

Université ABBES LAGHROUR Khenchela



جامعة عباس لغرور خنشلة
Faculté de Sciences et Technologie
كلية العلوم و التكنولوجيا
Département de Génie Mécanique
قسم الهندسة الميكانيكية



Mémoire

de fin d'études Pour l'obtention du diplôme
MASTER (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Thème

***ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES
DE COUPE SUR LA RUGOSITE DE SURFACE
USINEE***

Réalisé par :

- SALHI AHMED
- KHENNAB NAIM

Dirigé par : TOUATI SOUFIANE

Année universitaire : 2019-2020

Avant tout, je remercie le BON DIEU de m'avoir aidé à réaliser ce présent travail.

J'adresse tout particulièrement à notre encadreur Dr. « TOUATI SOUFIANE », Enseignant à l'Université Abbes-Laghrou, mes sincères reconnaissances et mes remerciements les plus vifs, de m'avoir Dirigé et guidé tout le long de ce travail. Ses critiques constructives, remarques et précieux conseils ont contribué à faire progresser mes recherches.

Je tiens à exprimer également mes remerciements à Tous Mes enseignants sans exception

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus distinguées à mes chers parents dont le soutien aussi bien moral que matériel ne m'a jamais fait défaut et sur toutes mes sœurs et mes frères et bien sur Tous mes amis(es) sans exception.

RESUME

Le but de ce travail est de trouver une corrélation entre la rugosité de surface, le volume de copeau et les paramètres d'usinage (vitesse, avance et profondeur de passe).

Une étude expérimentale a conduit à déterminer les effets des paramètres de coupe 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 (Ra) et le volume de copeau enlevé (VC) aux différentes combinaisons de régime de coupe 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. 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), volume copeau.

ABSTRACT

The purpose of this work is to find a correlation between surface roughness, material removal rate and the machining parameters.

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 purpose, a linear quadratic model in interaction of connecting surface roughness (Ra) and material removal rate (VC) with different combinations of cutting parameters such as cutting speed, feed rate, depth of cut is elaborated. In order to express the degree of interaction of cutting parameters, a multiple linear regression and response surface methodology are adopted. 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), material removal rate.

ملخص

جودة السطح هو شرط أساسي للمستهلكين بسبب تأثيره على أداء المنتج. الغرض من هذا العمل هو إيجاد علاقة بين خشونة السطح، ومعلمات بالقطع.

دراسة تجريبية أجريت لتحديد آثار القطع المعلمات و خشونة السطح الموقع عند قطع الفولاذ-32CrMoV12.

28 مع أداة كربيد YT15 . وقد تم تطوير نموذج تربيعي خطي مع التفاعل مرتبطة بخشونة السطح (Ra) , معدل إزالة

RESUME

المواد (VC) مع مجموعات مختلفة من نظام الانحدار الخطي المتعدد ومنهجية استجابة السطح سمح للتعبير عن درجة تأثير كل عنصر من عناصر نظام. هذا النموذج يمكن أن تكون ذات فائدة لتحسين عملية القطع.

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

السطح (RSM)، معدل إزالة المواد.

SOMMAIRE

Introduction Général.....	1
Chapitre I LE PHENOMENE DE COUPE (ETUDES BILIOGRAPHIQUES)	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Opération de tournage.....	5
I.2.1 Définition de tournage	5
I.2.2 Principe de tournage	5
I.2.3 Les outils de coupe en tournage	6
I.3 Les paramètres de coupe.....	7
I.3.1 La vitesse de coupe.....	7
I.3.2 L'avance par tour.....	7
I.3.3 La profondeur de passe.....	8
I.4 Les zones de coupe.....	8
I.5 Les matériaux des outils de coupe.....	9
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.6.3 Rayon de bec et angle de taillan.....	12
I.6.4 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 discontinu.....	14
I.7.3 Copeau avec arête rapportée.....	14
I.8 Les modèles mathématiques d'usure (Durée de vie).....	15
I.8.1 La loi de Taylor.....	15
I.8.2 La loi de Gilbert.....	16
I.8.3 Loi de Kronenberg	16
I.8.4 La loi de Konig – Depiereux.....	16
I.9 Etat de surface	17
I.9.1 Généralités.....	17

SOMMAIRE

I.9.2	Paramètres de mesure des irrégularités.....	19
I.10	conclusion.....	23
Chapitre II LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES		
II.1	Introduction	25
II.2	La Méthode Des Surfaces De Réponse	26
II.3	Objectif De La Méthode Des Surfaces De Réponse.....	26
II.4	Les étapes d'une étude par la méthode Des Surfaces De Réponse	27
II.4.1	Définition des réponses	27
II.4.2	Choix d'une stratégie expérimentale.....	27
II.4.3	Définition des facteurs et des niveaux.....	28
II.4.4	Définition du domaine expérimental.....	28
II.4.5	Définition du modèle empirique	29
II.4.6	Construction du plan d'expériences	29
II.4.7	Expérimentation	30
II.4.8	Analyse globale des résultats d'essais.....	30
II.4.9	Analyse mathématique des résultats d'essais.....	30
II.4.10	Analyse statistique du modèle.....	31
II.4.11	Analyse graphique du modèle	31
II.4.12	Validation du modèle et des informations obtenues	31
II.5	Conclusion.....	31
Chapitre III METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET PREPARATION DES EXPERIENCES		
III.1	Introduction	33
III.2	Objectif.....	33
III.3	Environnement expérimental.....	33
III.3.1	Machine.....	33
III.3.2	Matériau	34
III.3.3	Outil de coupe	35
III.4	Réponses du système (facteurs de sortie).....	36
III.4.1	État de surface	36
III.4.2	Volume de copeau a enlevé VC en fonction des paramètres de coupe	37
III.5	Plan d'expérience factoriel utilisé	37

SOMMAIRE

III.5.1	Les plans de Taguchi	37
III.5.2	Les avantages des plans de Taguchi [61]	38
III.5.3	Traitements des résultats	39
III.6	Conclusion	40
Chapitre IV RESULTATS DES EXPERIENCES TRAITEMENT ET ANALYSE		
IV.1	Introduction	42
IV.2	Modélisation de la rugosité (Ra) et le volume de copeau enlevé (VC)	42
IV.3	Analyse de la variance ANOVA	43
IV.3.1	Analyse de la variance ANOVA pour de la rugosité Ra	43
IV.3.2	Analyse de la variance ANOVA pour VC	43
IV.4	Analyse de régression	43
IV.4.1	Analyse de régression de la rugosité Ra	43
IV.4.2	Analyse de régression de volume de copeau VC	44
IV.5	Les graphes résiduels	44
IV.5.1	Les graphes résiduels de la rugosité Ra	44
IV.5.2	Les graphes résiduels de volume de copeau VC	45
IV.6	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites	45
IV.6.1	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra	45
IV.6.2	Comparaison entre le volume de copeau mesurées et prédits	46
IV.7	Graphique des effets principaux pour les les réponses	47
IV.7.1	Graphique des effets principaux pour Ra	47
IV.7.2	Graphique des effets principaux pour VC	47
IV.8	Graphique de contour	48
IV.8.1	Graphique de surface pour de la rugosité Ra	48
IV.8.2	Graphique de surface pour le volume de copeau (VC)	50
IV.9	Optimisation multi-réponse	51
IV.10	conclusion	52
CONCLUSION GENERALE		
Conclusion Générale		53
Références Bibliographiques		56

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE I

Figure I.1 L'usinage dans une machine de tour.	4
Figure I.2. Principe de tournage	6
Figure I.3. Outil de tournage	7
Figure I.4 Les différentes zones de coupe.....	8
Figure I.5. Disposition les matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté.....	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 discontinu (a), (b).....	14
Figure I.10. Copeau avec arête rapportée	15
Figure I.11. Motif de rugosité.....	19
Figure I.12 Exemple de détermination des motifs de rugosité.....	19
Figure I.13. Exemple de détermination d'ondulation des motifs	20
Figure I.14. Ligne moyenne du profil.	21
Figure I.15. Définitions des paramètres liés à la courbe de portance.....	22

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE II

Figure II.1 Les trois parties du processus d'acquisition des connaissances	25
Figure II.2 Domaine expérimental.	Erreur ! Signet non défini. 29

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE III

Figure III.1 Tour parallèle modèle SN40.	34
Figure III.2 Forme et dimension des plaquettes YT15.....	35
Figure III.3. Système de fixation de la plaquette.....	35
Figure III.4. Montages et formes des éprouvettes pour les essais	3536
Figure III.5. Rugosimètre Mitutoyo	37

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES DU CHAPITRE IV

Figure IV.1 test de normalité de la distribution des résidus pour Ra.	44
Figure IV.2. test de normalité de la distribution des résidus pour VC.	45
Figure IV.3. Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour Ra.....	46
Figure IV.4 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour VC.....	46
Figure IV.5. Graphique des effets principaux pour Ra.....	47
Figure IV.6. Graphique des effets principaux pour VC	48
Figure IV.7 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité Ra	48
Figure IV.8 Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité Ra.....	49
Figure IV.9 Effet de la profondeur de passe et l'avance sur la rugosité Ra.....	49
Figure IV.10. Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur VC.....	50
Figure IV.11. Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur VC	50
Figure IV.12. Effet de la profondeur de passe et l'avance sur VC.....	51
Figure IV.13 Optimisation de surface de réponse.	52

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX DU CHAPITRE I

Tableau I.1 Valeurs approximative de n pour A.R.E.S.	1715
Tableau I.2 Valeurs approximative de n pour carbure.	16
Tableau I.3 . Ordres de grandeur des irrégularités géométriques	17
Tableau I.4 Classement pratique des différents écarts géométriques	18
Tableau I.5 Principaux paramètres liés aux motifs	20
Tableau I.6 Principaux paramètres liés à la ligne moyenne	21
Tableau I.7 Principaux paramètres liés à la courbe de portance	22

LISTE DES TABLEAUX DU CHAPITRE III

Tableau III.1 la composition chimique de l'acier 32CrMoV12-28	34
Tableau III.2 Les caractéristiques de l'outil de coupe et le porte d'outil.	3636
Tableau III.3 Attribution des niveaux de facteurs.	39
Tableau III.4 Matrice de planification pour un plan de 09 essais	40

LISTE DES TABLEAUX DU CHAPITRE IV

Tableau IV.1 Résultats expérimentaux de la rugosité et le volume de copeau enlevé (VC)	42
Tableau IV.2 Analyse de la variance ANOVA pour Ra	43
Tableau IV.3 Analyse de la variance ANOVA pour VC	43
Tableau IV.4 Combinaison optimale	52

NOMENCLATURE DES SYMBOLES

NOMECLATURE 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)
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
VC	Volume de coupeau a enlevé (mm/s^3).
PE	Plans d'expériences

INTRODUCTION GENERALE

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.

Ces travaux ont montré que la qualité de la surface est influencée par la dureté et les propriétés du matériau usiné, il est prouvé que la rugosité de surface diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce.

Grâce au déploiement de la qualité dans les entreprises et à un accès facilité aux moyens de calcul, les plans d'expériences prennent une place plus importante. Les applications des plans d'expériences deviennent de plus en plus nombreuses. La méthodologie des plans d'expériences permet une recherche expérimentale planifiée appelée « plans d'expériences ». Nous utilisons 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.

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) 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. Pour chacun des modèles, un test de «Student» a été appliqué pour sélectionner les paramètres les plus significatifs. Puis, 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 mémoire 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 et l'état de surface.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, nous présentons la définition de 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.
- ❖ 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 sur la rugosité de surface et le volume de copeau a enlevé en tournage. Des modèles mathématiques ont été établis à partir de la régression linéaire.

**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 façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, 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 conjonction 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.

De nos jours, des machines-outils à commande numérique (MOCN), c'est-à-dire asservies par un système informatique (FAO), permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure.

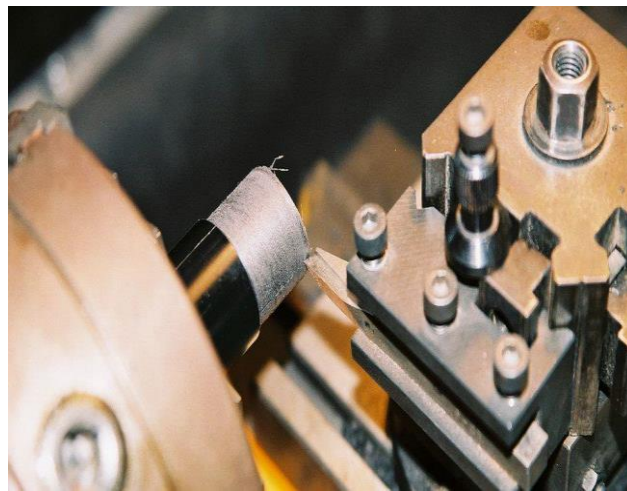


Figure I.1. L'usinage dans une machine de tour. [1]

L'usinage entre dans la gamme de fabrication d'une pièce mécanique. Elle est définie par un plan portant une cotation exhaustive. Celle-ci a pour but de définir les dimensions de la pièce finie, la précision, la géométrie ainsi que l'état de surface de l'ensemble des surfaces qui constituent la pièce usinée. À chaque phase de la gamme de fabrication, le concepteur et/ou l'usineur choisissent le type d'usinage à réaliser, la machine, l'outil ainsi que le support de pièce permettant l'obtention de tous les éléments de cotation de la surface considérée. D'une manière générale, les formes des surfaces usinées peuvent être planes ou de révolution. Les principaux usinages sont le fraisage (surfaces planes) et le tournage (surfaces de révolution).

Avec l'apparition de la commande numérique, il est désormais possible d'usiner une multitude de surfaces courbes. Toutefois, il convient de noter que les outils utilisés sont sensiblement les mêmes que pour les machines traditionnelles et que leurs trajectoires sont constituées de segments de droites et d'arcs de cercles.

L'usinage a un coût : temps de travail, surépaisseur de matière à enlever, usure de la machineoutil, consommables (outil, lubrifiant, courant électrique), stockage. On ne pratique donc que les usinages nécessaires. [1]

I.2 Operation de tournage

Le choix a été fait pour cette étude de s'intéresser à une opération de tournage finition. Deux raisons principales viennent motiver ce choix.. Deuxièmement, le tournage est une opération d'usinage à la fois simple et très courante dans l'industrie mécanique. n'est pas de faire une présentation détaillée du tournage et du processus de coupe en générale mais seulement de donner quelques définitions qui permettront une meilleure compréhension de la suite de l'étude. [2]

I.2.1 Définition de tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique . La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [3].

I.2.2 Principe de tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes)

Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil (mouvement radial) il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution de plusieurs forme (cylindre, cône, sphère, etc.). le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage

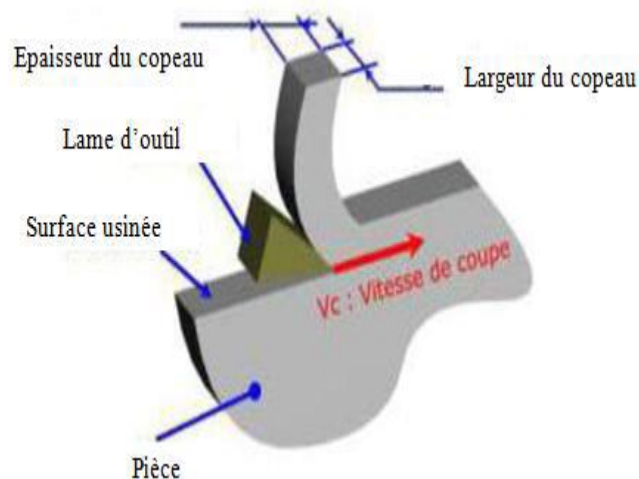


Figure .I.2 Principe de tournage [4]

L'utilisation principale des ces machines est l'usinage des arbres. la pièce, généralement tenue par le mandrin, qui a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche [4].

I.2.3 Les outils de coupe en tournage

Le choix des paramètres présenté ci-dessus dépend directement de l'outil de coupe (nuances, géométrie...), du matériau à usiner, de la nature de l'opération à réaliser et du produit final (état de surface, contraintes internes, changement de phase...). Dans ce qui suit, nous ne présenterons que les paramètres d'outils de coupe essentiels à cette étude.

Pour les décrire, il est nécessaire de donner les différents angles caractéristiques de l'outil. Ces derniers sont définis par les plans de référence dans le système de l'outil en main sur un outil de chariotage (figure I.3) [5].

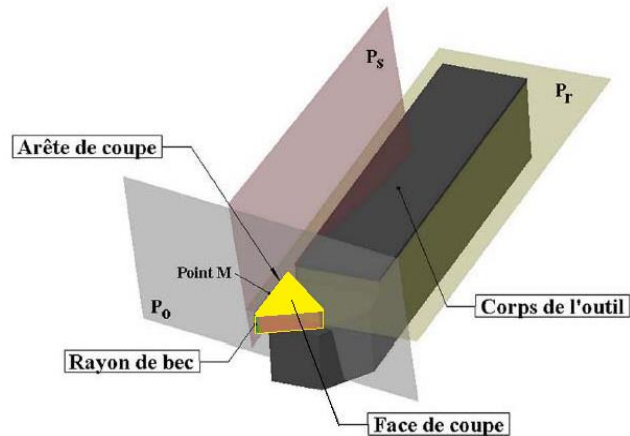


Figure I.3 Outil de tournage [5]

I.3 Les paramètres de coupe

I.3.1 Vitesse de coupe

Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce (notée N et exprimée en tour.mn^{-1}). Cette vitesse dépend de la vitesse de coupe et du diamètre de la pièce à usiner. La relation reliant la vitesse de coupe et la vitesse de rotation est donnée par l'Équation I.1.[7]

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (\text{I.1})$$

D : diamètre de la pièce exprimée en mm .

V_c : vitesse de coupe [m.mn^{-1}] .

N : vitesse de rotation [tour.mn^{-1}].

I.3.2 L'avance par tour

L'avance correspond au déplacement de l'outil en fonction de la rotation de la pièce pendant la formation de copeau. L'avance est notée f et est exprimée en mm.tour^{-1} . Comme pour la vitesse de coupe, en pratique, l'avance s'exprime en vitesse d'avance V_f . Cette dernière représente la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal et en fonction du nombre de tours effectués par la pièce. Elle est donnée par l'Équation I.2[7].

$$V_f = f \times N \quad (\text{I.2})$$

avec : V_f vitesse d'avance exprimée en mm.min⁻¹.

I.3.3 La profondeur de passe

La profondeur de passe représente la différence des rayons avant et après usinage (profondeur de la matière à enlever). Elle est notée a_p et exprimée en mm. En coupe orthogonale, ce paramètre disparaît car il est confondu avec l'avance.[7]

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. La figure (I.4) ci-dessous montre les trois zones de coupe.

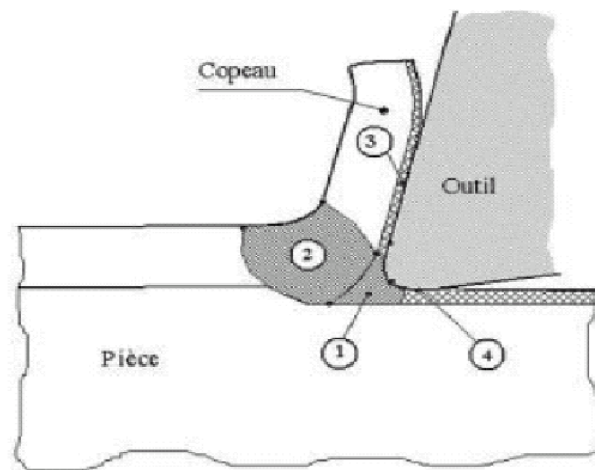


Figure I.4 Les différentes zones de coupe [8].

- **La zone 1 ou la zone morte :** C'est la zone de séparation en deux parties de la matière engendrée par l'arête de l'outil.[8]
- **La zone 2 ou de cisaillement primaire :** Dans cette zone la matière subit une déformation plastique ainsi qu'un échauffement considérable, elle est le lieu où s'effectue le changement de direction de la matière usinée qui passe de la vitesse de coupe V_c à la vitesse du copeau V_{cop} . C'est une zone intense de déformation qui s'étend de la pointe de l'outil jusqu'à la surface libre du copeau. [8]
- **La zone 3 ou de cisaillement secondaire :** Cette zone se situe à l'interface entre la face de coupe de l'outil et le copeau. Elle est entraînée par le frottement du copeau sur l'outil ; cette zone est à la fois soumise à des forts taux de cisaillement et à une forte élévation de température causée par le frottement. [8].

- **La zone 4 ou 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, ces derniers 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. [8]

I.5 Matériaux utilisés pour les outils

L'acier rapide

(HSS - High Speed Steel), qui est un acier fortement allié, est très employé pour la production d'outils de coupe. Les caractéristiques qui le rendent intéressant sont sa dureté d'environ 65 HRC et sa ténacité qui lui confère une bonne longévité.

les carbures métalliques

Rentrent dans cette catégorie les alliages composés de tungstène (60-90%), titane et tantale (1-35%) et de cobalt ou nickel (5-15%), ainsi que d'autres matières en plus faibles quantités comme le molybdène ou le vanadium. La fabrication du métal dur est réalisée par frittage, on en fait généralement des plaquettes que l'on fixe sur le corps de l'outil par brasage, avec une vis ou aussi par bridage. Certains outils de petites dimensions sont fabriqués entièrement en métal dur.

Les outils en carbure se présentent sur marché en deux types .à savoir :

- Les outils à plaquettes en carbure brasées dont la plaquette se trouve brasée au porte plaquette.
- Les outils à plaquettes en carbure amovibles : ils sont formés de trois blocs. à savoir, le porte plaquette, la plaquette intercalaire et la plaquette. cet est à jeter une fois sa durée de vie est atteinte. leurs principales formes et dimensions sont normalisées.[9]

Ceramique :

Les outils à plaquettes en céramique amovibles ont une grande dureté (donc une faible ténacité) et une grande stabilité à haute température. ils permettent un grand débit de matière. Mais nécessitent une grande stabilité de la machine et un strict respect des conditions de coupe. Ils sont généralement utilisés pour les opérations de finition[9].

Cermet

Ce sont des outils à plaquettes en cermet amovibles. le nom cermet vient de céramique – métal car il représente les carbures ayant des particules de titane .de carbonitride de titane ou nitride de titane.

Les applications typiques sont la finition des aciers inoxydables, des fontes, des aciers à bas carbone et des aciers ferritiques. [9]

Nitride de bore cubique :

Ce sont des outils à plaquettes amovibles en nitride de bore cubique (matériau le plus dur après le diamant) noté CBN. Il comporte l'avantage de ne pas s'oxyder à haute température. Son utilisation requiert une machine stable, une grande rigidité de la pièce et du porte pièce et un arrosage[9].

Diamant :

Le diamant a un faible coefficient de frottement. il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température tel que les alliages d'aluminium, les alliages de cuivre, les alliages de magnésium therm durcissables etc et ne convient pas à l'usinage des matériaux ferreux. [9]

Carbures revêtus :

Les carbures métalliques frittés (obtenus par frittage) non revêtus présentent beaucoup d'avantages mais l'inconvénient majeur est sa faible ténacité. Ces propriétés sont inversement proportionnelles aux quantités de ses composants. Afin de remédier à ce problème, les outils à plaquettes en carbures revêtus ont été mis en oeuvre où ils ont appliqué un matériau de revêtement, dont les plus utilisés sont :

- Nitride de titane TiN.
- Oxyde d'aluminium Al₂O₃.
- Carbure de titane TiC.
- Carbonitride de titane TiCN.
- Alumino-nitride de titane TiAlN.

Chaque élément de revêtement apporte à l'outil une aptitude meilleure dans un domaine particulier. Il est possible d'appliquer plusieurs couches de différents matériaux de revêtement pour combiner leurs différents avantages[10].

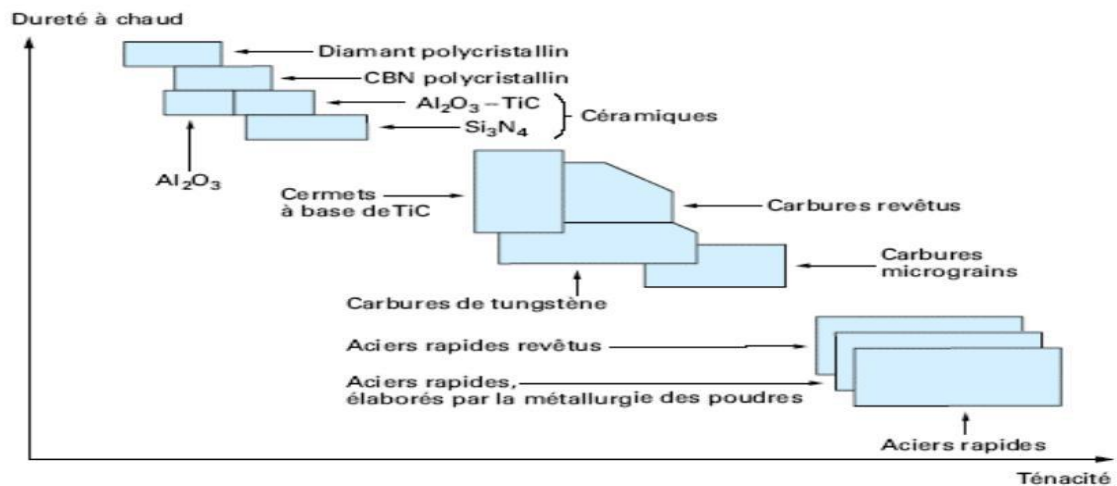


Figure.I.5. Disposition les matériaux d’outil selon la ténacité et la dureté [10].

Remarque

Le choix de l’outil de coupe dépend directement de la matière à usiner ainsi que l’opération à réaliser [9].

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) [11].

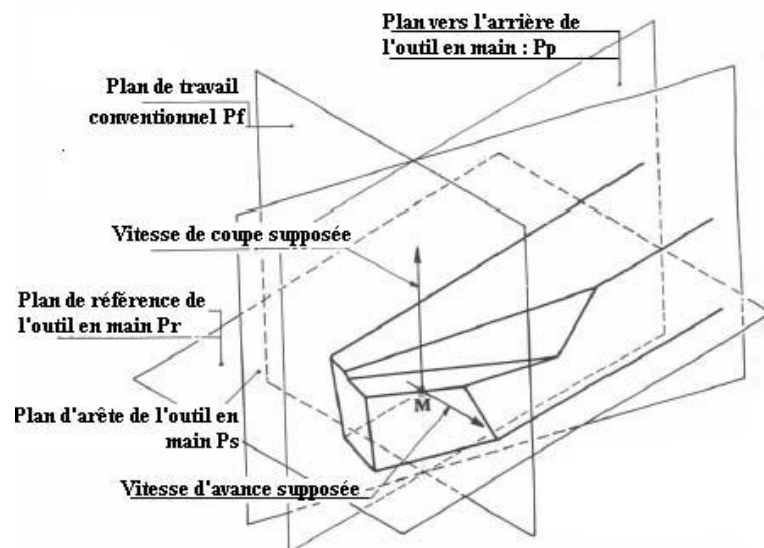


Figure 0.6 Principaux plans de l’outil en main [11].

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_f .

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.6.3 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.6.4 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. [7]

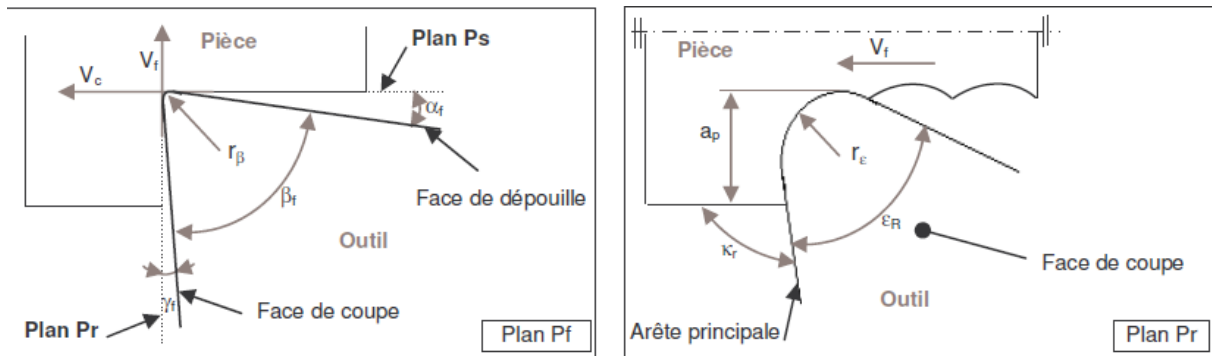


Figure 0.7 Plans et angles en main sur un outil de chariotage [7].

I.7 Formation de copeaux

On est en mesure d'effectuer une classification des formes d'élaboration du copeau suivant les trois groupes principaux suivants [12]:

- Le copeau continu.
- Le copeau discontinu (ou festonné)
- Le copeau avec arête rapportée.

I.7.1 Le copeau continu

Il se forme par déformation plastique de cisaillement, sans fissuration au niveau de la zone de cisaillement primaire (Fig. I.8) Ce cas est le plus simple à traiter, la matière s'écoule sur l'outil de façon continue et stationnaire. La plupart des travaux sur la modélisation de la coupe se rapportent à ce cas de figure. Le modèle numérique de coupe mis au point au cours de cette étude est basé sur ces considérations[12].

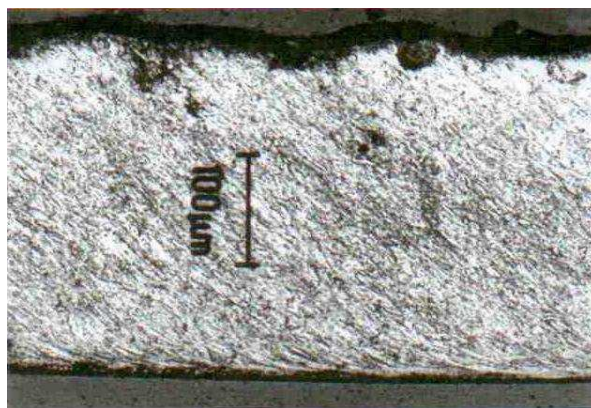


Figure 0.8 Copeau continu[13].

I.7.2 Le copeau discontinu

Dans la catégorie des copeaux discontinus (Fig. I.9), on considère deux cas distincts : les copeaux discontinus de cisaillement et les copeaux discontinus déchirés :

- les premiers résultent d'une déformation plastique jusqu'à la défaillance du matériau, suivie d'une fissuration, de sorte qu'il se forme des copeaux à partir de plus ou moins d'éléments individuels continus. Ces copeaux sont caractéristiques de l'usinage des aciers. [12]
- Les seconds se forment sans déformation plastique importante par arrachement de copeaux irréguliers. On observe ce comportement dans le cas de l'usinage d'un matériau fragile comme la fonte. La rigidité du porte-outil est un facteur externe influant sur la formation des copeaux discontinus. Des observations montrent que la période de festonnage est fonction de la rigidité du porte-outil, traduisant la présence d'un phénomène de résonance. [12]

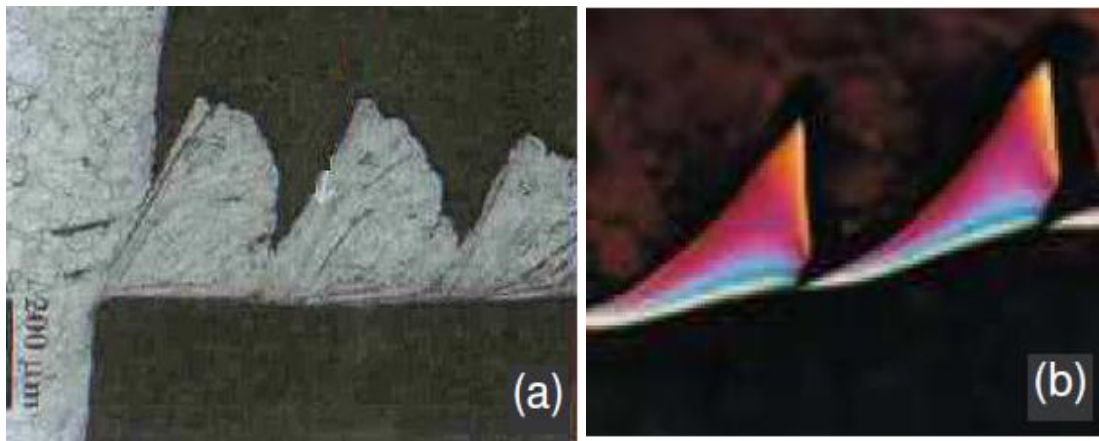


Figure 0.9 Copeau discontinu (a) [14], (b) [15]

I.7.3 Le copeau avec arête rapportée

L'un des phénomènes les plus particuliers lors de la formation du copeau est la création d'arêtes rapportées (Fig. I.10). Un fragment de matériau de la pièce à usiner se fixe dans la zone de l'arête de coupe où les vitesses de glissement sont nulles et forme à l'extrémité de celle-ci un petit tranchant, dont la géométrie évolue continuellement, qui supplée la fonction préliminaire de l'arête de coupe. Ce phénomène d'arête rapportée modifie considérablement la géométrie de l'outil, de sorte que tout le processus est influencé par des formes d'élaboration sans cesse différentes. [16]

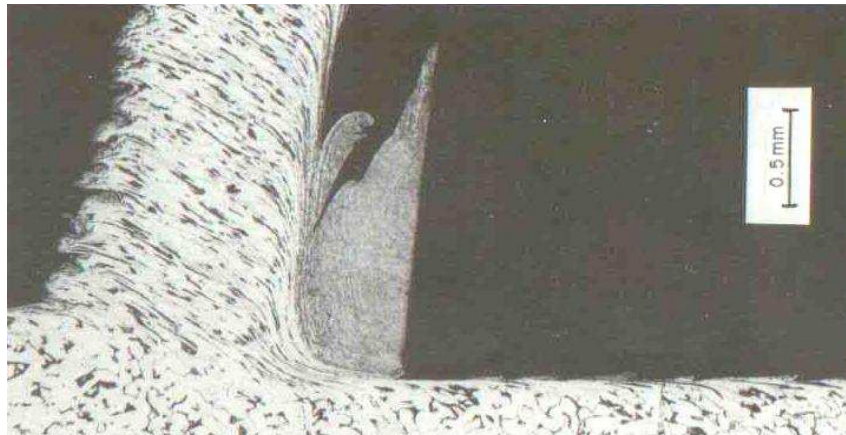


Figure 0.10 Copeau avec arête rapportée. [16]

I.8 Principaux modèles mathématiques de l'usure

I.8.1 Loi de Taylor

Ce modèle établi par TAYLOR en 1906 est caractérisé par l'équation :

$$T = C_v \times V_c^n \quad (I.4)$$

T : Durée de vie d'outil

n : Exposant de TAYLOR,

C_v : Constante dépendant du couple outil/pièce.

L'exposant n , souvent appelé coefficient de Taylor, il est influencé par le matériau de l'outil, le matériau usiné, ainsi que le type d'usinage.

On peut prendre les valeurs de n données par les tableaux suivants. [17]

Usinages effectués avec des outils en A.R.E.S (Tableau I.1).

Tableau I.1 Valeurs approximative de n pour A.R.E.S. [17]

	Aciers	Fontes grises	Fontes malleables	Alliages d'Aluminium
Tournage	-8,5	-10	-8,5	-2,5
Perçage	-5	-8,5	-8,5	-2,5

Usinages effectués avec des outils en carbure (Tableau I.2).

Tableau I.2 Valeurs approximative de n pour carbure. [17]

	Aciers	Fontes grises	Fontes malleables	Alliages d'Aluminium
Tournage	- 4,5	-5	-5	-2,5
Perçage	-3,5	-2,5	-2,5	-2,5

Bien que l'influence de l'avance et de la profondeur de passe ne soient pas prises en considération ce modèle est toujours très employé.

Si l'on met l'équation $T = C_V \times V_C^n$ sous la forme :

$$\log T = n \log V_C + \log C_V \quad (I.5)$$

I.8.2 Loi de Gilbert

Ce modèle, qui date de 1950, est en fait une généralisation de la loi de Taylor pour prendre en considération l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation:

$$T = K \times V_C^k \times f^x \times a^y \quad (I.6)$$

K : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné,

k, x et y : Exposants dépendants de la nuance de l'outil [17].

I.8.3 Loi de Kronenberg

Ce modèle, qui date de 1968 ne prend pas en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe, tout comme la loi de Taylor. Il est caractérisé par l'équation :

$$T + K = C_V + V_C^n \quad (I.7)$$

K: est une constante.

Il est à noter que la constante C et le coefficient, n'ont pas les mêmes valeurs que dans la loi de Taylor [17].

I.8.4 Loi de König-Depiereux

Dans ce modèle, qui date de 1969, on tient compte de l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation :

$$T = \exp(\alpha V^v \cdot \gamma f^\mu \cdot \delta a^\lambda) \quad (I.8)$$

Ce modèle conduit à une représentation correcte de la loi d'usure et son type exponentiel est en accord avec les courbes expérimentales qui déterminent l'usure des outils. Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de Taylor est suffisamment

représentatif, il est couramment utilisé. Ces différents constants sont déterminés à l'aide d'essais de coupe où l'on pousse l'usure de l'outil jusqu'à l'obtention de la valeur maxi du critère d'usure considéré [17].

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 mètres, qui relèvent le profil de la surface.

Un profil de surface, est composé de différents écarts géométriques, auxquels correspondent différents profils (Tableau I.3).

❖ 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)

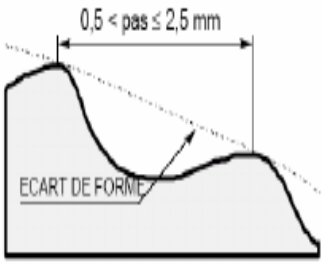
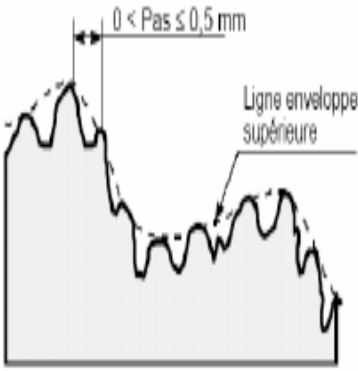

On appelle aussi profil W, sur lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole W, par exemple W_t , W_a ...

❖ 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 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **I.3**
Ordres de grandeur des irrégularités géométriques [18].

Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques			
Ordres	Écarts géométriques	Croquis	Origines possibles
1	<p>Écarts géométriques : Défauts de planéité ; de rectitude ; de circularité ; de cylindricité, etc.</p>	<p>Le croquis illustre un profil géométrique théorique représenté par une ligne droite descendante à gauche et une ligne horizontale à droite. Une ligne courbe déviée, étiquetée 'ECART DE FORME', s'écarte de la ligne théorique. Une légende 'PROFIL GEOMETRIQUE THEORIQUE' pointe vers la ligne droite.</p>	<p>Défaut de bridage.</p> <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).

<p>2</p>	<p>Ondulation : Irrégularités géométriques, telle que la distance entre deux sommets d'irrégularités soit comprise entre 500 µm et 2 500 µm</p>		<p>Vibrations basses fréquences :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de la pièce. • de l'outil. • les deux, dues aux flexions, au mauvais guidage et à l'équilibrage des éléments de la machine, et également à l'insuffisance de l'installation de l'isolation passive et active
<p>3</p>	<p>Rugosité : Irrégularités géométriques, telle que la distance entre deux pics de ces irrégularités soit comprise entre 0 et 500 µm (1).</p>		<p>Vibrations hautes fréquences (causes analogues à celles énumérées ci-dessus).</p> <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. • Qualité de la géométrie de l'outil. • Hétérogénéité, plasticité du matériau.
<p>4</p>	<p>Arrachement : Marque d'outil, fente, piqure, ... (irrégularités aperiodiques)</p>		<p>Ensemble des écarts de profil dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une ou plusieurs fonctions données.</p>

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.4).

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **I.4** Classement pratique des différents écarts géométriques [18].

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.11) [19]. 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.12) est calculé en utilisant l'opérateur A. Par définition, un motif de rugosité a une longueur AR_i 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.13) 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 H_w et H_{w+1} .

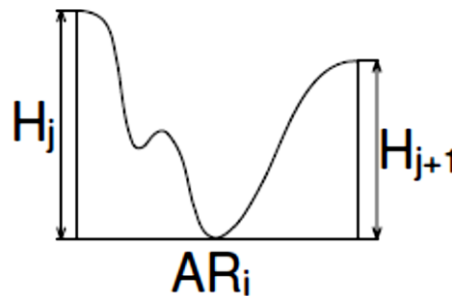


Figure 0.11 Motif de rugosité [17].

AR_i = Pas élémentaire du motif.

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

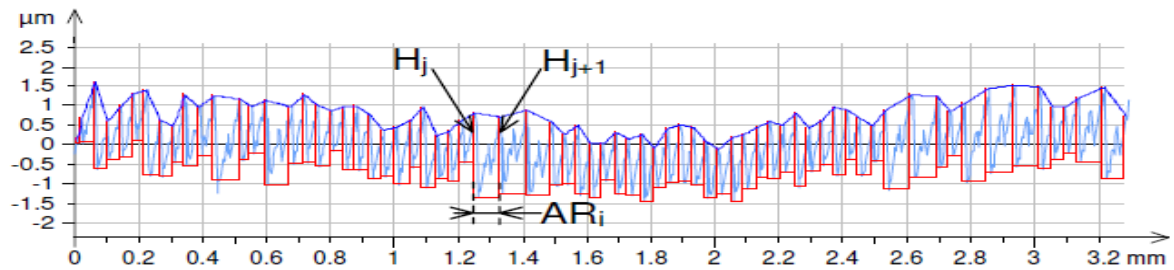


Figure 0.12 Exemple de détermination des motifs de rugosité [19].

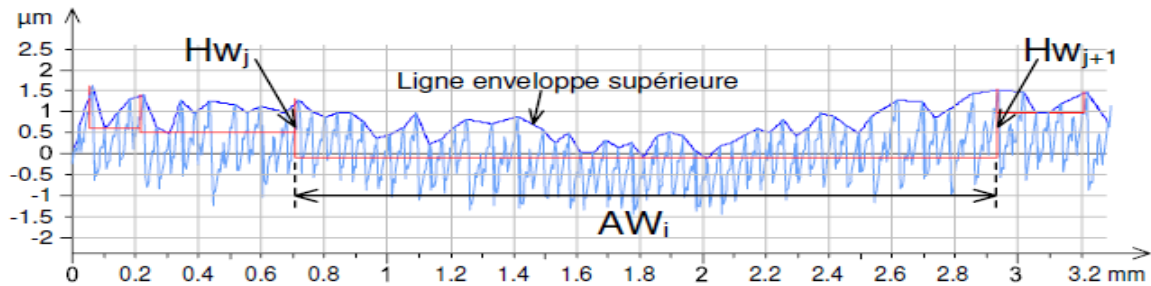


Figure 0.13 Exemple de détermination d'ondulation des motifs [19].

La définition des principaux paramètres liés aux motifs est présentée dans le Tableau I.5.

Tableau I.5 Principaux paramètres liés aux motifs. [20]

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.14).

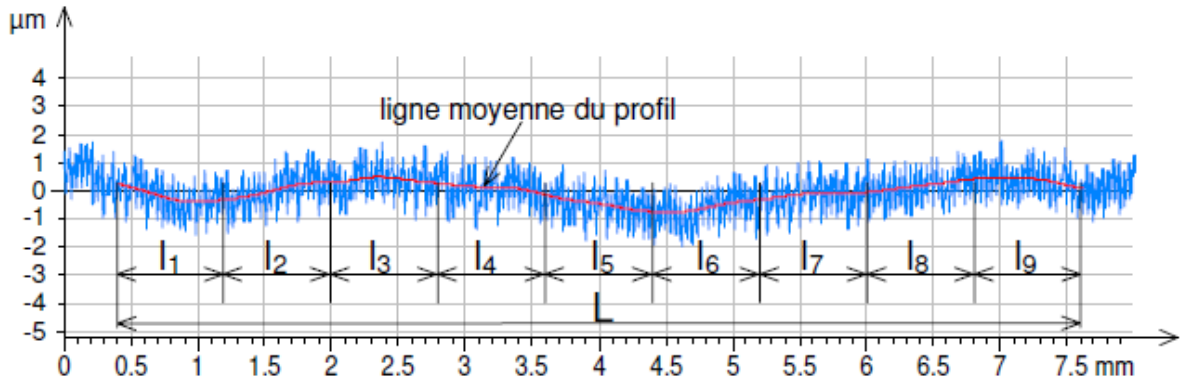


Figure 0.14 Ligne moyenne du profil. [19]

La définition des principaux paramètres liés à la ligne moyenne est présentée dans le Tableau I.6

Tableau I.6 Principaux paramètres liés à la ligne moyenne [20].

Définition des paramètres liés à la ligne moyenne		
Intitulé	Symbole	Définition
Hauteur totale du profil	R_t W_t	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.
Écart moyen arithmétique du profil évalué	R_a W_a	Moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées $Z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base : $Ra_i, Wa_i = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) \cdot dx$ $Ra = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K Ra_i, Wa = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K Wa_i$ Avec k =nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)
Hauteur maximale du profil	R_z W_z	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. $Rz = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K Rz_i$ Avec k =nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)

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 (défini 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.15):

- 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.

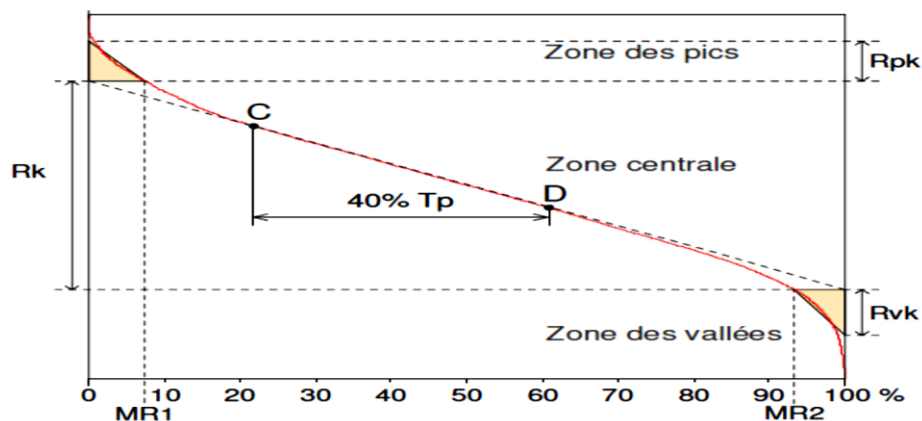


Figure 0.15 Définitions des paramètres liés à la courbe de portance.

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

Tableau I.7 Principaux paramètres liés à la courbe de portance [20].

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. 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 l'état de surface.

CHAPITRE II LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE

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 .

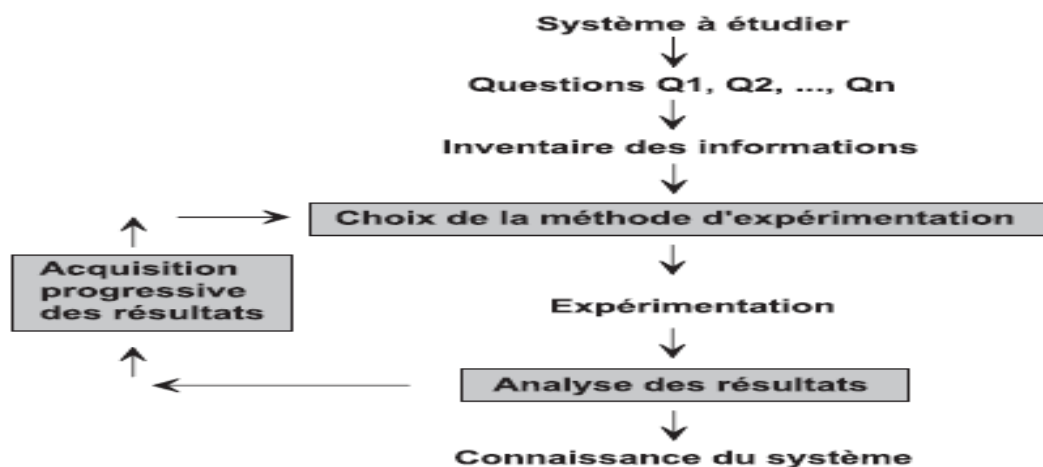


Figure II.1 Les trois parties du processus d'acquisition des connaissances[21].

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. [21]

II.2 La Méthode Des Surfaces De Réponse

L'étude des surfaces de réponses sont apparus dans la seconde moitié du 10^{ème} 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 recours à la recherche d'un plan optimal basée sur l'utilisation d'un algorithme d'échange dont la technique est apparue après 1970, comme l'indique la figure 1. 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 [22].

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 [23] :

- 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 (screening ou RMS) et la définition du plan d'expériences. Cependant, dans les deux cas, les étapes de la démarche se déroulent dans un ordre similaire à savoir [22] :

- ❖ Définition des objectifs.
- ❖ Définition des réponses.
- ❖ Choix d'une stratégie expérimentale.
- ❖ Définition des facteurs et 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 [23].

II.4.2 Choix d'une stratégie expérimentale

Dès lors que les objectifs et les réponses ont bien été définis il convient d'adopter une démarche pour atteindre le ou les objectifs fixés de la manière la plus efficace possible. Lorsqu'on est confronté à un problème d'optimisation deux grandes approches expérimentales peuvent être appliquées:

- Les méthodes directes consistent à converger séquentiellement vers un optimum local sans faire appel à une forme particulière de modélisation. Il s'agit par exemple de la méthode du simplexe et de ses différentes variantes proposées par (Walters et al. 1991 ; Nelder, 1965 ; Spendley et al. 1962). On cherche à chaque étape de s'éloigner du plus mauvais résultat.
- Les méthodes indirectes consistent à postuler a priori un modèle pour explorer un domaine expérimental dont les limites ont été fixées au préalable à partir de la plage de variation des facteurs. 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. [24]

II.4.3 définition des facteurs et des niveaux

Après avoir précisé les objectifs d'une étude et les réponses les caractérisant, il est nécessaire de définir les facteurs, c'est-à-dire les variables sur lesquelles l'expérimentateur va agir de manière à créer une variation de la/les réponse(s), qui sera restituée au travers d'un modèle.

Un diagramme d'Ishikawa [Ishikawa, 96] ou un P-Diagramme permet de compiler l'ensemble des facteurs présents dans une étude et de les présenter dans un même graphique. Il peut également être utile de préciser pour chaque facteur les difficultés que représente le changement de son niveau. En effet, lors du choix de la matrice d'expériences cela permettra d'éviter d'avoir à modifier à chaque expérimentation, un facteur difficilement modifiable[22].

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 . 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 :

➤ **Un domaine isotrope**

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

➤ **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 [25].

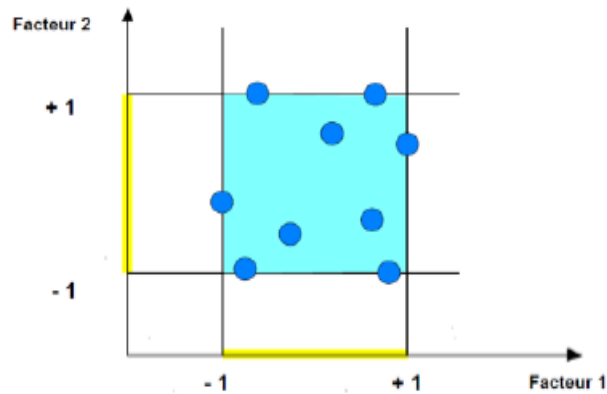


Figure II.2 Domaine expérimental[25].

II.4.5 Définition du modèle empirique

Cette étape revient à choisir une forme de modèle adaptée aux objectifs de l'étude et à estimer le nombre d'inconnues p associées au modèle :

- Adopter un modèle additif sans couplage pour estimer et comparer les effets moyens des facteurs[22] :

$$Y = C^{te} + \sum_{i=1}^k W_i \text{ et } p = 1 + \sum_{i=1}^k (m_i - 1) \quad (\text{II.1})$$

- Adopter un modèle additif avec interactions pour préciser les effets moyens des facteurs par des interactions (généralement limités au 1^{er} ordre) comme ce sera le cas dans notre application :

$$Y = C^{te} + \sum_{i=1}^k W_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k C_{ij} \quad (\text{II.2})$$

et

$$p = 1 + \sum_{i=1}^k (m_i - 1) + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k (m_i - 1)(m_j - 1)$$

Dans les relations II.1 et II.2 :

m_i désigne le nombre de modalités du facteur i ,

k désigne le nombre de facteurs considérés,

W_i désigne le poids du facteur i

C_{ij} désigne le poids de l'interaction entre les facteurs i et j .

II.4.6 Construction du plan d'expériences

La construction du plan d'expériences consiste donc à sélectionner les nombres 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[22].

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.

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

Une expérimentation est une évaluation ou une série d'évaluations permettant d'explorer, de définir et de construire des données (résultats d'essais) pour modéliser ou prévoir le comportement d'un système ou d'un procédé[26].

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 consiste à estimer, grâce à la méthode des moindres carrés, les p coefficients du modèle et les N résidus, à savoir les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prévues par le modèle pour chacun des N traitements du plan d'expériences. La méthode des moindres carrés garantit une estimation non-biaisée des coefficients du modèle [22].

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[27].

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.4.12 validation du modèle et des informations obtenues

Deux possibilités existent :

- Soit le modèle est validé, ce qui signifie qu'il représente suffisamment bien le phénomène étudié dans le domaine expérimental et dans ce cas, les objectifs sont atteints : nous pouvons utiliser ce modèle pour faire de la prévision en n'importe quel point du domaine expérimental.
- Soit le modèle n'est pas validé et alors son utilisation n'est pas possible. Il faut donc s'acheminer vers la proposition d'un modèle différent[5].

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

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble des moyens et des techniques expérimentales utilisés pour l'élaboration des expériences afin d'examiner, modéliser et optimiser les paramètres coupe, la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé en utilisant un logiciel statistique lors du tournage de l'acier (32CrMoV12-28) avec des plaquettes en carbure non revêtu type YT15.

Il s'agit de la présentation d'un banc d'essais comportant un tour, un rugosimètre de marque (Mitutoyo), pour déterminer la rugosité de la pièce usinée. Les spécifications des plans adoptés pour l'approche expérimentale avec les conditions de coupe sont également présentées.

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) sur l'état de surface Ra et le volume de copeau enlevé VC 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 Environnement expérimental

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

III.3.1 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.3.2 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).

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.3.3 Outil de coupe

III.3.3.1 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.

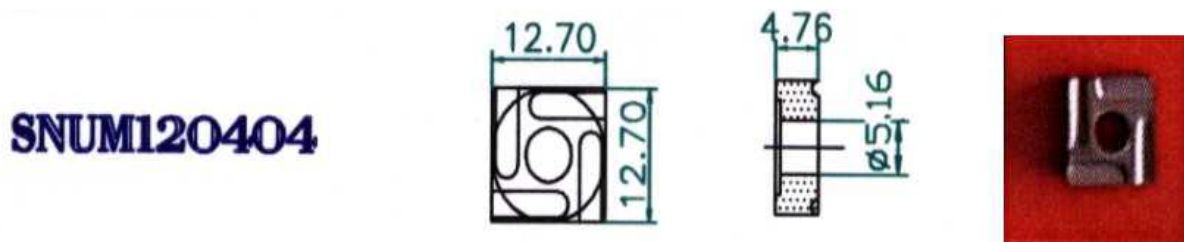


Figure III.2 Forme et dimension des plaquettes YT15.

III.3.3.2 La porte plaquette

Pour la réalisation des essais nous avons utilisé une porte plaquette à fixation mécanique de type PSBNR 25 25 12 section 25x25. La porte plaquette est présentée dans la figure III.3.

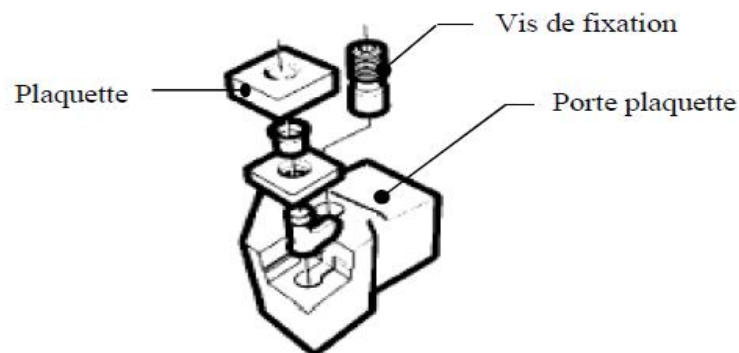


Figure III.3 Système de fixation de la plaquette.

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						
Type	la géométrie de la zone active					Type	Section
YT15	X_r	λ	α	γ	r	PSBNR 25* 25K12	25×25
	+75°	-6°	+6°	-6°	0,8mm		

Le Montage et la forme des éprouvettes pour les essais sont indiqué sur la figure III.4

**Figure III.4** Montages et formes des éprouvettes pour les essais.

III.4 Réponses du système (facteurs de sortie)

III.4.1 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 , à l'aide d'un rugosimètre de marque (Mitutoyo). L'appareil est employé après chaque essai en trois différentes positions.



Figure III.5 RugosimetreMitutoyo

III.4.2 Volume de copeau a enlevé VC en fonction des paramètres de coupe

Le volume de copeau enlevé permet d'estimer la productivité lors de l'usinage. Le débit d'enlèvement de copeaux (VC) désigne la quantité de copeaux enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante:

$$VC = V_c \times A = V_c \times f \times a_p \quad (III.1)$$

VC : Volume de copeau enlevé [mm^3/min]

A : Section de coupe [mm^2] avec ($A = a_p \times f$)

V_c : Vitesse de coupe [m/min]

III.5 Plan d'expérience factoriel utilisé

III.5.1 Les plans de Taguchi [28]

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.

Les plans de Taguchi viennent enrichir les 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.

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

D'où

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 18 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.5.2 Les avantages des plans de Taguchi [28]

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.5.3 Traitements des résultats

Un plan d'expérience factoriel à 09essais 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)	Avancef (mm/tr)	Profendeur de passe ap(mm)
1 (minimum)	120	0,08	0,5
2 (moyen)	170	0,11	0,75
3 (maximum)	240	0,16	1

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 19. 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.

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 et de volume de copeau a enlevé en fonction des paramètres de coupe). 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.

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.

Tableau III.4 : Matrice de planification pour un plan de 09 essais

N° d'essais	Valeurs codifiées		
	Vc(m/min) X1	f(mm/tr) X2	Ap(mm) X3
1	-1	-1	-1
2	-1	0	0
3	-1	1	1
4	0	-1	0
5	0	0	1
6	0	1	-1
7	1	-1	1
8	1	0	-1
9	1	1	0

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel expérimentale,. 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 à 09 essais a été choisi.

CHAPITRE VI RESULTATS DES EXPERIENCES TRAITEMENT ETANALYSE

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les modèles mathématiques des différents paramètres étudiés : critères de rugosité (Ra) et le volume de copeau enlevé (VC) est faite à l'aide du logiciels Minitab19, 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.

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 proche de 1.

VI.2 Modélisation de la rugosité (Ra) et le volume de copeau enlevé (VC)

Les résultats expérimentaux de la rugosité (Ra) et le volume de copeau enlevé (VC) 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 ($V_c=240$ tr/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p= 1$ mm).mais les valeurs maximales de volume de copeau enlevé (VC) ont été enregistrées pour les régimes de coupe ($V_c=240$ tr/min, $f=0.16$ mm/tr, $a_p= 0.75$ mm).

Tableau VI.1 Résultats expérimentaux de la rugosité et le volume de copeau enlevé (VC).

N° d'essais	Valeurs codifiées			Valeurs réelles			Résultats			
	X1	X2	X3	Vc (m/min)	f (mm)	ap (mm)	Ra (μ m)	Ra prédite (μ m)	VC (mm ³ /min)	VC prédite (mm ³ /min)
1	-1	-1	-1	120	0,08	0,5	2,342	2,36892	4800	2442,88
2	-1	0	0	120	0,11	0,75	2,696	2,62497	9900	10172,46
3	-1	1	1	120	0,16	1	3,176	3,05172	19200	20221,76
4	0	-1	0	170	0,08	0,75	2,323	2,25647	10200	10527,88
5	0	0	1	170	0,11	1	2,55	2,51252	18700	18257,46
6	0	1	-1	170	0,16	0,5	2,925	2,93927	13600	15556,76
7	1	-1	1	240	0,08	1	2,13	2,09904	19200	20146,88
8	1	0	-1	240	0,11	0,5	2,496	2,35509	13200	15126,46
9	1	1	0	240	0,16	0,75	2,77	2,78184	28800	25175,76

VI.3 Analyse de la variance ANOVA

VI.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 83.69%. l'effet de la vitesse de coupe est également significatif avec une contribution de 1.29%. L'effet de la profondeur de passe a une légère signification avec une contribution de 1.17%.

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

Analyse de la variance pour la rugosité Ra							
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	Cont %	Observation
Régression	3	0,825685	0,275228	50,34	0	96,79%	
Vc	1	0,110288	0,110288	20,17	0,006	1,29%	significatif
f	1	0,713956	0,713956	130,6	0	83,69	significatif
ap	1	0,001441	0,001441	0,26	0,629	1,17%	Non significatif
Erreur	5	0,027334	0,005467				
Total	8	0,853019					
				R² = 96,80% R² (adj) =94,87%			

VI.3.2 Analyse de la variance ANOVA pour le volume de coupe VC

Le tableau IV.3 expose les résultats de l'analyse de variance ANOVA pour le volume coupe. L'effet l'avance f , la vitesse de coupe Vc et la profondeur de passe est significatif avec des contributions de 33,21%, 32,29% et 27,30% respectivement.

Tableau 0 Analyse de la variance ANOVA pour VC.

Analyse de la variance de Volume de coupe enlevé							
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	Cont%	Observation
Régression	3	368399540	122799847	21,51	0,003	92,80%	
Vc	1	128186672	128186672	22,45	0,005	32,29%	significatif
f	1	131837868	131837868	23,09	0,005	33,21%	significatif
ap	1	108375000	108375000	18,98	0,007	27,30%	significatif
Erreur	5	28549349	5709870				
Total	8	396948889					
				R²= 92,81% R²(adj)=88,49%			

VI.4 Analyse de régression

VI.4.1 Analyse de régression de la rugosité Ra

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.1).

$$Ra = 1,956 - 0,002249 Vc + 8,535f + 0,062 ap \quad (IV.1)$$

Le coefficient de corrélation (R^2) présente la proportion de la variation de la réponse expliquée par le modèle est d'environ 96.80%, ce qui le rend en raisonnable accord avec (R^2) ajusté de 94.87%.

VI.4.2 Analyse de régression de volume de coupeau VC

L'analyse initiale des réponses obtenues à partir de RSM inclut les critères de volume coupeau en fonction des termes qui ont un effet significatif est donnée par l'équation(IV.2).

$$VC = 24540 + 76,7 Vc + 115986 f + 17000 ap \quad (IV.2)$$

Le coefficient de corrélation (R^2) est d'environ 92.81%, ce qui le rend en raisonnable accord avec (R^2) ajusté de 88.49%.

VI.5 Les graphes résiduels

VI.5.1 Les graphes résiduels de la rugosité Ra

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de la rugosité de surface (Ra) est : $R^2 = 96.80\%$. La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.

Pour valider ce modèle, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différence entre les valeurs expérimentales de la rugosité (Ra) et celles obtenues à partir du modèle de prédiction). 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, les résidus du modèle de la rugosité (Ra) peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant.

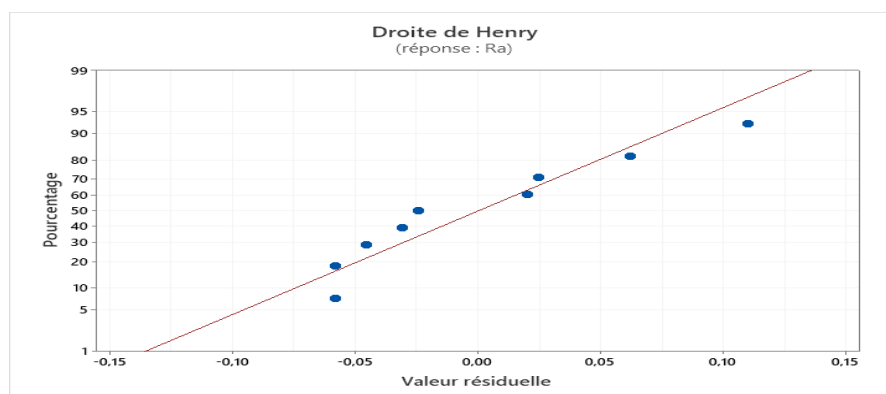


Figure IV.1 test de normalité de la distribution des résidus pour Ra.

VI.5.2 Les graphes résiduels de volume de coupeau VC

La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de volume de coupeau (VC) est : $R^2=92.81\%$. La valeur du coefficient de détermination est élevée suggérant une haute signification du modèle et un bon ajustement de ces derniers aux données expérimentales.

La figure IV.2, montre que les résidus du modèle de volume de coupeau enlevé (VC) peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant.

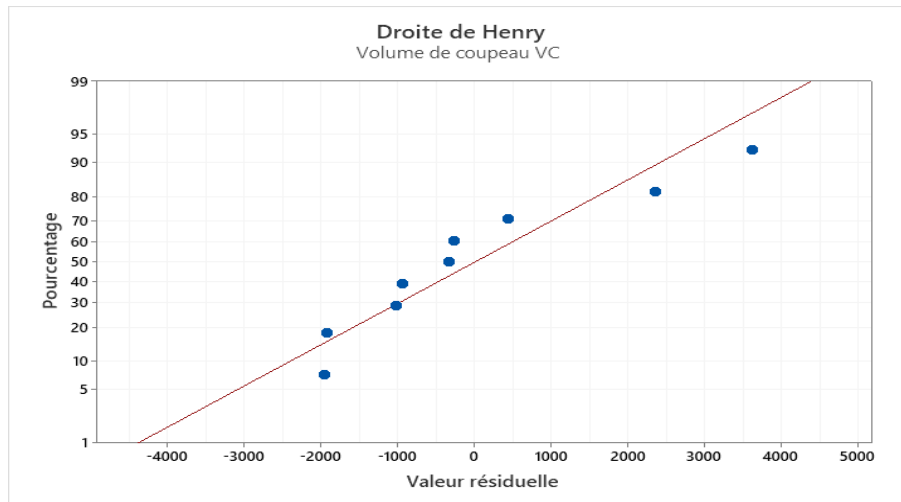


Figure IV.2 test de normalité de la distribution des résidus pour VC.

VI.6 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites

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

La comparaison entre les valeurs expérimentales de la rugosité de surface (Ra) et celles estimées par le modèle obtenu par la méthodologie de surface de réponse (RSM) est présentée sur la figure IV.3

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

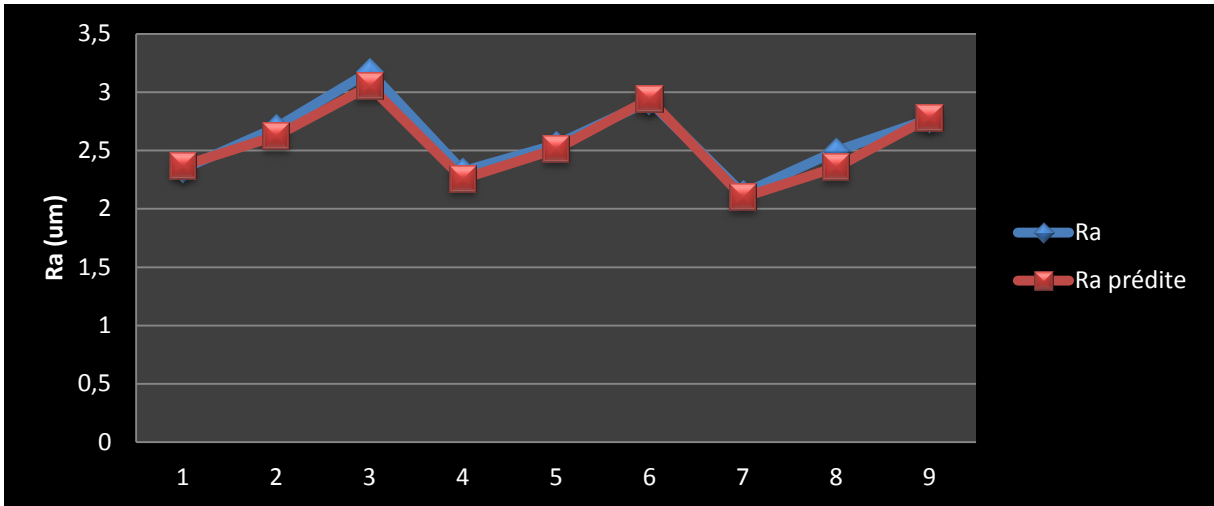


Figure IV.3 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour Ra.

VI.6.2 Comparaison entre le volume de coupeau mesurées et prédits

La comparaison entre les valeurs expérimentales de volume de coupeau (VC) et celles estimées par le modèle obtenu par la méthodologie de surface de réponse (RSM) est présentée sur la figure IV.4.

Il est clair que les deux courbes se confondent et les valeurs expérimentales et prédite sont très proches. Nous avons aussi observé qu'une bonne corrélation a été montrée entre les deux courbes.

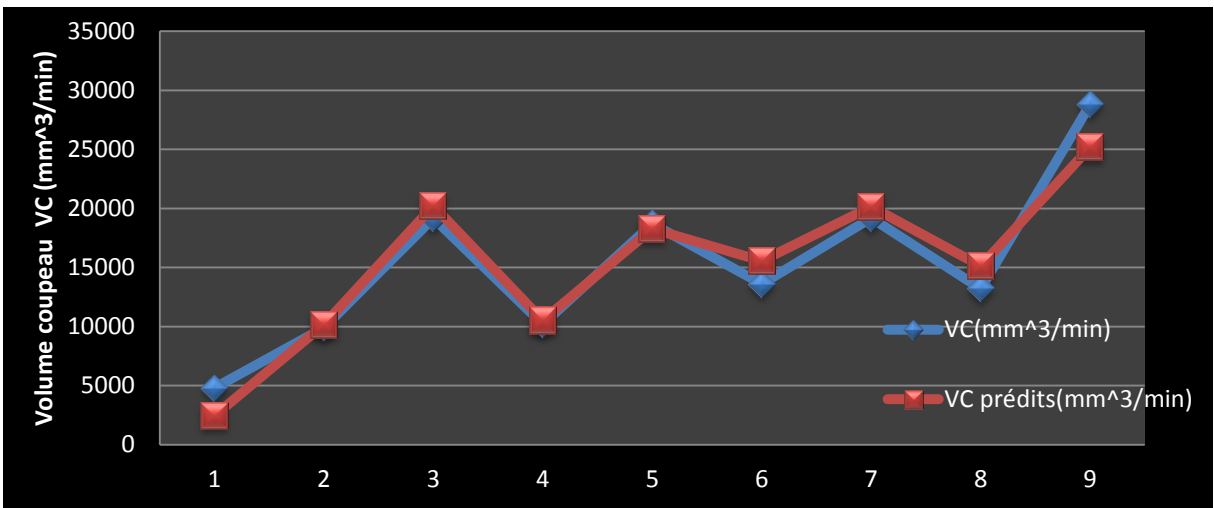


Figure IV.4 Comparaison entre les valeurs mesuré et prédite pour VC.

VI.7 Graphique des effets principaux pour les réponses

IV.7.1 Graphique des effets principaux pour Ra

La figure (IV.5) montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur la rugosité de surface (Ra).

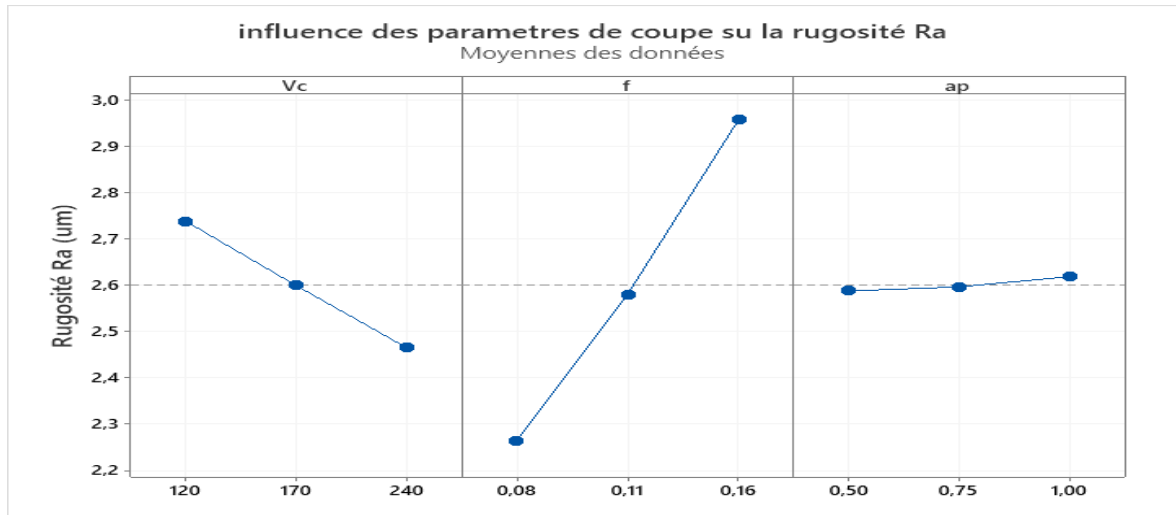


Figure IV.5 Graphique des effets principaux pour Ra.

Cette figure montre que l'avance a un effet significatif sur (Ra). En effet, on remarque que la pente du paramètre (f) est plus grande que la pente de la vitesse de coupe.

L'analyse des résultats de la (fig. IV.5) montre que l'augmentation de l'avance et la vitesse de coupe entraîne une augmentation de la rugosité de surface (Ra).

IV.7.2 Graphique des effets principaux pour VC

La figure (IV.6) montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur le volume de copeau à enlevé VC.

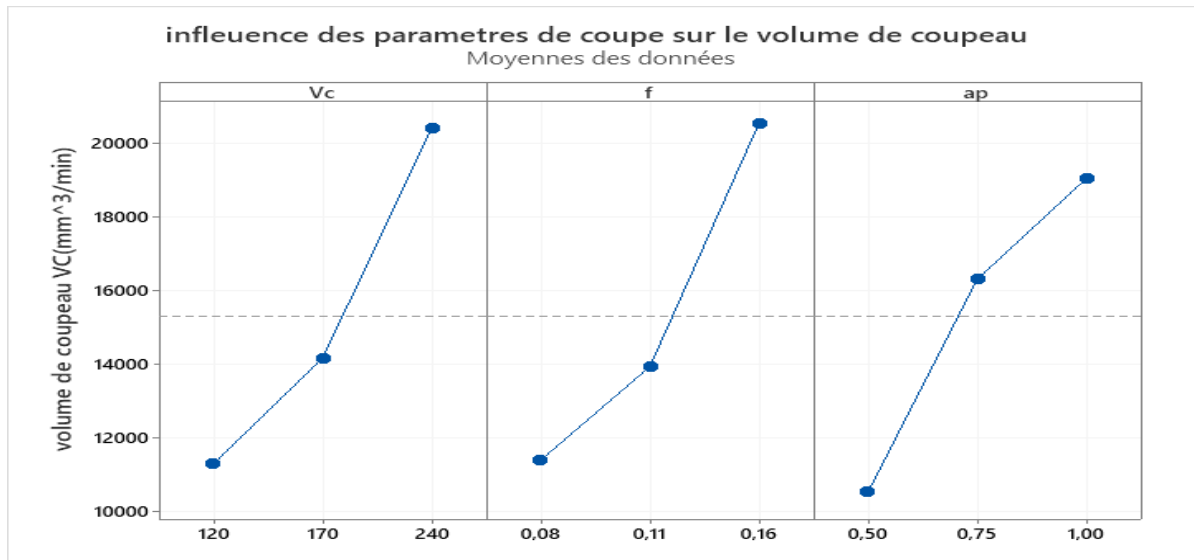


Figure IV.6 Graphique des effets principaux pour VC

La figure (IV.6) illustre les effets principaux des paramètres de coupe sur le volume de copeau enlevé (VC). On remarque que (VC) augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant aussi.

VI.8 Graphique de contour

IV.8.1 Graphique de surface pour de la rugosité Ra

Ces figures ont été élaborées en utilisant la méthode de surface de réponse RSM.

La figure (IV.7) 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.

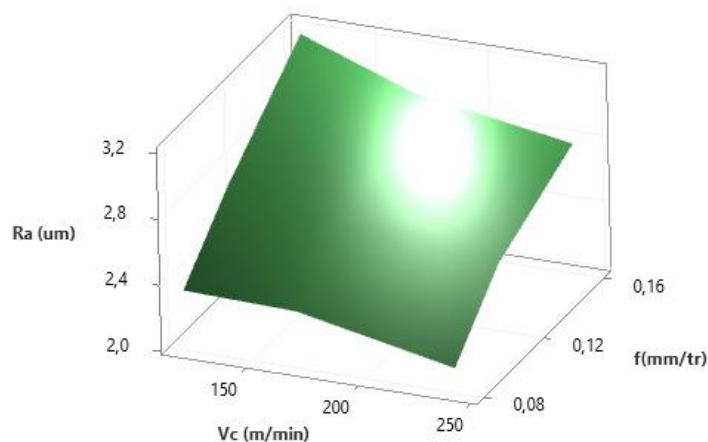


Figure IV.7 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité Ra

L'influence de la vitesse de coupe et profondeur de passe sur la rugosité de surface Ra est illustrée dans la figure(IV.8).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.

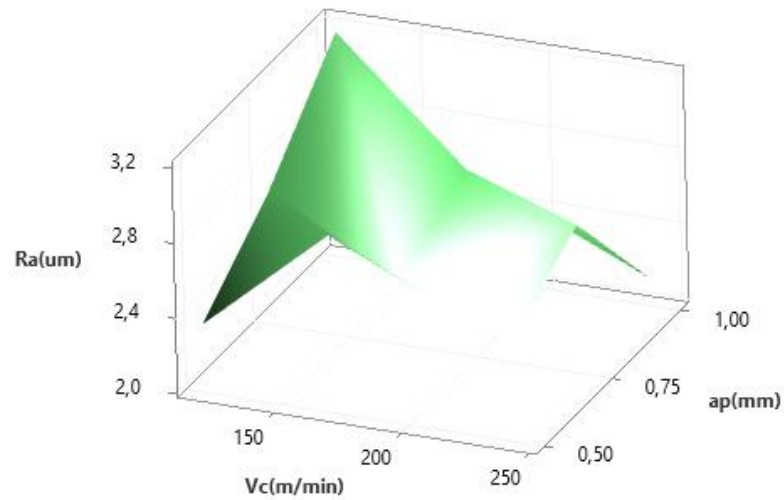


Figure IV.8 Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité Ra

La figure (IV.9) 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.

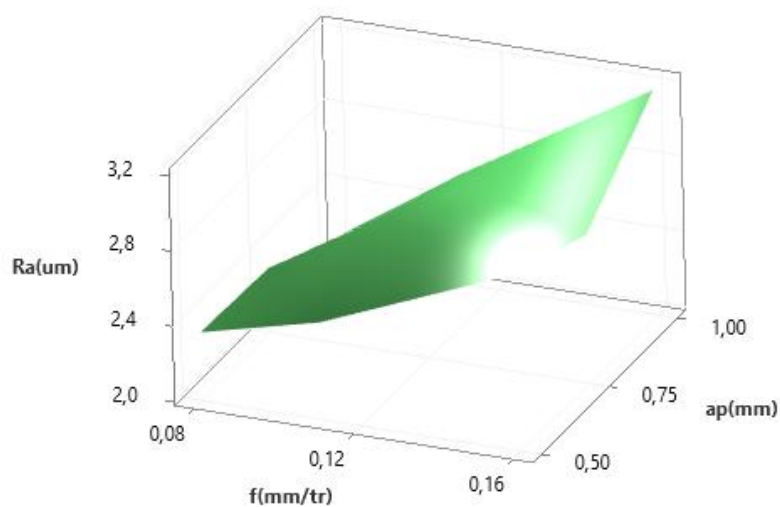


Figure IV.9 Effet de la profondeur de passe et l'avance sur la rugosité Ra

IV.8.2 Graphique de surface pour le volume de coupe (VC)

La figure (IV.10) montre l'effet de la vitesse de coupe avec l'avance par tour sur le volume de coupe (VC), on observe que cette dernière a un effet significatif sur l'état de surface usinée.

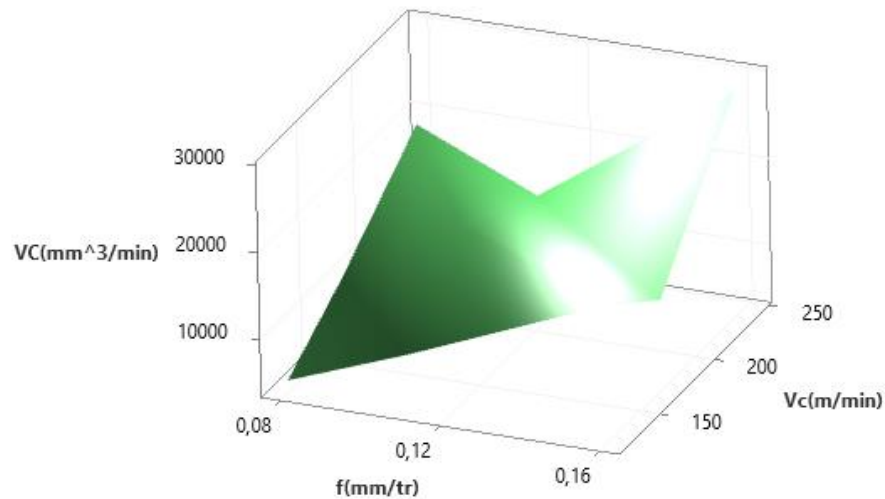


Figure IV.10 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur VC

La figure (IV.11) montre l'influence de la vitesse de coupe et profondeur de passe sur le volume de coupe. Cette courbe montre qu'avec une vitesse de coupe environ de 240 m/min, on obtient la plus grande valeur de (VC). Lorsqu'on augmente la profondeur de passe la valeur du volume de coupe augmente aussi.

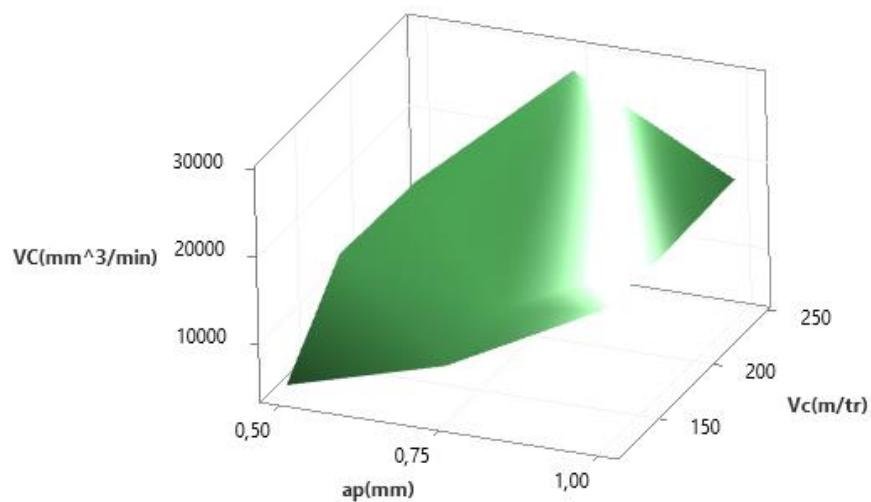


Figure IV.11 Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur VC

La figure (IV.12) montre l'effet de l'interaction de la profondeur de passe et l'avance par tour le volume de copeau, on remarque qu'avec l'augmentation de la profondeur de passe le volume de copeau augmente aussi

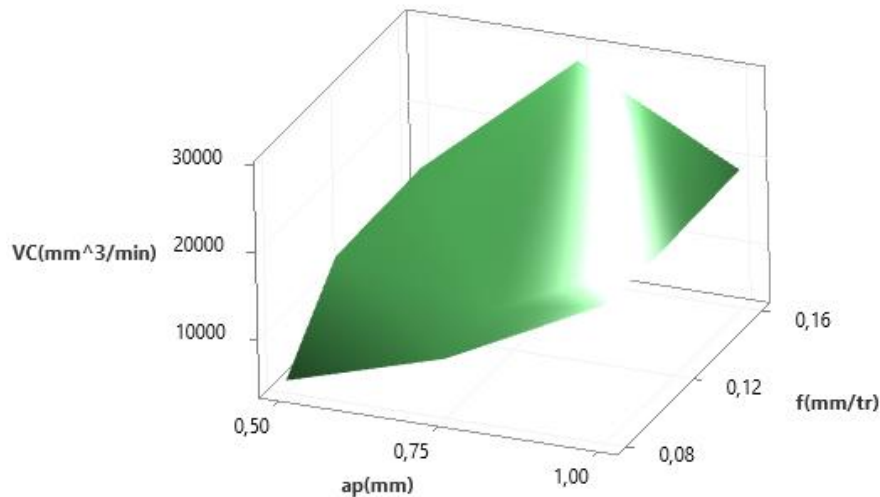


Figure IV.12 Effet de la profondeur de passe et l'avance sur VC.

IV.9 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) optimales en utilisant comme réponses la rugosité de surface Ra et le volume de copeau (VC).

La fonction de désirabilité est une fonction qui a un but de tirer les valeurs optimales des paramètres de coupe afin de minimiser la rugosité de surface usinée (Ra) et maximiser le volume de copeau. La désirabilité D déterminé par l'équation (IV.3) [29].

$$DF = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right]^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (IV.3)$$

$$F(x) = -DF$$

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

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- Bon état de surface (Ra mini)
- Volume de copeau enlevé maximal (VC max)

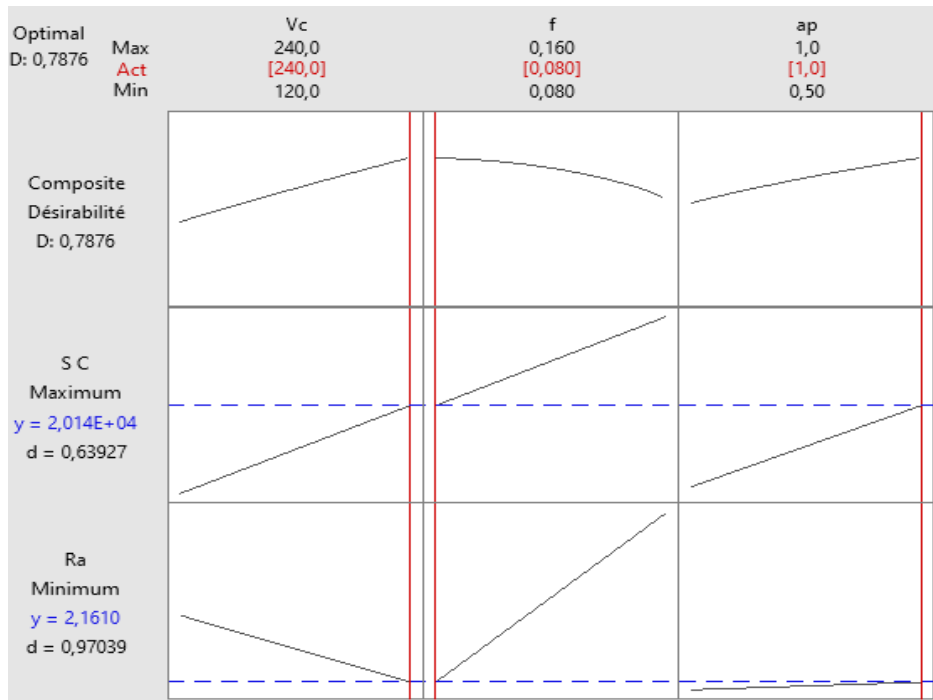


Figure IV.13 Optimisation de surface de réponse

Dans le tableau (IV.4) montre les résultats d'optimisation, le régime de coupe optimales pour la rugosité de surface (Ra) et le volume de copeau (VC) sont comme suit : $V_c = 240$ m/min, $f = 0.080$ mm/tr, $a_p = 1$ mm, la rugosité de surface Ra optimale est $2.16097 \mu\text{m}$. et le volume de copeau optimale est $20142.3 \text{ mm}^3/\text{min}$, avec une désirabilité composite de 0.79.

Tableau VI 4 Combinaison optimale

Condition de coupe optimale			Volume de copeau enlevé	Rugosité de surface	désirabilité composite
V_c (m/tr)	f (mm/tr)	a_p (mm)	VC (mm^3/min) valeur ajustée	Ra (μm) valeur ajustée	D
240	0,08	1	20142,3	2,16097	0,79

VI.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montrés l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et lors du tournage de l'acier 32CrMoV12-28 sur la rugosité de surface Ra et le volume de copeau VC, on utilisant la méthodologie de surface de réponse associé à l'analyse de variance ANOVA. les modèles mathématique permettent de nous donner simuler les valeurs de Ra et VC et optimiser les conditions de coupe

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 linéaire 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), sur le volume de copeau a enlevé et 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) a trouvé que l'avance et la vitesse de coupe ont un effet significatif sur l'évolution de la rugosité de surface Ra.
- ❖ 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 Ra.
- ❖ L'analyse de la variance (ANOVA) a trouvé que les trois paramètres de coupe ont un effet significatif sur le volume de copeau a enlevé VC.
- ❖ Les modèles mathématiques développés par la régression linéaire sont efficaces, ils permettent de faire une prédiction et une optimisation de la rugosité de surface Ra et le volume de copeau VC.
- ❖ Le coefficient de corrélation R^2 et le coefficient de corrélation R^2 ajusté des modèles Ra et VC montre que les deux modèles sont valables à une grande signification.
- ❖ 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 d'optimiser les conditions de coupe, pour minimiser la rugosité de surface et maximiser le volume de copeau a enlevé.

Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives :

- ❖ 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.

CONCLUSION GENERALE

- ❖ 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

- [1] **M. CHERIF**, « Influence de l'avance sur la rugosité de Surface », mémoire de l'université d'annaba, (2015).
- [2] **A. MONDELIN**, « modélisation de l'intégrité des surfaces usinées application au cas du tournage finition de l'acier inoxydable **15-5PH** », thèse de l'université de lyon, (2012).
- [3] **CH. Celia**, « Application informatique pour le calcul du temps et coût d'usinage des pièces en fraisage et en tournage », mémoire de l'université Abderrahmane mira bejaia, (2017).
- [4] **M. DEYAEDDINE, N. ABDERRAHMANE**, « Optimisation des Paramètres de Coupe pour Minimiser la Consommation d'Energie Pendant le Tournage », mémoire de l'université Kasdi merbah ouargla, (2015).
- [5] **H. CHIBANE**, « Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire. Application aux matériaux métalliques et composites », thèse de l'université francois rabelais de tours, (2013).
- [6] **R. FETHI**, « L'effet d'usinage par tournage sur un acier XC18 », Thèse de Doctorat de l'Université Mohamed Khider – Biskra, (2016).
- [7] **M. HABAK**, « étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6 », l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, (2006).
- [8] **M. NORA, M. ABDERRAHIM**, « Influence des angles de coupe sur l'usinage des alliages d'aluminium », Thèse de Doctorat de l'Université Abderrahmane mira bejaia, (2017).
- [9] **B. RAMEZ, M. LAMINE**, « L'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface lors de l'usinage de l'acier XC48 », mémoire de l'université badji mokhtar annaba, (2018).
- [10] **B. Mohammed El Larbi**, « Polycopié de Coupe des Métaux *en Fabrication Mécanique et Productique* », pp15, (2018).
- [11] **R. MOHAMMAD**, « 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, (2011).
- [12] **B. SALIM**, « étude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie. Etude expérimentale de la formation du copeau », Thèse de Doctorat de l'Université badji mokhtar annaba, (2009).
- [13] **C. LECALVEZ**, « Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone », (1995).

- [14] **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).
- [15] **G.POULACHON**, «Usinabilité des matériaux difficiles. Application aux aciers durcis », Techniques de l'ingénieur, BM 7048, pp. 1 - 18 (2004).
- [16] **E. M. TRENT**, «Métal cutting », 3ème édition, Butterworth-Heinemann, (1991).
- [17] **D. ABDELLATIF BENGLIA, M. BAKAR**, «Optimisation Multi-Passe des Régimes de Coupe En Chariotage», mémoire de l'université Kasdi merbah ouargla, (2011).
- [18] **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 superfinition », thèse de doctorat de l'institut National Polytechnique de Lorraine, pp 28, (2008).
- [19] **C.BARLIER, L. GIRARDIN**, «Matériaux et usinage», Memotech Productique, pp 115-127, (1999).
- [20] **B.RAPHET**, « États de surface – Caractérisation », Techniques de l'Ingénieur -Sciences & Techniques, Vol. R 1230, pp. 22, (2005).
- [21] **T. SOFIANE**, «Etude de l'influence du comportement vibratoire du système pièce-outil-machine sur la qualité de surface», thèse de doctorat de l'université badji mokhtar annaba,(2018).
- [22] **F. RABIER**, « Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en tractionferroviaire », thèse de doctorat l'Institut National Polytechnique de Toulouse, pp 73-79, (2007).
- [23] **J .GOUPY**, « Plan d'expériences pour surface de réponse », (1999).
- [24] **L. ABDELMADJID, T. LAKHDAR**, « Prédiction de la température de coupe de l'acier AISI D3. Application au tournage en utilisant la méthode de surface de réponse (RSM) », mémoire de l'université Kasdi merbah ouargla, (2017).
- [25] **J.J.DROESBEKE, J. FINE, G. SAPORTA**, «Plans d'expériences, Applicationà l'entreprise», Technip, Ed Paris, (1997).
- [26] **D. LEPADATU**, « optimisation des procedes de mise en forme par approche couplee plans d'expériences, elements finis et surface de reponse», thèse de doctorat de l'université d'angers, (2006).
- [27] **S. KARAM**, « Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt», thèse de doctorat de l'université de limoges, (2004).

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

[28] **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, (2003).

[29] **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).