

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJ MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année: 2017/2018

Faculté des Sciences de l'Ingénierat

Département de Génie Mécanique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

Etude de l'Influence du comportement vibratoire du système pièce-outil-machine sur la qualité de surface

Spécialité: Génie Mécanique

Option: Génie Mécanique

Par:

TOUATI Sofiane

DIRECTEUR DE THESE : MEKHILEF. Slimane MCA Université Annaba

Devant le jury

MERZOUG Bachir	Prof	Université d'Annaba	Président
MEKHILEF Slimane	MCA	Université d'Annaba	Rapporteur
HADJAJ AOUAL Ilyes	Prof	Université d'Annaba	Examineur
MEZIANI Salim	Prof	Université de Constantine 1	Examineur
FOUATHIA Athmane	MCA	Université de Constantine 1	Examineur

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu, à mon Directeur de Thèse, Dr MEKHILEF SLIMANE pour m'avoir donné la possibilité de réaliser cette thèse au sein de Laboratoire de Mécanique Industrielle, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar Annaba.

Je remercie vivement le Professeur MERZOUG Bachir pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury de thèse.

Je remercie aussi le Professeur HADJAJ AOUAL Ilyes, le professeur MEZIANI Salim, et le docteur FOUATHIA Athmane (MCA) pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mon travail et pour avoir accepté d'être examinateurs de ma thèse.

Je remercie également toute l'équipe du laboratoire de Mécanique et structure 'LMS', département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma qui m'ont bien accueilli et en particulier le Docteur Kribes Nabil qui m'a apporté leur aide lors de la réalisation de mes essais.

Je suis très reconnaissant envers Madame Hsainia Zahia, Docteur au laboratoire de Mécanique et structure 'LMS', Université 08 Mai 1945 de Guelma qui m'a beaucoup aidé dans le traitement de mes résultats et la méthodologie de mon article de publication.

Je remercie le professeur Laouar Lakhdar responsable de la formation doctorale et le professeur Bouchlaghem Mahmoud Abdelaziz directeur de laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI).

Mes remerciements à tous les membres du Département de Génie Mécanique et du Laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI) de l'Université Badji Mokhtar, Annaba.

Un grand merci à l'ensemble mes collègues et amis : Ilyes, Salah, Fakhreddine, Mohamed Lemouchi, Yacine Mohamed, Reda, Nacer, Fethi Hakim, hakou, Yazid, qui ont tous contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réussite de cette thèse.

Enfin, je remercie ma famille et particulièrement mes parents papa et maman, mon épouse AMNA, mon fils Mohammed Racim, mes frère Bachir, Raouf, Ibtissem, Wafa, Manel, Ma tante

REMERCIEMENTS

Kadija, Mon oncle Amor, et toute la famille TOUATI et ZEMMOURI, qui m'ont apporté l'amour, le soutien et les encouragements dont j'avais besoin pour mener à bien cette aventure.

RESUME

RESUME

La qualité de surface est une exigence essentielle des consommateurs en raison de son impact sur la performance des produits.

Le but de ce travail est de trouver une corrélation entre la rugosité de surface, les paramètres d'usinage (vitesse, avance et profondeur de passe) et les vibrations de l'outil de coupe.

Une étude expérimentale a conduit à déterminer les effets des paramètres de coupe et les vibrations d'outil sur la rugosité de surface en tournage lors de l'usinage de l'acier 32CrMoV12-28 avec un outil en carbure métallique YT15. Un modèle quadratique linéaire avec interaction reliant la rugosité (R_a , R_z) aux différentes combinaisons de régime de coupe et les vibrations de l'outil ont été élaborés et caractérisés par l'analyse de variance ANOVA. La régression linéaire Multiple et la méthodologie de la surface de réponse ont permis d'exprimer le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe et les vibrations d'outil, l'application de cette technique statistique pour la prédiction de la rugosité montre que l'avance est le facteur le plus dominant suivi par la vitesse de coupe, alors que la profondeur de passe et les vibrations d'outil ont un effet secondaire. Ce modèle peut présenter un intérêt certain pour l'optimisation du processus de coupe.

Mots clés : Usinage, Tournage, Paramètres de coupe, Rugosité de surface, analyse de variance (ANOVA), méthodologie de la surface de réponse (RSM), vibrations d'outil.

ABSTRACT

Surface quality is an essential requirement of consumers because of its impact on product performance.

The purpose of this work is to find a correlation between surface roughness, the machining parameters, and the cutting tool vibrations.

In this paper, we present an experimental study to determine the effect of the cutting conditions and tool vibration on the surface roughness in finish turning of 32CrMoV12-28 steel, using carbide cutting tool YT15. For that purposes, a linear quadratic model in interaction of connecting surface roughness (R_a , R_z) with different combinations of cutting parameters such as cutting speed, feed rate, depth of cut and tool vibration, in radial and in tangential cutting force directions (V_y) and (V_z) is (a quadratic model) elaborated, In order to express the degree of interaction of cutting parameters and tool vibration, a multiple linear regression and response surface methodology are adopted; The application of this statistical technique for predicting the surface roughness shows that the feed rate is the most dominant factor followed by the cutting

speed. However, the depth of the cut and tool vibrations have a secondary effect. The presented models have some interest since they are used in the cutting process optimization.

Keywords: Machining, Turning, Cutting Parameter, Surface Roughness, Analysis of Variance (ANOVA), Response Surface Methodology (RSM), Tool vibration.

ملخص

جودة السطح عند عملية القطع هي شرط أساسي للمستهلك لتأثيرها الكبير على أداء المنتج. الهدف من هذه الأعمال التطبيقية هو إيجاد علاقة بين خشونة السطح، عوامل القطع واهتزازات أداة القطع.

دراسة تجريبية أدت إلى تحديد آثار عوامل القطع و اهتزازات أداة القطع على خشونة السطح، خلال عملية الخراطة باستعمال الفولاذ 32CrMoV12-28 مع أداة القطع YT15. استعملنا نموذج تربيعي خطي مع مختلف التفاعلات لربط علاقة بين خشونة السطح مع عوامل القطع و اهتزازات أداة القطع. الانحدار الخطي و منهجية استجابة السطح (RSM) سمحا لنا بالتعبير على درجة تأثير كل عامل من عوامل القطع و اهتزازات أداة القطع، تطبيق تقنية (ANOVA) بين لنا أن عامل التقدم عند القطع هو العامل الأكثر تأثير على خشونة السطح، يليه عامل سرعة القطع، لكن عمق القطع و عاملا اهتزازات أداة القطع لهم تأثير ثانوي. هذا النموذج يمكن أن يكون ذو فائدة لتحسين عملية القطع و خشونة السطح.

الكلمات المفتاحية: خراطة، القطع، عوامل القطع، خشونة السطح، تحليل التباين (ANOVA)، منهجية استجابة السطح (RSM)، اهتزازات أداة القطع.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction Général.....	1
Chapitre I LE PHENOMENE DE COUPE (ETUDES BILIOGRAPHIQUES)	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Opération de tournage.....	4
I.3 Les paramètres de coupe.....	5
I.3.1 La vitesse de coupe.....	5
I.3.2 La profondeur de passe.....	5
I.3.3 L'avance.....	5
I.4 Les zones de coupe.....	6
I.4.1 La zone de cisaillement primaire.....	6
I.4.2 La zone de cisaillement secondaire.....	7
I.4.3 La zone de cisaillement tertiaire.....	7
I.5 Les matériaux des outils de coupe.....	8
I.5.1 Aciers rapides.....	8
I.5.2 Carbures métalliques.....	8
I.5.3 Carbures micrograin.....	9
I.5.4 Carbures revêtus.....	9
I.5.5 Cermets.....	9
I.5.6 Céramiques.....	9
I.5.7 Nitrure de bore cubique (CBN).....	10

SOMMAIRE

I.5.8	Diamant polycristallin (DP ou PCD)	10
I.6	Les angles de coupe	11
I.6.1	Angles de direction et d'inclinaison d'arête	11
I.6.2	Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil	12
I.6.2.1	Rayon de bec et angle de taillant.....	12
I.6.2.2	Angle de coupe et l'angle de dépouille.....	12
I.7	Formation du copeau.....	13
I.7.1	Copeau continu	13
I.7.2	Copeau avec arête rapportée	13
I.7.3	Copeau discontinu.....	14
I.8	Les modèles mathématiques d'usure (Durée de vie)	14
I.8.1	La loi de Taylor.....	15
I.8.2	La loi de Gilbert.....	15
I.8.3	La loi de Konig – Depiereux.....	15
I.9	Etat de surface.....	16
I.9.1	Généralités	16
I.9.2	Paramètres de mesure des irrégularités.....	18
I.9.2.1	Paramètres liés aux motifs.....	18
I.9.2.2	Paramètres liés à la ligne moyenne.....	20
I.9.2.3	Paramètres liés à la courbe de portance.....	21
I.10	Comportement mécanique du système pièce/outil/machine (POM).....	22
I.11	Techniques d'analyse	22

SOMMAIRE

I.12	Source des vibrations du système POM.....	23
I.13	Les méthodes de mesures des vibrations	24
I.13.1	Mesures directes.....	24
I.13.1.1	Mesure avec contact.....	24
I.13.1.2	Mesures sans contact.....	25
I.13.2	Mesure indirect	25
I.14	Méthodes limitant les effets des vibrations	26
I.14.1	Les méthodes prédictives	26
I.14.1.1	L'approche périodique ou analytique.....	26
I.14.1.2	L'approche temporelle.....	27
I.14.2	Les méthodes de contrôle.....	27
I.15	Les Outils d'analyse vibratoire	27
I.15.1	Analyses dans le domaine temporel.....	27
I.15.1.1	Valeur efficace ou valeur RMS.....	28
I.15.1.2	Facteur crête.....	28
I.15.1.3	Kurtosis.....	28
I.15.2	Analyses Dans Le Domaine Fréquentiel.....	29
I.15.2.1	Analyse spectral.....	29
I.15.2.2	Analyse d'enveloppe.....	30
I.15.2.3	Technique du HFRT (High Frequency Resonance Technique).....	30
I.15.2.4	Analyse cepstral.....	31
I.15.3	Analyses dans le domaine temps-fréquence	31

SOMMAIRE

I.15.3.1	La transformation de Fourier a fenêtre glissante.....	31
I.15.3.2	La transformation de Wigner-Ville.....	32
I.16	Les types de vibrations.....	32
I.16.1	Les vibrations libres.....	33
I.16.2	Les vibrations forcées.....	33
I.16.3	Les vibrations auto-entretenues.....	34
I.16.3.1	Broutement d'origine régénératif.....	34
I.16.3.2	Broutement d'origine non-régénératif.....	34
I.17	Optimisation du processus d'usinage.....	35
I.17.1	Optimisation mono-objectif.....	35
I.17.2	Optimisation multi-objectif.....	35
I.18	Conclusion.....	36

CHAPITRE II LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.1	Introduction.....	38
II.2	La méthode des surfaces de réponse.....	39
II.3	Objectif de la méthode des surfaces de réponse.....	39
II.4	Les étapes d'une étude par la méthode des surfaces de réponse.....	40
II.4.1	Définition des réponses.....	40
II.4.2	Choix d'une stratégie expérimentale.....	40
II.4.2.1	Les méthodes directes.....	40
II.4.2.2	Les méthodes indirectes.....	41

SOMMAIRE

II.4.3	Définition des facteurs et des niveaux	41
II.4.3.1	Définition des niveaux.....	41
II.4.3.2	Codage de la matrice d'expérience.....	41
II.4.4	Définition du domaine expérimental.....	41
II.4.4.1	Un domaine isotrope.....	42
II.4.4.2	Un domaine anisotrope.....	42
II.4.5	Définition du modèle empirique	42
II.4.6	Construction du plan d'expériences.....	42
II.4.6.1	Les constructions historiques.....	43
II.4.6.2	Les constructions algorithmiques.....	43
II.4.7	Expérimentation.....	43
II.4.8	Analyse globale des résultats d'essais	43
II.4.9	Analyse mathématique des résultats d'essais	43
II.4.10	Analyse statistique du modèle	43
II.4.10.1	L'analyse de régression.....	44
II.4.10.1.1	Test de "Fisher-Snedecor"	44
II.4.10.1.2	Test "Indected Residual Error Sun of Squares"	45
II.4.10.1.3	Probabilité	46
II.4.10.2	Analyse statistiques des coefficients du modèle	46
II.4.10.3	Analyse statistique des résidus	47
II.4.11	Analyse graphique du modèle.....	48

SOMMAIRE

II.4.11.1	Surfaces de réponse.....	48
II.4.11.2	Courbe iso-réponse.....	48
II.4.12	Validation du modèle et des informations obtenues	49
II.5	Conclusion.....	49

Chapitre III METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET PREPARATION DES EXPERIENCES

III.1	Introduction	51
III.2	Objectif.....	51
III.3	Essais préliminaires.....	51
III.4	Environnement expérimental	51
III.4.1	Machine.....	51
III.4.2	Matériau	52
III.4.3	Outil de coupe	53
III.4.3.1	Plaquettes en carbures.....	53
III.4.3.2	Porte plaquette.....	53
III.5	Réponses du système (facteurs de sortie).....	54
III.5.1	État de surface.....	54
III.5.2	Vibrations de l'outil de coupe.....	54
III.6	Plan d'expérience factoriel utilisé.....	55
III.6.1	Les plans de Taguchi	55
III.6.2	Les avantages des plans de Taguchi	56

SOMMAIRE

III.6.3	Traitements des résultats.....	56
III.7	Conclusion.....	58
Chapitre IV RESULTATS DES EXPERIENCES TRAITEMENT ET ANALYSE.		
IV.1	Introduction	60
IV.2	Modélisation de la rugosité (Ra et Rz) et les vibrations de l'outil (Vy et Vz).....	60
IV.3	Analyse de la variance ANOVA	61
IV.3.1	Analyse de la variance ANOVA pour de la rugosité Ra	61
IV.3.2	Analyse de la variance ANOVA pour la rugosité Rz	62
IV.4	Analyse de régression linéaire.....	63
IV.4.1	Analyse de régression de la rugosité Ra	63
IV.4.2	Analyse de régression de la rugosité Rz	64
IV.5	Les graphes résiduels	65
IV.5.1	Les graphes résiduels de la rugosité Ra	65
IV.5.2	Les graphes résiduels de la rugosité Rz	65
IV.6	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de la rugosité.....	66
IV.6.1	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra.....	66
IV.6.2	Comparaison entre la rugosité Rz mesurées et prédites.....	66
IV.7	Courbes de surface de réponse	67
IV.7.1	Courbes de surface de réponse pour de la rugosité Ra	67
IV.7.2	Courbes de surface de réponse pour de la rugosité Rz	68
IV.8	Optimisation multi-réponse.....	70

SOMMAIRE

IV.9 Conclusion.....	72
----------------------	----

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale	74
---------------------------	----

Perspectives	75
--------------------	----

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques	77
-----------------------------------	----

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE I

Figure I.1 Opération de chariotage en tournage	5
Figure I.2 Les paramètres de coupe en tournage	6
Figure I.3 Segmentation du copeau.....	7
Figure I.4 Les zones de coupe	8
Figure I.5 Illustration des aptitudes des matériaux à outil	11
Figure I.6 Principaux plans de l'outil en main	11
Figure I.7 Plans et angles en main sur un outil de chariotage	13
Figure I.8 Copeau continu.....	13
Figure I.9 Copeau avec arête rapportée.....	14
Figure I.10 Copeau discontinu (a), (b)	14
Figure I.11 Les modèles mathématiques d'usure.....	16
Figure I.12 Motif de rugosité	19
Figure I.13 Exemple de détermination des motifs de rugosité.....	19
Figure I.14 Exemple de détermination des motifs d'ondulation.....	19
Figure I.15 Ligne moyenne du profil.	20
Figure I.16 Définitions des paramètres liés à la courbe de portance.....	21
Figure I.17 Constitution générale d'une machine-outil.	22
Figure I.18 Les Techniques d'analyse.....	23
Figure I.19 Accéléromètre 3D.....	24
Figure I.20 vibromètre laser.	25
Figure I.21 Représentation de la coupe orthogonale	26
Figure I.22 Distribution d'amplitude du signal temporel.....	29
Figure I.23 Spectre gabarit à large bande.....	30
Figure I.24 Spectre enveloppe.....	30

Figure I.25 Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes	32
Figure I.26 Les vibrations libres.	33
Figure I.27 Les vibrations forcées	33
Figure I.28 Les vibrations auto-entretenues.	35

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE II

Figure II.1 Les trois parties du processus d'acquisition des connaissances	38
Figure II.2 Domaine expérimental.	42
Figure II.3 Courbe de résidu.	47
Figure II.4 Représentation de surface de réponse.	48
Figure II.5 Courbe iso-réponses	49

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE III

Figure III.1 Tour parallèle modèle SN40.	52
Figure III.2 Montages et formes des éprouvettes.	52
Figure III.3 Forme et dimension des plaquettes YT15.....	53
Figure III.4 Système de fixation de la plaquette.	53
Figure III.5 Montages et formes des éprouvettes pour les essais.	54
Figure III.6 Rugosimetre Mitutoyo.	54
Figure III.7 Analyseur dynamique Smart Balancer 2 CHENCK.	55
Figure III.8 Plan d'expérience.....	56

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE IV

Figure IV.1 Probabilités normales des résidus de Ra.....	65
Figure IV.2 Probabilités normales des résidus de Rz.....	65
Figure IV.3 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour Ra.....	66
Figure IV.4 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour Rz.....	66

Figure IV.5 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité Ra.	67
Figure IV.6 Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité Ra.	67
Figure IV.7 Effet de la profondeur de passe et l'avance sur la rugosité Ra.	68
Figure IV.8 Effet des vibrations sur la rugosité Ra.	68
Figure IV.9 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité Rz.	69
Figure IV.10 Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité Rz.	69
Figure IV.11 Effet de la profondeur de passe et l'avance sur la rugosité Rz.	70
Figure IV.12 Effet des vibrations sur la rugosité Rz.	70
Figure IV.13 Optimisation de surface de réponse.	71

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX DU CHAPITRE I

Tableau I.1 Ordres de grandeur des irrégularités géométriques	17
Tableau I.2 Classement pratique des différents écarts géométriques	18
Tableau I.3 Principaux paramètres liés aux motifs	19
Tableau I.4 Principaux paramètres liés à la ligne moyenne	20
Tableau I.5 Principaux paramètres liés à la courbe de portance	21

LISTE DES TABLEAUX DU CHAPITRE II

Tableau II.1 Analyse de la variance (ANOVA).	45
Tableau II.2 Les résultats de l'analyse de la variance des PE	46
Tableau II.3 Analyse des coefficients.	47

LISTE DES TABLEAUX DU CHAPITRE III

Tableau III.1 La composition chimique de l'acier 32CrMoV12-28.	52
Tableau III.2 Les caractéristiques de l'outil de coupe et le porte d'outil	53
Tableau III.3 Attribution des niveaux de facteurs.	56
Tableau III.4 Le plan Taguchi des expériences.	57

LISTE DES TABLEAUX DU CHAPITRE IV

Tableau IV.1 Résultats expérimentaux de la rugosité et les vibrations	61
Tableau IV.2 Analyse de la variance ANOVA pour Ra.	62
Tableau IV.3 Analyse de la variance ANOVA pour Rz.	62
Tableau IV.4 Les coefficients de régression pour Ra.	63
Tableau IV.5 Validation du modèle Mathématique pour Ra.	64
Tableau IV.6 Les coefficients de régression pour Rz.	64
Tableau IV.7 Validation du modèle Mathématique pour Rz.	64
Tableau IV.8 Combinaison optimale.	71

NOMENCLATURE DES SYMBOLES

NOMONCLATURE

α	Angle de dépouille principal (°)
γ	Angle d'attaque(°)
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante(°)
V_c	Vitesse de coupe (m/min)
A_p	Profondeur de passe (mm)
f	Avance par tour (mm/tr)
R_a	Rugosité moyenne arithmétique (μm)
R_z	Les hauteurs des irrégularités (μm)
DL	Degré de liberté
R^2	Coefficient de détermination
RSM	Méthodologie de surface de réponse
SS	Somme des carrés
MS	Moyenne des carrés
F	Valeur de ficher
P	Probabilité d'obtenir résultats par hasard
$Cont \%$	Pourcentage de contribution %
$ANOVA$	Analyse de la variance
V_y	Amplitude des accélérations de l'outil dans la direction Y (m/s^2).
V_z	Amplitude des accélérations de l'outil dans la direction Z (m/s^2).
PE	Plans d'expériences
H	Vecteur des coefficients estimés pour la modélisation de la réponse
X	Matrice du modèle ou matrice des effets
$X'X$	Matrice d'information ou matrice de Fisher

INTRODUCTION GENERAL

Introduction Général

La qualité de surface est une exigence essentielle des consommateurs en raison de son impact sur la performance des produits. Les caractéristiques des surfaces usinées ont une influence significative sur la capacité d'un matériau à résister aux contraintes de température, de frottement et à la corrosion. Certains facteurs influent d'une façon directe ou indirecte sur la rugosité de surface, pour les mettre en évidence et comprendre leurs influences dans le processus de coupe de nombreux travaux de recherche ont été réalisés dans ce cadre ; [1], [2] ont montré que la dureté et les propriétés du matériau usiné influe sur la qualité de la surface. Yang et autres [3] a étudié l'effet de l'influence de la géométrie de l'outil sur la rugosité de surface. Theile et autres [4] ont prouvé que la géométrie de l'outil de coupe présente un impact important sur les contraintes résiduelles, une arête arrondie favorise l'apparition des contraintes compressives et d'autre part le rayon du bec de l'outil à un effet considérable sur l'intégrité de la surface, en effet la rugosité est inversement proportionnelle au rayon.

Une forte corrélation entre les vibrations et la rugosité de surface a été signalée et les différentes caractéristiques des signaux vibratoires ont été choisies pour évaluer la qualité de surface [5]. Arizmendi et autres. [6] ont observé que la présence de vibrations de l'outil pendant le processus de coupe engendre une détérioration de l'état de surface. Ozcelik et Erzurumlu [7], ont mis en évidence d'une corrélation entre la rugosité de surface, les paramètres d'usinage (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les vibrations l'outil de coupe. Beauchamp et autres [8], ont collecté et analysé la rugosité et les vibrations de l'outil générées par le tournage à sec des échantillons d'acier à différents niveaux de régime de coupe, rayon du bec d'outil et de la longueur de la pièce.

Neseli et autres. [9] ont appliqué la méthodologie de la surface de réponse (RSM) pour optimiser l'effet de la géométrie de l'outil et les paramètres de rugosité de surface dans le cas du tournage dur d'AISI 1040 avec un outil P25. Nordin et autres [10] ont appliqué la méthodologie de la surface de réponse lors du tournage de l'acier AISI 1045, en se basant sur la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, la variable de réponse était la rugosité de surface (Ra), ANOVA indique que la vitesse d'avance est le facteur le plus significatif sur la réponse.

De nombreux chercheurs ont étudié la technique de régression linéaire multiple pour développer un modèle empirique complet de la rugosité qui tient compte de l'interaction entre la dureté de la pièce et le régime de coupe et qui a justifié l'influence des paramètres de coupe et leurs

degrés d'importance. Une autre méthode d'analyse basée sur la variance ANOVA, pour déterminer les effets de la dureté de la pièce et la géométrie de l'outil sur la rugosité [11].

L'objectif de cette étude est, d'une part d'étudier les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance), et les vibrations d'outil sur l'état de surface des pièces usinées, d'autre part de choisir les paramètres de coupe optimaux en tournage d'un acier (32CrMoV12-28) pour une configuration choisie à partir d'un minimum d'essais.

Pour atteindre cet objectif, une combinaison de plusieurs méthodes : statistiques, analytiques et expérimentales a été mise en œuvre. La méthode de régression linéaire a permis d'obtenir une modélisation mathématique des paramètres de coupe. L'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la validité des modèles. Enfin, l'algorithme d'optimisation choisi est un algorithme génétique d'optimisation multi-objectif.

Ce travail de thèse est constitué de quatre chapitres :

- Le premier chapitre rappelle les notions de phénomène de coupe en tournage en mettant l'accent sur les paramètres de coupe, état de surface, les vibrations en usinage et enfin l'optimisation du processus d'usinage.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons la méthodologie de recherche basée sur la méthode des plans d'expériences et Nous allons décrire de manière théorique le contenu de chacune de ces étapes dans le cas d'une étude basée sur la méthode des plans d'expériences pour l'étude de surface de réponse.
- Dans le troisième chapitre nous présentons un état de l'art sur la méthode de surface de réponse (RSM), ensuite la présentation des données expérimentales et enfin une présentation du Plan d'expérience factoriel utilisé (taguchi).
- Dans le quatrième chapitre, une application sur l'acier 32CrMoV12-28 est illustrée. Une étude expérimentale a conduit à déterminer les effets des paramètres de coupe et les vibrations d'outil sur la rugosité de surface en tournage. Des modèles mathématiques ont été établis à partir de la régression linéaire.
- Le manuscrit se termine par des conclusions et des perspectives.

**CHAPITRE I LE PHENOMENE DE COUPE
(ETUDES BILIOGRAPHIQUES)**

I.1 Introduction

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjugaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance). Il existe deux manières de générer la surface recherchée : par travail de forme ou par travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme, c'est la forme de l'arête tranchante de l'outil qui conditionne la surface obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la conjonction des mouvements de coupe et d'avance qui définit la surface finale [12].

L'usinage dit « conventionnel » est réalisé à faible vitesse de rotation de broche (inférieure à 5000tr/min). Les vitesses de coupe correspondantes sont de l'ordre de 40 à 400 m/min selon la nature du matériau usiné. La dynamique et les caractéristiques des machines-outils permettent d'obtenir des qualités d'usinage moyennes. Les usinages conventionnels sont réalisés par des machines manuelles mais aussi par les machines à commande numériques qui les remplacent de plus en plus [13].

Les outils utilisés pour les usinages conventionnels sont réalisés dans une très vaste gamme de matières. La plupart sont en "carbure"(carbures de tungstène) ou en aciers "rapides". Des outils en Nitrures de Bore Cubiques (CBN), Céramiques ou "Cermets"(Carbures de Titane) sont également utilisés pour ces usinages.

I.2 Opération de tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils de coupe à arête unique [14]. Il s'effectue sur des machines-outils dites tour. Pendant le tournage, la pièce tourne autour de son axe, tandis que l'outil s'engage dans sa surface à une profondeur déterminée. L'outil est animé d'un mouvement d'avance continu parallèle où perpendiculaire à l'axe de la pièce. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée 'surface de la pièce'. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage due à des d'opérations précédentes. La 'surface engendrée' (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée 'surface coupée'.

En tournage, le chariotage (figure I.1) est une opération consistant à usiner sur un tour un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil de coupe suivant un axe parallèle à l'axe

de rotation de la pièce. Les paramètres de coupe sont l'avance f , la profondeur de passe a_p et la fréquence de rotation (N) [12].

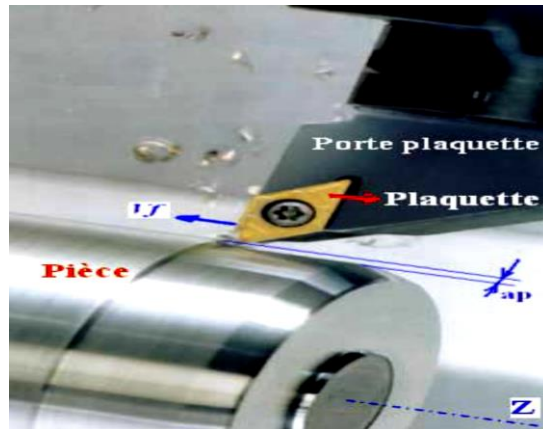


Figure I.1 Opération de chariotage en tournage [15].

I.3 Les paramètres de coupe [16]

I.3.1 La vitesse de coupe

La vitesse de coupe notée V_c (figure I.2), est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle détermine la vitesse de rotation de la pièce. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière, où D est le diamètre final de la pièce pour le cas de tournage, mais dans le cas de fraisage D correspond au diamètre de la fraise.

La vitesse de rotation de la pièce est définie par :

$$N(\text{tr}/\text{min}) = \frac{1000V_c(\text{m}/\text{min})}{\pi D(\text{mm})} \quad (\text{I.1})$$

I.3.2 La profondeur de passe

La profondeur de passe, notée a_p (figure I.2), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et par exemple à la différence entre le rayon avant et après usinage.

I.3.3 L'avance

L'avance notée f (figure I.2), correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage).

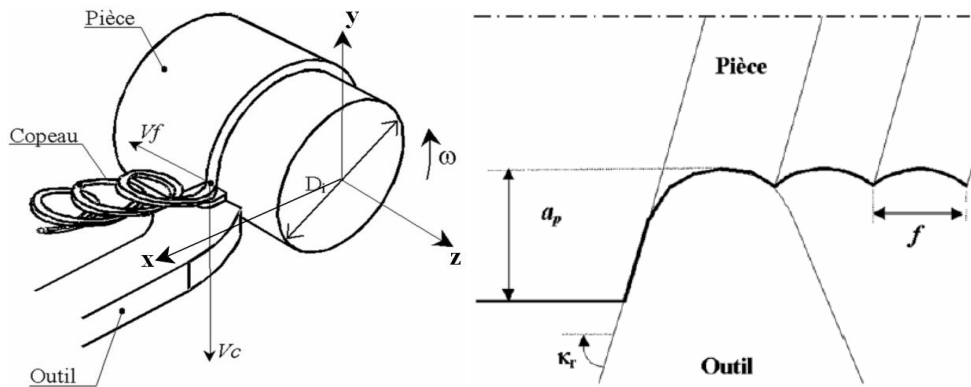


Figure I.2 Les paramètres de coupe en tournage [17].

I.4 Les zones de coupe

La compréhension du phénomène d'arrachement de la matière est nécessaire pour augmenter la qualité de la surface usinée. Connaître la forme et les propriétés du copeau est essentiel pour avoir des performances efficaces. Dans le cas de la coupe orthogonale, on ne prend en considération qu'une seule arête de coupe, simultanément perpendiculaire à la vitesse de coupe V_c et à la vitesse d'avance f . La formation de copeau se fait dans les zones de coupe (figure 1.4). Il convient de distinguer trois zones où les phénomènes thermomécaniques se produisent et interagissent.

I.4.1 La zone de cisaillement primaire

Elle provient du changement de direction d'écoulement de la matière ; cette zone est le siège de cisaillement et de taux de cisaillement intenses engendrant une forte élévation thermique due à la dissipation. Dans cette zone, l'écoulement du copeau passe de la vitesse de coupe V_c à la vitesse du copeau. La variation de direction d'écoulement du copeau provoque un phénomène de grande déformation très rapide car très localisé, ce qui engendre une très forte augmentation de la chaleur dans la zone située autour de ce plan de cisaillement. La phénoménologie de la formation du copeau fait intervenir un grand nombre de paramètres, tels que la rhéologie du matériau usiné, la nature du contact outil/matière et les différents paramètres d'usinage. Suivant ces différents paramètres, le cisaillement effectué de manière continue (copeau d'épaisseur constante et de microstructure homogène) ou instable (copeau dentelé et de microstructure hétérogène) (figure 1.3). [12]

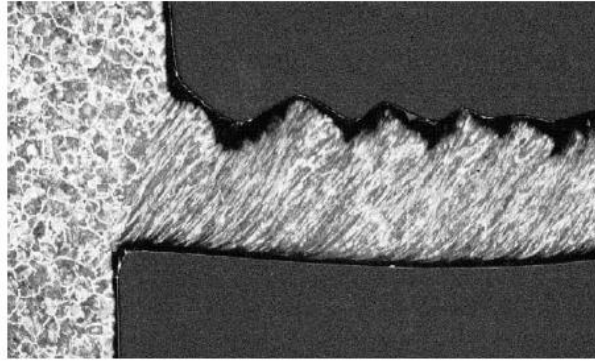


Figure I.3 Segmentation du copeau [18].

I.4.2 La zone de cisaillement secondaire

Cette zone se situe à l'interface, entre la face de coupe de l'outil et le copeau induit par le frottement de ce dernier sur l'outil ; cette zone est à la fois soumise à des forts taux de cisaillement et à une forte élévation de température engendrée par le frottement [19]. La déformation du matériau dans cette zone provoque une haute température [20], [21]. Cette zone à frottement génère une quantité de chaleur très importante (~ 20 à 30 % de la chaleur totale produite) selon [22], ce flux de chaleur diffusé à la fois dans l'outil et dans le copeau. La température maximale est située à la fin du contact entre le copeau et la face de coupe, et peut produire un effet d'usure en cratère critique. A l'avant de cette zone il peut y avoir l'arête rapportée (BUE : Built-Up-Edge) qui se forme, cette arête rapportée provoque l'instabilité durant l'usinage [23].

I.4.3 La zone de cisaillement tertiaire

C'est la zone où la surface de la pièce finie est réalisée. Le contact entre l'outil et la surface usinée peut provoquer des déformations plastiques dans la pièce. Les déformations dans cette zone sont moins intenses que dans les deux zones précédentes et elles dépendent de la forme de la pointe de l'outil. La qualité de la surface usinée dépend fortement des interactions entre la forme de l'outil, les efforts et la température dans cette zone.

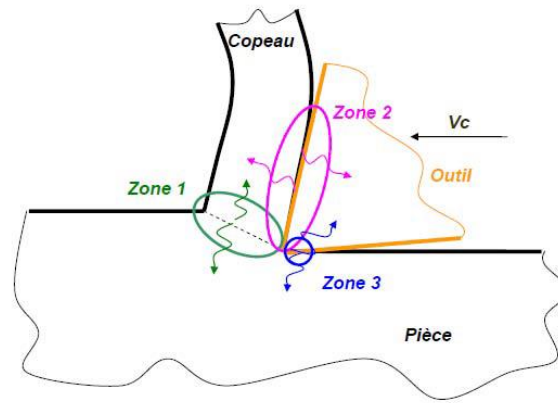


Figure I.4 Les zones de coupe [12].

I.5 Les matériaux des outils de coupe

I.5.1 Aciers rapides

Ce sont des aciers fortement alliés qui contiennent plus de 0,7 % de carbone et des éléments d'addition susceptibles de former des carbures :

- Dans tous les cas environ 4 % de chrome (C) ;
- Du tungstène (W), du molybdène (D), du vanadium (V), en proportions variables ;
- Eventuellement du cobalt (K) qui a pour rôle d'augmenter la dureté à chaud.

Ils ont la propriété de pouvoir acquérir, après trempe, une dureté très élevée, et de la conserver jusqu'à une température de l'ordre de 600 °C.

Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de ces alliages, la norme NF

A 35-590 en retient 16, parmi lesquelles des aciers sur carburés et des aciers au cobalt.

I.5.2 Carbures métalliques

Ils sont fabriqués selon la technique de métallurgie des poudres par frittage, Ils sont constitués :

- De substances dures (60 à 95 % du carbure) qui donnent la dureté et donc la résistance à l'usure. Elles se composent de carbure de tungstène (WC) phase (γ), de carbure de titane (TiC), de carbure tantale (TaC) et de carbure de niobium (NbC) (phase γ).
- De substances liantes qui donnent la ténacité au carbure. La plus employée est le cobalt (Co) car il dissout facilement les différents carbures (phase β). On obtient différentes nuances de carbures en faisant varier le pourcentage des substances dures et liantes. Ces nuances présentent des tenues plus ou moins importantes à l'usure

(selon la dureté) et aux chocs (selon la ténacité) en fonction de l'utilisation prévue.

La résistance à la chaleur et la conductivité thermique dépendent :

- De la taille des grains WC ;
- Du pourcentage de Co ;
- Du contenu de la phase γ .

I.5.3 Carbures micrograin

Ils sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène (0,2 à 1 μm), lié par du cobalt (6 à 13 %). Ils ont une ténacité plus élevée pour une dureté constante et de ce fait peuvent entrer dans le domaine des applications de matériaux tels que l'acier rapide. Cette nuance permet des arêtes beaucoup plus fines par suite, l'obtention d'angles de coupe très positifs.

I.5.4 Carbures revêtus

Les carbures existent de plus en plus sous forme revêtus. Ce revêtement en couches de quelques microns (1 à 20 μm) est constitué, selon les applications:

- De nitrure de titane (TiN), d'une dureté d'environ 2 000 HV (jaune d'or).
- De carbure de titane (TiC), d'une dureté d'environ 3 900 HV (gris).
- De carbonitride de titane (Ti) (C1N), d'une dureté de 3 000 HV (gris).
- D'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), d'une dureté d'environ 2 400 (noir).

Ces revêtements améliorent très nettement les possibilités des outils, en particulier la durée de vie, grâce à une réduction importante du frottement copeau/outil et pièce/outil. Les résultats sont surtout spectaculaires sur les aciers rapides (certains fabricants de fraises annoncent une augmentation de la durée de vie de 500 %).

I.5.5 Cermets

Il s'agit de matériaux à base de titane avec un liant de nickel, de cobalt ou des deux à la fois. Ils ont une très bonne résistance à l'usure et une excellente stabilité chimique. Ils sont surtout réservés aux opérations de finition. Ils donnent de bons résultats en tournage de finition pour les aciers, en particulier pour les aciers inoxydables. Ils peuvent être revêtus (PVD) de TiN et Ti (C1N).

I.5.6 Céramiques

Les céramiques se présentent sous forme de plaquettes frittées, il existe deux grandes familles de céramiques :

- Les céramiques à base d'alumine sous deux aspects : les céramiques pures de couleur blanche composées d'oxyde d'aluminium et d'autres oxydes métalliques ;
- Les céramiques mixtes de couleur grise composée d'oxydes d'aluminium et de carbures métalliques.
- Les céramiques à base de nitrure de silicium : ce sont des matériaux nouveaux, les plus connus étant les sialons. Elles sont de couleur noire, composée de nitrure de silicium et d'oxydes métalliques.

En pratique, les céramiques sont prévues pour supporter des vitesses de coupe élevées à des températures importantes. Elles résistent bien à l'usure mais mal aux chocs. Elles sont souvent utilisées sur des machines puissantes pour l'usinage des métaux ferreux. Elles ne conviennent pas pour les alliages légers et pour les alliages de titane (problèmes chimiques). Elles peuvent être revêtues de TiN et Al₂O₃.

I.5.7 Nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est un des matériaux de coupe des plus durs (dureté supérieure aux céramiques et aux carbures). Il s'agit de particules de nitrure de bore cubique et une matière liante céramique. Il se présente généralement sous la forme d'une pointe qui est basée sur un support de carbure. Il peut également être fritté sur chaque pointe du support carbure, ce qui améliore la sécurité.

Les plaquettes peuvent être revêtues (PVD) de TiN, ce qui facilite la détection de l'usure. Une nuance additionnée de nitrure de titane, très dure, est principalement utilisée en finition pour les aciers trempés, les aciers cimentés et pour les fontes. Une nuance de CBN pure, très résistante à l'usure, mais aussi très tenace est recommandée pour les aciers trempés et les fontes dans des conditions difficiles.

I.5.8 Diamant polycristallin (DP ou PCD)

Le diamant polycristallin est composé de cristaux à grains fins de diamètres compris entre 5 et 30µm. Les plaquettes de coupe sont découpées par électroérosion dans un disque de diamant polycristallin. Il est recommandé pour la finition et la semi-finition des métaux non ferreux (aluminium, cuivre, plomb) et pour les matières non métalliques telles que le graphite et les composites. [13]

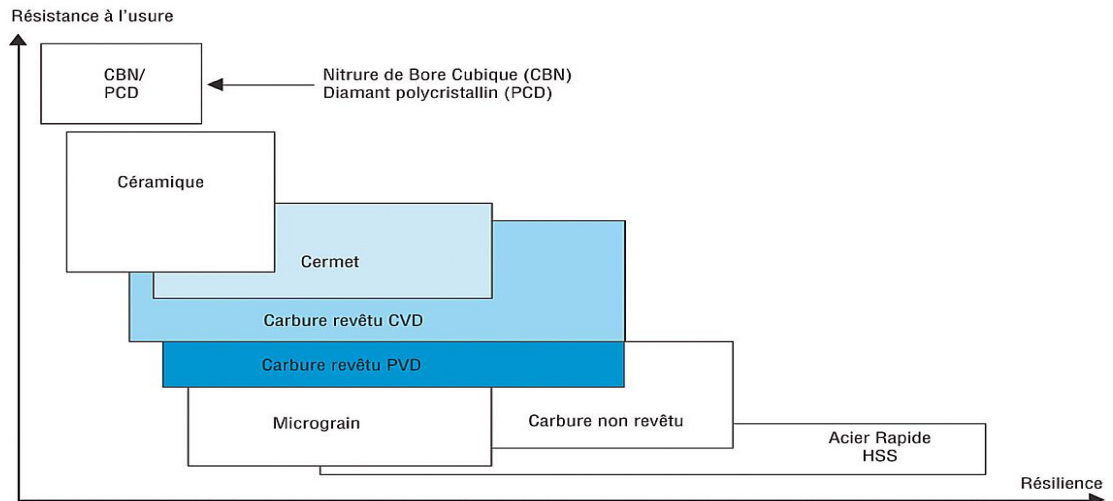


Figure I.5 Illustration des aptitudes des matériaux à outil [24].

I.6 Les angles de coupe

Les angles de coupe sont repérés dans différents plans de projection. Dans le cas de l'outil en main, les principaux plans de projection sont les plans : P_f , P_p , P_r , P_s (figure I.6) [12].

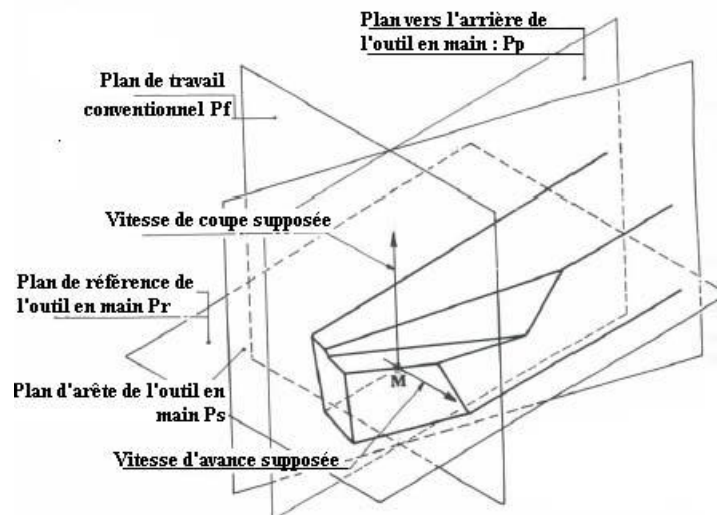


Figure I.6 Principaux plans de l'outil en main [12].

I.6.1 Angles de direction et d'inclinaison d'arête

L'angle de direction d'arête k_r est l'angle, projeté dans le plan de référence de l'outil P_r , entre l'arête de coupe et la direction d'avance (Figure I.7). Selon le type d'usinage, l'outil de coupe et/ou le porte outil, un angle de direction d'arête est imposé. Cet angle a une influence sur la direction des forces de coupe, sur la direction d'évacuation des copeaux, la largeur de copeau et sur

l'usure de l'outil. L'angle d'inclinaison d'arête (λ_s) est l'angle formé entre l'arête de coupe et le plan de référence P_r dans le plan P_r .

I.6.2 Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil

La pointe de l'outil est la zone de contact avec la matière. Elle est ainsi la zone de l'outil de coupe la plus sollicitée mécaniquement et thermiquement. A cet effet, il est important de bien choisir les caractéristiques géométriques de la pointe de l'outil. Ces dernières sont définies principalement par le rayon du bec de l'outil (r_ϵ), l'angle de pointe (ϵ_R), l'arrondi d'arête (r_β) l'angle de coupe (γ) et l'angle de dépouille (α) (Figure I.7).

I.6.2.1 Rayon de bec et angle de taillant

La Figure (I.7), représente un schéma d'une pointe d'outil dans les plans P_f et P_r . Le rayon de bec (r_ϵ) est essentiel dans le choix d'un outil de coupe, car il conditionne la rugosité de la surface à usiner et détermine la résistance du bec de l'outil (plus le rayon de bec est élevé, plus l'outil résiste aux efforts de coupe dans les limites admises par la géométrie), alors que l'angle de taillant (β) est l'angle reliant la face de coupe à la face de dépouille (Figure I.7).

I.6.2.2 Angle de coupe et l'angle de dépouille

L'angle de coupe (γ) et l'angle de dépouille (α) sont liés à la géométrie de l'outil qui à son tour dépend fortement de la nature du couple outil-matière et des conditions de coupe.

L'angle de coupe c'est l'angle qui se trouve entre la face de coupe et le plan de référence P_r dans le plan P_f (Figure I.7). Il est déterminant dans la formation du copeau. Selon le matériau à usiner, il peut passer d'une valeur positive à une valeur très négative. Dans l'usinage des aciers durs, et pour rendre l'outil plus résistant mécaniquement et thermiquement, l'angle de coupe doit être très faible voir négatif (jusqu'à -20 degrés). L'angle de dépouille quant à lui est l'angle formé entre la face de dépouille de l'outil et le plan P_s perpendiculaire au plan de référence P_r . Il intervient aussi dans le frottement entre la pièce et l'outil [25].

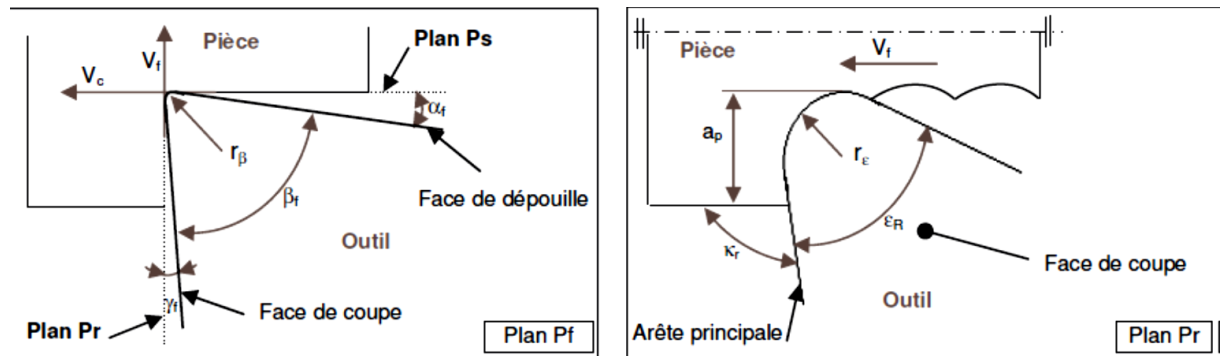


Figure I.7 Plans et angles en main sur un outil de chariotage [25].

I.7 Formation du copeau

Les mécanismes de génération de copeaux et les phénomènes thermomécaniques intervenant conduisent, à l'échelle micrographique, à la formation de copeaux de natures et de morphologies très différentes. Les copeaux peuvent être classifiés suivant trois grands groupes.

I.7.1 Copeau continu

Lors de la génération d'un copeau continu, la valeur de la contrainte de cisaillement que subit la matière à la traversée de la zone primaire n'atteint pas la limite de rupture du métal et ce dernier s'écoule de manière continue le long de l'outil. Généralement, ce type de copeau est obtenu pour de faibles vitesses de coupe et/ou d'avance [26].

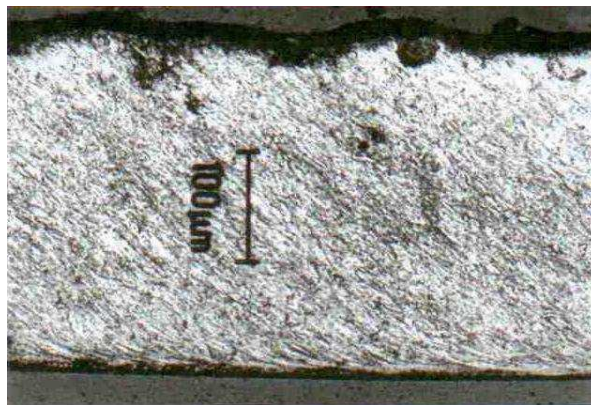


Figure I.8 Copeau continu [27].

I.7.2 Copeau avec arête rapportée

Pendant la coupe et pour de faibles vitesses de coupe, une arête rapportée peut se former par accumulation de la matière à la pointe de l'outil de coupe générant ainsi une nouvelle arête, qui déplacera le contact outil copeau (Figure I.9) [28]. Les dimensions de l'arête rapportée (l'épaisseur

et la longueur), conditionnent la rugosité totale de la surface usinée et sont d'autant plus grandes que les dimensions sont élevées [29].

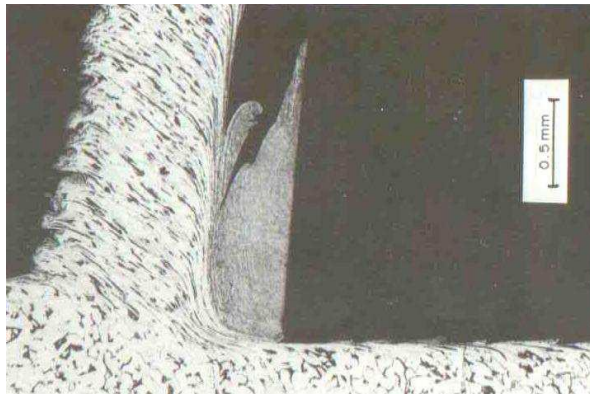


Figure I.9 Copeau avec arête rapportée [28].

I.7.3 Copeau discontinu

Dans ce cas, la valeur de la contrainte de cisaillement dans la zone primaire atteint la limite de rupture du métal usiné et le copeau se casse sous l'effet de cette rupture finale du matériau. Cette morphologie est souvent observée dans l'usinage des aciers inoxydables austénitiques (Figure I.10a), des aciers durs (Figure I.10b) et des aciers fragiles.

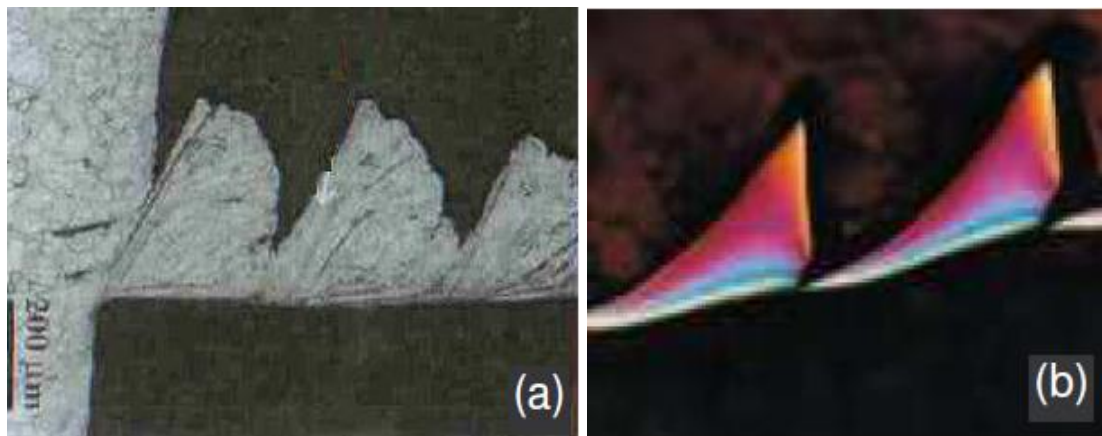


Figure I.10 Copeau discontinu (a) [26], (b) [30].

I.8 Les modèles mathématiques d'usure (Durée de vie)

La durée de vie de l'outil est caractérisée par le temps pour atteindre la valeur limite du critère d'usure. On choisit comme critère d'usure l'un des trois critères suivants :

- Défaillance brutale : due à la déformation plastique de l'arête. Ce critère n'est employé que pour les outils en acier rapide ou les outils céramiques.

- Usure frontale : employée pour tous les outils, caractérisée soit par l'usure frontale moyenne soit par l'usure frontale maximale VBB_{max} . La largeur maximale de l'usure frontale est couramment fixée à $VBB_{max} = 0.6$ mm, et la largeur moyenne $VBB_{moy} = 0.3$ mm.
- L'usure en cratère : est caractérisée par la profondeur de cratère (équation 1.2).

$$KT = 0.06 + 0.3 \quad (I.2)$$

Plusieurs lois de durée de vie existent, nous les détaillons ci-dessous.

I.8.1 La loi de Taylor

Ce modèle établi par Taylor en 1969 est caractérisé par l'équation (équation 1.3). Le coefficient C_v et l'exposant n sont des constantes. La constante C_v est caractérisée par le matériau. La durée de vie d'un outil est influencée par la vitesse de coupe, elle augmente quand la vitesse de coupe diminue. Le revêtement est l'un des paramètres qui joue un rôle important sur la durée de vie, son utilisation augmente la durée de vie de l'outil car il diminue l'usure par diffusion entre la pièce et la face de coupe (Figure I.11.a) [31].

$$T = C_v \cdot V^n \quad (I.3)$$

V : Vitesse de coupe. T : Durée de Vie. n : Exposant de Taylor. C : Constante dépendant du couple outil/pièce.

I.8.2 La loi de Gilbert

Cette loi est une généralisation de la loi de Taylor pour prendre en considération l'influence de l'avance f et de la profondeur de passe a_p . Elle est caractérisée par l'équation (équation 1.4) (Figure I.11.b) [32].

$$T = Cp^x \cdot a^y \cdot V^n \quad (I.4)$$

C : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné, p : Profondeur de passe en mm, a : Avance en mm/tr et x, y : Exposants dépendant de la nuance de l'outil.

I.8.3 La loi de König – Depiereux

Cette loi prend en compte l'influence de l'avance f et la profondeur de passe a_p dans une équation exponentielle (équation 1.5) (Figure I-11.c) [33].

$$T = e^{(-\alpha V^\gamma - \gamma a^u - \delta p^t)} \quad (I.5)$$

$$T = e^{(-\alpha V^\gamma + \beta)} \quad (I.6)$$

Modèle simplifié

$$\beta = -\gamma a^u - \delta p^t = cste$$

De la même façon que précédemment, on cherche à faire passer au mieux des points expérimentaux, sous la forme logarithmique on obtient :

$$\log T_i = -\alpha V_i^{\gamma+\beta} \quad (I.7)$$

Par approches successives, on détermine la valeur de γ , ensuite le calcul de α et β est immédiat.

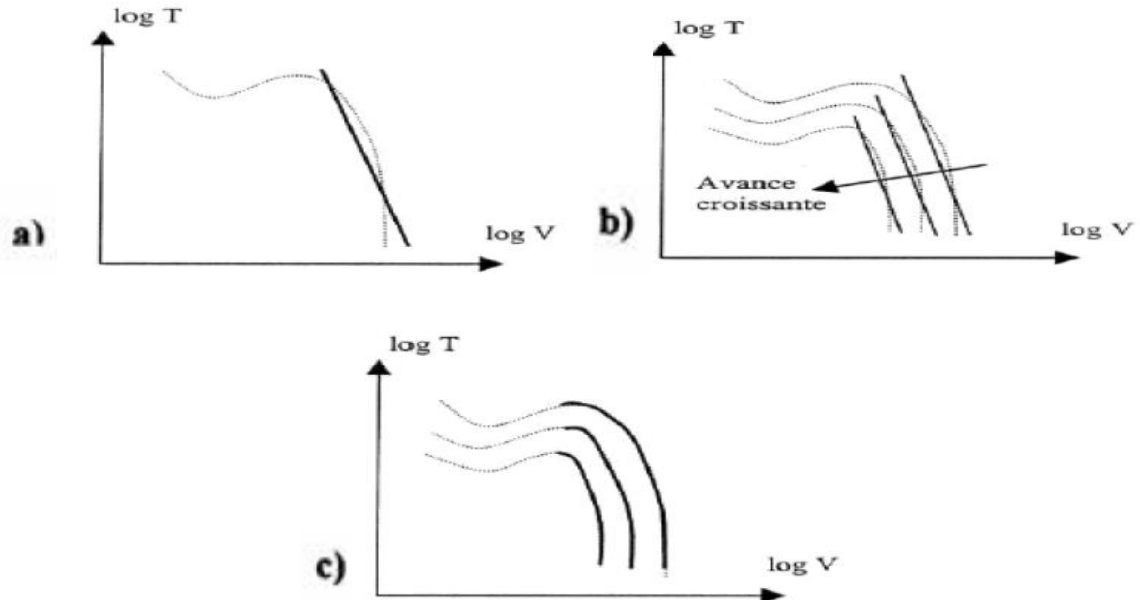


Figure I.11 Les modèles mathématiques d'usure [32].

I.9 Etat de surface

I.9.1 Généralités

Le phénomène « État de surface », est les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont le plus souvent mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profil mètre, qui relèvent le profil de la surface.

Un profil de surface, est composé de différents écarts géométriques, auxquels correspondent différents profils (Tableau I.1).

❖ Profil primaire (ordre 1 + 2 + 3 + 4)

On appelle aussi profil P, sur lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole P, par exemple P_t , P_a

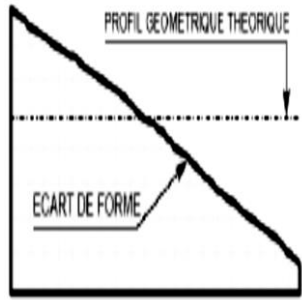
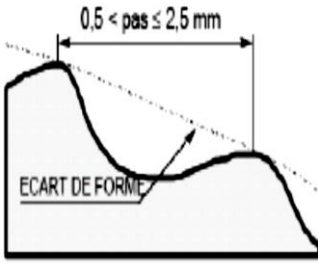
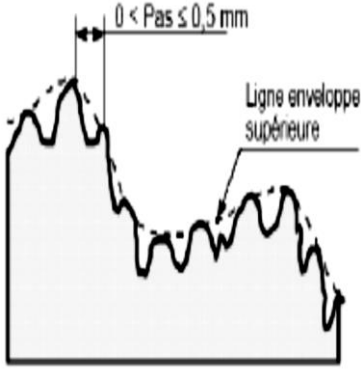
❖ **profil d'ondulation (ordre 2)**


On appelle aussi profil W, sur lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole W, par exemple W_t , W_a ...

❖ **profil de rugosité (ordre 3 + 4)**

On appelle aussi profil R, sur lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole R, par exemple R_a , R_z ...

Tableau I.1 Ordres de grandeur des irrégularités géométriques [34].

Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques			
Ordres	Écarts géométriques	Croquis	Origines possibles
1	Écarts géométriques : Défauts de planéité ; de rectitude ; de circularité ; de cylindricité, etc.		Défaut de bridage. <ul style="list-style-type: none"> ➤ Flexion des éléments de la machine ➤ Qualité du guidage des éléments coulissants. ➤ Usure des organes. ➤ Déformation de la pièce : <ul style="list-style-type: none"> ✓ Pendant l'usinage, indépendamment du procédé. ✓ Après l'usinage, dépendant du matériau (libérations des contraintes internes).
2	Ondulation : Irrégularités géométriques, telle que la distance entre deux sommets d'irrégularités soit comprise entre 500 μm et 2 500 μm		Vibrations basses fréquences : <ul style="list-style-type: none"> ➤ De la pièce. ➤ De l'outil. ➤ Les deux, dues aux flexions, au mauvais guidage et équilibrage des éléments de la machine, et également à l'insuffisance de l'installation de l'isolation passive et active
3	Rugosité : Irrégularités géométriques, telle que la distance entre deux pics de ces irrégularités soit comprise entre 0 et 500 μm (1).		Vibrations hautes fréquences (causes analogues à celles énumérées ci-dessus). <ul style="list-style-type: none"> ➤ Installation de lubrification: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Lubrifiant : nature, qualité lubrifiante, action de refroidissement, stabilité dans le temps. ✓ Mode d'arrosage. ✓ Filtre : efficacité du système (entre autres fréquences de nettoyage). ➤ Procédés par enlèvement de copeaux : STRIES, SILLONS dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil ; à l'avance par tour de la pièce ou de la meule, etc.

			<ul style="list-style-type: none"> ➤ Qualité de la géométrie de l'outil. ➤ Hétérogénéité, plasticité du matériau.
4	Arrachement : Marque d'outil, fente, piqûre,... (irrégularités a périodiques)		Ensemble des écarts de profil dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une ou plusieurs fonctions données.

La frontière entre la rugosité et l'ondulation est arbitraire, aucune définition absolue n'existe. En pratique, le classement s'effectue à partir de la distance entre les pics (Tableau I.2).

Tableau I.2 Classement pratique des différents écarts géométriques [34].

Ecart géométrique	Distance entre les pics (en μm)
Ecart de forme (ordre 1)	Entre 2 500 à 8 000 et longueur de l'élément
Ondulation (ordre 2)	Entre 250 à 800 et 2 500 à 8 000
Rugosité (ordre 3 et 4)	Entre 2 et 250 à 800

I.9.2 Paramètres de mesure des irrégularités.

I.9.2.1 Paramètres liés aux motifs

Un motif est une portion du profil situé entre les points les plus hauts de 2 saillies locales du profil, consécutives ou non. Il est caractérisé par sa longueur et par la hauteur de chacun de ses côtés (Figure I.12) [35]. On distingue les motifs de rugosité et les motifs d'ondulation à l'aide de deux opérateurs : l'opérateur A, qui est la limite entre un motif de rugosité et un motif d'ondulation et l'opérateur B, qui est la limite entre un motif d'ondulation et un écart de forme. Bien que non définis précisément, les valeurs conventionnelles et recommandées par la norme ISO 12085 de ces opérateurs sont $A=0,5\text{mm}$ et $B=2,5\text{mm}$.

Un motif de rugosité (Figure I.13) est calculé en utilisant l'opérateur A. Par définition, un motif de rugosité a une longueur AR inférieure ou égale à A. Il est caractérisé par son pas AR_i et ses profondeurs élémentaires H_j et H_{j+1} .

Un motif d'ondulation (Figure I.14) est déterminé sur la ligne enveloppe supérieure du profil en utilisant l'opérateur B. Il est caractérisé par son pas AW_i et ses profondeurs élémentaires Hw_j et Hw_{j+1} .

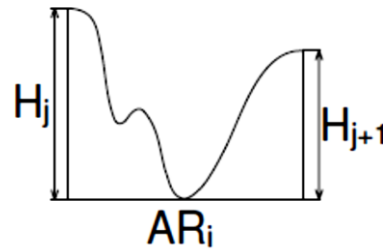


Figure I.12 Motif de rugosité [34].

AR_i = Pas élémentaire du motif.

H_j et H_{j+1} = Profondeurs élémentaires du motif.

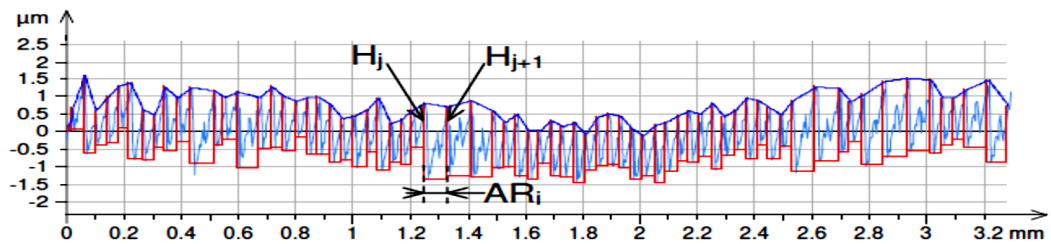


Figure I.13 Exemple de détermination des motifs de rugosité.

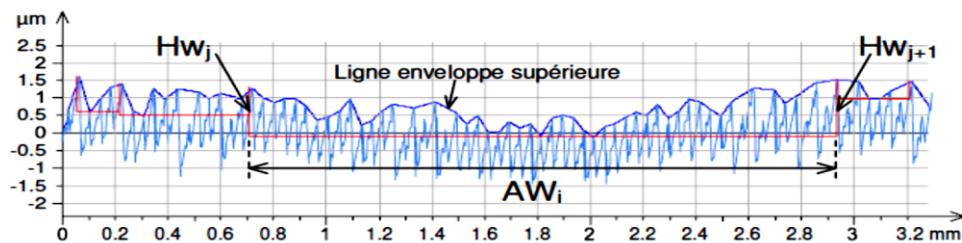


Figure I.14 Exemple de détermination des motifs d'ondulation.

La définition des principaux paramètres liés aux motifs est présentée dans le Tableau I.3.

Tableau I.3 Principaux paramètres liés aux motifs [36].

Définitions des paramètres liés aux motifs			
Intitulé	Définition	Profil de rugosité	Profil d'ondulation
Pas moyen des motifs	Moyenne arithmétique des longueurs des motifs	$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$	$AW = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m AW_i$
		n= nombre de motifs de rugosité	m= nombre de motifs d'ondulation
Profondeur moyenne des motifs	Moyenne arithmétique des profondeurs des motifs	$R = \frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} H_j$	$W = \frac{1}{m+1} \sum_{j=1}^{m+1} HW_j$
		n= nombre de motifs de rugosité	m= nombre de motifs d'ondulation

I.9.2.2 Paramètres liés à la ligne moyenne

La référence pour le calcul des paramètres est la ligne des moindres carrés calculée sur une longueur de base. La valeur moyenne des paramètres est calculée en effectuant la moyenne des valeurs trouvées sur toutes les longueurs de base (Figure I.15).

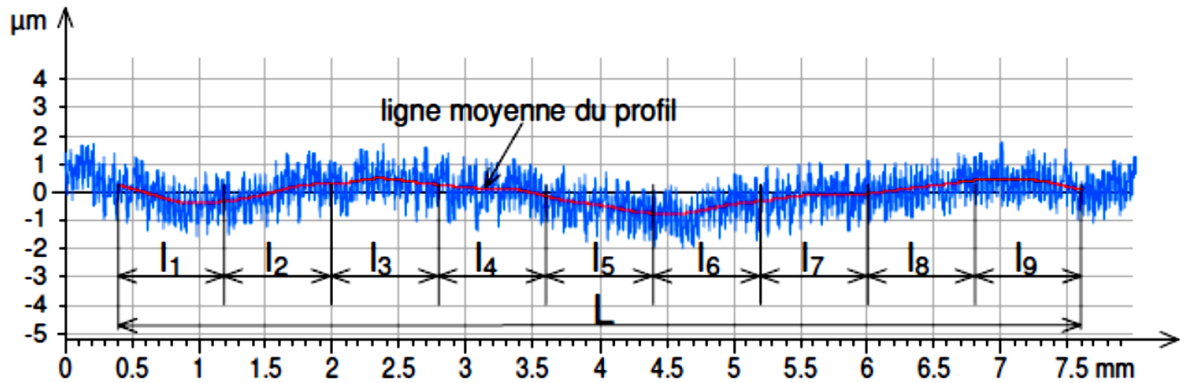


Figure I.15 Ligne moyenne du profil.

La définition des principaux paramètres liés à la ligne moyenne est présentée dans le Tableau I.4.

Tableau I.4 Principaux paramètres liés à la ligne moyenne [36].

Définition des paramètres liés à la ligne moyenne		
Intitulé	Symbole	Définition
Hauteur totale du profil	R_t W_t	<p>Somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, Z_p, et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, Z_v, à l'intérieur de la longueur d'évaluation.</p>
Écart moyen arithmétique du profil évalué	R_a W_a	<p>Moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées $Z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base :</p> $R_{a_i}, W_{a_i} = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) \cdot dx$ $R_a = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K R_{a_i} , W_a = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K W_{a_i}$ <p>Avec k=nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)</p>
Hauteur maximale du profil	R_z W_z	<p>Rz_i: somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, Z_p, et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, Z_v, à l'intérieur d'une longueur de base.</p> $Rz = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K Rz_i$ <p>Avec k=nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)</p>

I.9.2.3 Paramètres liés à la courbe de portance

Lorsque la surface mesurée présente des creux relativement profonds sous un plateau dont le fini est plus fin, avec une faible ondulation, le profil de rugosité engendré par filtrage subit certaines distorsions indésirables. Une autre méthode de filtrage a été développée pour réduire ces distorsions permettant ainsi la définition de paramètres de rugosité liés à la courbe de taux de portance ou courbe d'Abbott-Firestone (définie dans la norme ISO 4287). Cette courbe décrit l'augmentation du taux de longueur portante T_p en fonction de l'augmentation de la profondeur du profil de rugosité.

Ces paramètres constituent une classe de paramètres d'état de surface caractérisant l'aspect fonctionnel d'une surface, à savoir le contact, le rodage et la lubrification.

Ces points d'intersection permettent de diviser horizontalement la courbe en trois secteurs (Figure I.16):

- La zone des pics, jouant un rôle dans les rodages mécaniques.
- La zone centrale, jouant un rôle dans les contacts.
- La zone des creux, jouant un rôle dans la lubrification.

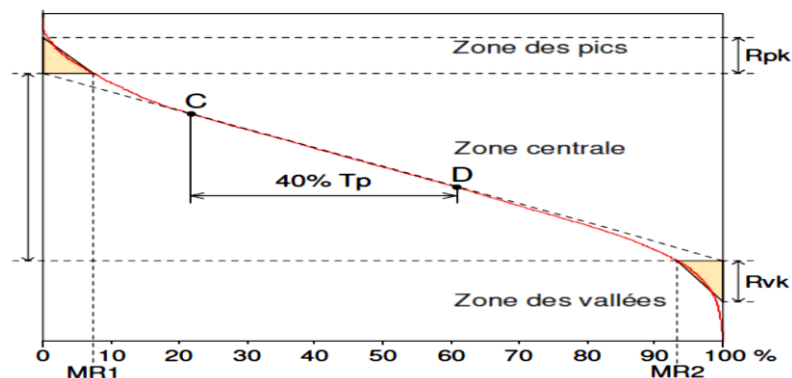


Figure I.16 Définitions des paramètres liés à la courbe de portance.

Les paramètres déterminés par rapport à la courbe de portance sont définis dans le Tableau I.5

Tableau I.5 Principaux paramètres liés à la courbe de portance [36].

Définition des paramètres liés à la courbe de portance		
Intitulé	symbole	Définition
Profondeur du profil écrêté	Rk	Profondeur de la partie centrale du profil de rugosité.
Hauteur des pics éliminés	Rpk	Hauteur moyenne des pics saillants situés au-dessus du profil écrêté
Hauteur des creux éliminés	Rvk	Hauteur moyenne des creux situés au-dessus du profil écrêté.
Taux de longueur portante MR1	MR1	Taux (%) déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les pics saillants du profil écrêté.
Taux de longueur portante MR2	MR2	Taux (%) déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les creux du profil écrêté.

I.10 Comportement mécanique du système pièce/outil/machine (POM)

La machine-outil est un ensemble complexe mettant en œuvre un ou plusieurs procédés, des éléments de structure fixes (bâtis, glissières) ou mobiles (broches et arbres tournants dans des paliers) ainsi qu'une partie commande. La machine-outil est donc un véritable système qui doit être étudié comme tel. Tous les éléments, qu'ils soient actifs ou passifs, interagissent. La machine à un comportement dynamique dont ne saurait rendre compte l'étude séparée de chacun de ses éléments [17].

Malgré leurs diversités apparentes, les machines-outils ont pratiquement les mêmes structures et sont composées des mêmes éléments de base. La constitution générale d'une machine-outil (figure I.17) permet de distinguer deux parties :

- Une partie indépendante de l'opération d'usinage,
- Une partie dépendante de l'opération d'usinage.

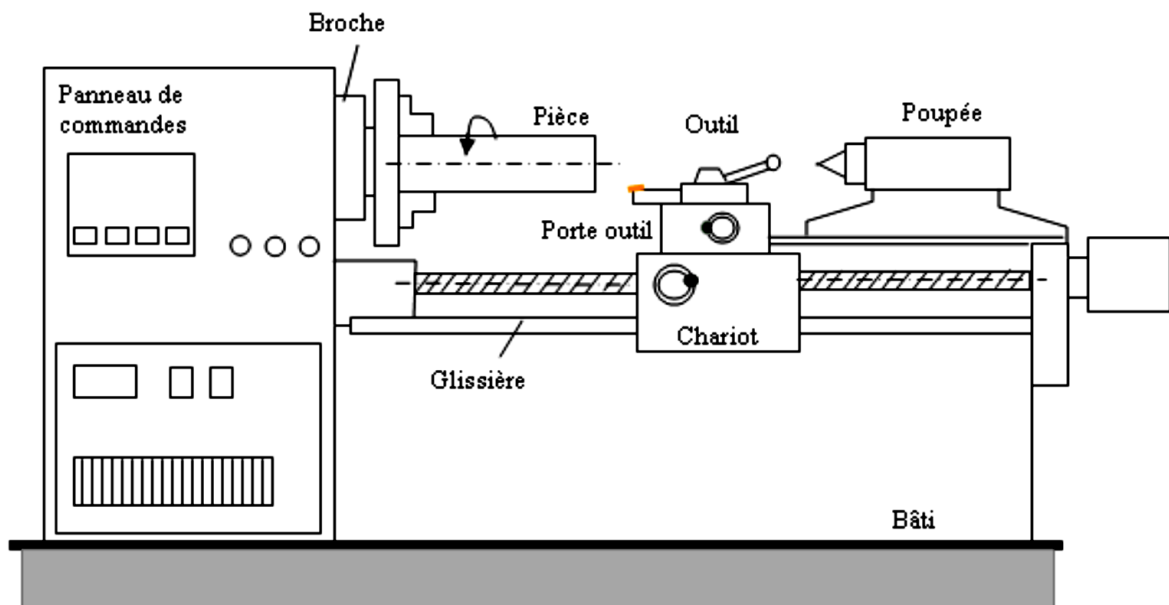


Figure I.17 Constitution générale d'une machine-outil.

I.11 Techniques d'analyse [37]

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance. Il existe différentes techniques d'analyse (figure I.18) tels que :

- ❖ **L'analyse vibratoire** est la plus largement utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

- ❖ **L'analyse d'huile** est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, ...). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser pour déduire l'état de l'équipement.
- ❖ **La thermographie infrarouge** : Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.
- ❖ **L'analyse acoustique** : permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.
- ❖ **Le contrôle par ultrasons** : permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement.

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts.

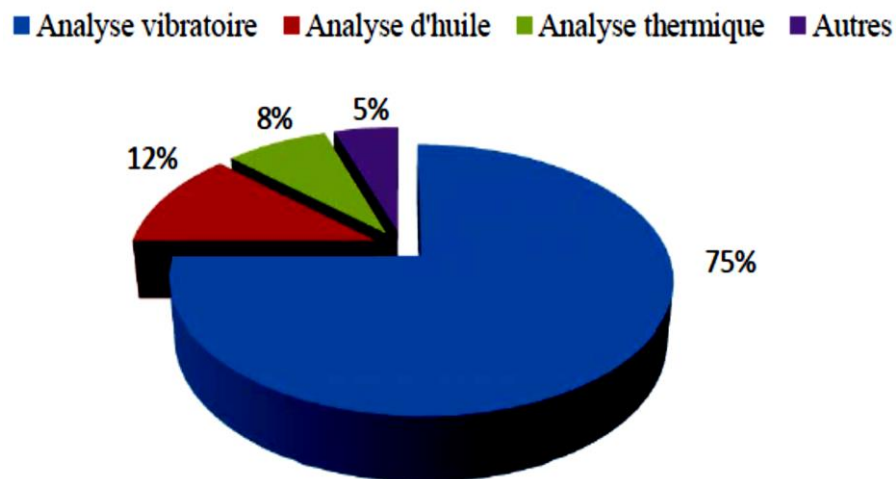


Figure I.18 Les Techniques d'analyse.

I.12 Source des vibrations du système POM

Les causes d'excitation du système POM sont principalement les défauts d'équilibrage, les défauts liés à la chaîne cinématique et les oscillations provenant de l'asservissement de pilotage. Les sources d'excitation qui sont liées à l'usinage sont de quatre types [17] :

- ❖ **La coupe** : c'est à cause de l'hétérogénéité du matériau qui conduit à une répartition statistique de micro-duretés et l'instabilité de l'écoulement du copeau.

- ❖ **Discontinuités d'usinage** : Il se rencontre en fraisage et en tournage discontinu. Chaque choc, a l'établissement ou a la rupture du contact entre une arête de coupe et de la pièce, conduit à un régime transitoire. La fréquence des chocs dépend de la vitesse de rotation de la broche, du nombre d'arêtes et de la configuration de la pièce.
- ❖ **Excitation périodique** : dans le cas du tournage d'une pièce excentrée ou la reprise d'un alésage dont l'avant trou est excentré. Le comportement est différent selon la valeur relative de la vitesse de rotation par rapport aux fréquences propres du système POM. Il est également possible d'avoir une répétition de discontinuités.
- ❖ **Phénomène de régénération** : est lié au fait qu'à chaque tour l'outil ré-usine la surface qu'il a générée au tour précédent. Des termes retardés apparaissent introduisant des non-linéarités dans les équations de la dynamique régissant le comportement du système POM.

I.13 Les méthodes de mesures des vibrations [38]

I.13.1 Mesures directes

Le capteur mesure directement les vitesses ou accélérations de la pièce ou de l'outil en cours de l'usinage, il faut choisir le capteur avec précaution. Nous montrons ici les mesures avec et sans contact.

I.13.1.1 Mesure Avec Contact

Le capteur de vibrations appelé accéléromètre doit être placé en contact avec le corps à mesurer, il faut donc le placer sur la broche pour capter le signal de l'outil. Il faut également faire attention à l'endroit où est placé le capteur, pour éviter tout risque de choc entre l'outil et l'accéléromètre.

Les capteurs de déplacement (capacitif, inductif) sont aussi des capteurs avec contact. Ces capteurs ne posent pas le problème de la masse ajoutée comme les accéléromètres. Par contre, la petite distance de mesure peut entraîner des collisions sous l'effet de l'amplitude des vibrations, qui peuvent endommager le capteur.



Figure I.19 Accéléromètre 3D.

I.13.1.2 Mesure sans contact

Les capteurs sans contact sont capables de mesurer les vibrations du système usinant à une distance importante. Ceci ne pose pas le problème de l'interaction entre le capteur et la pièce à mesurer. Les capteurs de pression acoustique (microphone, sonde d'intensité acoustique) sont sensibles aux bruits environnants. Ainsi, ils capteront aussi bien les vibrations de la pièce que les vibrations de l'outil. Mais c'est également un inconvénient. Ils vont également capter le son émis par d'autres sources que le système usinant en vibration. Il faut donc être capable d'isoler le signal recherché du signal mesuré.

Les vibromètres laser sont également utilisés, ils ne mesurent que le corps sur lequel il est pointé. L'avantage de ce capteur présent de pouvoir mesurer les vibrations depuis l'extérieur de l'enceinte de la machine, le faisceau laser passant à travers les vitres. Par contre, il est très difficile de réaliser des mesures d'usinage sous lubrification, le faisceau n'étant pas réfléchi correctement par la surface du corps à mesurer.



Figure I.20 vibromètre laser.

I.13.2 Mesure indirect

Les mesures les plus courantes sont les mesures des vibrations de l'outil que les vibrations de la pièce. Le capteur d'efforts (dynamomètre) se présente sous la forme d'une platine sur laquelle est montée la pièce, et qui est installée sur la table de la machine. Le capteur mesure ainsi les efforts dans les trois directions. Cependant, il faut prendre garde à ce que le comportement dynamique du capteur n'interfère pas avec le comportement du système usinant. Le premier mode propre de ces platines se situe aux environs de 1 kHz, ce qui est du même ordre de grandeur que les fréquences de vibrations du système usinant. Nous risquons alors de mesurer les vibrations de la platine, et non du système usinant.

I.14 Méthodes limitant les effets des vibrations

Plusieurs travaux montrent que les sources des vibrations pouvant influencer sur l'usinage, donc des études proposant des méthodes pour limiter les effets néfastes des vibrations qui sont principalement basées sur le principe de la régénération de la surface.

On peut classer ces méthodes en deux familles :

I.14.1 Les méthodes prédictives

Deux méthodes permettant de prédire les conditions d'apparition de vibrations auto-excitées, les méthodes numériques et les méthodes mathématiques.

Parmi les méthodes numériques, qui sont les plus utilisées, on trouve principalement deux approches : l'approche périodique ou analytique et l'approche temporelle.

I.14.1.1 L'approche périodique ou analytique

Elle introduit de nombreuses simplifications permettant de diminuer la complexité des équations : on se place dans le cas simple de la coupe orthogonale (Figure I.21) ; la machine est considérée parfaite (de rigidité infinie) et l'outil est assimilé à un système masse-ressort dont les modes sont découplés. L'effort de coupe est pris en fonction de la section du copeau et de la pression spécifique de coupe qui dépend du matériau.

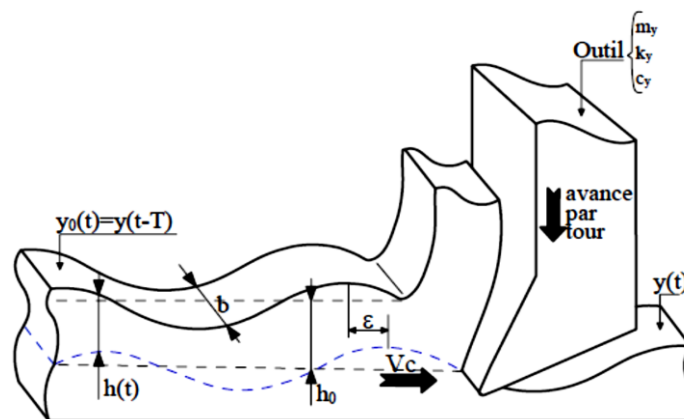


Figure I.21 Représentation de la coupe orthogonale

L'approche périodique est à la base de la théorie des lobes de stabilité [39, 40] qui donne en fonction de la vitesse de rotation de la broche N et de la largeur de coupe b , des zones où l'usinage est supposé stable. Les résultats de cette approche sont tout à fait acceptables et d'une utilisation industrielle [39, 41] tant que les hypothèses restent valables. Les limites de ces hypothèses sont cependant souvent rencontrées lors de phases de finition où la moindre vibration de l'outil engendre des variations importantes de l'épaisseur de copeau (par rapport aux épaisseurs nominales) et donc

de très fortes variations des efforts de coupes. La linéarisation du modèle n'est alors plus réaliste [42].

I.14.1.2 L'approche temporelle

L'approche temporelle permet de décrire l'évolution du système au cours du temps. Elle ne fait pas d'hypothèse de périodicité et prend en compte l'histoire complète de l'évolution du système usinant et de la pièce usinée. Elle est basée sur un processus de résolution incrémentale qui nécessite une mise en œuvre numérique coûteuse en temps de calcul [43], [44]. La prise en compte de tous les phénomènes non-linéaires intervenant lors de la coupe est potentiellement possible. Cependant, cette modélisation demande une description géométrique de la pièce et des interactions outil-pièce qui induit des algorithmes très élaborés et coûteux en temps. Il est donc nécessaire de faire un compromis entre la complexité de la modélisation géométrique, celle des phénomènes pris en compte et le temps de calcul.

I.14.2 Les méthodes de contrôle

Différentes solutions ont été envisagées pour limité le phénomène de broutage [34].

- La modulation continue de la vitesse de rotation de la broche pour éviter l'installation et le développement de l'effet régénératif.
- L'adaptation de la longueur de l'outil pour que la vitesse de rotation souhaitée de la broche se situe dans une zone de coupe stable.
- L'ajout d'éléments actifs ou passifs permettant l'amortissement des vibrations dès l'apparition de celles-ci

Les problèmes de vibrations sont très importants en usinage, mais il existe des solutions pour les limités. Les méthodes de contrôle donnent de bons résultats et sont industriellement simple à mettre en œuvre. Les autres, les méthodes prédictives, permettent une meilleure compréhension des phénomènes, mais sont quant à elles très difficiles à faire entrer dans les ateliers d'usinage.

I.15 Les Outils d'analyse vibratoire [45].

I.15.1 Analyses dans le domaine temporel.

Cette approche est utilisée pour minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres, elle utilise des indicateurs scalaires pour suivre l'évolution d'une grandeur décrivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal.

I.15.1.1 Valeur efficace ou valeur RMS

Cette valeur est très utilisée, mais en générale cette dernière ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans la maintenance prédictive, Elle s'écrit comme suit :

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (I.8)$$

D'où

$x(n)$: signal temporel mesuré.

N_e : nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

I.15.1.2 Facteur crête

Les indicateurs spécifiques comme le facteur de crête est mieux adapté pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles, il est défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace, il s'écrit comme suit :

$$F_{\text{valeur Crête}} = \frac{\text{Sup } |x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (I.9)$$

I.15.1.3 Kurtosis

C'est un indicateur qui définit par le moment d'ordre 4 de la distribution des amplitudes vibratoires il traduit la largeur de la courbe de densité de probabilité du signal. Un signal ayant un Kurtosis > 3 se représente par une distribution plus étroite dominée par la présence d'amplitudes crêtes anormalement élevées comme c'est le cas en présence de chocs répétés. Le Kurtosis permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut, il s'écrit comme suit :

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (I.10)$$

D'où

$x(n)$: le signal temporel.

\bar{x} La valeur moyenne des amplitudes.

N : le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

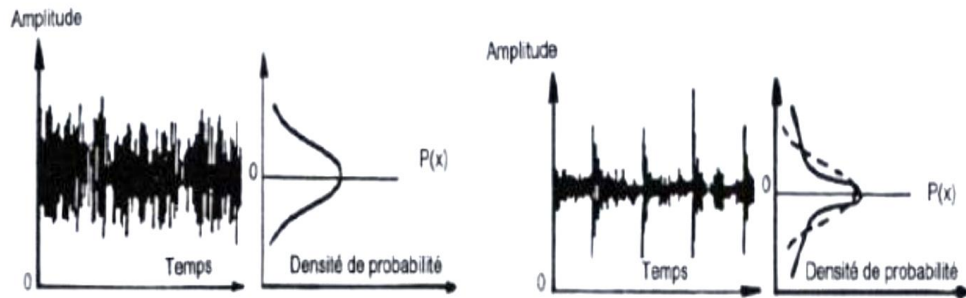


Figure I.22 Distribution d'amplitude du signal temporel [45].

I.15.2 Analyses dans le domaine fréquentiel

Toute anomalie affectant une machine tournante se traduit par des vibrations dont les fréquences correspondent aux fréquences d'apparition des forces les induisant et de leurs harmoniques. C'est pourquoi, pour le diagnostic, il est intéressant de décomposer le signal vibratoire mesuré en ses sinusoïdes élémentaires dont les amplitudes et les fréquences peuvent être lues.

I.15.2.1 Analyse spectrale

Cette analyse doit être appliquée lors de l'acquisition et du traitement du signal temporel, elle doit respecter de plusieurs facteurs :

- Estimation de la fréquence maximale d'analyse sur la base des conditions de fonctionnement et de la cinématique de l'installation.
- Connaissance de la résolution permettant de dissocier des fréquences voisines. En cas d'insuffisance de cette finesse d'analyse, il est possible de l'améliorer par la technique de zoom.
- Choix de la fenêtre de pondération conditionnant la lisibilité du spectre.

L'interprétation d'un spectre sera d'autant plus précise et pertinente que les conditions de fonctionnement et la cinématique de la machine sont connues, tel que le type de moteur, le type de roulements, le nombre de dents des engrenages.

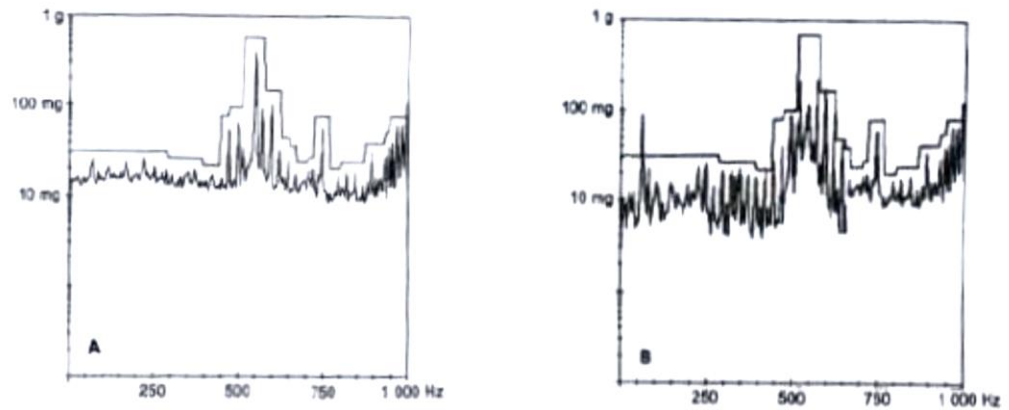


Figure I.23 Spectre gabarit à large bande.

I.15.2.2 Analyse d'enveloppe

Le spectre du signal enveloppe est intéressant dans la mesure où la fréquence de sa composante fondamentale correspond à l'ordre 1 de la fréquence de répétition des chocs. En pratique, pour obtenir le spectre du signal enveloppe, il faut trouver la fréquence maximale en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre et de la nature des défauts, filtrer la réponse sur la résonance choisie, et enfin calculer le spectre du signal enveloppe.

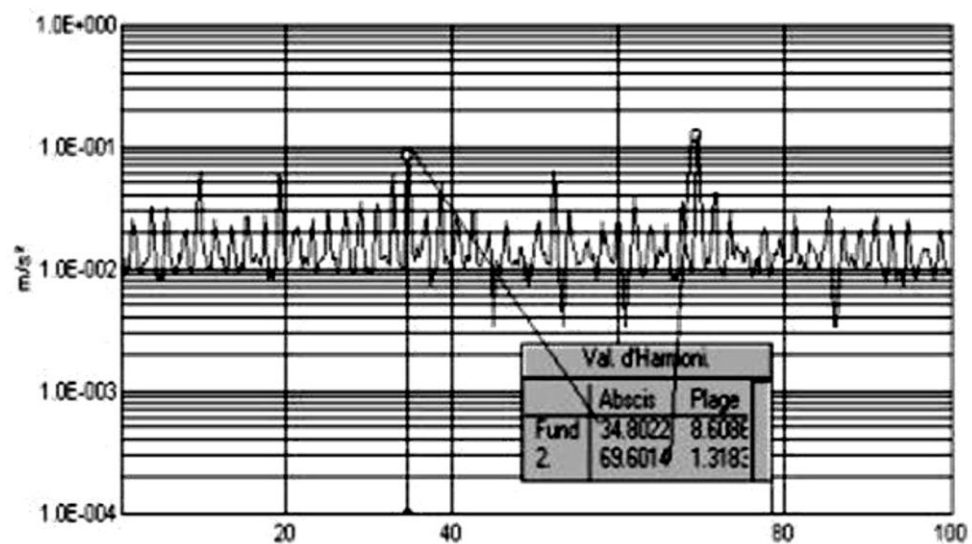


Figure I.24 Spectre enveloppe [37].

I.15.2.3 Technique du HFRT (High Frequency Resonance Technique)

Cette technique permet l'analyse des réponses impulsionnelles de résonance. L'idée repose sur l'amplification des amplitudes du signal lorsqu'une résonance est excitée. La lecture du spectre devient alors plus claire. Cette technique a été depuis longtemps mise à profit dans la détection des défauts sur les roulements.

I.15.2.4 Analyse cepstrale

Mathématiquement, le cepstre temporel d'un signal $x(t)$ est la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de sa transformée de Fourier directe :

$$C[x(t)] = F^{-1}[\log F[x(t)]] \quad (\text{I.11})$$

I.15.3 Analyses dans le domaine temps-fréquence

L'inconvénient majeur de la précédente technique est son incapacité à traiter ces signaux non-stationnaires, pourtant apparaissant fréquemment lors de défauts sur les machines. C'est ainsi que furent développées les méthodes visant à se pencher à la fois sur la variation dans le temps et sur les fréquences du signal.

I.15.3.1 La transformation de Fourier à fenêtre glissante

Il s'agit de décrire de façon la plus précise possible une partie du signal, en termes de temps et de fréquence. L'idée consiste à procéder à un fenêtrage glissant en tronquant le signal de façon à ne le considérer que sur un intervalle fini. Cette opération de troncature se traduit mathématiquement par la convolution avec le sinus cardinal, transformée de Fourier de la fonction « porte ».

La transformation dite « de Gabor » consiste à décomposer et analyser un signal en fréquence morceau par morceau. Pour cela, on utilise une fenêtre glissante centrée autour d'un temps b qui détermine une zone contenant des oscillations. C'est ainsi qu'on parle d'Analyse de Fourier à fenêtre glissante ou de STFT (Short Time Fourier Transform).

Le signal résultant du fenêtrage temporel de fonction $w(t)$ possède un spectre :

$$X_{\pi,b}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_{\pi,b}(\theta) \cdot e^{-i2\pi f\theta} d\theta \quad (\text{I.12})$$

Sur la figure I.25, on a visualisé la transformée de Fourier de la somme de deux signaux sinusoïdaux.

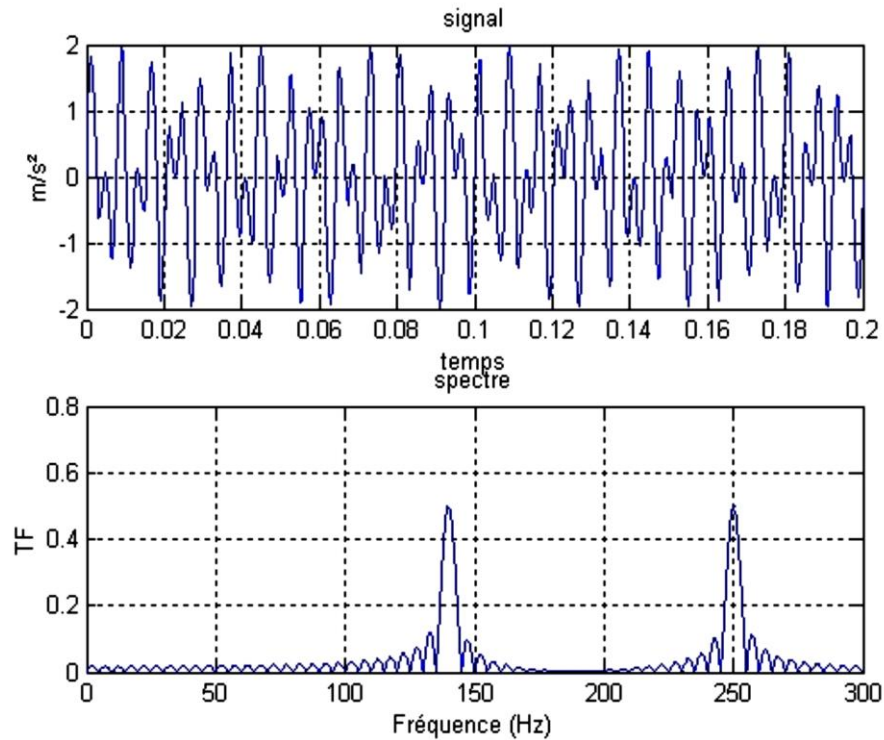


Figure I.25 Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes [37].

I.15.3.2 La transformation de Wigner-Ville

L'efficacité de cette transformation de Wigner-Ville dans le cas d'une distribution d'énergie du signal dans les domaines temporel et fréquentiel. L'étude des comportements et le diagnostic des défauts sur les machines tournantes peuvent être réalisés grâce à cette méthode. La transformée de Wigner-Ville d'un signal déterministe est définie par :

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-2\pi f \tau} d\tau \quad (\text{I.13})$$

Les applications de cette méthode s'étalent sur plusieurs domaines. Elle fut la base de l'élaboration d'un programme de diagnostic de systèmes et de suivi vibratoire de la pompe de refroidissement de réacteur au sein d'une centrale nucléaire.

I.16 Les types de vibrations

Les problèmes de vibrations en usinage, sont apparus dès le début du XX^e siècle. Frederick W. Taylor en 1907 évoquait le broutement en usinage comme l'un des problèmes les plus délicats à traiter. Il a été constaté que trois types de vibrations sont présents dans le cas d'une opération d'usinage, les vibrations libres, les vibrations forcées, et les vibrations auto-entretenues [46].

I.16.1 Les vibrations libres

Elles correspondent à la réponse vibratoire naturelle de tout système mécanique à une brève excitation, un impact. Dans le cas de l'usinage, que ce soit en fraisage ou en tournage, elles sont généralement utilisées pour la caractérisation du système, lors d'un sonnage ou test du marteau ("hammer test" en anglais) (Figure I.26).

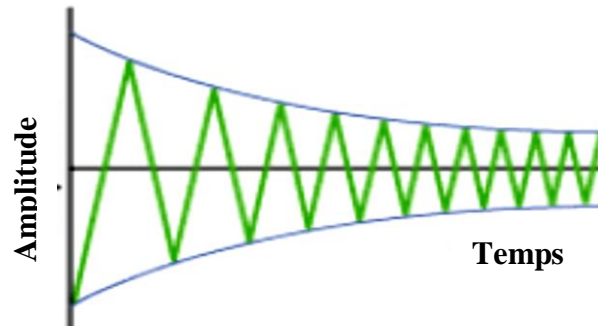


Figure I.26 Les vibrations libres.

I.16.2 Les vibrations forcées

Les vibrations forcées sont la réponse vibratoire d'un système mécanique à une excitation périodique. Pour ce qui est de l'usinage, c'est par exemple la réponse du système lors d'une opération ou la coupe est interrompue.

Ce type de vibrations peut également apparaître dans le cas du tournage d'une pièce non cylindrique. Dans ce cas, la variation de la profondeur de passe au cours d'une révolution, entraînera comme dans le cas du fraisage, des variations d'effort et donc excitera l'outil en vibrations forcées.

Ces vibrations ont un impact relativement faible sur l'état de surface car elles ont la même fréquence que le passage de dents. Par conséquent, à chaque tour d'outil, l'enlèvement de matière est identique ce qui n'implique pas d'irrégularités lors de l'usinage (Figure I.27).

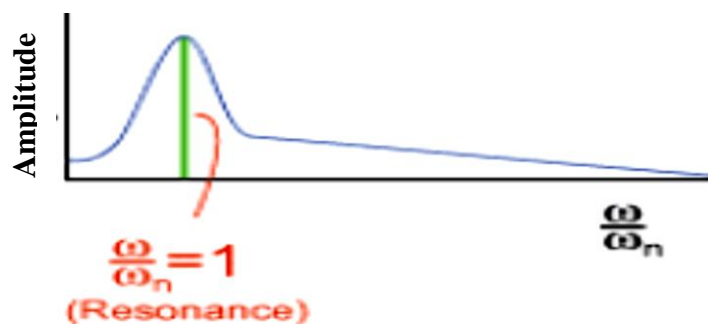


Figure I.27 Les vibrations forcées .

I.16.3 Les vibrations auto-entretenues

Les vibrations auto-entretenues ont pour source le passage d'un régime de coupe stabilisé à un régime de coupe instable. C'est-à-dire quand le système usinant se met à vibrer à une fréquence différente de la fréquence de passage de dent, le régime dynamique de la coupe est différent du régime dynamique de l'outil. Elles sont la cause du phénomène appelé broutement (ou "chatter" en anglais), ce phénomène est très préjudiciable car il entraîne généralement :

- Un bruit très désagréable lors de l'usinage. Même si ce point n'a pas de conséquence sur la qualité de la pièce finie, il est à prendre en compte par rapport à l'environnement de travail des opérateurs.
- Une usure prématurée de la broche de la machine.
- Un très mauvais état de surface de la pièce finie.

Une baisse de la durée de vie de l'outil en accélérant l'usure ou dans des cas extrêmes en entraînant la casse de l'outil (Figure I.28).

Zhao et Balachandran [47] évoquent les sources reconnues de ces vibrations auto-entretenues et les classent en deux catégories. Elles peuvent être d'origines régénératives et non-régénératives.

I.16.3.1 Broutement d'origine régénératif

Le broutement régénératif, doit son origine dans la régénération de la surface précédemment usinée. Dans le cas d'un usinage par enlèvement de matière, l'outil ré-usine la surface de la passe précédente. Cette surface a été générée en présence de vibrations forcées. Ces vibrations engendrent une surface aux ondulations régulières.

I.16.3.2 Broutement d'origine non-régénératif

Le broutement d'origine non-régénératif a plusieurs causes possibles :

- D'autres phénomènes non-linéaires dus à la coupe de la matière comme : le talonnage entre l'outil et la pièce [48] ou les effets thermomécaniques liés à la formation du copeau.
- Le couplage des modes de vibrations, chacun des axes de l'outil ou de la machine possède des modes de vibrations qui peuvent s'influencer.
- Les non-linéarités apparaissant lors d'un usinage très instable. Dans certains cas, l'outil aura tendance à sortir de la matière lorsque les vibrations sont trop importantes. Ceci entraîne un comportement non-linéaire du système pièce-outil.

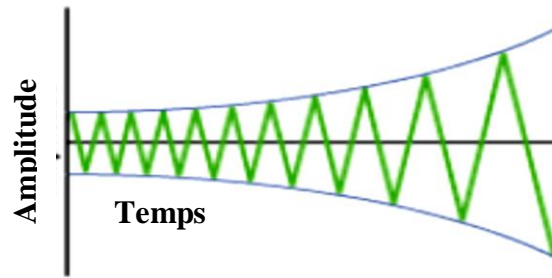


Figure I.28 Les vibrations auto-entretenues.

I.17 Optimisation du processus d'usinage

Optimiser, c'est rechercher la solution la plus satisfaisante tout en respectant un certain nombre de contraintes. Dans le cas d'une mise en œuvre d'une nouvelle production ou d'une amélioration d'une production existante, il peut être nécessaire d'optimiser le choix des paramètres de coupe. Il existe de nombreux critères selon lesquels on peut optimiser les paramètres de coupe mais on ne présentera ici que les trois principaux :

- Coût minimum d'usinage,
- Temps minimal d'usinage cadence maximale de fabrication,
- Volume de copeau donné par arête de coupe.

Dans l'ordre de s'assurer que les résultats sont physiquement significatifs, des contraintes sur les paramètres du procédé de tournage (a_p , f , V_c) sont ajoutées aux modèles. Ces contraintes sont nécessaires pour que les paramètres du procédé restent dans des limites raisonnables garanties par le plan d'expérience validé.

I.17.1 Optimisation mono-objectif

Tout dépendra de l'objectif ciblée, l'optimisation mono-objectif pourra être soit la minimisation ou de maximisation de cette objective. Les différents objectifs envisagés sont :

- Réduire la rugosité de surface R_a et R_z pour améliorer l'état de surface ;
- Réduire les accélérations V_x ;
- Réduire les accélérations V_y ;
- Réduire les accélérations V_z ;

I.17.2 Optimisation multi-objectif

Le but de cette optimisation est d'introduire la notion d'aide à la décision au cours de l'optimisation, elle est basée sur une somme pondérée des fonctions objectives :

$$F_{obj} = x_{Ra} \frac{Ra}{Ra_{max}} + x_{Vx} \frac{Vx}{Vx_{max}} + x_{Vy} \frac{Vy}{Vy_{max}} + x_{Vz} \frac{Vz}{Vz_{max}} \quad (I.14)$$

Avec x_{Ra} , x_{Vx} , x_{Vy} , x_{Vz} , sont des facteurs de pondération qui permettent de privilégier tel ou tel objectif en fonction des besoins.

I.18 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté essentiellement la coupe de métaux et l'opération de tournage, ainsi d'autres points en particulier, tels que les zones de coupe, les matériaux de coupe, la formation de copeaux et l'usure des outils. Dans la deuxième partie on a étudié les vibrations en usinage et la rugosité de surface, on a aussi traité l'optimisation du processus d'usinage.

CHAPITRE II LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.1 Introduction

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences.

Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

L'expérimentateur qui entreprend une étude ne connaît pas les résultats, il est donc sage d'avancer progressivement pour pouvoir réorienter les essais en fonction des premiers résultats. Une première ébauche permettra de mieux orienter les essais vers les seuls aspects intéressants de l'étude et d'abandonner les voies sans issues. Une première série d'expériences conduit à des conclusions provisoires ; en fonction de ces conclusions provisoires, on lance une nouvelle série d'essais. L'ensemble des deux séries d'expériences est utilisé pour obtenir un contour précis des résultats d'étude. L'expérimentateur accumule ainsi les seuls résultats dont il a besoin et s'arrête dès qu'il a obtenu ce qu'il cherche [49].

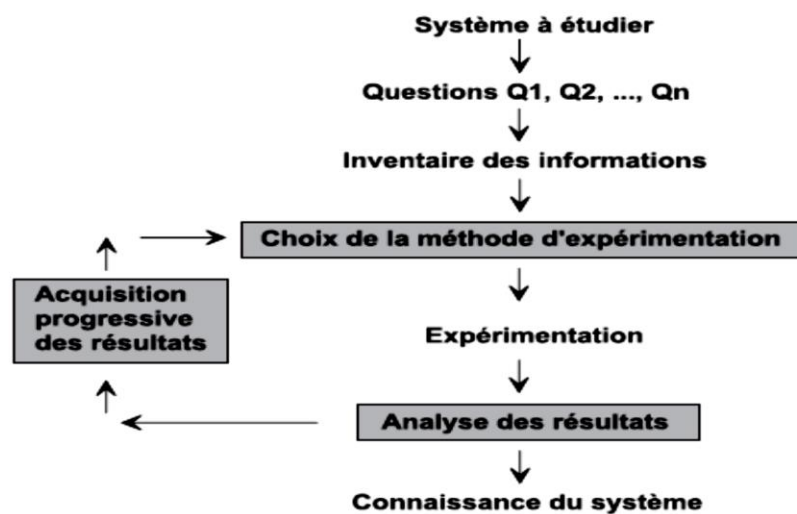


Figure II.1 Les trois parties du processus d'acquisition des connaissances.

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et

économique. La méthodologie des plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple.

Les méthodes des plans d'expériences peuvent être utilisées dans deux types d'investigations: les études de criblage ou screening et Les études de surface de réponse (RSM).

Notre travail de recherche se base sur l'étude de surface de réponse, cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative. Elle vient ainsi s'appliquer à la suite de l'étude de screening, puisque logiquement, elle n'utilise que les facteurs précédemment jugés influents.

II.2 La méthode des surfaces de réponse

L'étude des surfaces de réponses sont apparus dans la seconde moitié du 20ème siècle. Il s'agit de dispositifs expérimentaux plus onéreux que ceux destinés à l'étude des effets des facteurs car nécessitant davantage d'essais, mais permettant de répondre à un objectif spécifique qui correspond à la recherche d'un optimum. Le modèle sous-jacent à la construction de ce type de plan est de forme polynomiale du second degré.

Les plans mis en place avant 1970 sont utilisables dans des domaines isotropes. En présence d'une ou plusieurs contraintes rationnelles, il faut alors avoir recourt à la recherche d'un plan optimal basée sur l'utilisation d'un algorithme d'échange dont la technique est apparue après 1970. Dans tous les cas, l'analyse des résultats d'essais, passant par le calcul des coefficients du modèle, nécessite la mise en œuvre de la méthode des moindres carrés [50].

Dans une application de la méthodologie de surface de réponse (RMS), les variations de la réponse sont calculées en fonction des facteurs et interactions précédemment jugés influents. Cette étude est davantage quantitative, le but étant de déterminer comment la réponse varie.

II.3 Objectif de la méthode des surfaces de réponse

Un grand nombre de problèmes industriels se pose souvent spontanément en termes d'optimisation. En effet, on associe à la recherche d'une performance donnée, la minimisation des coûts. L'objectif visé lors d'une étude de surface de réponse peut être de différentes natures [51] :

- Optimiser (maximiser/minimiser) une ou plusieurs variables de réponse,
- Trouver un compromis satisfaisant entre plusieurs variables de réponse,
- Construire une cartographie de la variation d'une réponse dans un plan, comme ce sera le cas pour nous,

- Rechercher dans quelles proportions on peut mélanger des constituants préalablement choisis.

II.4 Les étapes d'une étude par la méthode des surfaces de réponse

Une dépendance fondamentale existe entre l'objectif recherché (RMS) et la définition du plan d'expériences. Cependant, les étapes de la démarche se déroulent dans un ordre similaire à savoir [50] :

- Définition des réponses.
- Choix d'une stratégie expérimentale.
- Définition des niveaux.
- Définition du domaine expérimental.
- Définition du modèle empirique.
- Construction du plan d'expériences.
- Expérimentation.
- Analyse globale des résultats d'essais.
- Analyse mathématique des résultats d'essais.
- Analyse statistique du modèle.
- Analyse graphique du modèle.
- Validation du modèle et des informations obtenues.

II.4.1 Définition des réponses

Le nombre de réponses est spécifique à chaque étude, on parle d'optimisation multicritères dès que l'on caractérise les objectifs d'un problème à partir d'au moins deux réponses [51].

II.4.2 Choix d'une stratégie expérimentale

Deux grandes approches expérimentales peuvent être appliquées Lorsque'on est confronté à un problème d'optimisation :

II.4.2.1 Les méthodes directes

Consistent à converger séquentiellement vers un optimum local sans faire appel à une forme particulière de modélisation. Les règles de progression séquentielle repose sur le classement des résultats d'essais et sur des principes purement géométriques. On cherche à chaque étape de s'éloigner du plus mauvais résultat.

II.4.2.2 Les méthodes indirectes

C'est l'interprétation du modèle sous forme numérique et/ou graphique qui permet d'obtenir des propositions de réglages permettant d'atteindre un optimum. Comme le nombre de coefficients à estimer (p) croît rapidement avec le nombre de facteurs (k), il est nécessaire de limiter le domaine d'étude.

II.4.3 Définition des facteurs et des niveaux

II.4.3.1 Définition des niveaux

Les niveaux sont fixés par la méthode de construction du plan, au sein d'un domaine dont les bornes sont définies par l'utilisateur. La construction de notre plan pour l'étude de surface de réponse nécessite donc 3 niveaux au minimum pour chacun des facteurs.

II.4.3.2 Codage de la matrice d'expériences

Il convient donc de standardiser les variations de ces paramètres pour avoir accès aux outils généraux de construction des plans d'expériences. Pour cela on utilise une relation de codage unique définie à partir de la transformation bijective définissant la valeur x_i à partir de la relation (équation II.1), que l'on peut retrouver dans l'ensemble des ouvrages traitant des plans pour étude de surface de réponses comme par exemple [51] :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{maxi} + u_{mini}}{2}\right)}{\left(\frac{u_{maxi} - u_{mini}}{2}\right)} \quad (\text{II.1})$$

u_{maxi} et u_{mini} étant les bornes définies par l'utilisateur et u_i le niveau réel donné au facteurs i lors de l'expérimentation. Le facteur codé x transformé du facteur u est sans dimension et ses valeurs sont comprises dans l'intervalle borné $[-1 ; 1]$.

II.4.4 Définition du domaine expérimental

La nature quantitative continue des facteurs induit un nombre de combinaisons infini pour le domaine expérimental, chacun des facteurs pouvant prendre un nombre infini de niveaux particuliers, dans la plage de variation qui leur est associée [52]. Nous nous intéressons donc, dans le cas d'un plan pour l'étude de surface de réponse, à l'enveloppe du domaine expérimental, qui suite à la relation de codage présentée ci-dessus peut présenter deux géométries :

II.4.4.1 Un domaine isotrope

Lorsqu'il n'existe pas de contraintes relationnelles définies entre tout ou partie des k facteurs indépendants.

II.4.4.2 Un domaine anisotrope

Lorsqu'il existe une ou plusieurs contraintes relationnelles définies entre tout ou partie des k facteurs indépendants, la géométrie du domaine expérimental perd sa régularité.

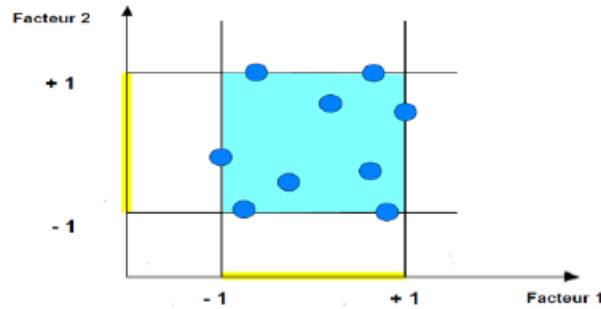


Figure II.2 Domaine expérimental.

II.4.5 Définition du modèle empirique

Le choix de modèle du second degré repose sur le fait que la recherche d'un optimum nécessite la présence d'une dérivée nulle et qu'il est toujours possible de définir au voisinage d'un point un développement en série de Taylor-McLaurin pour toute fonction [52].

On recherche donc un modèle de la forme :

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=0}^k \alpha_i X_i + \sum_{i=0}^k \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \alpha_{ij} X_i X_j \quad (\text{II.2})$$

Dans lequel α représente les coefficients du modèle à identifier α_0 la constante, α_i les coefficients associés aux facteurs, α_{ii} les coefficients associés aux termes quadratiques et α_{ij} les coefficients associés aux interactions d'ordre 1, k désigne le nombre de facteurs x_i pris en considération dans notre modèle.

II.4.6 Construction du plan d'expériences

La construction du plan d'expériences consiste donc à sélectionner les nombre d'expériences qui composent une matrice de façon à obtenir les meilleurs résultats de l'analyse des réponses mesurées. On parle pour cela de matrice optimale.

Une matrice optimale peut être obtenue à l'aide de deux types de constructions [50].

II.4.6.1 Les constructions historiques

Ce type de construction revient à positionner au sein du domaine expérimental et parfois à l'extérieur de ce dernier, des combinaisons particulières des modalités des facteurs, à partir de règles algébriques ou géométriques, de manière à minimiser les incertitudes sur les prédictions de la réponse à partir du modèle.

II.4.6.2 Les constructions algorithmiques

Les contraintes expérimentales ne permettent pas toujours d'être dans les conditions idéales des plans d'expériences précédemment décrits. Par exemple, les réglages de l'appareil ne permettent pas d'atteindre le niveau préconisé par la théorie ou des combinaisons de niveaux peuvent se révéler dangereuses. Dans cette situation, l'obtention d'un plan optimal passe par une construction algorithmique.

II.4.7 Expérimentation

Il convient de préparer pour chacun des essais, une fiche indiquant les modalités des facteurs à respecter. De plus, il est préférable d'effectuer une randomisation des essais si cela est possible. Cette randomisation permet de limiter l'éventuelle influence perturbatrice de facteurs non contrôlés.

II.4.8 Analyse globale des résultats d'essais

Avant de mettre en œuvre des outils mathématiques pour estimer les p inconnues du modèle et réaliser la surface de réponse correspondante, il est important de porter un jugement global sur l'ensemble des résultats d'essais.

L'analyse globale des résultats d'essais permet notamment d'assurer un écart significatif entre les valeurs minimales et maximales de la réponse observée, repérer une combinaison des modalités des facteurs, et détecter des valeurs suspectes et procéder à une reproduction d'expériences le cas échéant.

II.4.9 Analyse mathématique des résultats d'essais

L'analyse mathématique des résultats d'essais a pour objectif de calculer les coefficients du modèle et par la suite les résidus qu'engendre ce modèle.

II.4.10 Analyse statistique du modèle

La mise en œuvre de tests statistiques doit permettre de porter un jugement sur les résultats obtenus à savoir ; un modèle décrivant la variation de la réponse, des estimations des coefficients

associés aux différents monômes du modèle, et des résidus traduisant les écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées.

II.4.10.1 L'analyse de régression

L'analyse de régression consiste à expliquer la variation totale de la réponse à partir de la somme des carrés des écarts entre les résultats d'essais et leur moyenne.

$$SCT = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.3})$$

On vérifie immédiatement la relation suivante, encore appelée équation d'analyse de variance ou équation d'analyse de régression :

$$SCT = SCM + SCE \quad (\text{II.4})$$

Le *SCM* traduit la variation des réponses calculées autour de leur moyenne :

$$SCM = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.5})$$

Pour déterminer les coefficients du modèle de la méthode des moindres carrés, on utilise la relation suivante :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{y}_i \quad (\text{II.6})$$

Le *SCE* traduit la somme des carrés des résidus :

$$SCE = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II.7})$$

II.4.10.1.1 Test de «Fisher-Snedecor»

Le test de Fisher-Snedecor permet de comparer 2 variances, par l'utilisation de la loi statistique de Fisher (loi *F*) [53]. Ce test va nous dire si le modèle nous apporte une réponse significative, si l'équation établit bien une relation entre la variation des facteurs et de la réponse, ou si c'est du à un changement, une fluctuation aléatoire de la réponse dans le domaine expérimental

On effectue alors le test de Fisher-Snedecor. On définit pour cela la statistique, notée F_{obs} par la relation :

$$F_{obs} = \frac{\frac{SCM}{p-1}}{\frac{SCE}{N-p}} \quad (\text{II.8})$$

D'où

$p - 1$ Nombre de degrés de liberté affectés à la somme des carrés associée au modèle *SCM*.

$N - p$ La somme des carrés associés aux résidus (*SCE*).

On compare ensuite cette valeur à une valeur critique F_{crit} extraite de la table de la loi *F*. Si la valeur de F_{obs} est inférieure à celle de F_{crit} , on considère la variance associée au facteur ou à l'interaction comme égale à la variance résiduelle.

Un tableau d'analyse de régression (tableau II.1), permet de regrouper les différentes étapes permettant d'aboutir au calcul de cette probabilité.

Tableau II.1 Analyse de la variance (ANOVA).

Source	Somme des carrés	Degrés de liberté	Source Carré moyen	F_{obs}	Probabilité
Modèle	SCM	$p - 1$	$\frac{SCM}{p - 1}$	F_{obs}	p
Résidus	SCE	$N - p$	$\frac{SCE}{N - p}$		
Total	SCT	N			

Cette opération est très importante dans une étude de RSM car elle diminue le nombre de dimensions du problème,

On peut également calculer le coefficient de corrélation R^2 comme suit :

$$R^2 = \frac{SCM}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad (\text{II.9})$$

Plus la valeur du le coefficient de corrélation R^2 est proche de 1 et plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante.

On peut aussi également calculer le coefficient de régression $R_{ajusté}^2$ comme suit :

$$R_{ajusté}^2 = 1 - \frac{\frac{SCE}{N-p}}{\frac{SCT}{N-1}} \quad (\text{II.10})$$

II.4.10.1.2 Test « Predicted Residual Error Sum of Squares »

PRESS (Predicted Residual Error Sum of Squares), c'est la mesure de la qualité de l'ajustement du modèle à chaque point du plan. La position de chaque point est prédite sur la base d'un modèle contenant tous les points excepté le point en question. La somme des carrés des résidus, C'est à dire la somme des écarts entre les réponses mesurées et prédites est réalisée [54].

$$PRESS = \sum_{i=1}^N \frac{y_i - \hat{y}_i}{1 - h_{ii}} \quad (\text{II.11})$$

D'Ou

y_i La réponse mesurée au point i

\hat{y}_i La réponse calculée par le modèle au point i ,

h_{ii} le $i^{ème}$ terme diagonal de la matrice H définie comme :

$$H = X(X^t X)^{-1} X^t \quad (\text{II.12})$$

II.4.10.1.3 Probabilité

La Probabilité ou « p-valeur » peut être utilisée comme repère de la confiance qu'on peut avoir dans un résultat particulier. Beaucoup de chercheurs utilisent une « p-valeur » de moins de 0.05 comme limite de significativité statistique, ce qui revient à dire que le résultat observé dans une étude peut se produire par hasard au moins une fois par vingt études différentes. La « p-valeur » peut seulement prendre des valeurs comprises entre 0 et 1. Si elle est inférieure à 0.05, on conclut que l'effet est significatif et si elle est inférieure à 0.01, il est possible de conclure que le facteur est hautement significatif.

Les résultats de l'analyse de la variance des PE sont généralement présentés sous la forme du tableau suivant.

Tableau II.2 Les résultats de l'analyse de la variance des PE.

SOURCE	DDL	SCE	CM	F _{obs}	F _{théo}	p-valeur
A	$p-1$	SCE _a	CM _a	CM _a /CM _r	F(p-1; pq(n-1))	FDDL _a , DDL _r , 1-α
B	$q-1$	SCE _b	CM _b	CM _b /CM _r	F(q-1; pq(n-1))	FDDL _b , DDL _r , 1-α
:						
:						
Ab	$((p-1) \times (q-1))$	SCE _{ab}	CM _{ab}	CM _{ab} /CM _r	F(p-1)(q-1); pq(n-1)	FDDL _{ab} , DDL _r , 1-α
:						
:						
Erreur	$pq(n-1)$	SCE _r				
Total	$pqn-1$	SCE _t	CM _r			

II.4.10.2 Analyse statistiques des coefficients du modèle

Pour chaque coefficient la statistique, notée t_{obs} à partir de la relation

$$t_{obs} = \frac{|a_i - 0|}{s(a_i)} = \frac{|a_i|}{s(a_i)} \quad (\text{II.13})$$

a_i valeur particulière d'une variable aléatoire qui dépend en effet directement des résultats d'essais et du modèle postulé.

$s(a_i)$ l'erreur-type qui est défini à partir :

$$s(a_i) = \sqrt{\text{var}(a_i)} = \sqrt{c_{ii}\sigma^2} \quad (\text{II.14})$$

c_{ii} Coefficient de variance.

σ^2 Variance expérimentale.

D'où

$$s_r = \sqrt{\sigma^2} \quad (\text{II.15})$$

Alors on peut écrire t_{obs} sous la forme :

$$t_{obs} = \frac{|a_i|}{s_r \sqrt{c_{ii}}} \tag{II.16}$$

On peut résumer l'analyse des coefficients dans le tableau II.3.

Tableau II.3 Analyse des coefficients.

Facteur	Coefficients	Erreur-type	t_{obs}	Probabilité
X_i	a_i	$s(a_i)$	$t_{obs} = \frac{ a_i }{s_r \sqrt{c_{ii}}}$	P

II.4.10.3 Analyse statistique des résidus

La normalité de la distribution des résidus est une hypothèse importante de la méthode des moindres carrés. Compte tenu du nombre N d'essais on utilise généralement la méthode graphique de la droite d'Henry. À chacun des résidus une fréquence dont la définition respecte la relation

$$P = \frac{r-3/8}{N-1/4} \tag{II.17}$$

Ou

r Le rang des résidus.

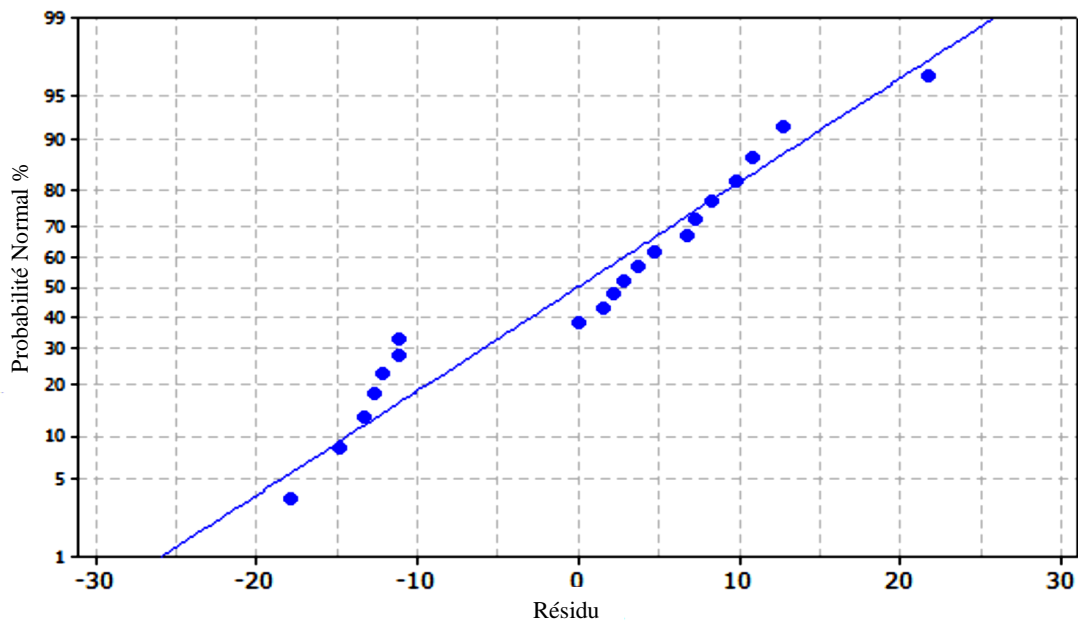


Figure II.3 Courbe de résidu.

II.4.11 Analyse graphique du modèle

Un des grands avantages des plans d'expériences est la présentation des résultats sous forme graphique. Pour chacune des méthodes, nous obtenons des graphiques différents qui répondent aux questions posées.

Les graphiques sont avant tout un outil d'aide à l'interprétation des résultats mais, ils permettent également de manière plus communicative lors de tiré plus rapidement des conclusions et ainsi d'orienter la poursuite d'une étude. Il existe différents types de graphiques pour illustrer les effets moyens des facteurs.

II.4.11.1 Surfaces de réponse

La surface de réponse, comme celle présentée en figure II.4, matérialise la surface de régression à partir d'un graphique dans un espace à trois dimensions. Le plan horizontal de la figure matérialise le domaine de variation de 2 facteurs ; l'axe vertical matérialise la variation de la réponse à partir du modèle.

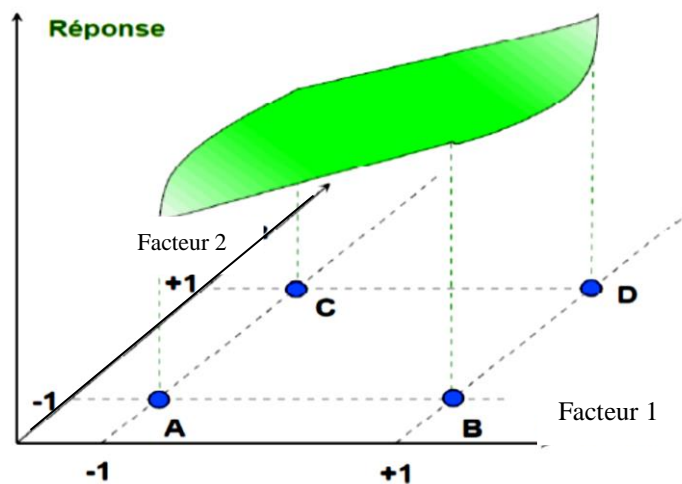
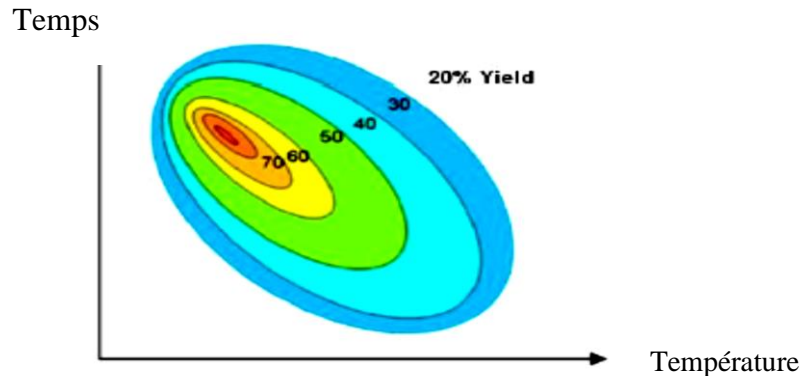


Figure II.4 Représentation de surface de réponse.

II.4.11.2 Courbes iso-réponse

Les courbes iso-réponses s'interprètent comme les courbes de niveaux, dessinées sur une carte topographique, cette dernière ne fait intervenir que 2 facteurs à la fois, les autres devant être fixés à un niveau constant.



II.4.12 Validation du modèle et des informations obtenues

L'analyse des résultats d'essais permet d'identifier une combinaison optimale des facteurs, il faudra alors tester la combinaison optimale qui n'a pas été faite dans le plan d'expériences, ce qui arrive fréquemment avec cet essai final, de rejeter ou pas le modèle proposé [54].

Le modèle sera validé si les réponses mesurées sont comprises dans l'intervalle de tolérance prédit par le modèle au point considéré [50].

II.5 Conclusion

Le deuxième chapitre se base sur l'étude des plans d'expériences, donc nous avons décrit de manière théorique le contenu de chacune de ces étapes dans le cas d'une étude de surface de réponse.

CHAPITRE III METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET PREPARATION DES EXPERIENCES

III.1 Introduction

Un grand nombre des travaux de recherches sur la rugosité de surface et les vibrations en usinage liée à des opérations de tournage ont été menées. [55] ont utilisé la méthode de surface de réponse (RSM) avec un plan factoriel pour prédire la rugosité de surface lors du tournage dur on utilisant le matériau 42CrMo4. Horng et autres [56], ont étudié l'usinabilité d'un acier dur Al₂O₃/TiC en tournage avec un outil mixte à base de céramique par la méthode de surface de réponse. [57] ont utilisé un modèle multiplicatif pour prédire la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe et des vibrations de l'outil. Par ailleurs, la modélisation de la coupe peut être développée en utilisant des approches classiques telles que la régression linéaire ou des méthodes basées sur l'intelligence artificielle. Ces dernières utilisent des approches non conventionnelles telles que les réseaux de neurones artificiels (ANN), la logique floue (FL) et les algorithmes génétiques (GA) [58], [59], [60].

III.2 Objectif

L'objectif de cette étude est, d'une part d'étudier les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance), et les vibrations d'outil sur l'état de surface des pièces usinées, d'autre part de choisir les paramètres de coupe optimaux en tournage d'un acier (32CrMoV12-28) pour une configuration choisie à partir d'un minimum d'essais.

III.3 Essais préliminaires

Afin de vérifier la possibilité d'enregistrer l'influence et des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance), et les vibrations d'outil sur l'état de surface, une première série d'essais a été faite pour connaître la sensibilité et la capacité de nos systèmes de mesure à saisir et analyser les vibrations d'outil.

III.4 Environnement expérimental

L'environnement expérimental renferme tous les facteurs maintenus constants pendant les essais, il est composé principalement de

III.4.1 Machine

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour universel de type SN40C à une puissance de broche de 6.6KW (figure III.1).



Figure III.1 Tour parallèle modèle SN40.

III.4.2 Matériau

Au cours de ces essais, nous allons utiliser l'acier 32CrMoV12-28 (International / ISO, ISO 4957 (1999)), c'est un Acier pour outils, utilisé pour des applications dans lesquelles la température de surface est généralement supérieure à 200 ° C.

Les ébauches sont des rondins en acier dur de (D=54mm, L=490mm) préparés préalablement : dressés, centrés, charioter et chanfreinés, en montage mixte est choisi pour la réalisation des essais des vibrations et de la rugosité (figure III.2).

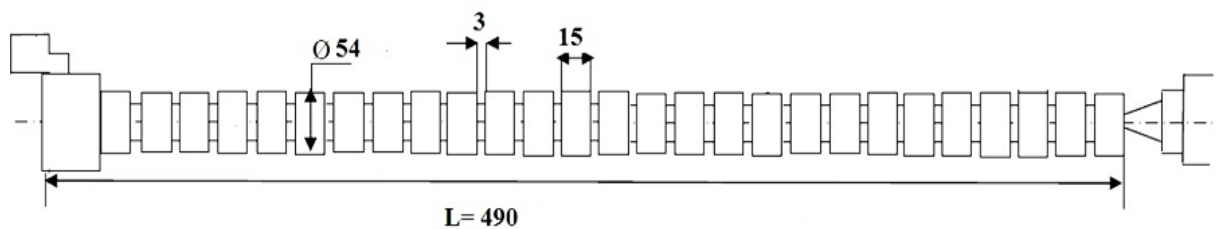


Figure III.2 Montages et formes des éprouvettes.

La composition chimique du matériau est présentée dans le tableau III.1

Tableau III.1 la composition chimique de l'acier 32CrMoV12-28.

Dimension					D= 54 mm					L= 490 mm				
Composition chimique														
%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%AL	%Ti	%Ni	%Cr	%Mo	%V	%Sn	% B	%W
0.27	0.31	0.32	0.015	0.008	0.029	0.007	0.003	0.13	2.96	2.35	0.45	0.032	0.001	0.034

III.4.3 Outil de coupe

III.4.3.1 Plaquettes en carbures

Les plaquettes utilisées lors de nos essais ont été choisies en fonction des recommandations de notre partenaire industriel ERIS / Seriana – Batna. Dans des conditions «normales» d’usinage, une géométrie fine et un rayon de plaquette en carbure non revêtu type YT15 de faible rayon ($r = 0,4 \text{ mm}$) pour application sur l’acier.

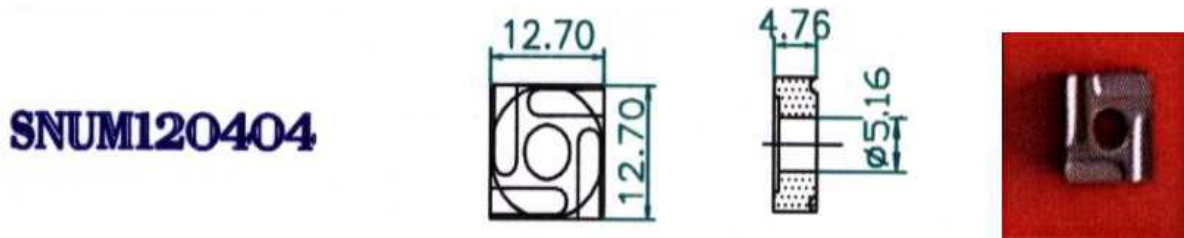


Figure III.3 Forme et dimension des plaquettes YT15.

III.4.3.2 Porte plaquette

Pour la réalisation des essais nous avons utilisé une porte plaquette à fixation mécanique de type PSB NR 25 25 12 section 25x25 La porte plaquette est présentée dans la figure III.4.

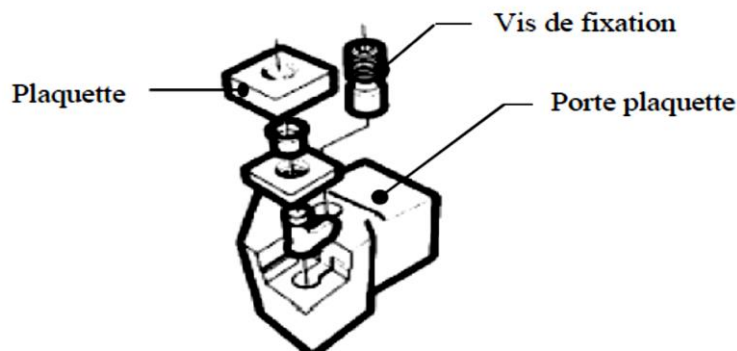


Figure III.4 Système de fixation de la plaquette.

Les caractéristiques géométriques de l’outil de coupe et le porte d’outil sont présentées dans le tableau III.2.

Tableau III.2 Les caractéristiques de l’outil de coupe et le porte d’outil.

Outil de coupe	Porte outil						
	la géométrie de la zone active					Type	Section
Type	χ_r	λ	α	γ	r	PSB NR 25* 25K12	25x25
YT15	+75°	-6°	+6°	-6°	0,8mm		

Le Montage et la forme des éprouvettes pour les essais sont indiqués sur la figure III.5.



Figure III.5 Montages et formes des éprouvettes pour les essais.

III.5 Réponses du système (facteurs de sortie)

III.5.1 État de surface

Afin de vérifier la qualité de l'usinage, après chaque essai son état est caractérisé par la mesure de la moyenne arithmétique du profil de rugosité, notée Ra et Rz , à l'aide d'un rugosimètre de marque (Mitutoyo). L'appareil est employé après chaque essai en trois différentes positions.



Figure III.6 Rugosimètre Mitutoyo.

III.5.2 Vibrations de l'outil de coupe

Dans cette application, le vibromètre Smart Balancer 2 de type CHENCK avec des accélérations de vibration bidirectionnelle, ont été attachées sur le support d'outil pour mesurer les amplitudes des accélérations de l'outil dans la direction tangentielle (Vz) et radial (Vy).

L'instrument est menu de deux canaux analogique dont la plage de fréquence s'étend de 0.5 Hz à 40 kHz.



Figure III.7 Analyseur dynamique Smart Balancer 2 CHENCK.

III.6 Plan d'expérience factoriel utilisé.

III.6.1 Les plans de Taguchi [61]

La méthode de Taguchi vise à combiner un ensemble de techniques pour obtenir des améliorations rapides de la qualité et des coûts de production. Dans un premier temps, elle a connu un succès dans les secteurs industriels et en particulier dans le domaine agroalimentaire, puis elle a suscité l'intérêt de la communauté scientifique pour un développement et une étude plus larges. La "méthode Taguchi" vient enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires. Elle vise essentiellement à simplifier la mise en œuvre des plans d'expériences. Elle propose un recueil de tables et des outils d'aide au choix de la table la plus adaptée.

Chaque table peut être identifiée par la forme de $L_a(S^f)$.

D'ou

a : le nombre des lignes.

S : niveaux des facteurs.

r : nombres des facteurs + les interactions.

Elles précisent le contenu d'un plan d'expériences qui se présentent sous la forme d'une table orthogonale, avec éventuellement un ou des graphes linéaires et un triangle des interactions. Ces tables orthogonales sont au nombre de 27 et permettent de répondre à un bon nombre de problèmes industriels dans le contrôle de la qualité. Elles peuvent être classées en trois groupes :

- Interactions impossibles $L_{12}(2^{11})$ et $L_{36}(2^{11}x3^{12})$.
- Interactions limitées $L_{18}(2^1x3^7)$, $L_{32}(2^1x4^9)$, $L_{50}(2^1x5^{11})$.
- Interactions possibles $L_4(2^3)$. $L_8(2^7)$, $L_{16}(2^{15})$. $L_{32}(2^{31})$, $L_{64}(2^{63})$, $L_9(3^4)$. $L_{27}(3^{13})$.

III.6.2 Les avantages des plans de Taguchi [61]

Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d’avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques du deuxième ordre. Les avantages majeurs de l’approche Taguchi sont :

- Les plans de Taguchi sont préférés aux méthodes standards des plans d’expériences avec une utilisation simple et ne demandant pas des connaissances particulières en techniques statistiques.
- Ils offrent une stratégie unique des systèmes avec les caractéristiques dynamiques (variables) de la réponse.
- Ils favorisent l’analyse graphique et évitent l’analyse complexe des résultats.

III.6.3 Traitements des résultats

Un plan d’expérience factoriel complet (figure III.8) à 27 essais a été choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats. Les trois niveaux de variation des facteurs sont dans le tableau III.3.

Tableau III.3 Attribution des niveaux de facteurs.

Niveau	Vitesse de coupe Vc (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de passe ap(mm)
1 (minimum)	120	0,08	0,5
2 (moyen)	170	0,11	0,75
3 (maximum)	240	0,16	1

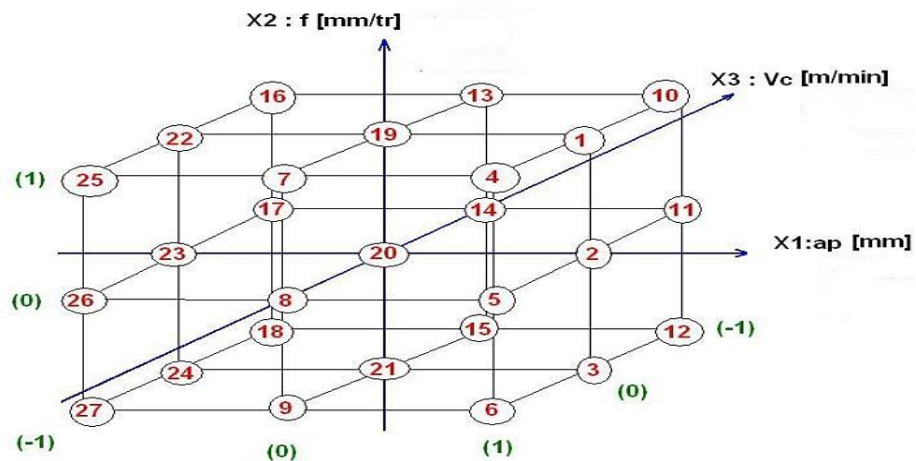


Figure III.8 Plan d’expérience.

La méthode de planification qui a été utilisée pour la réalisation des essais est la méthode multifactorielle, cette méthode permet d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes. Afin d'atteindre notre objectif, l'analyse statistique des résultats expérimentaux a été faite à l'aide de logiciel Minitab 16. La méthode de la surface de réponse (RSM) et l'analyse de régression .cette technique de calcul permet d'estimer la contribution relative de chacun des facteurs de contrôle sur la réponse globale mesurée pour l'optimiser [55].

La méthode des plans d'expérience permet en effet d'obtenir un maximum d'informations à un coût minimal. Les méthodes de régression linéaire ont permis d'obtenir une modélisation mathématique (les équations de régression pour les critères de rugosité en fonction des paramètres de coupe et les vibrations de l'outil). Pour chacun des modèles, des tests statistiques ont été appliqués pour sélectionner les paramètres les plus significatifs. Puis, l'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la validité des modèles [55].

Dans la partie optimisation, plusieurs méthodes d'optimisation comme les algorithmes génétiques et les surfaces de réponse ont été utilisées en fonction des besoins et des objectifs recherchés.

Le tableau III.4 présente le plan de taguchi : la première colonne (C1) correspond à la vitesse de coupe, la deuxième colonne (C2) à l'avance et la cinquième colonne (C5) à la profondeur de passe. Les autres colonnes correspondent aux différentes interactions.

Tableau III.4 Le plan Taguchi des expériences [55].

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
$L_{27}(3^{13})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3

21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel expérimentale; le rugosimètre pour mesuré la rugosité de surface et l'analyseur dynamique pour mesuré les vibrations de l'outil. Nous avons aussi définie la composition chimique, les caractéristiques mécaniques et physiques de l'acier 32CrMoV12-28 et Les caractéristiques géométriques des matériaux de coupe. Un plan d'expérience factoriel complet à 27 essais a été choisi.

**CHAPITRE IV RESULTATS DES EXPERIENCES
TRAITEMENT ET ANALYSE**

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les modèles mathématiques des différents paramètres étudiés : critères de rugosité (R_a et R_z) et les vibrations (V_y et V_z) est faite à l'aide du logiciels Minitab16, qui est caractérisé par l'analyse de variance (ANOVA), la régression linéaire multiple et la surface de réponse.

Les tableaux ANOVA liés aux paramètres étudiés montrent les degrés de liberté (DF), la somme des carrés (SS), les carrés moyens (MS), la probabilité (P-VAL.) et la contribution en pourcentage (Contr. %) de chaque facteur et des différentes interactions.

Une faible valeur P ($\leq 0,05$) ou niveau de confiance 95% indique que les modèles obtenus sont considérés comme significatifs, ce qui est souhaitable.

Le coefficient de détermination R^2 , est défini comme le rapport de la variation expliquée de la variation totale. On a une très bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites, Lorsque R^2 approche l'unité.

IV.2 Modélisation de la rugosité (R_a et R_z) et les vibrations de l'outil (V_y et V_z)

Les résultats expérimentaux de la rugosité (R_a et R_z) et les vibrations (V_y et V_z) ont été obtenues selon la matrice de planification des expériences pour un plan $N=3^3$, lors de tournage de l'acier 32CrMoV12-28, présentées dans le tableau IV.1.

On remarque que les valeurs minimales de la rugosité ont été trouvées suivant les conditions des essais N°7 ($V_c=240$ tr/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.05$ à 1mm). mais les valeurs minimales des vibrations tangentielle ont été enregistrées pour les régimes de coupe ($V_c=120$ tr/min, $f=0.11$ mm/tr, $a_p=1$ mm), les valeurs minimales des vibrations radial ont été enregistrées pour les régimes de coupe ($V_c=120$ tr/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=1$ mm). La diminution de la vitesse de coupe avec une faible d'avance conduit une diminution des vibrations.

Tableau VI.1 Résultats expérimentaux de la rugosité et les vibrations.

N° essais	Facteurs codés			Facteurs			Réponses			
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc (m/min)	F (mm/tr)	Ap (mm)	Ra (µm)	Rz (µm)	Vy (m/s ²)	Vz (m/s ²)
1	1	-1	1	120	0,08	1	2,345	11,68	2,393	1,184
2	1	0	1	240	0,11	1	2,515	12,11	5,372	1,394
3	1	0	0	120	0,11	0,75	2,695	12,605	3,765	1,329
4	1	0	-1	120	0,11	0,5	2,66	12,595	3,41	1,227
5	1	-1	-1	120	0,08	0,5	2,34	11,535	3,521	1,941
6	1	1	0	240	0,16	0,75	2,785	12,995	5,434	1,527
7	1	-1	0	240	0,08	0,75	2,145	9,09	3,101	1,897
8	0	-1	0	170	0,08	0,75	2,325	10,89	3,328	1,059
9	1	1	1	120	0,16	1	3,305	14,76	3,269	1,449
10	0	-1	1	170	0,08	1	2,34	11,6	5,809	1,304
11	1	1	-1	120	0,16	0,5	2,99	13,58	4,07	1,429
12	0	1	0	170	0,16	0,75	2,985	13,495	2,75	1,403
13	1	-1	1	240	0,08	1	2,3	9,77	4,989	3,562
14	1	-1	-1	240	0,08	0,5	1,955	8,69	2,59	1,02
15	1	1	-1	240	0,16	0,5	2,735	12,88	3,414	0,943
16	1	0	-1	240	0,11	0,5	2,475	11,73	3,23	1,734
17	-1	0	1	120	0,11	1	2,735	12,855	3,414	0,943
18	0	0	0	170	0,11	0,75	2,54	12,385	3,614	1,384
19	0	-1	-1	170	0,08	0,5	2,305	10,65	3,269	1,449
20	1	0	0	240	0,11	0,75	2,5	11,93	5,119	2,769
21	1	1	1	240	0,16	1	2,79	13,04	3,379	2,052
22	0	0	1	170	0,11	1	2,585	12,41	4,225	2,441
23	0	1	-1	170	0,16	0,5	2,8	13,18	3,41	1,551
24	-1	-1	0	120	0,08	0,75	2,342	11,635	5,809	1,304
25	0	0	-1	170	0,11	0,5	2,525	12,155	4,36	1,668
26	0	1	1	170	0,16	1	2,99	14,275	3,115	1,013
27	-1	1	0	120	0,16	0,75	3,235	14,555	3,521	1,641

IV.3 Analyse de la variance ANOVA

IV.3.1 Analyse de la variance ANOVA pour de la rugosité Ra

Selon les résultats de l'analyse de la variance de la rugosité Ra présentés dans le tableau IV.2, l'avance f a un effet statistique significatif avec la plus grande contribution de 79.18%. l'effet de la vitesse de coupe est également significatif avec une contribution de 12.19%. L'effet de la profondeur de passe est aussi significatif mais avec une légère contribution de 2.58%. D'autre part, les interactions de l'avance avec les vibrations de la force radial (V_y) ont une légère contribution significatif de 1.32%.

Tableau VI.2 Analyse de la variance ANOVA pour Ra.

Source	DL	SS	MS	F	P	cont%
Vc	1	0.00632	0.006321	2.07	0.200	12.19
f	1	0.06481	0.064806	21.27	0.004	79.18
ap	1	0.00123	0.001232	0.40	0.548	2.58
Vy	1	0.00306	0.003060	1.00	0.355	0.12
Vz	1	0.00002	0.000019	0.01	0.939	0.68
Vc*Vc	1	0.00504	0.005038	1.65	0.246	0.08
f*f	1	0.00000	0.000003	0.00	0.977	0.55
ap*ap	1	0.00466	0.004663	1.53	0.262	0.10
Vy*Vy	1	0.00666	0.006662	2.19	0.190	0.22
Vz*Vz	1	0.00028	0.000284	0.09	0.770	0.01
Vc*f	1	0.01606	0.016056	5.27	0.061	0.73
Vc*ap	1	0.03006	0.030059	9.86	0.020	0.15
Vc*Vy	1	0.03894	0.038936	12.78	0.012	0.39
Vc*Vz	1	0.00059	0.000589	0.19	0.675	0.05
f*ap	1	0.02033	0.020335	6.67	0.042	0.43
f*Vy	1	0.02349	0.023495	7.71	0.032	1.32
f*Vz	1	0.00033	0.000330	0.11	0.753	0.00
ap*Vy	1	0.00094	0.000945	0.31	0.598	0.04
ap*Vz	1	0.00351	0.003512	1.15	0.324	0.27
Vy*Vz	1	0.00418	0.004183	1.37	0.286	0.15
Erreur	6	0.01828	0.003047			0.67
Total	26	2.68690				100

IV.3.2 Analyse de la variance ANOVA pour la rugosité Rz

Le tableau IV.3 expose les résultats de l'analyse de variance ANOVA pour Rz. l'avance f a un effet statistique significatif avec la plus grande contribution de 68.99%. L'effet de la vitesse de coupe est également significatif avec une contribution de 38.36%. L'effet de la profondeur de passe est aussi significatif mais avec une légère contribution de 2.94%. D'autre part, les interactions de l'avance au carré (f^2) et les interactions de l'avance avec les vibrations de la force radiale (V_y) ont une légère contribution significative de 2.67 et 1.64% respectivement.

Tableau IV.3 Analyse de la variance ANOVA pour Rz.

Source	DL	SS	MS	F	P	cont%
Vc	1	0.6186	0.61862	3.93	0.095	38.36
f	1	1.4455	1.44546	9.19	0.023	68.99
ap	1	0.0092	0.00920	0.06	0.817	2.94
Vy	1	0.0007	0.00068	0.00	0.950	1.53
Vz	1	0.0055	0.00546	0.03	0.858	0.09
Vc*Vc	1	0.0081	0.00810	0.05	0.828	0.12
f*f	1	0.1879	0.18789	1.19	0.316	2.67
ap*ap	1	0.0127	0.01266	0.08	0.786	0.05
Vy*Vy	1	0.0473	0.04726	0.30	0.603	0.05
Vz*Vz	1	0.0023	0.00233	0.01	0.907	0.23
Vc*f	1	0.0874	0.08737	0.56	0.484	0.70
Vc*ap	1	0.2469	0.24686	1.57	0.257	0.19
Vc*Vy	1	0.4766	0.47658	3.03	0.132	0.40
Vc*Vz	1	0.0459	0.04590	0.29	0.609	0.00

f*ap	1	0.1035	0.10353	0.66	0.448	0.31
f*Vy	1	0.6286	0.62855	3.99	0.093	1.64
f*Vz	1	0.0291	0.02911	0.18	0.682	0.00
ap*Vy	1	0.0337	0.03365	0.21	0.660	0.08
ap*Vz	1	0.0368	0.03682	0.23	0.664	0.05
Vy*Vz	1	0.0085	0.00847	0.05	0.824	0.01
Erreur	6	0.9442	0.15736			1.64
Total	26	57.2821				100

IV.4 Analyse de régression linéaire

IV.4.1 Analyse de régression de la rugosité Ra

L'analyse initiale des réponses obtenues à partir de RSM inclut tous les paramètres et leurs interactions, l'équation obtenue pour Ra est la suivante.

$$\begin{aligned}
 Ra = & 0.7086 - 7.65 \times 10^{-3}Vc + 14.75f + 1.05ap + 5.18 \times 10^{-1}Vy + 5.57 \times 10^{-2}Vz + 1.0 \times \\
 & 10^{-5}Vc^2 + 8 \times 10^{-1}f^2 - 5.08 \times 10^{-1}ap^2 - 4.08 \times 10^{-2}Vy^2 + 4.96 \times 10^{-2}Vz^2 - 2.42 \times \\
 & 10^{-2}Vc.f - 5.17 \times 10^{-3}Vc.ap + 2.05 \times 10^{-3}Vc.Vy + 4.98 \times 10^{-4}VcVz + 5.202f.ap - \\
 & 2.09f.Vy + 5.63 \times 10^{-1}f.Vz - 9.17 \times 10^{-2}apVy + 2.40 \times 10^{-1}apVz - 1.46 \times \\
 & 10^{-1}Vy.V
 \end{aligned} \tag{IV.1}$$

Les coefficients de régression des modèles mathématiques estimés pour la rugosité de surface (Ra) sont présentés dans le tableau IV.4. Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions et de classer les éléments qui influent sur la rugosité de surface (Ra) par ordre.

Tableau IV.4 Les coefficients de régression pour Ra.

Terme	Coef SS	Coef SE	T	P
Constant	0.7086	0.9694	0.73	0.492
f	14.751	6.754	2.18	0.072
Vc*ap	-0.005174	0.001648	-3.14	0.020
Vc*Vy	0.002049	0.000573	3.57	0.012
f*ap	5.202	2.014	2.58	0.042
f*Vy	-2.0986	0.7558	-2.78	0.032

L'équation de régression pour les critères de rugosité (Ra) en fonction des termes qui ont un effet significatif est donnée par l'équation IV.2.

$$Ra = 0.7086 + 14.75f - 5.17 \times 10^{-3}Vc.ap + 2.05 \times 10^{-3}Vc.Vy + 5.202f.ap - 2.09f.Vy \tag{IV.2}$$

Le coefficient de corrélation (R^2) présente la proportion de la variation de la réponse expliquée par le modèle est d'environ 99.32%, ce qui le rend en raisonnable accord avec (R^2) ajusté de 97.06%.

Tableau IV.5 Validation du modèle Mathématique pour Ra.

Source	DL	SS	MS	F	P	Remarques
Régression	20	2.67851	0.133926	43.95	0.000	suffisant
Erreur résiduelle	6	0.1828	0.003047			
Total	26					
R ²						99,32
R ² ajusté						97,06

IV.4.2 Analyse de régression de la rugosité Rz

L'analyse initiale des réponses obtenues à partir de RSM inclut tous les paramètres et leurs interactions, l'équation obtenue pour Rz est la suivante.

$$Rz = 2.27511 - 3.1210^{-2}.Vc + 98.17.f + 3.58ap + 1.73.Vy + 1.20.Vz + 1.32 \times 10^{-5}Vc^2 - 211.57.f^2 + 8.38 \times 10^{-1}.ap^2 - 1.08 \times 10^{-1}.Vy^2 + 1.42 \times 10^{-1}.Vz^2 + 5.64 \times 10^{-5}.Vc^2 - 211.57.f^2 + 8.38 \times 10^{-1}.ap^2 - 1.08 \times 10^{-1}.Vy^2 + 1.42 \times 10^{-1}.Vz^2 + 5.64 \times 10^{-2}.10^{-2}.f - 1.48 \times 10^{-2}.Vc.ap + 7.17 \times 10^{-3}.Vc.Vy - 4.39 \times 10^{-3}.Vc.Vz + 11.73.f.ap - 10.85.f.Vy + 5.28.f.Vz - 5.47 \times 10^{-1}.ap.Vy - 7.77 \times 10^{-1}.ap.Vz - 2.08 \times 10^{-10}.Vy.Vz \quad (IV.3)$$

Les coefficients de régression des modèles mathématiques estimés pour la rugosité de surface (Rz) sont présentés dans le tableau IV.6. Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions et de classer les éléments qui influent sur la rugosité de surface (Rz) par ordre.

Tableau IV.6 Les coefficients de régression pour Rz.

Terme	Coeff SS	Coeff SE	T	P
Constant	2.275	6.966	0.33	0.755
f	98.17	48.53	2.02	0.090

L'équation de régression pour les critères de rugosité (Rz) en fonction des termes qui ont un effet significatif est donnée par l'équation IV.4.

$$R_z = 2.27511 + 98.17f \quad (IV.4)$$

Le coefficient de corrélation (R²) est d'environ 98.35%, ce qui le rend en raisonnable accord avec (R²) ajusté de 92.86%.

Tableau IV.7 Validation du modèle Mathématique pour Rz.

Source	DF	SS	MS	F	P	Remarques
Régression	20	56.3379	2.81690	17.90	0.001	suffisant
Erreur résiduelle	6	0.9442	0.15736			
Total	6					
R ²						98.35%
R ² ajusté						92.86%

IV.5 Les graphes résiduels

IV.5.1 Les graphes résiduels de la rugosité Ra

La Droite de Henry nous dit que si les points forment à peu près une ligne droite, cela veut dire que les valeurs résiduelles sont réparties normalement, donc d’après la figure IV.1.a, les résidus du modèle de la rugosité (Ra) peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant. La figure IV.1.b, les valeurs résiduelles sont distribuées de manière aléatoire autour de zéro et que la variance est constante

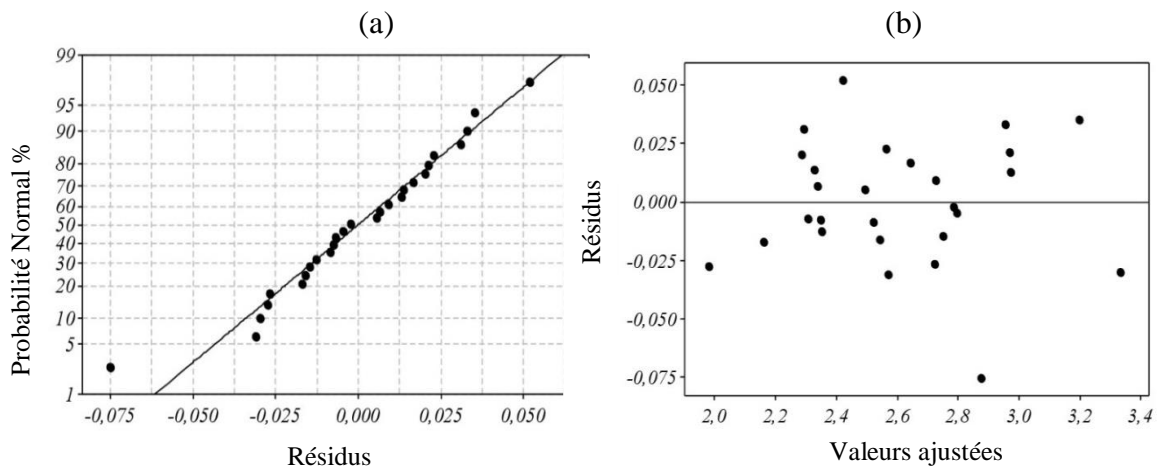


Figure IV.1 Probabilités normales des résidus de Ra.

IV.5.2 Les graphes résiduels de la rugosité Rz

La figure IV.2.a, montre que les résidus du modèle de la rugosité (Rz) peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant. La figure IV.2.b, les valeurs résiduelles sont distribuées aussi de manière aléatoire autour de zéro et que la variance est constante.

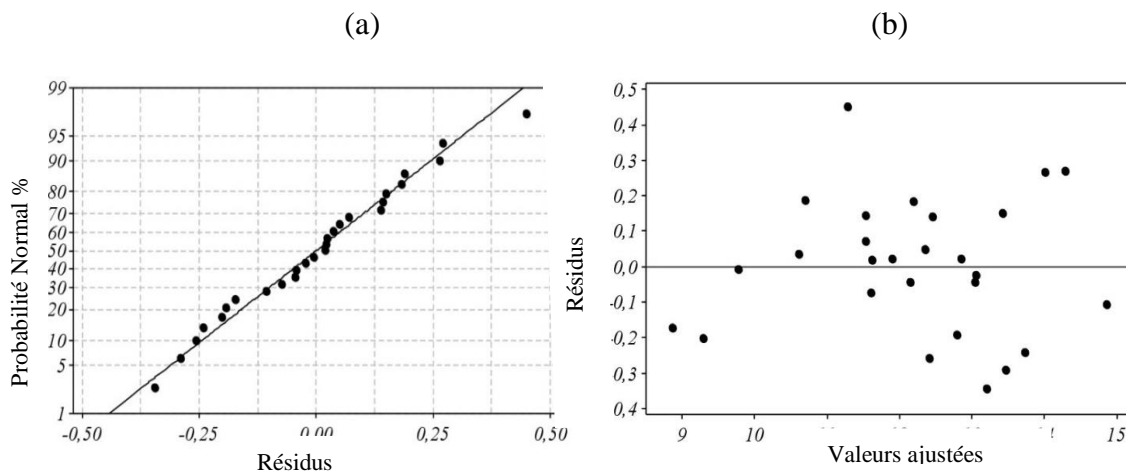


Figure IV.2 Probabilités normales des résidus de Rz.

IV.6 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de la rugosité

IV.6.1 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra

La figure IV.3 utilisée pour comparer la rugosité (Ra) mesurée et prédite .Les valeurs prédites et les valeurs expérimentales de la rugosité de surface (Ra) sont très proches les unes des autres. Une bonne corrélation a été montrée entre les deux courbes.

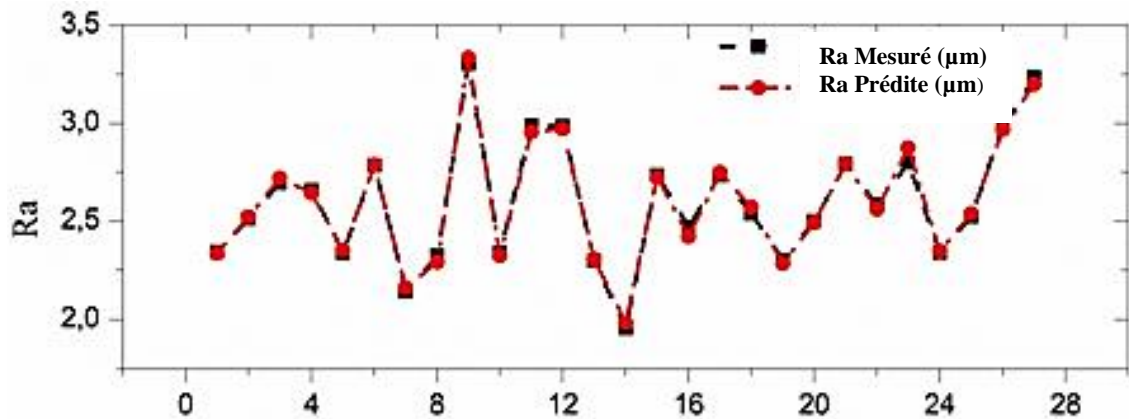


Figure IV.3 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour Ra.

IV.6.2 Comparaison entre la rugosité Rz mesurées et prédites

La figure IV.4 utilisée pour comparer la rugosité (Rz) mesurée et prédite .il est clair que les deux courbes se confondent et les divergences observées sont très. Nous avons aussi observé qu'une bonne corrélation a été montrée entre les deux courbes.

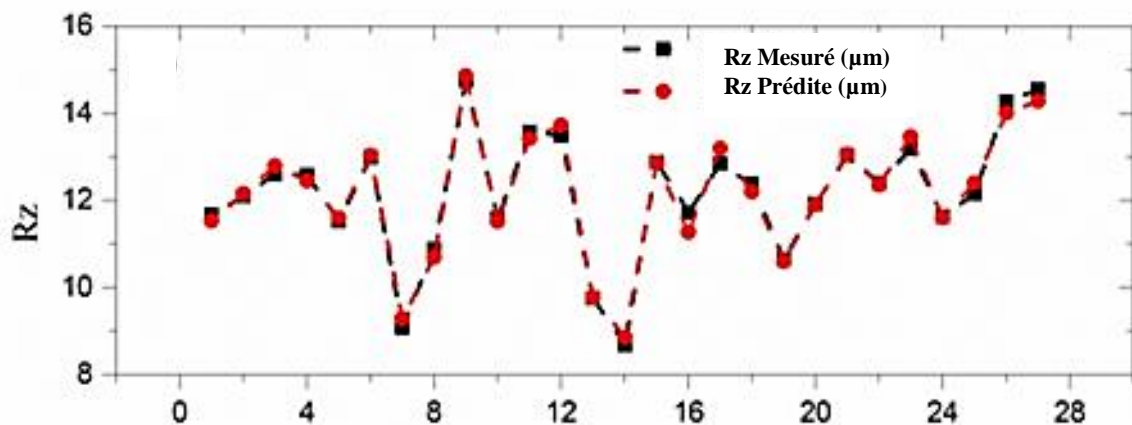


Figure IV.4 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour Rz.

IV.7 Courbes de surface de réponse

IV.7.1 Courbes de surface de réponse pour de la rugosité Ra

Ces figures 3D ont été élaborées en utilisant la méthode de surface de réponse RSM. La figure IV.5 montre l'effet de l'interaction de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité de surface Ra. Cette courbe Montre que l'augmentation de la vitesse de coupe diminue la rugosité de surface (Ra) et la diminution de l'avance diminue aussi la rugosité de surface.

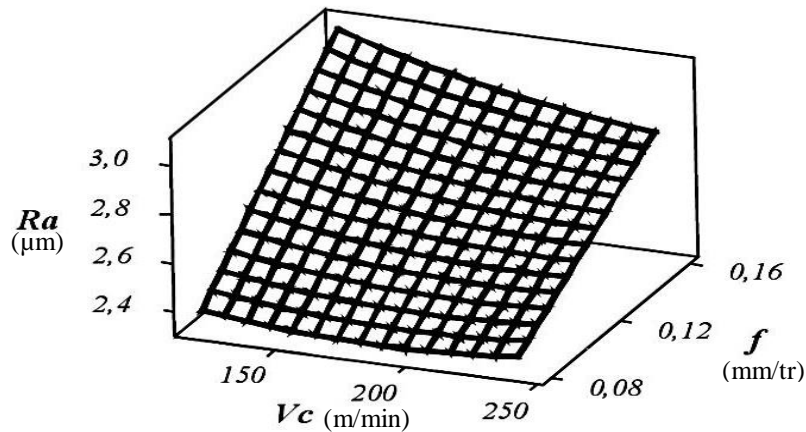


Figure IV.5 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité Ra.

L'influence de la vitesse de coupe et profondeur de passe sur la rugosité de surface Ra est illustrée dans la figure IV.6. cette courbe montre qu'une valeur de 240m/min de vitesse de coupe avec une faible profondeur de passe donne la plus faible valeur de rugosité,

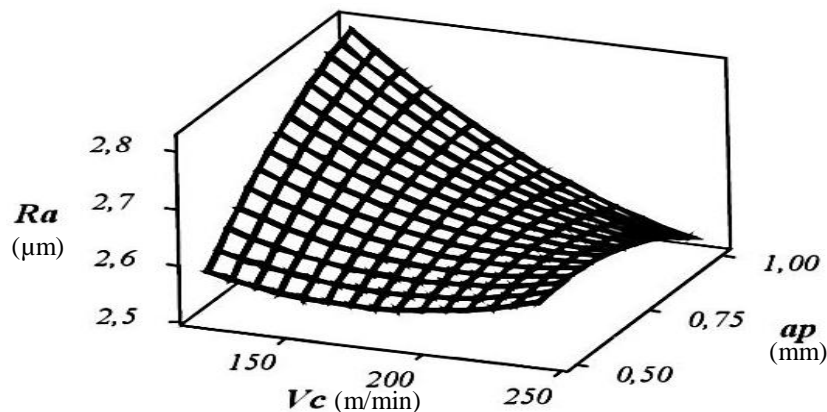


Figure IV.6 Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité Ra.

La figure IV.7 montre l'évolution la rugosité de surface Ra en fonction de la profondeur de passe et l'avance par tour .On peut observer dans ce graphe que l'avance est le facteur le plus

dominant sur la rugosité de surface. Des valeurs minimales de rugosité sont obtenues lorsque en augmente la valeur de la profondeur de passe.

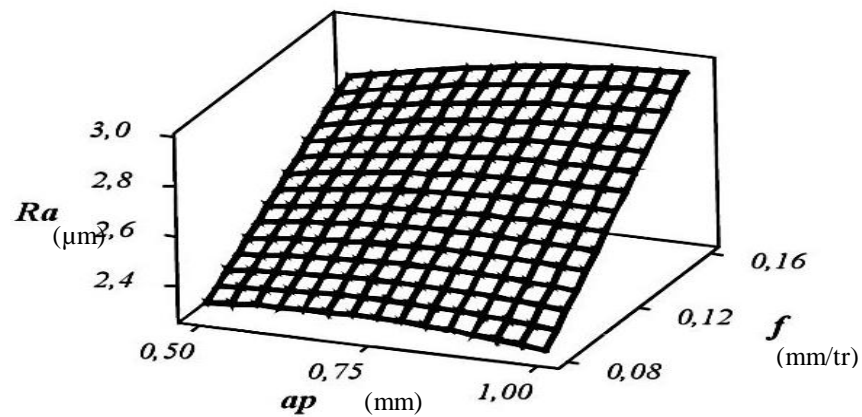


Figure IV.7 Effet de la profondeur de passe et l'avance sur la rugosité Ra.

L'évolution de la rugosité de surface Ra en fonction des vibrations tangentielle et (Vz) et les vibrations radiale (Vy) de l'outil est tracée dans la figure IV.8 on constate que les vibrations de la force de coupe tangentielle (Vz) et les vibrations de la force radiale (Vy) ont un effet secondaire par rapport aux paramètres du régime de coupe.

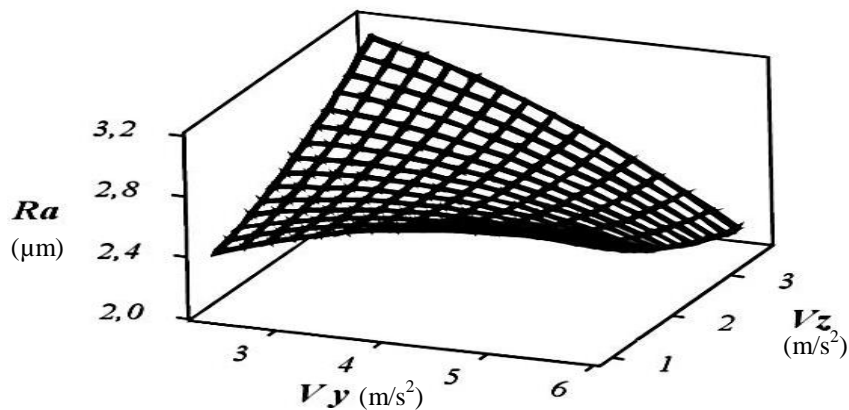


Figure IV.8 Effet des vibrations sur la rugosité Ra.

IV.7.2 Courbes de surface de réponse pour de la rugosité Rz

La figure IV.9 montre l'effet de la vitesse de coupe avec l'avance par tour sur la rugosité de surface Rz , on observe que cette dernière a un effet significatif sur l'état de surface usinée.

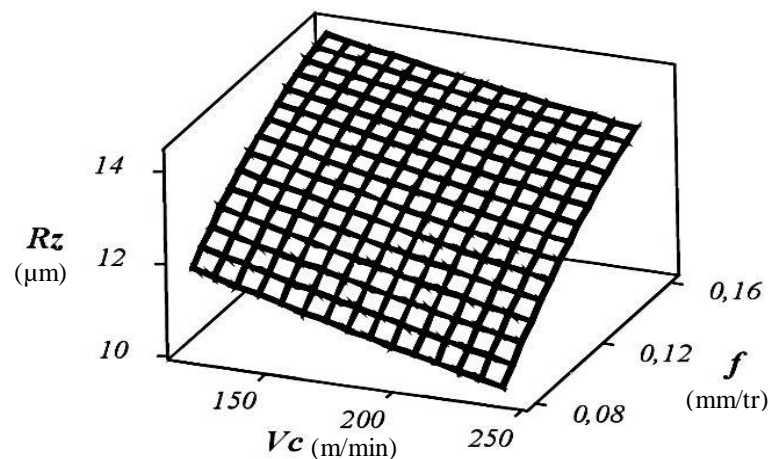


Figure IV.9 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité R_z .

La figure IV.10 montre l'influence de la vitesse de coupe et profondeur de passe sur la rugosité de surface R_z . Cette courbe montre qu'avec une vitesse de coupe environ de 240 m/min, on obtient la plus faible valeur de rugosité. Lorsqu'on augmente la profondeur de passe la valeur de rugosité de surface va diminuer.

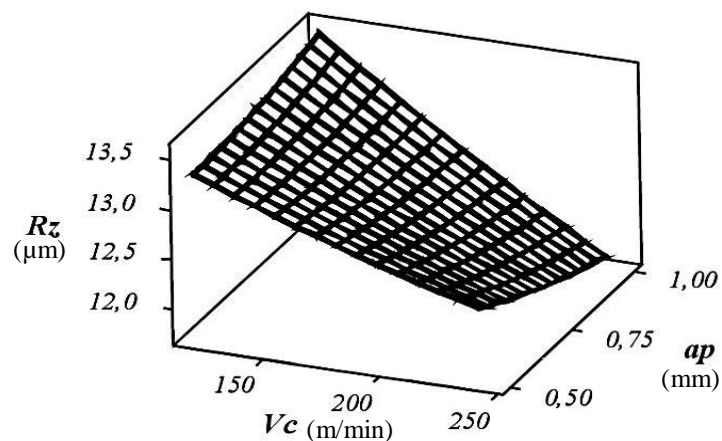


Figure IV.10 Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité R_z .

La figure IV.11 montre l'effet de l'interaction de la profondeur de passe et l'avance par tour sur la rugosité de surface R_z , on remarque que l'avance a un effet significatif sur l'état de surface usinée. On observe que la rugosité de surface est réduite avec l'augmentation de la profondeur de passe.

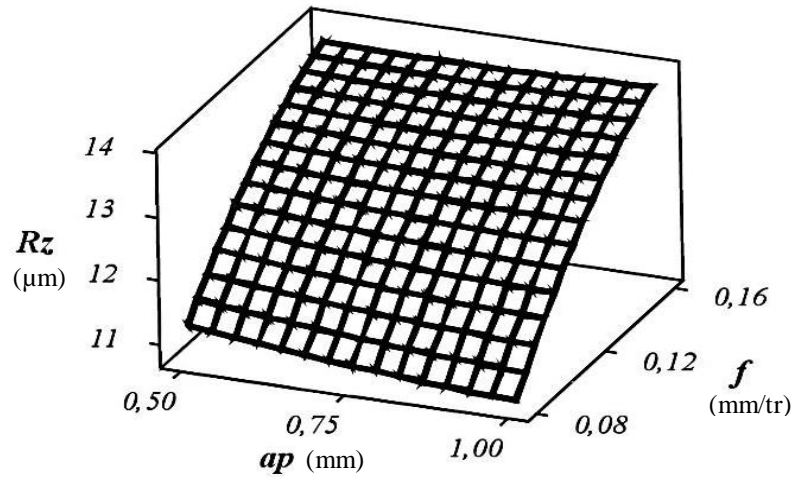


Figure IV.11 Effet de la profondeur de passe et l'avance sur la rugosité R_z .

L'évolution de la rugosité de surface R_z en fonction des vibrations tangentielle et (V_z) et les vibrations radiales (V_y) de l'outil est tracée dans la figure IV.12. D'après ce graphe on constate que les vibrations tangentielle et radiale ont un effet secondaire par rapport aux paramètres du régime de coupe.

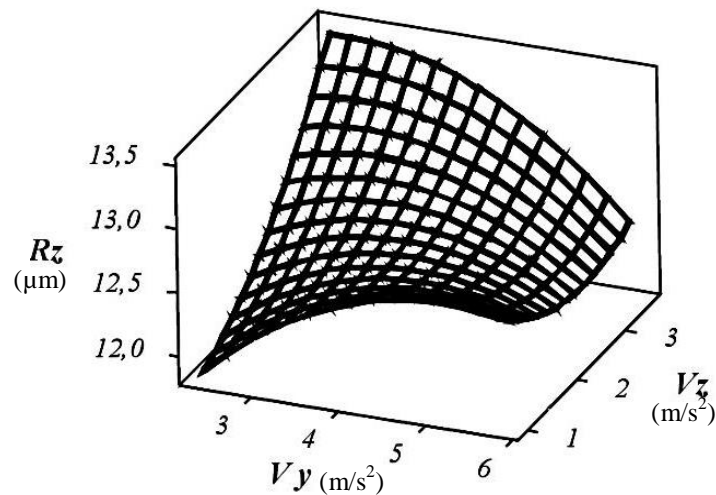


Figure IV.12 Effet des vibrations sur la rugosité R_z .

IV.8 Optimisation multi-réponse.

La méthode de surface de réponse (RSM) est une technique mathématique et statistique utilisées pour obtenir les conditions d'usinage (paramètres de coupe et les vibrations d'outil) optimales en utilisant comme réponses la rugosité de surface R_a et R_z .

La fonction de désirabilité est une fonction qui a un but de tirer les valeurs optimales des paramètres de coupe et les valeurs des vibrations d’outil afin de minimiser la rugosité de surface usinée (Ra et Rz). La désirabilité D déterminé par l’équation IV.5 [55], [62].

$$DF = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right]^{\sum_{j=1}^{1/n} w_i} \tag{IV.5}$$

$$F(x) = -DF$$

Ou d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée, w_i est la fonction de pondération de d_i . La désirabilité est définie dans différentes formes, elle varie en fonction des niveaux de facteurs

Lors du processus d’optimisation, les paramètres de coupe et les vibrations d’outil sont résumées dans la figure IV.13.

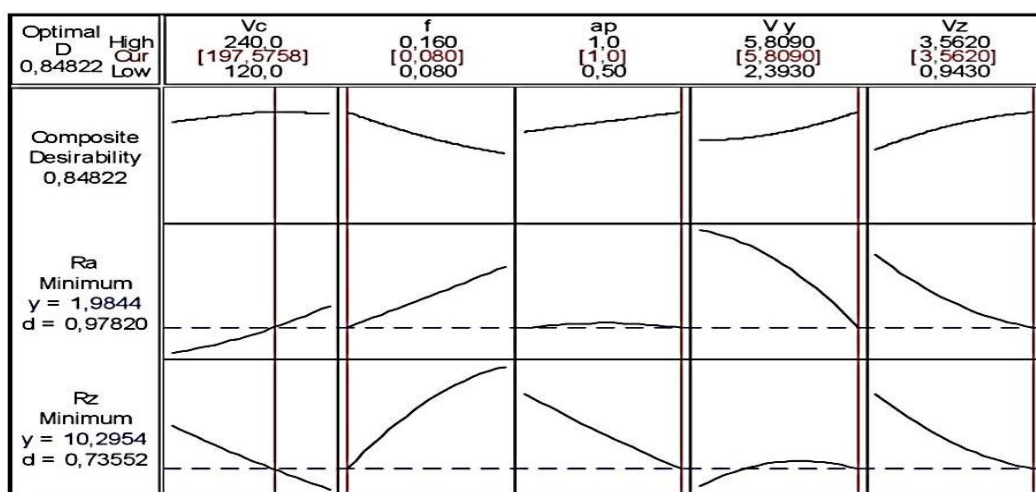


Figure IV.13 Optimisation de surface de réponse.

Dans le tableau IV.8 montre les résultats d’optimisation, le régime de coupe et les valeurs des vibrations optimales pour la rugosité de surface Ra sont comme suit : Vc= 197.57 m/mn, f=0.080 mm/tr, ap=1 mm, Vy =5.80 m/s² et Vz =3.56 m/s².la rugosité de surface Ra optimale est 1.9844 µm. Le régime de coupe et les valeurs des vibrations optimales pour la rugosité de surface Rz sont comme suit : Vc= 197.57 m/mn, f=0.080 mm/tr, ap=1 mm, Vy =5.80 m/s² et Vz =3.56 m/s².la rugosité de surface Rz optimale est 10.2954 µm.

On peut aussi tirer les valeurs de désirabilités pour la rugosité de surface Ra et Rz qui ont respectivement comme suit : 0.98 et 0.73 avec une désirabilité composite de 0.85.

Tableau IV.8 Combinaison optimale.

Réponse	But	Combinaison optimale					Rugosité optimale	Désirabilités
		Vc (m/mn)	F(mm/tr)	ap(mm)	Vy(m/s ²)	Vz(m/s ²)		
Ra	Minimiser	197.57	0.080	1	5.80	3.56	1.9844	0.98
Rz	Minimiser	197.57	0.080	1	5.80	3.56	10.2954	0.73
Désirabilités composite		0.85						

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montrés l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les vibrations d'outil (vibrations d'outil radial et tangentiel), on utilisant la méthodologie de surface de réponse associé à l'analyse de variance ANOVA. Les modèles mathématiques permettent de prédire les paramètres de rugosité et optimiser les conditions de coupe. D'après les résultats trouvés, on peut conclure que pour l'opération de tournage par l'acier 32CrMoV12-28 :

- L'avance a un effet significatif sur la rugosité de surface avec la plus grande valeur de contribution (79.18% pour Ra et 68.99% pour Rz).
- La vitesse de coupe vient en deuxième position avec une valeur de contribution de 12.19% pour Ra et 38.36% pour Rz.
- La profondeur de passe a un effet significatif faible d'une valeur de contribution de 2.58% pour Ra et 2.94% pour Rz.
- Les interactions $f \cdot V_y$ pour la rugosité Ra ont une légère contribution significative de 1.32%.
- Les interactions $f \cdot f$ et $f \cdot V_y$ pour la rugosité Rz ont une légère contribution significative de 2.67% et 1.64% respectivement.
- Les coefficients de corrélation R^2 et R^2 ajusté pour les modèles mathématiques de la rugosité Ra sont 99.32% et 97.06% respectivement.
- Les coefficients de corrélation R^2 et R^2 ajusté pour les modèles mathématiques de la rugosité Rz sont 98.35% et 92.86% respectivement.
- Les deux tests de normalités pour la rugosité Ra et Rz montrent que les valeurs résiduelles sont distribuées normalement.
- Les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour la rugosité Ra et Rz montrent une bonne corrélation entre eux.
- D'après Les résultats d'optimisation la rugosité Ra optimale est de 1.9844 μm . Le régime de coupe et les valeurs des vibrations optimales sont : $V_c = 197.57 \text{ m/mn}$, $f = 0.080 \text{ mm/tr}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $V_y = 5.80 \text{ m/s}^2$ et $V_z = 3.56 \text{ m/s}^2$.
- D'après Les résultats d'optimisation la rugosité Rz optimale est de 10.2954 μm . Le régime de coupe et les valeurs des vibrations optimales sont : $V_c = 197.57 \text{ m/mn}$, $f = 0.080 \text{ mm/tr}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $V_y = 5.80 \text{ m/s}^2$ et $V_z = 3.56 \text{ m/s}^2$.
- les valeurs de désirabilités pour la rugosité de surface Ra et Rz qui ont respectivement comme suit : 0.98 et 0.73 avec une désirabilité composite de 0.85.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

L'application de la méthode de surface de réponse, l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression en tournage de l'acier 32CrMoV12-28 avec les plaquettes des outils de coupe en carbure nous a permis de mettre en évidence l'impact des conditions de coupe (avance par tour, vitesse de coupe, profondeur de passe) et les vibrations d'outil de coupe (vibrations radiales et tangentielles), sur la rugosité des surfaces usinées.

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- La méthodologie de surface de réponse (RSM), le plan des expériences, l'analyse statistique ANOVA et l'optimisation multi-réponses sont des outils très efficaces pour tous nos problèmes de traitement des résultats expérimentaux dans le domaine de fabrication mécanique.
- L'analyse de la variance (ANOVA) montre que l'avance et la vitesse de coupe ont un effet significatif sur l'évolution de la rugosité de surface avec un pourcentage de (79,18% et 12,19%) respectivement sur Ra, et (68,99% et 38,36%) respectivement sur Rz.
- La profondeur de passe est moins importante que l'avance et la vitesse de coupe, elle a un effet significatif faible sur la qualité de surface usinée avec un valeur de contribution de 2.58% pour la rugosité Ra et 2.94% pour la rugosité Rz .
- Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) ont montrés que les vibration de l'outil a un effet significatif faible sur la rugosité de surface usinée.
- Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) ont montrés Les interactions f^*V_y pour la rugosité Ra ont une légère contribution significative de 1.32%.
- Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) ont montrés que Les interactions f^*f et f^*V_y pour la rugosité Rz ont une légère contribution significative de 2.67% et 1.64% respectivement.
- Les modèles mathématiques développés par la régression multiple sont efficaces, ils permettent de faire une prédiction et une optimisation de la rugosité de surface.
- Le coefficient de corrélation (R^2) et (R^2 ajusté) du modèle de la rugosité Ra montre que le modèle est valable avec $R^2=99.32\%$ et R^2 ajusté $=97.06\%$.
- Le coefficient de corrélation (R^2) et (R^2 ajusté) du modèle de la rugosité Rz montre que le modèle est valable avec $R^2=98.35\%$ et R^2 ajusté $=92.86\%$.
- Les graphes résiduels qui ont été élaborées en utilisant la méthodologie de surface de réponse RSM montrent que Les deux tests de normalités pour la rugosité Ra et Rz sont satisfaisant et les valeurs résiduelles sont distribuées normalement.

- Les graphes qui ont été élaborées en utilisant la méthodologie de surface de réponse RSM prouvent une bonne corrélation entre Les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour la rugosité Ra et Rz.
- Les graphes qui ont été élaborées en utilisant la méthodologie de surface de réponse RSM permettent d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.
- La méthodologie de surface de réponse RSM a réussi à optimiser les conditions de coupe et les vibrations de l'outil, pour minimiser la rugosité de surface. Les valeurs optimales sont la vitesse de coupe et la profondeur de passe réglés à un niveau élevé du domaine expérimental (197,57m/min, 1mm) et l'avance à un niveau bas de la gamme expérimentale (0.08 mm/tr).
- La méthodologie de surface de réponse RSM montre les valeurs de désirabilités pour la rugosité de surface Ra et Rz qui ont respectivement comme suit : 0.98 et 0.73 avec une désirabilité composite de 0.85.

Perspectives

Ce travail ouvre à des nouvelles perspectives à savoir :

- Tester de nouveaux matériaux de coupe tel que le CBN et le céramique et voir leur comportement vis à vis du matériau à usiner.
- Etudier l'impact des vibrations sur la qualité de surface usinée avec la méthode de RSM dans le tournage dur.
- Déterminer les modèles mathématiques de la rugosité de surface en fonction de plusieurs variables d'entrée.
- Etudier l'impact des efforts de coupe et de l'usure sur la qualité de surface usinée en utilisant la méthode de surface de réponse RSM.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] **W. CHEN**, «Cutting forces and surface finish When machining medium hardness steel using CBN Tools», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40(3), pp.455-466, (2000).
- [2] **D. SINGH, P.V. RAO**, «A Surface roughness prediction model for hard turning process», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 32(11-12), pp1115-1124, (2007).
- [3] **W.H. YANG, Y.S. RANG**, «Design optimization of cutting parameters for turning operation based on the Taguchi method », *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 84 , pp 122-129, (1998).
- [4] **J. GRUM, J.M. SLABLE**, «The use of factorial design and response surface methodology for fast determination of optimal heat treatment of different Ni-Co-Mo surface layers», *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 155(156), pp155-156, (2004).
- [5] **P.G. BERNARDOS, G.C.VOSNIAKOS**, «Predicting surface roughness in machining», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 43(8), pp 833–844, (2003).
- [6] **M. ARIZMZNDI, F.J. CAMPA, J. FERNANDEZ, L.N. LOPES DE LACALLE ,A. Gil, E. BILBAO, F. VEIGA, A. LAMIKIZ**, «Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration», *CIRP annals-Manufacturing Technology*, Volume 58, pp 93–96, (2009) .
- [7] **B. OZCELIK, T. ERZURMLU**, «Determination of effecting dimensional parameters on war page of thin shell plastic parts using integrated response surface method and genetic algorithm», *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Volume 32 ,pp 1085–1094, (2005) .
- [8] **M. THOMAS, Y. BEAUCHAMP, A.Y. YOUSSEF, J. MASOUNAVE**, «Effect of tool vibration on surface roughness during lathe dry turning process», *Computers and Industrial Engineering*, Volume 31(3-4), pp 637–644, (1996).
- [9] **S. NESELI, S. YALDIZ, E. TURKES**, «Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology», *Measurement*, Volume 44, pp 580–587, (2011).
- [10] **M.Y. NOORDI, V.C. VENKATESH, S. SHARIF, S. ELTING, A. ABDULLAH** , «Application of response surface methodology in the optimization of cutting parameters or surface roughness in turning», *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 145, pp 46-58,(2004).

- [11] **H .OKTEM, T .ERZURMLU, H .KURTARAN**, «Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness », *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 170, pp11-16, (2005).
- [12] **R. MOHAMMED**, « Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, pp7-8, (2011).
- [13] **S. BELHADI**, « Etude de l'usinage des Aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau », Thèse de doctorat de l'université Badji Mokhtar Annaba, pp 4, (2009).
- [14] **A. PASSERON**, «Tournage », *Technique de l'ingénieur*, Volume N°1, Article Référence : BM 7086, (1998).
- [15] **S. COROMANT**, «Guide technique d'usinage», (2005).
- [16] **SANDVIK-COROMANT**, « Technique de l'ingénieur », Document Réf : BM7082 volume N°1, (2001).
- [17] **C. F.BISU**, « Etude des vibrations auto-entretenues en coupe tridimensionnelle : nouvelle modélisation appliquée au tournage », Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux 1, pp29, (2007).
- [18] **Z. PALMAI, G. CSERNAK**, «Chip formation as an oscillator during the turning process», *Journal of sound and vibration*, Volume 326 (3-5), pp 809-820, (2009).
- [19] **L. FILICE, F. MICARI, L. SETTINERI, D. UMBRELLO**, «Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools», *Wear*, Volume 262 (5-6), pp545–554, (2007).
- [20] **W. GRZESIK, M. BARTOSZUK, P. NIESLONY**, «Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools», *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 164-165, pp1204–1211,(2005).
- [21] **R.T. COELHO, NG. EU-GENE, M.A. ELBESTAWI**, «Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47 (2), pp263–272, (2007).
- [22] **E.M. TRENT**, «Metal cutting and the tribology of seizure: II movement of work material over the tool in metal cutting», *Wear*, Volume 128(1), pp47–64(1988).
- [23] **Z.B. HOU, R. KOMANDURI**, «Modeling of thermo mechanical shear instability in machining», *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 39 (11), pp1273–1314, (1997).

- [24] **C. BARLIER, L. GIRARDIN**, « Matériaux & Usinage », Collection : Mémotech, 4^{ème} édition, (1999).
- [25] **M. HABAK**, « Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6 », Thèse de doctorat de l'université d'Angers, pp5-6, (2006).
- [26] **R. M'SAOUBI**, « Aspects thermiques et microstructuraux de la coupe. Application à la coupe orthogonale des aciers austénitiques », Thèse de Doctorat de l'Université de Lille, (1998).
- [27] **C. LECALVEZ**, « Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone », Thèse de doctorat de l'ENSAM Paris, (1995).
- [28] **E. M. TRENT**, «Métal cutting », 3^{ème} édition, Butterworth-Heinemann, (1991).
- [29] **E. FELDER**, « Procédé d'usinage », Techniques de l'ingénieur, Document Réf : BM 7000, pp1-15, (1997).
- [30] **G. POULACHON**, «Usinabilité des matériaux difficiles. Application aux aciers durcis », Techniques de l'ingénieur, Document Réf : BM 7048, pp. 1 - 18 (2004).
- [31] **G. POULACHON, A. MOISAN, I.S. JAWAHIR**, «Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools», Wear, Volume 250(1-12), pp576–586, (2001).
- [32] **B. ROUMESY**, « Détermination des lois d'usure de coupe. Machines-outils », N°301, pp. 34-36, (1975).
- [33] **K.A.D. ABDELILLA**H, « Contribution à la modélisation Coupe–paramètres d'usinage à l'aide de la Méthode de Traitement de Données par Groupe », Thèse de doctorat de l'université Abou Bakr Belkaid de Telemcen, pp 21, (2013).
- [34] **A. CROLET**, « contribution à l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système « pièce-outil-machine » sur la qualité de surface obtenue en tournage de super finition », Thèse de doctorat de l'institut National Polytechnique de Lorraine, pp 28, (2008).
- [35] **C. BARLIER, L. GIRARDIN**, «Matériaux et usinage», Memotech Productique, 4^{ème} édition, pp 115-127, (1999).
- [36] **B. RAPHET**, « États de surface – Caractérisation », Techniques de l'Ingénieur -Sciences & Techniques, Volume R 1230, pp. 22, (2005).
- [37] **O. DJEBILI**, « Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement », Thèse de doctorat université de REIMS, pp13-14, (2013).

- [38] **M.V. THEVENOT**, « Contribution à la maîtrise des phénomènes vibratoires en usinage de parois minces : Application à l'usinage de pales aéronautiques », Thèse de doctorat de L'institut National Polytechnique de TOULOUSE, pp 19-21, (2005).
- [39] **Y. ALTINTAS**, « Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design », Cambridge University Press, 2nd edition, (2000).
- [40] **E. RIVIERE**, « Etude et simulation de procédés de fraisage grande vitesse : Effort de coupe, Stabilité, Etats de surface », Thèse de doctorat de la Faculté Polytechnique de Mons , pp 201, (2007).
- [41] **A. GREFFIOZ**, « Calcul par éléments finis d'un banc d'essai, in Premières Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse », Thèse de doctorat de l'université de Senlis – France, (2000).
- [42] **A. MARTY**, « Simulation numérique de l'usinage par outil coupant à l'échelle macroscopique: contribution à la définition géométrique de la surface usinée », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), pp123, (2003).
- [43] **F. LAPUJOLADE**, « Simulation des phénomènes vibratoires intervenant en usinage - Etat de recherches et perspectives », Thèse de doctorat de l'université de Lyon, (2003).
- [44] **A. MARTY, P. LORONG, G. COFFIGNAL**, « Numérical simulation of a turning operation », 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance, La Baule - Nantes – France, (2000).
- [45] **G. M. R. RAZANDRAZATO**, « Méthodes numériques pour la caractérisation vibratoire de structures complexes », Thèse doctorat l'Université Paris Est Créteil, (2010).
- [46] **V. MOREAU**, « Etude dynamique de l'usinage et de l'interaction pièce-outil par mesure des déplacements : application au fraisage et au tournage », Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, pp 10-11, (2010).
- [47] **M. X. ZHAO, B. BALACHANDRAN**, « Dynamics and stability of milling process. International Journal of Solids and Structures », Volume 38, pp 10-13, , (2001).
- [48] **N. CORDUAN**, « Etude des phénomènes vibratoires en fraisage de finition de plaques minces: Application aux aubages de turbines aéronautiques », Thèse de doctorat de l'établissement de paris, ENSAM, (2006).
- [49] **J. GOUPY, L. CREIGHTON**, « Introduction Aux Plans D'expériences », 3^{ème} édition, (2001).
- [50] **F. RABIER**, « Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire », Thèse de doctorat l'Institut National Polytechnique de Toulouse, pp 73-79, (2007).

- [51] **J. GOUPY**, « Plan d'expériences pour surface de réponse », collection technique et ingénierie, ed dunod, (1999).
- [52] **J. J.DROESBEKE, J. FINE, G. SAPORTA**, «Plans d'expériences, Application à l'entreprise», Technip, Ed Paris, (1997).
- [53] **J. FAUCHER**, «Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue», Thèse de doctorat de L'institut National Polytechnique de TOULOUSE (2006).
- [54] **NFX 06-063, 87** «Application de la statistique, comparaison du rapport de deux variances (deux écart-types) à une valeur donnée», Afnor, Ed Paris, (1987).
- [55] **Z. HESSAINIA, A. BELBAH, M.A. YALLESE, T. MABROUKI, J.-F. RIGAL**, «On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations», Measurement, Volume 46, pp1671-1681, (2013).
- [56] **S.K. CHOUDHURY, P. ER SRINIVAS**, « Tool wear prediction in turning», Journal of Materials Processing Technology, Volume 153-154, pp 276-280, (2004).
- [57] **J.T. HORNG, J. TSONG, N. LIU, K. CHIANG**, « Investigating the machinability evaluation of had field steel in the hard turning with al2o3/tic mixed ceramic tool based on the response surface methodology», Journal of materials processing technology, Volume 208, pp 532-541,(2008).
- [58] **A. MANSOUR, H. ABDALLA**, « Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations», Journal of materials processing technology, Volume 124(1-2), pp 183-191, (2002).
- [59] **V. BALASUBRAMANIAN, A. K LAKSHMINARAYANAN**, «Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded aa7039 aluminium alloy joints», Science Press China, Volume 19, pp 9-18 , (2009).
- [60] **S. SHARIF, Z. AZLAN MOHD, H. HABIBOLLAH**, «Prediction of surface roughness in the end milling machining using artificial neural network», Expert Systems with Applications, Volume 37, pp1755-1768, (2010).
- [61] **A.D. SAHASRABUDHE, K.A. RISBOOD, U.S. DIXIT**, «Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process», Journal of Materials Processing Technology, Volume 132, pp203-214, (2003).
- [62] **R.H. MYERS, D.C. MONTGOMERY**, «Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments», second ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, (2002).

