{m}$  par le modèle (Chap III § III.5.1.1), la dimension fractale a été réduite de 0.37 par rapport à la valeur initiale (1.46), ainsi la surface est plus régulière et lisse. Pour le nombre de passe ( $i=2$ ), la dimension fractale "Dfp" (Figure IV.11) a augmenté de 0.07 par rapport au cas précédent, accompagné d'un accroissement de "Ra", ce qui s'explique par l'altération des couches superficielles de la surface lors du deuxième passage de la bille. L'application de trois passes ( $i=3$ ) engendre une amélioration de "Ra" et "Dfp" par rapport au cas précédent du fait de l'écrasement des aspérités résiduelles par la bille, produisant ainsi une surface plus régulière.

Par conséquent, il est observé que la dimension fractale "Dfp" et la rugosité de surface "Ra" suivent la même allure, ce qui est montré dans les travaux [54].

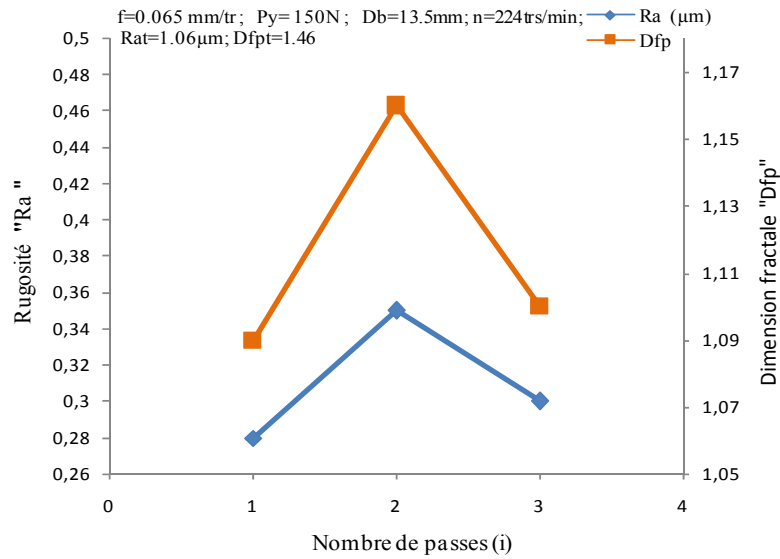


Figure IV.11 Variation de "Dfp" et "Ra" en fonction du nombre de passes(i)

### IV.3. 2.2 Effets sur les paramètres fonctionnels (Rk, Rpk, Rvk)

Les résultats enregistrés pour les paramètres tribologiques montrent qu'un nombre de passe important est défavorable. En effet, la figure IV.12a illustrant la variation des paramètres tribologiques (Rk, Rpk, Rvk) montre que le critère de fonctionnement "Rk" diminue lors du brunissage à trois passes pour atteindre 1.11μm, ce qui s'explique par le fait que sous l'effet de la charge associée à une faible avance la bille entasse les couches superficielles du matériau, ce qui tend à diminuer "Rk". De même pour le paramètre "Rpk" qui passe à la valeur 0.39μm pour i=2passes, cette valeur étant supérieure à celle obtenue pour une passe (Rpk=0.24 μm), ceci s'interprète par l'effet de la pression de la bille qui provoque une altération de la surface, ce qui a été constaté pour la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp". A son tour, le paramètre "Rvk" connaît une augmentation pour un nombre de passe (i=2) du fait que la bille sous la pression de la charge provoque une pénétration dans la surface créant ainsi de nouvelles poches. A l'inverse, pour le nombre (i=3), "Rvk" décroît suite au remplissage des creux résiduels. Les paramètres surfaciques (Spk, Sk, Svk) illustrées sur la figure IV.12b ont la même tendance que ceux obtenus pour les mesures 2D (figure IV.12a) pour un nombre de passe i=1 et 2.

Pour le nombre de passe  $i=3$  l'allure est la même mais moins accentuée vu que les paramètres fonctionnels de profil ( $Rpk$ ,  $Rk$ ,  $Rv$ ) reflètent les résultats moyens de profils par contre les paramètres surfaciques ( $Spk$ ,  $Sk$ ,  $Svk$ ) représentent les résultats des profils juxtaposés.

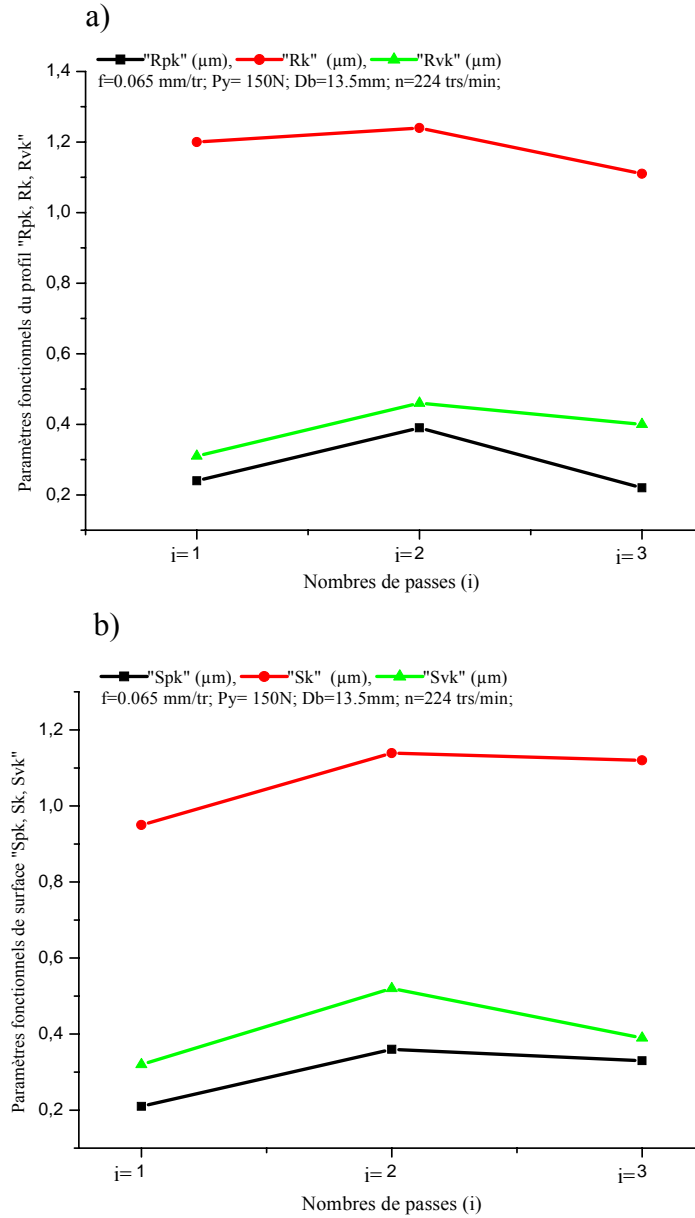


Figure IV.12 Variation des paramètres fonctionnels en fonction du nombre de passes (i), a) pour le profil, b) pour la surface

### IV.3. 2.3 Effet sur le taux de longueur portante "Rmr"

Le taux de longueur portante est important lors du fonctionnement des surfaces en contact, critère prévoyant la tenue à l'usure. L'effet du nombre de passe sur "Rmr" et son évolution avec la rugosité "Ra" et la dimension fractale "Dfp" est illustré sur la figure (IV.13). On observe que lors de l'application d'une passe améliore le taux de la longueur portante ( $Rmr > Rmrt$ ), accompagné d'une amélioration de "Ra" et "Dfp". Ce résultat est dû à l'effet de la charge qui en repoussant les pics dans les creux confère un meilleur état de surface. A l'inverse, lors du repassage de la bille ( $i=2$ ), l'état de surface est altéré se traduisant par la croissance des valeurs "Ra" et "Dfp", ce qui a pour effet une diminution de la longueur portante. De nouveau, pour trois passes ( $i=3$ ), le passage de la bille corrige les défauts survenus lors de la deuxième passe où "Rmr" atteint une valeur plus élevée, mais restant toujours moins importante que le résultat de la première passe.

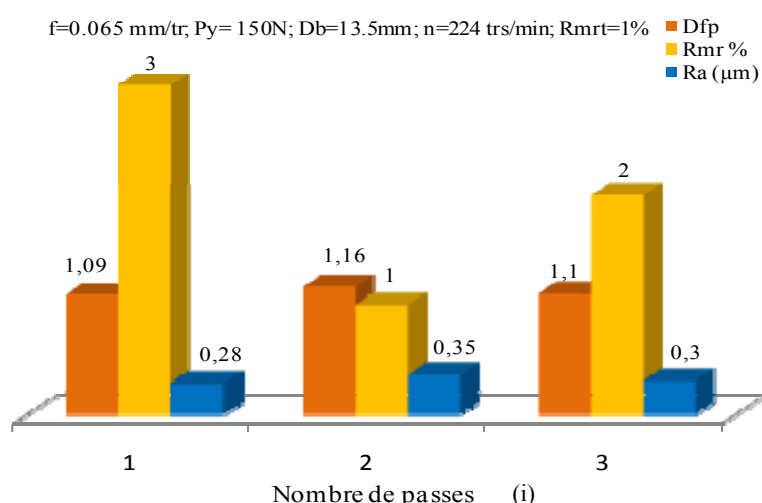


Figure IV.13 Variation de "Rmr", "Ra" et "Dfp" en fonction du nombre de passes (i)

### IV.3. 2.4 Effet sur l'indicateur d'isotropie "Str"

L'influence du nombre de passe sur l'indicateur d'isotropie "Str" ou orientation de la texture, est illustrée sur la figure (IV.14). Le paramètre "Str" tend vers son maximum  $Str=0.63$  (tendance vers un aspect isotrope), lors d'un premier passage de la bille ( $i=1$ ), ceci peut s'expliquer par le refoulement de la matière dans les creux engendrant ainsi un lissage de la surface avec une amélioration de "Ra" et "Dfp". La valeur du paramètre "Str" décroît au fur et à mesure qu'on augmente le nombre de passe ( $i=2-3$ ), accompagnée d'une augmentation de "Ra" et "Dfp".

Ceci, peut être commenté par la réaction de la surface sous l'effet de la pression exercée par la bille à plusieurs passes associé à une faible avance, ayant pour résultat la détérioration de la texture où "Str" diminue de 0.635 à 0.36, convergeant vers un aspect anisotrope de la surface.

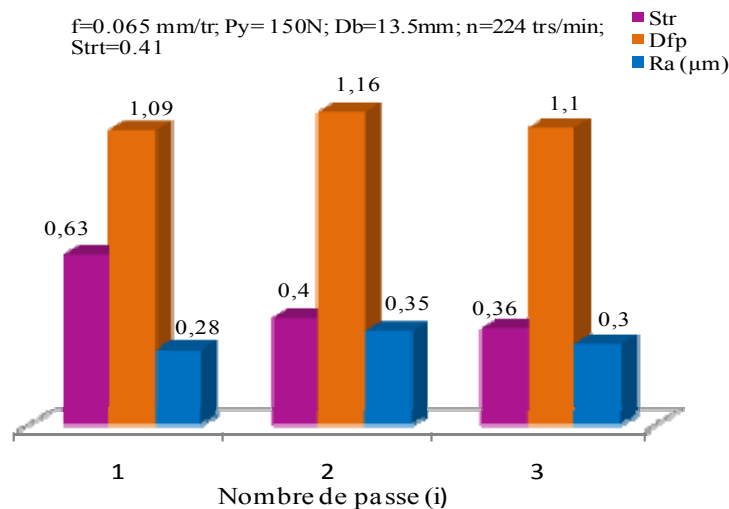


Figure IV.14 Variation de "Str", "Ra" et "Dfp" en fonction du nombre de passes (i)

### IV.3. 2.5 Effet sur la topographie et profil de surface

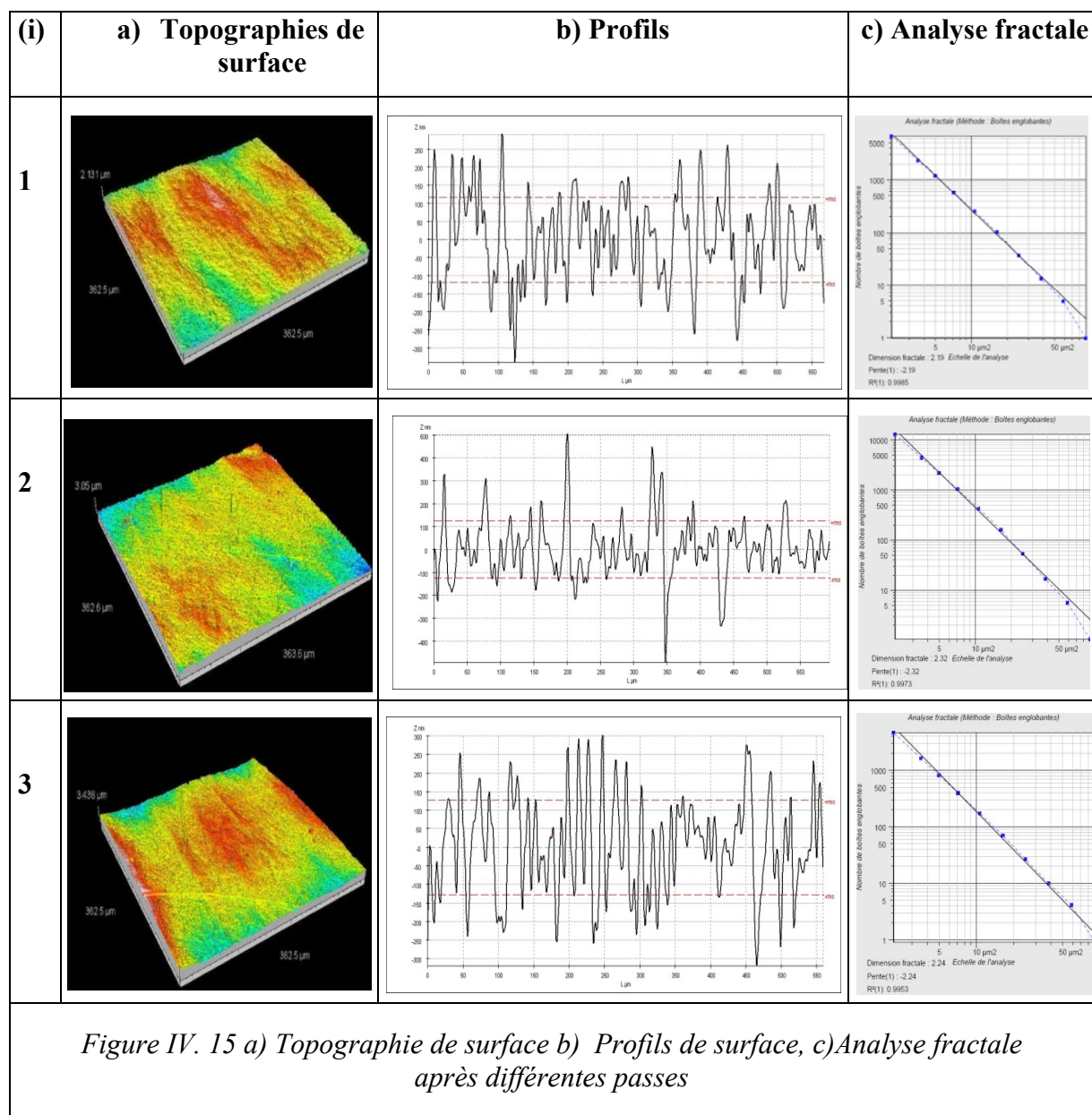
Les effets du brunissage sur la topographie, les profils de surfaces et la dimension fractale "Dfs" après l'application de différentes passes ( $i=1\div 3$ ) sont représentés sur la figure IV.15. Il apparaît sur la topographie une texture uniforme (Figure IV.15a) engendrée lors du premier passage de la bille où on enregistre une réduction des hauteurs des pics du profil à une valeur inférieure à  $0.25\ \mu\text{m}$  (Figure IV.15b) par rapport à la surface initiale ( $0.8\ \mu\text{m}$  à  $1.25\ \mu\text{m}$ ). De même, la dimension fractale "Dfs" diminue de la valeur initiale 2.57 à 2.19 (Figure IV.15c).

A la suite du deuxième passage de la bille, il est constaté une topographie de texture moins régulière (Figure IV.15a) avec une hauteur max des pics du profil allant jusqu'à  $0.50\ \mu\text{m}$  (Figure IV.15b), de même la dimension fractale "Dfs" valant 2.32 soit une augmentation de 0.13 (Figure IV.15c) par rapport à celle obtenue pour une passe. Ceci, se révèle par l'effet de la charge qui est important sur ce matériau. En effet, l'utilisation d'une pression élevée associée à une faible avance à induit un écrouissage des couches superficielles de la surface.

Lors de l'application de la troisième passe, on constate une amélioration modérée de la texture de surface (figure IV.15a) avec une légère diminution de la hauteur des pics du profil par rapport au cas précédent ne dépassant pas  $0.30\ \mu\text{m}$  (Figure IV.15b), ce qui est similaire pour la dimension fractale "Dfs" qui se trouve diminuée de 0.08 (Figure IV.15c) par rapport à celle enregistrée pour  $i=2$ .



Ceci, s'interprète par le fait que lorsque la bille effectue un repassage de la surface en corrigeant certaines irrégularités survenues lors de la deuxième passe, d'où l'amélioration de l'aspect de surface.





### IV.3.2.6 Effet sur la dureté superficielle "Hv"

Le procédé de finition adopté confère à la surface une amélioration de la dureté superficielle, résultat prouvé dans les travaux [76-78]. La variation de la dureté superficielle "Hv" en fonction du nombre de passes (i) est présentée dans la figure IV.17.

Il est constaté une légère diminution de "Hv" pour  $i=2$ , qui est dû à l'altération de la surface sous l'effet de la charge fragilisant ainsi la texture. Par contre, la troisième passe permet de renforcer les couches superficielles par écrouissage, ce qui a pour conséquence l'augmentation de "Hv".

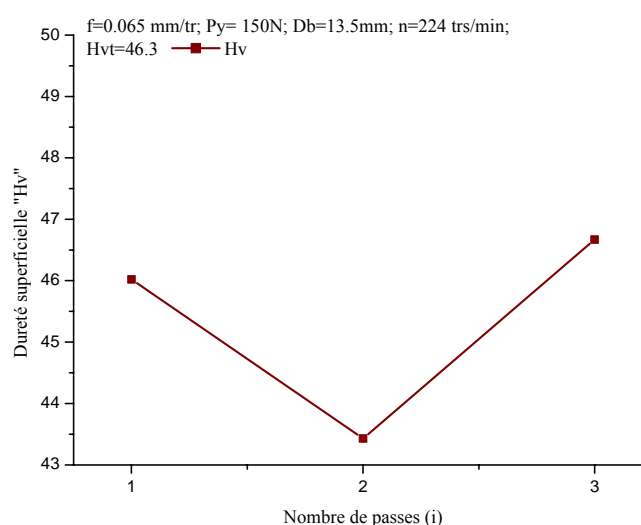


Figure IV.16 Variation la dureté superficielle "Hv" en fonction du nombre de passes (i)

### IV.3.3 Traitement par le régime optimal correspondant à "Dfp"

#### IV.3.3.1 Effet sur la dimension fractale "Dfp" et la rugosité "Ra"

L'influence du régime optimale prédit pour la dimension fractale et du nombre de passes est exposé sur la figure IV.17. La dimension fractale "Dfp" mesurée admet une valeur moyenne du même ordre de grandeur que celle de la valeur prédite ( $D_{fp}=1.12\pm 0.10$ ) par le modèle mathématique au chapitre3 (§III.4.1.2). Les résultats révèlent qu'avec ce régime la surface est d'autant plus régulière et lisse, que le nombre de passes augmente, ce qui est en accord avec les travaux [78 ,79]. De ce fait, l'augmentation du nombre de passes contribue à réduire la dimension fractale pouvant atteindre la valeur 1.08 pour un brunissage à 3 passes, avec un effet similaire sur la rugosité qui se trouve diminuée à une valeur de  $0.27 \mu\text{m}$ .

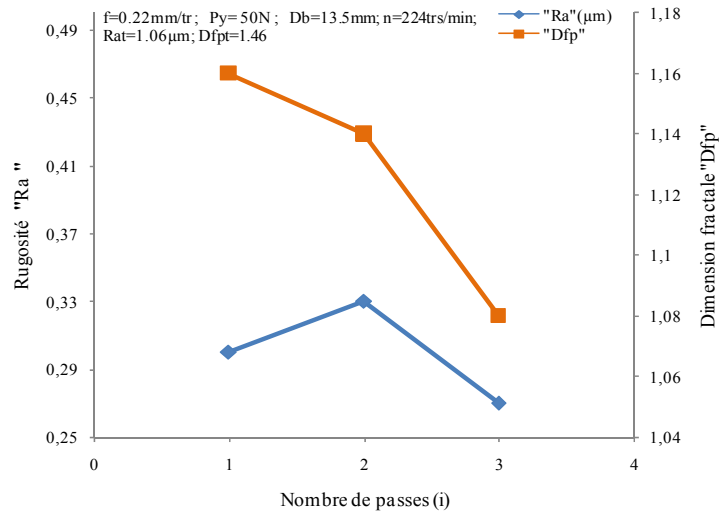


Figure IV.17 Variation de "Dfp" et de "Ra" en fonction du nombre de passes (i)

### IV.3.3.2 Effet sur les paramètres tribologiques

Sur la figure IV.18 est illustrée la variation des paramètres tribologiques (Rk, Rpk, Rvk) en fonction du nombre de passes. Le critère de fonctionnement "Rk" diminue jusqu'à atteindre 1.14 μm sous l'effet du lissage progressif de la surface (i=1 à 3 passes), la hauteur de la couche de matière reste toujours disponible pour assurer la longévité de la surface et sa résistance à l'usure. Le même effet du nombre de passes est aussi observé sur le paramètre "Rpk" qui diminue jusqu'à 0.53 μm. Cette diminution se traduit par la réduction du temps de rodage des aspérités de surface, ce qui est explicité dans [33]. Sous l'effet du lissage de la surface résultant de la déformation des pics dans les creux, le paramètre "Rvk" diminue à son tour. Cette réduction n'altère en rien le bon fonctionnement des surfaces conjuguées du fait d'une disponibilité des vallées nécessaires et suffisante à une bonne rétention du lubrifiant.

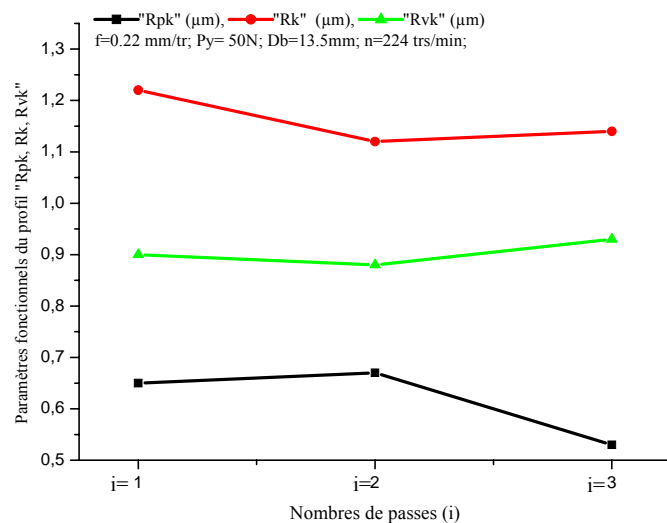


Figure IV.18 Variation de "Rk, Rpk, Rvk" en fonction du nombre de passes(i)

D'autre part une augmentation de "Dfp" indique une évolution des paramètres tribologiques "Rk", "Rpk" et "Rvk" (Figure IV.19). Malgré l'augmentation de "Rk" et "Rpk" mais qui restent de bons indices pour le rodage et le bon fonctionnement des surfaces, ce qui n'est pas le cas pour le paramètre "Rvk" dont la diminution pourrait conduire à un phénomène de grippage de la surface suite à une mauvaise rétention des fluides.

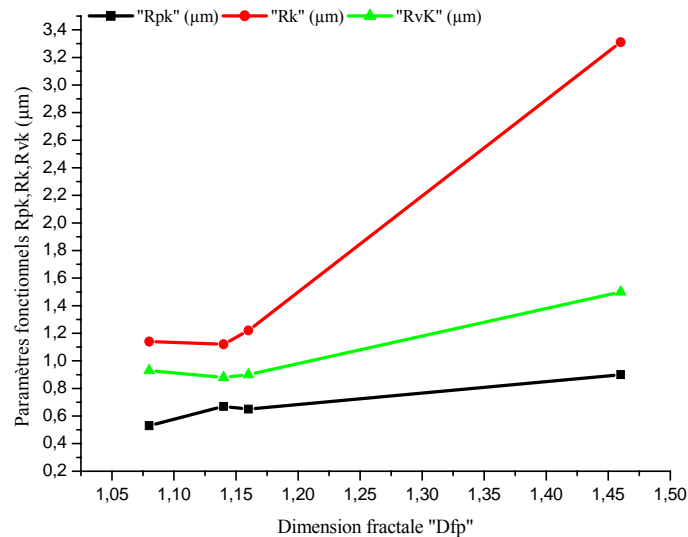


Figure IV.19 Variation des paramètres fonctionnels "Rk, Rpk, Rvk" en fonction de la dimension fractale "Dfp"

En outre les résultats des mesures 3D (Figure IV.20) ont la même allure que ceux obtenus par la mesure 2 D (Figure IV.18), où il apparaît une réduction de "Spk" et une augmentation de "Svk" pour un nombre de passe égal à 3 traduisant ainsi une amélioration de la surface.

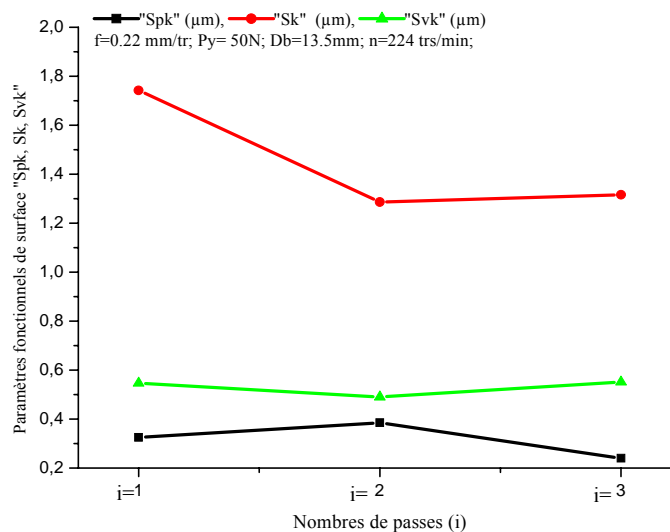


Figure IV. 20 Variation des paramètres fonctionnels surfaciques "Sk, Spk, Svk" en fonction du nombre de passes(i)

### IV.3.3.3 Effet sur le taux de longueur portante "Rmr"

Le taux de longueur portante "Rmr" est étroitement lié à la dimension fractale, plus faible est la dimension fractale "Dfp" (Figure IV.21) plus le taux de la longueur portante augmente. Lorsque le nombre de passe est important ( $i > 2$ ) la dimension fractale "Dfp" converge vers la valeur 1ce qui est énoncé dans les travaux [31, 51], de même la rugosité "Ra" diminue ( $Ra=0.27 \mu\text{m}$ ), d'où l'obtention d'une surface plus régulière et un accroissement de la longueur portante "Rmr".

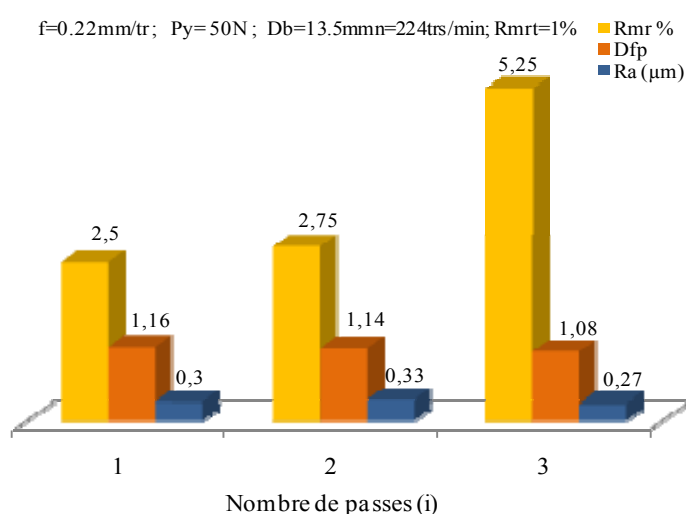


Figure IV. 21 Variation de "Rmr", "Dfp" et "Ra" en fonction du nombre de passes (i)

### IV.3.3.4 Effet sur l'indicateur d'isotropie "Str"

La variation du nombre de passes (i) et son effet sur l'indicateur d'isotropie est illustrée sur la figure IV.22. On constate, une amélioration importante de l'indicateur d'isotropie "Str" qui converge vers une valeur  $Str=0.7997$  soit  $\approx 80\%$  pour trois passes ( $i=3$ ). Ce qui est dû à l'application d'une faible charge associée à une grande avance de la bille diamètre ( $Db=13,5$ ) ayant pour effet d'atteindre une texture isotrope. Ce résultat est affirmé aussi par la diminution de la dimension fractale "Dfp" et la rugosité "Ra".

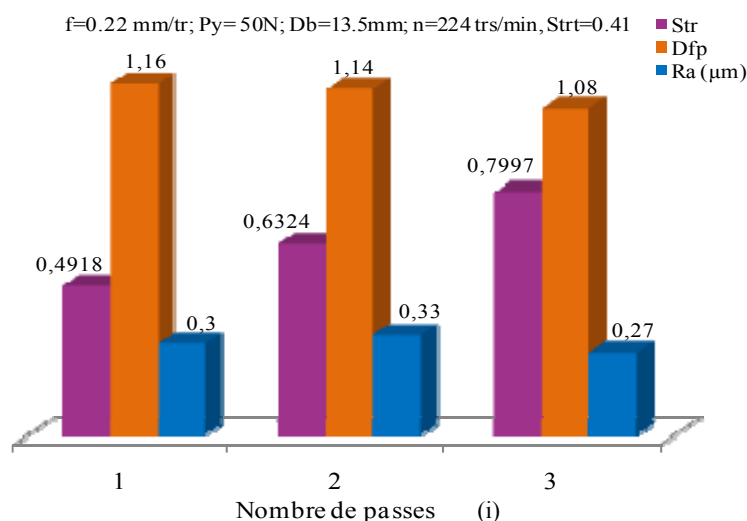
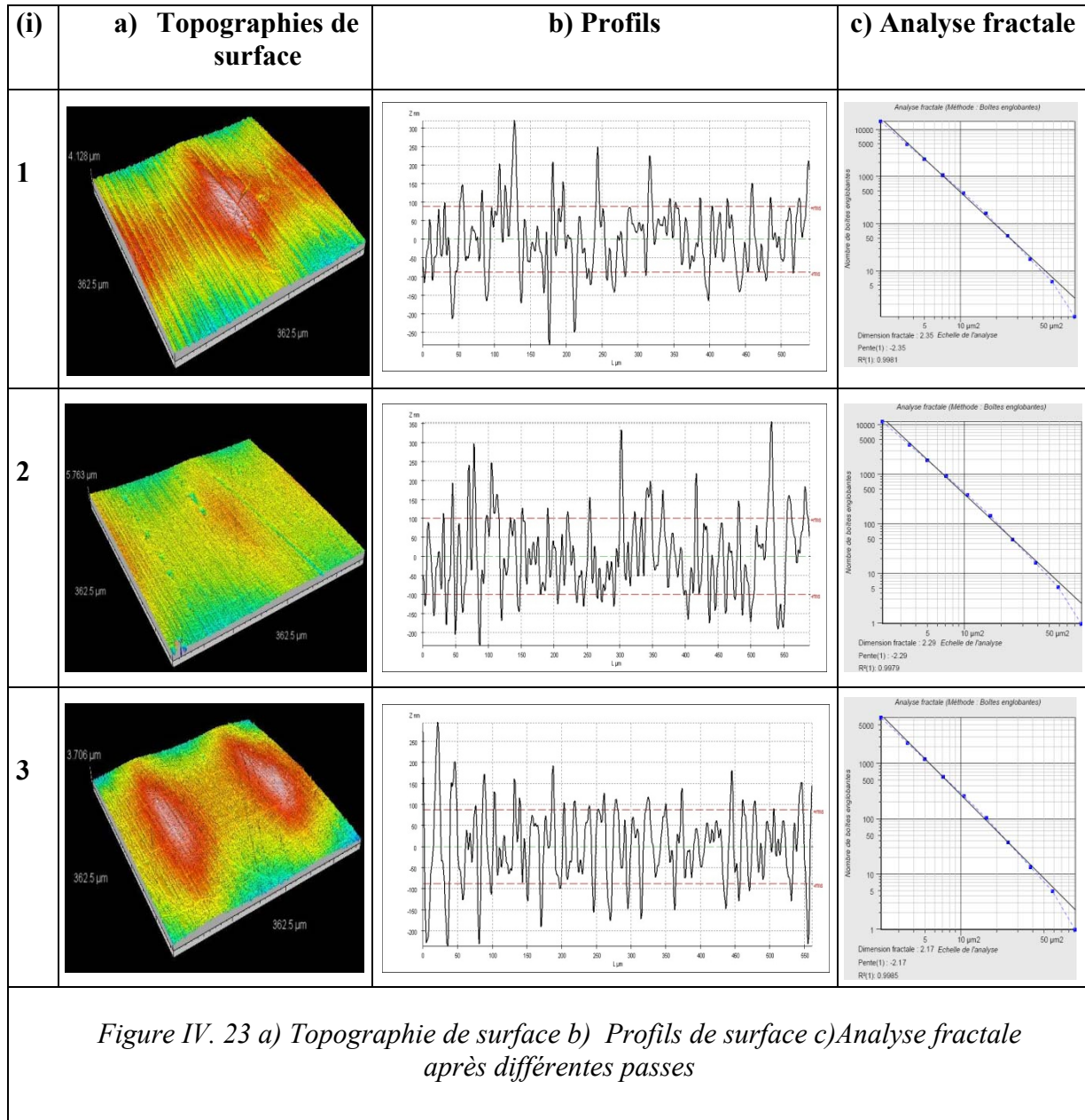


Figure IV. 22 Variation de "Str", "Dfp" et "Ra" en fonction du nombre de passes (i)

#### IV.3.3.5 Effet sur la topographie et profil de surface

Après le premier passage de la bille sur les couches superficielles (Figure IV.23a) la topographie de surface montre une réduction de la rugosité où la hauteur max des pics du profil atteint une valeur de  $0.30\mu\text{m}$  (Figure IV.23b) qui est inférieure à celle de la surface non traitée ( $1.25\mu\text{m}$ ). De même, la dimension fractale "Dfs" diminue jusqu'à 2.35 (Figure IV. 23c) vis-à-vis de la valeur initiale qui vaut 2.57, suite au passage de la bille qui offre une texture plus régulière par rapport à celle du tournage. A la suite du deuxième passage de la bille, il est constaté que la hauteur des pics de rugosité diminue progressivement offrant une topographie de surface plus régulière (Figure IV.23a), la hauteur des pics du profil se trouve dans l'intervalle ( $0.1\div 0.35\mu\text{m}$ ) (Figure IV.23b), aussi la dimension fractale "Dfs" qui vaut 2.29 soit une diminution de 0.06 (Figure IV.23c) par rapport à celle obtenue pour une passe. Lors de l'application de la troisième passe, on constate sur la topographie (figure IV.23a) une importante diminution des hauteurs de rugosité indiquant une amélioration de la qualité de surface dont les hauteurs des pics du profil varient entre  $0.1\mu\text{m}$  et  $0.25\mu\text{m}$  (Figure IV.23b). La dimension fractale "Dfs" qui se trouve diminuée de 0.12 (Figure IV.23c) par rapport à celle enregistrée pour deux passes ( $i=2$ ). Ceci s'interprète par le fait que lorsque la bille effectue un repassage de la surface sous trois passes ( $i=3$ ), elle corrige les imperfections survenues lors de la deuxième passe d'où l'amélioration remarquable de la surface.

Dans les trois cas, l'emploi d'une bille de grand diamètre sous de faibles charges associées à une grande avance abouti à une amélioration des couches superficielles, d'où une surface plus régulière et uniforme.



### IV.3.3.6 Effet sur la dureté superficielle "Hv"

La figure IV.24 présente l'évolution de la dureté des couches superficielles en fonction du nombre de passes. On peut remarquer que plus on augmente le nombre de passes ( $i=3$ ) plus la dureté croît et atteint une valeur de 55.1 Hv. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'emploi d'une bille de grand diamètre associé à une faible charge permet d'entasser plus de couches superficielles du matériau, ce qui a pour effet de consolider le matériau, résultats aussi affirmés dans les travaux [78].

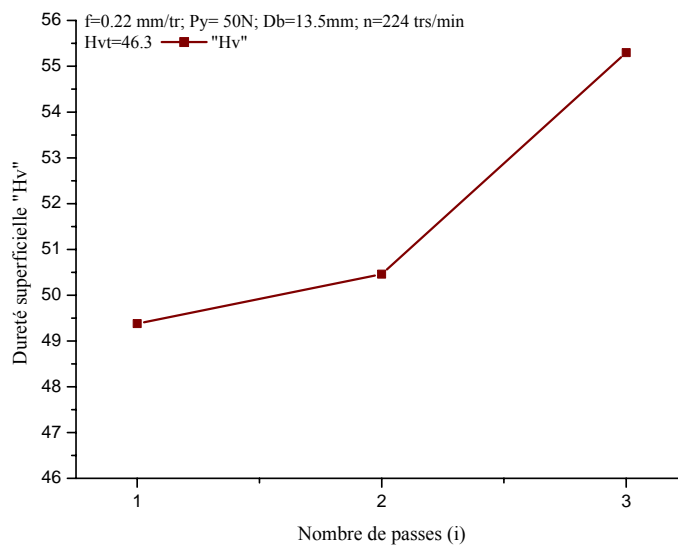


Figure IV.24 Influence du nombre de passes (i) sur la dureté superficielle "Hv"

## IV.4 Conclusion

Les conclusions qui peuvent être tirées de ce chapitre se résument en ce qui suit :

- Le modèle mathématique de Box-Behnken permet de prédire les paramètres de traitement les plus favorables afin d'atteindre une meilleure qualité de surface. Pour le matériau examiné, les efforts de pression moyens ainsi que les faibles avances lors de l'emploi de la bille de diamètre  $Db=13.5$  mm tendent à améliorer l'état de surface en l'occurrence "Ra" ;
- Le diamètre de la bille "Db" a un effet significatif sur la dimension fractale "Dfp" et par conséquent sur l'aspect de surface. En effet pour  $Db=13.5$ mm quelque soit la force de pression "Py" associé aux faibles avances, "Dfp" se trouve amélioré, pouvant atteindre une valeur inférieure à 1.08 pour les fortes charges ;
- Les faibles charges, combinées aux valeurs d'avance moyennes ou même maximales, appliquées avec un diamètre de bille moyen ( $Db=10$ mm) permettent de minimiser la dimension fractale "Dfs", d'où l'amélioration de la qualité de surface ;
- La bille de grand diamètre soumise à de faibles pressions et des vitesses d'avance réduites favorise l'élimination des pics engendrant la diminution du paramètre "Vmp". A l'inverse, la bille de petit diamètre sous les fortes charges combinées aux faibles valeurs d'avances permet d'améliorer les paramètres "Vmc" et "Vvv" ;
- La vitesse d'avance et le diamètre de bille ont respectivement les effets les plus dominants sur la l'aspect de texture de la surface, où les vitesses d'avance les plus faibles et les diamètres de billes les plus élevés sont les plus favorables avec un rapport d'aspect de texture de la surface "Str" tendant vers une valeur de 45% ;
- Les efforts de pression réduits ainsi que les fortes avances avec l'emploi de la bille de diamètre  $Db=13.5$  mm tendent à améliorer la dureté superficielle à une valeur de 50 Hv, soit une amélioration de 46% ;

Les résultats correspondant au régime optimal de la dimension fractale "Dfp" comparativement à ceux obtenus pour "Ra" ont montré qu'une avance importante associé aux faibles pressions et un nombre de passes supérieur à deux favorise un meilleur état de surface (Dfpmin), voire une meilleure topographie avec un accroissement de l'indicateur "Str" témoignant une texture isotrope pour le matériau considéré.



Par ailleurs, la dureté superficielle ainsi que les paramètres tribologiques sont améliorés où il est enregistré une augmentation du taux de la longueur portante "Rmr", une diminution du critère de rodage "Rpk" et du critère de lubrification "Rvk" qui reste toujours satisfaisant malgré la réduction de sa valeur. Ces résultats sont bénéfiques pour les surfaces fonctionnelles des pièces mécaniques en service.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

L'univers de la conception et de la fabrication mécanique est très vaste, où la concurrence entre industriels est très rude. Beaucoup de travaux et de nouvelles méthodes ont été développés afin d'améliorer la qualité de surface des pièces mécaniques. En effet, les couches superficielles des surfaces des pièces réalisées influent considérablement sur le fonctionnement d'un système mécanique. Lors de la fabrication, la qualité de surface d'une pièce est évaluée par sa rugosité qui met en relief des irrégularités dues aux procédés de mise en œuvre. Par ailleurs, une surface polie et lisse n'implique pas qu'elle remplit les conditions de fonctionnement qui assurent une vie saine au système tribologique. Cependant, il existe d'autres paramètres de rugosité qui sont nécessaires et qui contribuent à améliorer la durée de vie des pièces en service.

Les travaux de cette thèse ont été orientés vers l'introduction de l'approche fractale pour une meilleure caractérisation du fini de surfaces. Dans ce contexte, notre étude a été menée en s'appuyant sur une recherche bibliographique qui met en évidence, l'impact de la qualité de surface en tribologie, les différents paramètres (profil, surface) de rugosité, la liaison entre l'état de surface et sa fonction ainsi que l'importance de la topographie de surface en 3D. Une investigation sur la géométrie fractale, en particulier la dimension fractale "Df" qui a permis d'offrir une meilleure appréciation du profil de rugosité voire de la surface. Aussi, l'importance du procédé de traitement mécanique de surface dans l'amélioration des propriétés géométrique et mécanique des surfaces traitées a été mise en relief.

Les résultats obtenus dans ce travail reposent sur des essais expérimentaux qui ont été réalisés sur des échantillons en alliage d'aluminium, en opérant par le procédé de brunissage à la bille. Ce dernier permet de répondre à certaines exigences techniques imposées lors de la fabrication et la conception des structures mécaniques. Toutefois, l'effet de la déformation plastique dépend des propriétés du matériau. Par ailleurs, la méthodologie des plans d'expériences de Box-Behnken a été suivie lors de la réalisation des essais, ce qui a permis d'observer l'influence des paramètres du régime de traitement par brunissage ( $f$ ,  $P_y$ ,  $D_b$ ) sur les réponses étudiés ( $R_a$ ,  $D_{fp}$ ,  $H_v$ ,  $D_{fs}$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$ ,  $Str$ ). Ces plans peuvent constituer un outil d'envergure pour l'établissement des modèles mathématiques, permettant la prédiction des réponses et l'optimisation des régimes de traitement les plus adaptés avec un minimum d'essai.

Au regard des résultats expérimentaux, il apparaît que le procédé de brunissage, qui en agissant par déformation plastique des couches superficielles de l'alliage a permis d'améliorer la qualité de surface en l'occurrence la rugosité "Ra", la dimension fractale "Df" (profil, surface), l'indicateur d'isotropie "Str" et la microdureté "Hv", lorsque les paramètres du régime de traitement sont choisis convenablement. Les paramètres de volume (Vmp, Vmc, Vvv) prédits, contribuent à déterminer les propriétés tribologiques de la surface à réaliser, en offrant la possibilité de choisir le régime de traitement le plus adéquat. La simulation numérique présentée par les courbes d'isoréponses a contribué à l'analyse des effets des paramètres de traitement (facteurs d'entrée) sur les réponses étudiées.

Lors de l'application et la comparaison des régimes optimaux se rapportant à "Ra" et "Dfp" sous différentes passes, il a été montré que le régime correspondant à "Dfp" est le plus adapté, car il offre un compromis entre la rugosité "Ra" et la portance "Rmr", avec des paramètres fonctionnels acceptables (Rpk, Rk et Rvk) ainsi qu'une amélioration de la dureté superficielle "Hv". Par ailleurs, l'optimisation des paramètres du régime aide à améliorer l'indicateur d'isotropie "Str" jusqu'à une valeur de  $\approx 80\%$  pour trois passes ( $i=3$ ), menant à une surface de texture isotrope.

Au final, les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont permis de mieux apprécier l'état de surface au moyen de la dimension fractale "Df". Par ailleurs, le choix du régime de traitement est important pour garantir les paramètres fonctionnels et des paramètres de volume afin d'assurer le bon fonctionnement des surfaces des pièces en contact.

Les résultats de ce travail permettent d'ouvrir la voie vers des recherches plus exhaustives et les perspectives suivantes :

- Elargir l'étude en introduisant d'autres paramètres du régime de traitement (lubrification, fréquence de rotation,.....) ;
- il serait intéressant d'utiliser la fonction W-M (Weierstrass- Mandelbrot) pour simuler les profils de rugosité et envisager la reconstitution de la topographie de surface ;
- Etudier l'importance des paramètres de volume vis-à-vis de l'usure des surfaces travaillant en contact ;
- Appliquer cette approche pour d'autres matériaux (cuivre ; acier).

## Références

- [1] pierre. S (2009), Influence de la rugosité en fatigue de contact – rôle du rodage, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique, INSA Lyon, France, p33.
- [2] Minet. C, (2009). Lubrification mixte dans les étanchéités dynamiques : application aux garnitures mécaniques d'étanchéité, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Aéronautique, Université de Poitiers, France.
- [3] Bigerelle. M, (2016). Un système expert pour l'analyse des surfaces rugueuses, Mesrug System, <http://www.utc.fr/mesrug/>, [roberval.utc.fr/IMG/pdf/plaquette.version4.pdf](http://roberval.utc.fr/IMG/pdf/plaquette.version4.pdf).
- [4] H. Hamadache, L. Laouar, N.E. Zeghib, K. Chaoui, (2006), characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, journal of materials Technology 180- p 130-136.
- [5] Renouf. M (2010), Techniques d'analyses et d'observation appliquées à la tribologie / Référence 42466210 Réf TRI2800.
- [6] Hans Jörg. M, Bergmann. E, Gras. R, Analyse et technologie des surfaces: couches minces et tribologie, 2003, ISBN 2880744547 URL <https://books.google.fr/books>.
- [7] Noël Brutinière (2015). Introduction à la Tribologie, Institut Pprime-Futuroscope, Poitiers, France.
- [8] Salah Mezlini (2014) Tribologie, ENIM. <http://www.enim.tn/portail/claroline/course/index.php cid=TRIBO>.
- [9] Kane Malal, (2003). 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.
- [10] Michel Barquins (1994), tribologie la science pour comprendre et maîtriser le frottement et l'usure, N°764.
- [11] Valérie Duchâteau, Pierre Lambert, Benoît Lagrange, Elisabeth Persenaire (2002) Les Phénomènes de Frottement, Service de Mécanique analytique et cfao, <http://fr.wikipedia.org/wiki/frottement>.
- [12] M. Bourebia (2010). Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, mémoire de magistère, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba,
- [13] LACHEZE Vladimir, DAS, Noël, (2015). Les Frottements secs et visqueux. <http://gaetan.delacheze.free.fr/TIPE-TPE/Frottements/frottements.ppt>.

- [14] Gérald Zambali, Léo Vencent (1998). Matériaux et contact, Une approche tribologique, Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes.
- [15] J. Blouet, Usure, Techniques de l'Ingénieur (1978), B585, p 1 – 34.
- [16] Claudiu Constantin Ionescu (2013). Caractérisation des mécanismes d'usure par tribo-corrosion d'alliages modèles Ni-Cr. Ecole Centrale Paris,
- [17] Notions de tribologie, [http://58consmecha.free.fr/Cours%20a%20Pdf/contact\\_tribologie.pdf](http://58consmecha.free.fr/Cours%20a%20Pdf/contact_tribologie.pdf)
- [18] René Gras (2008). Tribologie principes et solution industrielles » l'usine nouvelle, Duno, Paris.
- [19] J.M.Georges (2000) Frottement, usure et lubrification. Eyrolles, CNRS Editions.
- [20] Etcheverry Bernard (2006). Adhérence mécanique et tribologie des revêtements composites NiP Talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite, École doctorale Matériaux Structure Mécanique.
- [21] SJ Shaffer (2013). Introduction to the Basics of Tribology, Tribology 101 Bruker- TMT.
- [22] Mounira.Bourbia, Lakhdar. Laouar, (2010). Importance de la rugosité de surface dans un contact mécanique, Première Conférence Internationale sur les Mines et la Métallurgie 10-12 Mai.
- [23] État de surface, Wikipédia, l'encyclopédie libre. <http://fr.wikipedia.org>. juin 15-2015
- [24] René Kamguem, (2013). inspection automatique et sans contact de la rugosité des pièces usinées, école de technologie supérieure université du Québec.
- [25] <http://www.mesurez.com/mesure-rugosite-principe-application-solution.html>.
- [26] Etude des produits et des outillages STS IPM, 2009-jgb-états-de surface.odt.
- [27] P.Gailly, (2011). Study of evolution of optical materials surface state under ion bombardment to low energy, Liège University - Liège Space Centre.
- [28] Mesure des états de surface - Sandvik Coromant, [http://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/knowledge/materials/measuring\\_surfaces](http://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/knowledge/materials/measuring_surfaces).
- [29] la mesure des états de surface <http://jm.karrer.free.fr/documents/ES1.doc>.
- [30] François Blateyron, Digital Surf mesures 787 - septembre 2006 - [www.mesures.com](http://www.mesures.com).
- [31] Cornet A, Deville J.P, (1998). Physique et ingénierie des surfaces EDP Sciences, P 327-330.
- [32] MEC 3330, Transmission de puissance, Tribologie, Ecole polytechnique de Montréal.

- [33] Norme ISO 13565-2: Méthode Caractérisation des hauteurs par la courbe de taux de longueur portante (courbe d'Abbott), available at: [http://www.mip2.insa-lyon.fr/Etats de surface/méthodes](http://www.mip2.insa-lyon.fr/Etats%20de%20surface/méthodes).
- [34] M. F. Jensen, L. H. Christensen, Jan. P. Per Kjeldsteen and M. E. Benzon. Evaluation de la topographie 3D des surfaces mécaniques', Danois, Centre pour l'analyse des surfaces, Inst. Technol.
- [35] F. Blateyron, New 3D Parameters and Filtration Techniques for Surface Metrology. [http://www.qualitymag.com/ext/resources/QUAL/Home/Files/PDFs/New3DParameter sandFiltrationTechniquesforSurfaceMetrology.pdf](http://www.qualitymag.com/ext/resources/QUAL/Home/Files/PDFs/New3DParameter%20and%20FiltrationTechniquesforSurfaceMetrology.pdf).
- [36] Jean-Christophe MICHEL, Historique et généralités sur les fractales, [www.gecif.net](http://www.gecif.net)
- [37] Christiane Hoffmann (2009). Une brève explication de la géométrie fractale [www.primary-care.ch](http://www.primary-care.ch/Archives%203%20Numéro10) Archives 3 Numéro10.
- [36] Josiane, La Joie de la géométrie fractale, juin (2006).
- [37] <http://fractales.perso.sfr.fr/fractales/fractales.html>
- [38] Mandelbrot B, 1983. La géométrie fractale de la nature. Freeman, New York, 1-83.
- [39] J. Lopez, G. Hansali, H. Zahouani, J.C. Le Bosse And T. Mathia, (1995). 3D Fractal-Based Characterisation For Engineered Surface Topography, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35, No.2, p. 211-217,
- [40] J. Lopez, G. Hansali, J. C. Le Bosse et T. Mathia (1994). Caractérisation fractale de la rugosité tridimensionnelle d'une surface, J. Phys. III France 4, p 2501-2219
- [41] I. A. El-Sonbaty, U. A. Khashaba, A. I. Selmy and A. I. Ali (2008) Prediction of surface roughness profiles for milled surfaces using an artificial neural network and fractal geometry approach, J. Mater. Process. Technol, 200, p 271–278.
- [42] A. Majunder, B. Bhushan (1990), Role of fractal geometry in roughness characterization And contact mechanics of surfaces, ASME J. tribology, 112 p 205-216.
- [43] Majunder A., Tien CL., (1990). Caractérisation fractale et la simulation des surfaces Rugueuses, Porter, 136, p 313-327.
- [44] T. Karaulova, I. Poljantshikov, E. Shevtshenko and S. Kramarenko, (2014). Fractal approach for Manufacturing project managements, Mechanics , 20, p 352–359.
- [45] Quiniou J.F.(1995). Description et caractérisation de la topographie de surface à l'aide d'outils issus de la géométrie Euclidienne et fractale, thèse de doctorat, faculté des sciences de l'ingénieur, Besançon.

- [46] S. Ganti, B. Bhushan (1995). Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces, *Wear* 180 p 17-34.
- [47] Paggi M & C.He Q, 2016. Evolution of the free volume between rough surfaces in contact, *Wear*, Vol 336, p 86-95.
- [48] Song Z & Komvopoulos K, (2014). Contact mechanics analysis of oscillatory sliding of a rigid fractal surface against an elastic–plastic half-space, *Journal Philosophical Magazine* Volume 94, Issue 28, p 3215-3233.
- [49] Bigerelle M & al,( 2013). Signature contacts tribological roughness calculated by a new peak radius of curvature estimation on fractal surfaces, *tribology international* Volume 65 , p 235-247.
- [50] Bigerelle M., 2014. Un système expert pour l’analyse des surfaces rugueuses, *Mesrug.System*,<http://www.utc.fr/mesrug/roberval.utc.fr/IMG/pdf/plaquette>.
- [51] Y. Irem and al, (1993), fractal precision models of lathe-type of turning machines, *DAC*, vol 65 p 501-513.
- [52] Khawaja Z (2014). Analyse des états de surface en science des matériaux: caractérisation multi-échelles par ondelette et Détermination de l'anisotropie des surfaces, thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France.
- [53] W.GRZESIK et S.BROL (2003), Hybrid approach to surface roughness evaluation in multistage machining processes, *Journal of Materials Processing Technology* Vol 134, P 265–272.
- [54] Myung Chang Kang, Jeong Suk Kim, Kwang Ho Kim (2005), Fractal dimension analysis of machined surface depending on coated tool wear, *Surface and Coatings Technology* Vol 193, P 259–265.
- [55] D-Goerke et K.Willner (2007) Normal contact of fractal surfaces- Experimental and numerical investigations, *Wear* Vol 264, P 589–598.
- [56] Yin X & Komvopoulos K (2010) An Adhesive Wear Model of Fractal Surfaces in Normal Contact. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, N°7-8, p 912 – 921.
- [57] Bigerelle M\_& al (2013). Signature contacts tribological roughness calculated by a new peak radius of curvature estimation on fractal surfaces, *tribology international* Volume 65 , p 235-247.

- [58] Ye-JunZhu, Wen-FengDing, Jiu-HuaXu, Yu-CanFu, (2016). Surface fractal evolution of fracture behavior of polycrystalline cBN grains in high-speed grinding, *Int J Adv Manuf Technol* 76 p 1505–1513.
- [60] Qiuping Y, Jianjun S, Bo Yu & Chenbo Ma, (2016). A Fractal Model of Mechanical Seal Surfaces Based on Accelerating Experiment, *Journal Tribology Transactions*.
- [61] Paggi M et C.He Q (2016). Evolution of free volume between rough surfaces in contact, *Wear*, Vol.336, p 86-95.
- [62] Bourebia M. Laouar L (2015). Influence des paramètres de traitement par brunissage sur la texture de la surface, *IRevue*, proceeding du 22ème Congrès Français de Mécanique, (Irevue, AFM), Lyon, France.
- [63] A.C.E.MENDER, (1978). La technique du galetage, métaux, déformation N°47.
- [64] Hamadache H., Laouar L & Chaoui K (2006). Influence Des Traitements Mécaniques De Surface sur La Rugosité, La Dureté et la Résistance a L'usure d'un Acier (RB40), *Revue des sciences et de la technologie Synthèse* N° 15, p 120-127.
- [65] H.Hamadache, L.Laouar, N.E.Zeghib, K.Chaoui, (2006) Characteristics of Rb40 steel superficial layer under Ball and roller burnishing, *Journal of Materials Processing Technology* vol 180, p130–136.
- [66] L. Laouar, H. Hamadache, S.Mekhilef (2005). 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, pp.
- [67] Deepak Mahajan, Ravindra Tajane,(2013) A review on Ball Burnishing Process *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol 3.
- [68] M. Bourebia, L.Laouar et A. Hamadache (2013) Amélioration de la qualité de surface par le procédé de brunissage, *AFM, Maison de la Mécanique, France(FR)-12-20 Acte du 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013*, I-Revues <http://irevues.inist.fr/utilisation>,
- [69] F.Gharbi, S. Sghaier, K. J. Al Fadhalah, and T. Benameur (2011). Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates, *JMEPEG*, Vol 20(6).
- [70] Kazimiera Konefal et al (2013) Improved corrosion resistance of stainless steel X6CrNiMoTi17-12-2 by slide diamond burnishing, *journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 11, P 1997-2004.



- [71] Hamadache H, Zemouri Z, Laouar L & Dominiak S (2014) Improvement of surface conditions of 36 Cr Ni Mo 6 steel by ball burnishing process. *Journal of Mechanical Science and Technology* 28 (4), p 1491-1498.
- [72] Hiegemann L., Weddeling C., Ben Khalifa N & Tekkaya A.E (2015) Prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 217, P 193-201.
- [73] Hiegemann L., Weddeling & Erman Tekkaya A (2016). Analytical contact pressure model for predicting roughness of ball burnished surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 232, p 63-77.
- [74] Deepak Mahajan, Ravindra Tajane (2013) A Review on Ball Burnishing Process *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 3, Issue 4.
- [75] ElAxir M H., & al (2008). Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing, *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 435–442.
- [76] N.S.M. El-Tayeb , K.O. Low & P.V. Brevern, (2007) “Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061”, *Journal of Materials Processing Technology* 186 272–278.
- [77] Ugur Esme, (2010) “Use of grey based Taguchi method in ball burnishing process for the optimization of surface roughness and microhardness of AA7075 aluminum alloy”, *mtaec9*, 44 (3), 129.
- [78] Dabeer PS, Purohit GK (2010) Effect of ball burnishing parameters on surface roughness using surface roughness methodology, *production engineering and management*, p 111-116.
- [79] M. h. el-axir & M. m. el-khabeery (2014) ball burnishing process optimization for aluminum alloy using taguchi technique, *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)* Vol. 3, Issue 1, p 1-14
- [80] Elisabeth Weidmann, Anne Guesnier, Struers A/S, Copenhagen, Denmark
- [81] Roger Develay (1992). *Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés – Principaux alliages industriels, techniques de l'ingénieur Référence M440 v2.*
- [82] Dietrich R., Garsaud D (1981) *Précis de méthodes d'usinage* Edition Fernand Nathan, Paris.
- [83] Sadog, Sadom C (1991) *Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité*, AFNOR technique.

- [84] Atkinsona.C (1988). Recent developments in the methods of optimum and related experimental designs, *Inst. Stat.Rev*, vol. 56, p 99-115.
- [85] Laouar L, Hamadache H, Saad S, Bouchelaghem A & Mekhilef S (2009). Mechanical surface treatment of steel-Optimization parameters of regime, *Physics Procedia* 2, p 1213-1221.
- [86] Goupy J , 1999. Plan d'expériences pour surface de réponse, collection Dunod.
- [87] Adel Mahmood Hassan (1996) The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals, Mechanical Engineering Department, Jordan University of Science and Technology, Irbid, Jordan.
- [88] Murray, R.Spiegel, 1983. Probabilité et statistique, Serie schaum, Paris.

---

## *ANNEXES*

## Annexe A

## Paramètres de rugosité selon la nouvelle norme ISO 25178

Les nouveaux paramètres de l'ISO 25178		
	Paramètres 2D (normes ISO 4287, ISO 13565-1 et 2)	Paramètres surfaciques (future norme ISO 25178)
Paramètres d'amplitude	Ra, Pa, Wa (Ecart moyen arithmétique du profil)	Sa (Rugosité moyenne arithmétique de la surface)
	Rq, Pq, Wq (Ecart moyen quadratique du profil)	Sq (Rugosité moyenne quadratique de la surface)
	Rsk, Psk, Wsk (Facteur d'asymétrie du profil)	Ssk (Facteur d'asymétrie de la surface)
	Rku, Pku, Wku (Facteur d'aplatissement du profil)	Sku (Facteur d'aplatissement de la surface)
	Rp, Pp, Wp (Hauteur maximale de saillie du profil)	Sp (Hauteur maximale des pics)
	Rv, Pv, Wv (Profondeur maximale de creux du profil)	Sv (Profondeur maximale des creux)
	Rt, Pt, Wt (Hauteur totale du profil)	St remplacé par Sz
	Rz (Hauteur maximale du profil)	Sz (Hauteur maximale de la surface, du plus haut point à la plus profonde vallée)
	Rc (Hauteur moyenne des éléments du profil)	Pas d'équivalent
	Rsm (Largeur moyenne des éléments du profil)	Pas d'équivalent
	Rdq (Pente moyenne du profil)	Sdq (Pente moyenne de la surface)
Paramètres de taux de portance	Rmr, Pmr, Wmr (Taux de longueur portante du profil)	Smr (Taux de surface portante)
	Rdc, Pdc, Wdc (Différence de hauteur de coupe du profil)	Sdc (Différence de hauteur de surface portante)
	Pas d'équivalent	Smc (Hauteur de taux de surface portante)
Paramètres d'isotropie	Pas d'équivalent	Str (Rapport d'aspect de la texture de surface)
	Pas d'équivalent	Sal (Longueur d'autocorrélation de la surface)
	Pas d'équivalent	Std (Direction de texture de la surface)
Paramètres fonctionnels	Rk, Rpk, Rvk	Sk, Spk, Svk
	Pas d'équivalent	Vmp, Vmc, Vvc, Vvv (Paramètres de volume)

## Annexe B

## Principe de mesure de la microscopie confocale

La microscopie confocale est une technique de mesure optique consistant à rechercher les maximums de l'intensité lumineuse pour en dégager une information sur le relief de l'objet étudié. La totalité du relief est obtenue en balayant l'ensemble des plans focaux (Figure B.1). Le principe de l'interférométrie est d'évaluer la différence de chemin optique entre un rayon incident de référence et un autre rayon émis par la même source mais reflété par l'échantillon analysé.

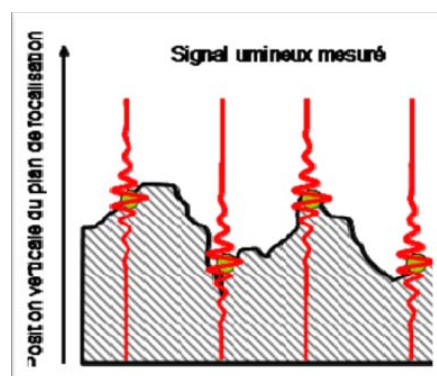


Figure B.1 Relief obtenue en balayant des plans focaux [2]

Une combinaison de cette technique et de la précédente en un seul procédé de mesure est réalisée en autorisant le déplacement de la focale d'un montage interférométrique. Pour ce faire, le microscope interférométrique confocal CCI 6000 développé par Taylor Hobson Ltd fait appel à un capteur piezo-électrique. La Figure B.2 détaille le fonctionnement de l'appareil la précision des résultats est de l'ordre du millièbre de l'étendue de mesure choisie [2].

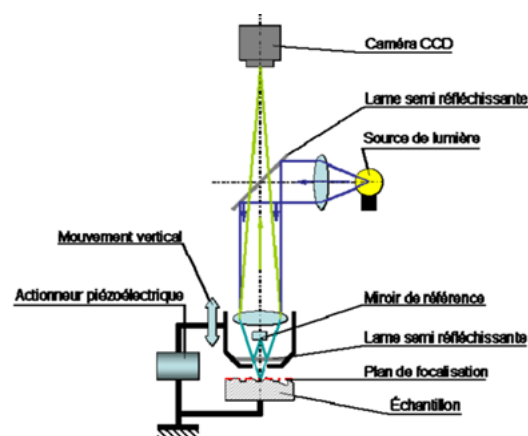


Figure B.2 Montage interférométrique confocal [2]

## Annexe C

### Les fractales

*((Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit. ))*

Gaston Bachelard

#### Introduction

De nos jours la maîtrise de l'état des surfaces est un facteur primordial pour les industriels d'où la nécessité d'une caractérisation plus précise en fonction des domaines et des besoins. Cependant les recherches actuellement vont vers l'exploration des paramètres de rugosité les plus pertinents qui relient la cartographie d'une surface aux différents phénomènes tribologiques (frottement, usure.....) lors de sa mise en service. En effet les méthodes conventionnelles de caractérisation des surfaces emploient les paramètres statistiques qui dépendent de la résolution de l'instrument de mesure ou de la longueur de l'échantillon tandis que la présente méthode utilise les paramètres fractals qui sont indépendants de l'échelle de mesure. Contrairement aux paramètres statistiques conventionnels, les paramètres fractals fournissent la structure de la rugosité à n'importe quelle échelle de longueur et peuvent donc faciliter l'étude d'un phénomène extérieur à toutes ses balances appropriées de longueur. Dans ce contexte l'approche fractale a été abordée pour apprécier l'état des surfaces traitée. Cette approche est à la base de développements intéressants pour la modélisation de la rugosité et la modélisation des contacts entre surfaces.

#### Détermination de la dimension fractale

La dimension fractale est une dimension non-entière, définie par " $D_f$ " pouvant prendre des valeurs fractionnaires ( $1 < D_{fp} < 2$ ) ( Bhushan, 2001 ) pour une courbe et ( $2 < D_{fs} < 3$ ) pour une surface. La dimension fractale constitue un paramètre pertinent pour l'industrie automobile permettant de différencier la brillance des surfaces des tôles ainsi que les irrégularités de surface. En effet, c'est un paramètre qui reflète de façon claire le profil d'une surface car il prend en considération la pente de chaque aspérité.

La dimension fractale peut être déterminée à partir de la fonction de densité spectrale de puissance, c'est une fonction très importante pour l'analyse de la rugosité de surface, elle est calculée comme étant le carré de la transformée de Fourier du profil de la surface et elle est définie par l'équation suivante :

$$S(\omega) = \frac{G^{2(Df-1)}}{\omega^{(5-2Df)}} \quad (\text{C.1}) \quad [31]$$

Où Df: dimension fractale

G: paramètre d'échelle

$\omega$ : fréquence 1/L

L: longueur du profil

La plupart des paramètres statistiques peuvent être obtenues à partir du spectre. L'un des paramètres pertinent pour cette étude est la dimension fractale Df. Connaissant la longueur d'évaluation (L) et la résolution de l'appareil de mesure (Figure C1), ce paramètre peut être calculé à partir des équations suivantes:

$$m_0 = \int_{\omega_l}^{\omega_h} S(\omega) d\omega = \frac{G^{2(Df-1)}}{2 \ln \gamma(4-2Df)} \left( \frac{1}{\omega_l^{(4-2Df)}} - \frac{1}{\omega_h^{(4-2Df)}} \right) \quad (\text{C.2})$$

$$m_4 = \int_{\omega_l}^{\omega_h} \omega^4 S(\omega) d\omega = \frac{G^{2(Df-1)}}{2 \ln \gamma 2Df} (\omega_l^{2Df} - \omega_h^{2Df}) \quad (\text{C.3})$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Rq} = \sigma &= \sqrt{\int_{\omega_l}^{\omega_h} 2S(\omega) d\omega} \\ \text{Rq} = \sigma &= \sqrt{2m_0} \end{aligned} \right\} [27]$$

$$Ek = \frac{m_4}{\sigma^4}$$

$$\omega_l = \frac{1}{Nd_0}$$

$$\omega_h = \frac{1}{2d_0}$$

$\omega_h$  : basse fréquence  $m_2$

$\omega_h$  : haute fréquence (fréquence de Nyquist)

L : longueur d'évaluation

$d_0$  : distance d'échantillonnage

N : nombre de points mesurés

$$\omega_h \gg \omega_l, \quad m_4 = \omega_h^4$$

$$m_0 = Rq = \log \frac{\omega h}{\omega l}$$

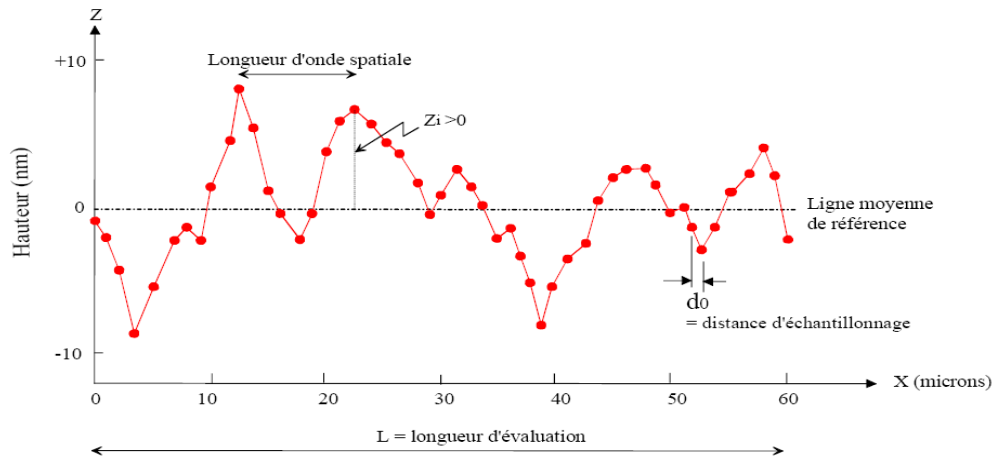


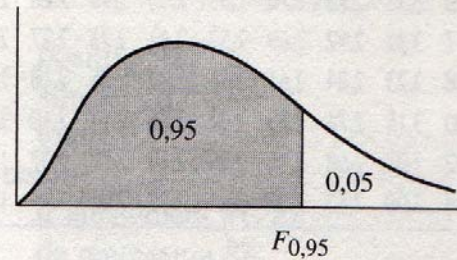
Figure C1 Représentation schématique d'un profil mesuré [27]



**Annexe D**

**Tableau de Fisher**

95-ièmes percentiles 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	$\infty$
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

---

# ***TRAVAUX SCIENTIFIQUES***

**Publication Internationale :**

1- **M. Bourebia**, L. Laouar, H. Hamadache & S. Dominiak ; **Improvement of surface finish by ball burnishing: approach by fractal dimension** ; Surface Engineering ISSN: 0267-0844, DOI 10.1080/02670844.2016.1232778, Received 9 May 2016; accepted 31 August 2016.

**Publication Nationale :**

1- **Mounira Bourebia**, Hichem Bounezour, Lakhdar Laouar, Hamid Hamadache ; **Evaluation de la Qualité de surface par la Dimension Fractale et les Paramètres de Volume** ; Revue Synthèse N°33, juin 2016.

**Communications Internationales avec Proceeding**

1- **M. BOUREBIA**<sup>a</sup>, Pr L.LAOUAR<sup>b</sup> et Dr A. HAMADACHE<sup>c</sup>, **Amélioration de la qualité de surface par le procédé de brunissage**, I-Revues <http://irevues.inist.fr/utilisation>, AFM, Maison de la Mécanique, France(FR)- 2013-12-20 Acte du 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013.

2- **M. Bourebia**, L. Laouar, H. Bounezour ; **Influence des paramètres de traitement par brunissage sur la texture de la surface** ; I-Revues <http://irevues.inist.fr/utilisation>, AFM, Maison de la Mécanique, France(FR)- Acte du 22ème Congrès Français de Mécanique, du 24 au 28 août 2015, Lyon ; France(FR).

**Communications Internationales**

1- **M. Bourebia**, L.Laouar, H.Hamadache, A.Bouchelaghem ; **Traitement Mécanique de surface - Effet sur la dureté superficielle d'un alliage d'aluminium** ; 8<sup>ème</sup> Journée d'étude Technique-JET du 28-29-30 Avril/2014 Marrakech/ Maroc.

2- Lakhdar LAOUAR, H. BOUNEZOUR, **M. BOUREBIA** and H. HAMADACHE ; **Mechanical surface treatment of steel- Influence and optimisation of process parameters** ; METALLURGICAL ENGINEERING CONFERENCE METECH'14, 17- 19 Nov. 2014, Istanbul– Turkey.

3- Hichem Bounezour, **Mounira Bourbia**, Lakhdar Laouar; **Analyse du procédé de finition de surface par déformation plastique superficielle - Approche par les plans d'expériences de Taguchi**; 3èmes Journées Scientifiques Franco-Maghrébines : Caractérisation des Matériaux Complexes (JSFM-CMC 2016) du 28 au 30 novembre 2016 Thiais (France). Voir Proceedings\_JSFM-CMC\_Paris\_2016 pages 43-46.

4- **M. Bourebia**, H. Bounazour, L. Laouar, H. Hamadache; **Traitement Mécanique de Surface d'un alliage d'aluminium - Effet sur le paramètre Rv**; 3èmes Journées Scientifiques Franco-Maghrébines : Caractérisation des Matériaux Complexes (JSFM-CMC 2016) du 28 au 30 novembre 2016 Thiais (France). Voir Proceedings\_JSFM-CMC\_Paris\_2016 pages 47-49

#### **Communication Nationale**

1- **Mounira Bourebia**<sup>1</sup>, Lakhdar Laouar<sup>2</sup> et Ilyes khelf<sup>3</sup>; **Procédés d'usinage- Effet sur un contact mécanique**; Congrès Algérien de Mécanique Guelma 14-17 Novembre 2011

