

Université 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Études
Pour l'obtention du diplôme de Master
Option : Construction Mécanique
Présenté par : GUEBAILIA Lazhar

=====

***Etude du comportement à l'usure d'un
carbure revêtu lors de l'usinage d'un
acier Inoxydable austénitique***

=====

Sous la Direction de :

- Dr. BELHADI Salim
- Dr. KADDECHE Mounia

Année universitaire : 2022/2023

Dédicace

Je voudrais dédier ce travail

**A mes chers Papa et Maman pour leur soutien,
leurs encouragements et leur sympathie**

**À ma chère épouse, qui s'est sacrifiée pour m'aider
et me soutenir dans la vie conjugale et scolaire;**

A mes chers enfants :

Badreddin, Issam, Sara et Sirin

Pour toute la famille

A mes amis et à tous ceux qui ont contribué à ce travail.

Remerciements

Au terme de ce travail de mémoire, il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer nos remerciements à « Dieu », le Tout-Puissant, qui m'a donné la santé et le courage pour me permettre de développer cet humble travail.

Je remercie énormément mes encadreurs, Dr BELHADI Salim et Dr. KADDECHE Mounia, à qui je tiens à exprimer m'a profonde gratitude pour toute la confiance qu'ils m'ont accordé, les encouragements, les conseils et l'aide qu'ils n'ont cessé de me procurer tout au long de cette période.

J'adresse également mes sincères remerciements à Mr Beggas Mofdi, Directeur de l'Industrie de la wilaya de Guelma, pour tout le soutien et les encouragements qu'il m'a apportés dans la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à tout le personnel technique et administratif du département de Génie Mécanique de l'université de Guelma.

Je remercie tous ceux qui ont aidé pour la réalisation de ce travail.

RESUME

Le choix des paramètres de coupe est très important dans la mise en forme par enlèvement de matière, le présent travail concerne une étude comparative de deux méthodes de lubrification, à savoir l'usinage à sec et l'utilisation MQL, lors de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 316L avec un outil en carbure revêtu selon le plan Taguchi L9, ce travail vise à déterminer les paramètres optimaux pour le chariotage. Ce travail est divisé en deux parties:

La première partie concerne la modélisation des réponses en sortie, à savoir : la rugosité de surface R_q et R_z , l'effort tangentiel F_z , l'usure de l'outil VB et le taux d'enlèvement de matière MRR , une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour évaluer l'effet des paramètres de coupe, à savoir : l'effet de la vitesse de coupe V_c , de l'avance f , de la profondeur de coupe a_p et le temps d'usinage t_c , sur les paramètres étudiés.

La deuxième partie du travail est réservée à l'optimisation mono-objective et multi-objective, afin de trouver des valeurs optimales pour les paramètres de coupe, l'approche de Taguchi, basée sur l'analyse signal sur bruit S/N , a été utilisée pour suggérer des régimes de coupe optimaux pour chaque paramètre de sortie séparément. Une optimisation multi-objectifs a également été effectuée. L'exploitation de la méthode d'optimisation TOPSIS a permis de réaliser une optimisation simultanée de paramètres contradictoires.

INDEX DES FIGURES

Chapitre I: Étude Bibliographique		
Figure	Titre de la figure	page
Figure I.1	Matériaux de coupe	5
Figure I.2	Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour La fabrication des outils de coupe	6
Figure I.3	Classification des matériaux de coupe	6
Figure I.4	Structures de diverses nuances de carbure	7
Figure I.5	Outils des usinages	7
Figure I.6	Plaquettes brasées ou fixées sur un corps d'outil en acier	8
Figure I.7	Micrographie d'une nuance de cermet	8
Figure I.8	Différents type de céramiques	9
Figure I.9	Microstructure du nitrure de bore cubique (CBN)	9
Figure I.10	Plaquette en tête de diamant	10
Figure I.11	Disposition les matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté	10
Figure I.12	Composantes de l'effort de coupe	12
Figure I.13	Influence de la vitesse sur l'effort de coupe lors de l'usinage des matériaux ductiles	14
Figure I.14	Influence du matériau de coupe	15
Figure I.15	Montage du dynamomètre et chaîne de mesure de l'effort de coupe	16
Figure I.16	Profile de surface 2D	17
Figure I.17	Caractéristiques du profil	18
Figure I.18	Principaux critères de rugosité	19
Figure I.19	Origine de la chaleur en Usinage	19
Figure I.20	Répartition de la chaleur dans la zone de l'usinage	20
Figure I.21	Température en divers points de l'outil, la pièce et le copeau	20
Figure I.22	Représentation la formation de la migration de l'arête rapportée	22
Figure I.23	Critères d'usure selon ISO 3685:1993. a) largeur de cratère sur la face de coupe KB ; b) vue générale de la mesure KB au microscope ; c) face de coupe avec mesure d'usure KE ; d) usure majeure VB et usure des entailles.	23
Figure I.24	Usure VB Our différents modes de lubrification testés.	24
Figure I.25	Variation de KB lors du tournage de l'acier 316L. a) usinage à sec ; b) Méthode MQL ; c) MCQL +méthode EP/AW ; d) La progression de l'assemblage pour des périodes de temps sélectionnées.	24
Figure I.26	Usure en fonction du mode de lubrification.	25
Figure I.27	Banc d'essai	25
Figure I.28	Comportement de l'usure pour a) usinage à sec et b) l'usinage MQL (Minimum Quantité Lubrification).	27
Figure I.29	Usure de l'outil de coupe pour $V = 200$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr	27

Figure I.30	Réponse de surface 3D pour (a) Ra et (b) Fz pour le cermet (GC 1525) et le carbure revêtu (GC 1125)	28
Figure I.31	Diagrammes de front de Pareto pour les plaquettes de coupe en cermet (à gauche) et (à droite) en carbure revêtu	30
Figure I.32	Évolution de VB avec par rapport au temps d'usinage pour cermet (GC 1525) et revêtu plaquettes de coupe en carbure (GC1125) à $V_c = 340$ m/min, $f = 0,8$ mm/tr, et $a_p = 0,2$ mm	31
Figure I.33	Graphiques 3D de Vb	32
Figure I.34	Topographie 3D lors du tournage avec a) $f = 0.12$ mm/tr ; b) $f = 15$ mm/tr ; c) $f = 0.24$ mm/tr et $V_c = 300$ m/min et $a_p = 0.30$ mm.	33
Figure I.35	Topographiques lors du tournage pour a) $V_c = 200$ m/min ; b) $V_c = 300$ m/min ; c) $V_c = 425$ mm/min et $f = 0.18$ mm/tr et $a_p = 0.30$ mm.	33
Chapitre II: Méthodes et essais		
Figure	Titre de la figure	page
Figure II.1	Tour à charioter et à fileter modèle SN40	35
Figure II.2	Variateur de vitesse	36
Figure II.3	Capteur de vitesse	36
Figure II.4	Eprouvette utilisée	37
Figure II.5	la plaquette de coupe utilisée	38
Figure II.6	Porte plaquette avec plaquette montée	38
Figure II.7	Rugosimètre 2D (Sur ftest SJ-210)	39
Figure II.8	Dynamomètre (KISTLER9257 B)	39
Figure II.9	PC piloté par le logiciel (DYNOWARE)	40
Figure II.10	Microscope pour la mesure de l'usure Vb (Visuel Gage 250)	41
Figure II.11	Pyromètre à infrarouge	41
Figure II.12	Système MQL	42
Chapitre III : Etude de l'usinage et modélisation lors des paramètres technologiques		
Figure	Titre de la figure	page
Figure III.1	Evolution des critères de la rugosité de surface (R_q et R_z) avec le mode de lubrification vitesse de coupe ($V_c = 250$ m/min).	46
Figure III.2	Evolution des critères de la rugosité de surface (R_q et R_z) avec le mode de lubrification vitesse de coupe ($V_c = 300$ m/min).	47
Figure III.3	Evolution des critères de la rugosité de surface (R_q et R_z) avec le mode de lubrification vitesse de coupe ($V_c = 350$ m/min).	47
Figure III.4	Evolution de l'effort tangentiel (F_z) en fonction en fonction du mode de lubrification pour différentes valeurs de (V_c).	48
Figure III.5	Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction en fonction du mode de lubrification pour différentes valeurs de (V_c).	49
Figure III.6	Diagramme des effets principaux pour Ra	51

Figure III.7	Valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour (Ra)	52
Figure III.8	Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (Vc, f et ap)	53
Figure III.9	Contour de rugosité Ra en fonction de (Vc, f ,ap)	53
Figure III.10	Diagramme des effets principaux pour Fz.	54
Figure III.11	Valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour Fz.	55
Figure III.12	Diagrammes de surface 3D de Fz en fonction de (Vc, f et ap)	55
Figure III.13	Contour de l'effort Fz en fonction de (Vc, f, ap)	56
Figure III.14	Visualisation de l'usure en dépouille des arêtes de coupe en fin de l'usinage.	57
Figure III.15	Diagramme des effets principaux pour VB	57
Figure III.16	les valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour VB	58
Figure III.17	Diagrammes de surface 3D de VB en fonction de (Vc, f et ap)	59
Figure III.18	Contour de VB en fonction de (Vc, f, ap)	59
Figure III.19	Les valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour MRR	60
Figure III.20	Diagrammes de surface 3D de MRR en fonction de (Vc, f et ap)	60
Figure III.21	Contour de MRR en fonction de (Vc, f, ap)	61
Chapitre IV: Optimisation des conditions de coupe		
Figure	Titre de la figure	page
Figure IV.1	Diagramme des effets principaux pour les rapports S/N du Ra	63
Figure IV.2	Diagramme des effets principaux pour les rapports S/N du Fz	64
Figure IV.3	Diagramme des effets principaux pour les rapports S/N du VB	65
Figure IV.4	Droites des effets principaux du coefficient « C_i »	70
Figure IV.5	Droites des effets principaux du coefficient « C_{iw} »	72

INDEX DES TABLEAUX

Chapitre I: Étude Bibliographique		
Tableau	Titre de Tableau	page
Tableau I.1	Paramètres de coupe	23
Tableau I.2	Modèles de la progression de l'usure de l'outil. en SEC et MQL .	26
Tableau I.3	Paramètres de coupe optimaux pour l'optimisation mono-objectif de Ra et Fz par SA	29
Tableau I.4	Paramètres de coupe optimaux pour l'optimisation mono-objectif de Ra et Fz par GA	30
Tableau I.5	Paramètres de coupe optimaux pour l'optimisation multi-objectif de Ra et Fz par GA	31
Chapitre II: Méthodes et essais		
Tableau	Titre de Tableau	page
Tableau II.1	Composition chimique d'éprouvette utilisée	37
Tableau II.2	Plan Taguchi L9.	44
Chapitre III: Etude de l'usinage et modélisation lors des paramètres technologiques		
Tableau	Titre de Tableau	page
Tableau III.1	Evolution des paramètres en fonction des conditions d'usinage.	46
Tableau III.2	Résultats expérimentaux	50
Tableau III.3	Analyse de la variance pour Ra	51
Tableau III.4	Analyse de la variance pour Fz	54
Tableau III.5	Analyse de la variance pour VB	58
Chapitre IV: Optimisation des conditions de coupe		
Tableau	Titre de Tableau	page
Tableau IV.1	Réponse des rapports S/N pour Ra	63
Tableau IV.2	Réponse des rapports S/N pour Fz	64
Tableau IV.3	Réponse des rapports S/N pour VB	65
Tableau IV.4	Résultats de l'optimisation mono-objectif.	65
Tableau IV.5	Résultats expérimentaux	66
Tableau IV.6	Matrice des valeurs normalisées.	67
Tableau IV.7	Valeurs normalisées pondérées.	67
Tableau IV.8	Solutions idéales positives et solutions idéales négatives.	68
Tableau IV.9	Mesure de séparation pour chaque alternative	69
Tableau IV.10	Valeurs optimales prédites des réponses.	70
Tableau IV.11	Valeurs normalisées pondérées.	71
Tableau IV.12	Solutions idéales positives et solutions idéales négatives.	71
Tableau IV.13	La proximité relative de la solution idéale	72
Tableau IV.14	Valeurs optimales prédites des réponses pour les nouveaux poids w_i	73

Nomenclature

f : Avance par tour, tr/mm.

Vc : Vitesse de coupe, m/min.

ap : Profondeur de passe, (mm).

Ra : Ecart arithmétique moyen, μm .

Rq : Rugosité moyenne quadratique du profil [μm]

Rz : Profondeur moyenne de la rugosité [μm]

Fz : Effort de coupe tangentiel [N]

VB : Usure en dépouille (mm).

MRR : Material Removal Rate (cm^3/min)

MRR : Débit du coupeau enlevé (cm^3/min)

tc : Temps d'usinage [min]

ANOVA : Analyse de la variance.

S/N : Rapport signal sur bruit [dB]

TOPSIS : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

TOPSIS : Technique de préférence de commande par similarité avec la solution idéale

Cont % : Pourcentage de contribution (%)

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I. Recherche bibliographique et état de l’art	
I.1. Introduction	3
I.2. Quelques définitions	3
I.2.1. La surface usinée	3
I.2.2. Copeau	4
I.2.3. Matériaux de coupe	5
I.2.4. Classification des matériaux des outils de coupe	6
I.3. Paramètres de coupe	10
I.4. Les efforts de coupe	11
I.5. Mesure des efforts	16
I.6. Rugosité des surfaces usinées	17
I.6.1. Différentes représentations de la surface	17
I.6.2. Principaux critères d’états de surface	18
I.7. Usinabilité	19
I.8. Température de coupe	19
I.8.1 Origine de la chaleur	19
I.8.2 Répartition de la température dans l’outil	20
I.9. Phénomène de l’arête rapportée	21
I.9.1. Mécanisme de formation de l’arête rapportée	21
I.9.2. Règles pour limiter les risques d’arête rapportée	22
I.10. Etat de l’art	22
I.10.1. Etude de l’usure des outils de coupe lors du tournage de l’Inox 316L dans les conditions de lubrification minimale (MQL)	22
I.10.2. Optimisation du régime de coupe lors du tournage de l’acier AISI316L à usage biomédical	25
I.10.3. Une étude comparative des performances des plaquettes de coupe en cermet et en carbure revêtu lors du tournage de l’acier inoxydable austénitique AISI 316L	28
I.10.4. Modélisation et optimisation multi-objective des paramètres de coupe lors du tournage de l’AISI 316L par RSM et de l’approche de la fonction de désirabilité DF	32

CHAPITRE II: Equipements et procédure expérimentale

II.1. Introduction	35
II.2. Matériels utilisés	35
II.2.1. Machine-outil	35
II.2.2. Matériau utilisé	36
II.2.3. Outils de coupe utilisés	37
II.2.4. Porte-plaquette	38
II.2.5. Matériels de mesure	38
II.2.5.1. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	38
II.2.5.2. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	39
II.2.5.3. Microscope pour la mesure de l'usure Les cermets	40
II.2.5.4. Mesure de la température de coupe	41
II.2.6. Système avec un minimum de quantité de lubrification (MQL)	42
II.2.7. Autres équipements utilisés	42
II.3. Planification des expériences	42
II.3.1. Méthodologie de recherche	43
II.3.2. Méthode multifactorielle	43
II.3.3 Débit d'enlèvement de copeau (MRR)	44
II.4. Conclusion	44

CHAPITRE III: Etude de l'usinage et modélisation lors des paramètres technologiques

III.1. Introduction	45
III.2. Etude de l'usinabilité de l'acier inoxydable AISI 316L	45
III.2.1. Effet des conditions de coupe sur les critères de la rugosité de surface (Rq et Rz)	46
III.2.2. Effet des conditions de coupe sur l'effort tangentiel Fz (N)	48
III.2.3. Effet des conditions de coupe sur l'usure de l'outil VB (mm)	49
III.3. Modélisation de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 316L	50
III.3.1. Résultats de L'ANOVA et modélisation de Ra	51
III.3.1.1. Effet des paramètres de procédé sur Ra	51
III.3.1.2. Equation de Régression de Ra	52
III.3.2. Résultats de l'ANOVA et modélisation de Fz	53
III.3.2.1. Effet des paramètres de procédé sur Fz	53
III.3.2.2. Équation de régression en unités non codées	55
III.3.3. Résultats de l'anova et modélisation de VB	56
III.3.3.1. Effet des paramètres de processus sur VB	56
III.3.3.2. Équation de régression dans les unités non codées	58
III.3.4. Analyse du débit de copeaux MRR	60
III.4. Conclusion	61

CHAPITRE IV : Optimisation des conditions de coupe

IV.1. Introduction 62

IV.2. Optimisation mono-objective de Taguchi 62

IV.2.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface 63

IV.2.2. Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe tangentiel 64

IV.2.3. Analyse des effets principaux sur l'usure en dépouille VB 64

IV.2. Optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe basée sur TOPSIS 66

IV.3. Conclusion 73

Conclusion générale

Référence

INTRODUCTION GENERALE

L'acier inoxydable joue un rôle majeur dans de nombreux domaines : industrie mécanique, agro-alimentaire, chimie, transport, médecine, chirurgie, etc. Il s'agit d'alliages de fer et de carbone (aciers), majoritairement additionnés de chrome, qui donnent la résistance recherchée à l'oxydation supérieure à 12 à 13 % dans la solution de moulage. En pratique, il existe déjà une résistance à la rouille supérieure à 10% de chrome dans la solution. Cela est dû au phénomène de « couche négative » enrichie en oxydes de chrome qui se forme à sa surface et qui se régénère naturellement. Des éléments d'alliage complémentaires, notamment le nickel et le molybdène, renforcent ce mécanisme d'autoprotection.

En effet, les aciers inoxydables austénitiques présentent une bonne résistance à la corrosion, ainsi que de bonnes propriétés mécaniques. Ils ont une résistance élevée, une capacité d'écrouissage et une ductilité. De plus, ils constituent ainsi des matériaux de structure particulièrement intéressante.

L'utilisation d'un liquide de refroidissement conventionnel est une stratégie de refroidissement courante dans l'industrie manufacturière pour dissiper la chaleur élevée de l'outil de coupe. Industrie manufacturière pour dissiper la chaleur élevée générée pendant le processus de traitement. Cependant, l'utilisation excessive de fluides de coupe conventionnels est nocive pour l'environnement et la santé, tout comme les fluides synthétiques, semi-synthétiques, à base de pétrole ou à base d'huile minérale. En plus, leur coût atteint jusqu'à 17,9% des coûts de fabrication totaux.

La réduction de l'utilisation de fluides de coupe présente également des avantages économiques en réduisant les coûts de lubrifiant et la durée du cycle de nettoyage des pièces/outils/machines. Le concept de quantité minimale de lubrification (MQL) a été proposé il y a une dizaine d'années pour résoudre les problèmes d'intrusion environnementale et de risques professionnels associés à la coupe des particules de fluide en suspension dans les ateliers d'usine.

D'autre part, dans tous les processus de fabrication, l'usure de l'outil est un phénomène qui entraîne la détérioration et la défaillance de l'outil. Les demandes croissantes de débit élevé dans le processus d'usinage nécessitent l'utilisation de vitesses d'avance et de coupe plus élevées, ce qui entraîne des températures de coupe plus élevées. L'impact de ce dernier réduit non seulement la durée de vie de l'outil, mais endommage également la surface de la pièce.

Bien que le processus soit effectué avec une faible profondeur de coupe et une faible avance, il peut réduire le temps de traitement jusqu'à 60 % dans les processus de tournage difficiles. D'où l'importance de notre travail, qui repose sur l'étude de l'effet des paramètres de coupe (V_c) vitesse de coupe, (f) vitesse d'avance et (a_p) profondeur de passe) sur certains paramètres technologiques

tels que la rugosité et l'effort de coupe, en plus de certains paramètres calculés sur la base de résultats expérimentaux.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre : présente une étude bibliographique qui concerne le processus d'usinage, les définitions des paramètres technologiques et un état de l'art sur les différents travaux de recherche en relation avec notre travail.

Le deuxième chapitre : est dédié à la présentation des équipements nécessaires à la réalisation des essais, la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe.

Le troisième chapitre : Dans une première partie nous avons présenté une étude paramétrique de l'influence du mode de lubrification sur l'effort de coupe, la rugosité et l'usure de l'outil, pour différentes vitesses de coupe. La seconde partie concerne une étude statistique et analyse ANOVA des résultats expérimentaux d'un plan L9 à l'aide du logiciel Design-Expert. L'objectif est de déterminer l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface R_q et R_z , l'effort tangentiel F_z , l'usure de l'outil VB et le débit de copeaux MRR , puis de dériver des modèles mathématiques qui permettent de prédire ces paramètres et peuvent être utilisés pour étudier d'éventuelles optimisation.

Le quatrième chapitre : Dans ce chapitre, nous exposons les résultats d'une étude d'optimisation mono et multi-objective. Pour l'optimisation mono-objective des paramètres technologiques, nous avons utilisé l'approche de Taguchi, basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (S/N). Par contre l'optimisation multi-objective a été réalisée par la méthode TOPSIS pour deux cas de pondération. En fin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus, pour clôturer cette étude

Chapitre I

Recherche bibliographique et état de l'art

I.1. Introduction

L'usinage est une famille de procédés de fabrication des pièces mécaniques par enlèvement de copeaux. 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 [1]. 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) [2].

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 [1-2].

I.2. Quelques définitions

I.2.1. La surface usinée

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

On distingue seize fonctions principales que peut remplir la surface d'une pièce. Elles font partie de la cotation d'état de surface [4];

➤ *Surface de contact avec une autre pièce*

- Frottement de glissement lubrifié(FG),
- Frottement à sec (FS),
- Frottement de roulement (FR),
- Frottement fluide(FF),
- Résistance au matage (RM),
- Étanchéité dynamique avec et sans joint (ED),
- Étanchéité statique avec et sans joint (ES),
- Ajustement fixe avec contrainte (AC),
- Adhérence, collage (AD).

➤ **Surface libre, indépendante**

Face de coupe d'un outil (OC),
Résistance aux efforts alternes (EA),
Résistance à la corrosion (RC),
Destinée à recevoir un revêtement, peinture ou autre (RE),
Destinée à recevoir un dépôt électrolytique (DE),
Mesure (ME),
Aspect (AS).

➤ **Ces fonctions vont définir**

Les dimensions finales de la pièce avec les tolérances,
La cotation de forme et de géométrie des surfaces usinées,
L'état de surface requis (rugosité).

C'est l'ensemble de ces éléments de cotation qui va déterminer le type d'usinage à effectuer, ses paramètres, la finition nécessaire et le contrôle à effectuer.

I.2.2. Copeau

Le copeau est la partie de matière qui se détache, lors de la coupe, dans un procédé d'usinage. L'état de la surface usinée dépend des conditions de coupe. Il existe une avance en dessous de laquelle il ne faut pas descendre sous peine de n'avoir aucune formation de copeau. Cette avance minimale dépend du matériau, de la vitesse et du type d'outil utilisés, et définit le copeau minimum. Si l'avance est plus faible, il n'y a plus de coupe, mais un écrouissage qui crée un échauffement préjudiciable à l'état de surface de la pièce et à l'outil [5].

Les procédés d'usinage produisent des copeaux et de la limaille qui, mélangés aux fluides d'usinage, forment de la boue. Une partie du matériau produit lors de la réalisation de la pièce brute ne sera pas dans la pièce usinée, il faut le collecter et le recycler. Les copeaux ont donc un coût [4-5].

Compte tenu des vitesses de « production » de copeaux avec les procédés d'usinage modernes, ceux-ci doivent être nécessairement fragmentés en petites particules afin d'en permettre une évacuation facile. Selon les matériaux « coupés » et la forme des « outils de coupe », les paramètres de coupe doivent être adaptés pour permettre une bonne fragmentation. Les fabricants d'outils fournissent aux usineurs des « courbes de fragmentation » donnant pour chacun des outils de leur catalogue les paramètres (vitesse d'avance et profondeur de passe) permettant d'obtenir cette fragmentation. Ces courbes en forme de chaussette sont spécifiques au « couple outil - matière » [5].

I.2.3. Matériaux de coupe

Plusieurs matériaux sont utilisés comme outils de coupe [6] tels que figure (I.1)

- Outils en acier à au carbone.
- Outil en acier rapide (HSS).
- Carbure cémenté.
- Outil en céramique.
- Outil en nitrure du bore cubique (CBN).
- Outil en diamant.

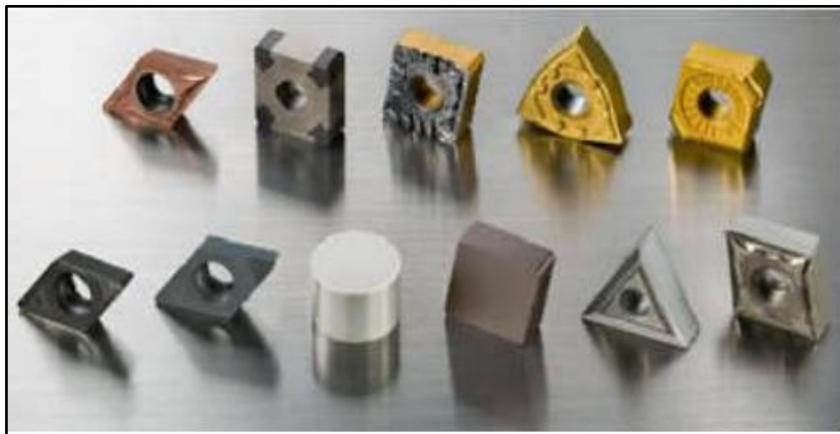


Figure I.1. Matériaux de coupe [6].

Les caractéristiques recherchées dans un matériau de coupe peuvent être résumées Comme suit [5-6] :

- * posséder une dureté permettant de résister à l'usure et à la déformation, même à une température élevée,
- * posséder une ténacité élevée pour résister à la rupture.
- * être chimiquement inerte vis à vis du matériau usiné,
- * être chimiquement stable pour résister à l'oxydation et à la dissolution,
- * offrir une bonne conductibilité thermique et une bonne résistance aux chocs Thermiques.

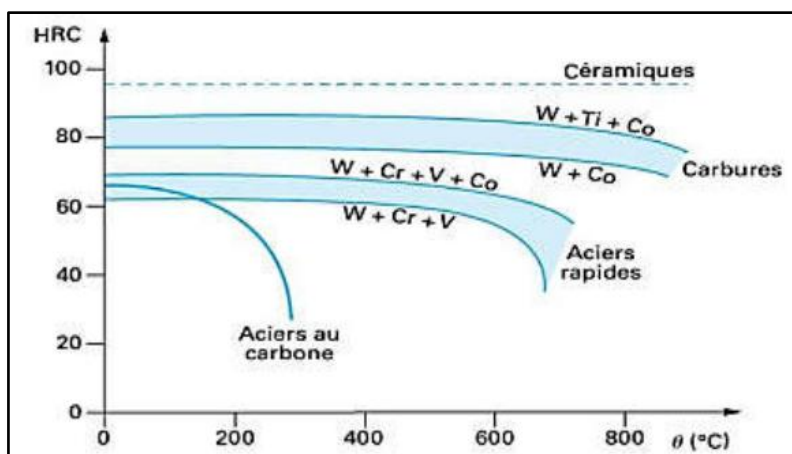


Figure I.2. Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour La fabrication des outils de coupe [6]

I.2.4. Classification des matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure [7]. Figure (I.3). De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les Propriétés suivantes :

- **Dureté** : résistance à l'usure en dépouille et à la déformation
- **Ténacité** : résistance à la rupture ;
- **Neutralité chimique** : absence de réaction chimique avec la matière à usiner.
- **Stabilité chimique** : résistance à l'oxydation et à la diffusion ;
- **Résistance** aux variations thermiques brusques

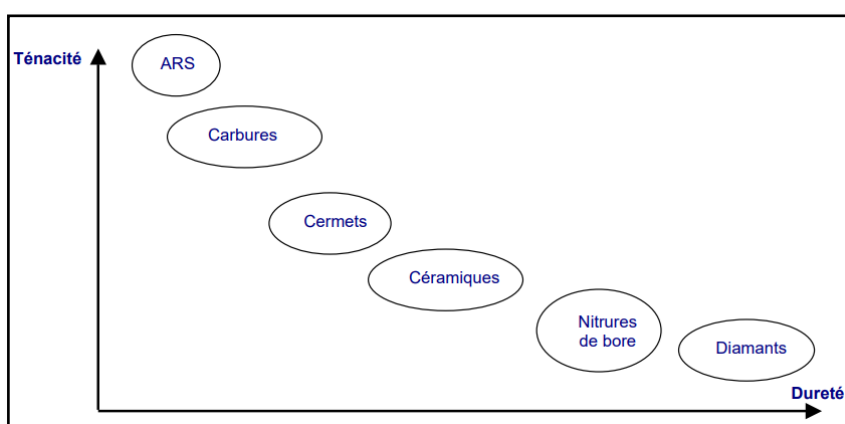


Figure I.3. Classification des matériaux de coupe [7].

Les matériaux de coupe utilisés en tournage des pièces peuvent être classés en plusieurs familles: les aciers rapides, les aciers rapides revêtus, les aciers rapides frittés, les Carbures métalliques, les carbures micro Cubique (CBN) et les diamants.

a) Acier au carbone

L'acier au carbone est un matériau de coupe métallique peu coûteux utilisé pour les opérations d'usinage à faible vitesse. Les outils de coupe en acier au carbone ordinaire ont une composition de 0,6 à 1,5 % de carbone et une très faible quantité (moins de 0,5 %) de Mn et Si. D'autres métaux comme Cr, V sont ajoutés pour modifier la dureté et la taille des grains. Les aciers à haute teneur en carbone sont résistants à l'abrasion et ont la capacité de maintenir un bord tranchant. Ils possèdent une bonne usinabilité mais ce matériau perd rapidement sa dureté à une température d'environ 250°C figure (I.4)[5].

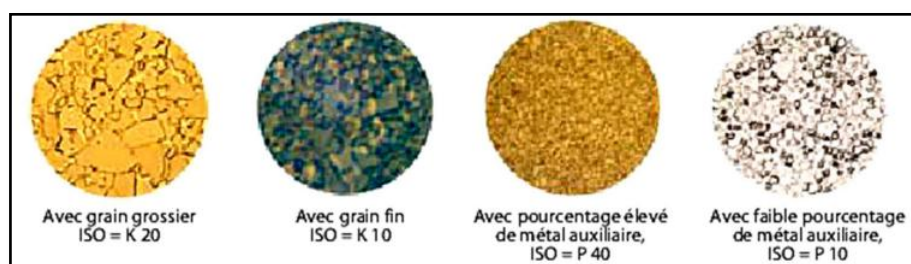


Figure I.4. Structures de diverses nuances de carbure [6].

b) L'acier rapide

Outil en acier rapide (HSS) Il s'agit d'un acier à haute teneur en carbone avec une quantité importante d'éléments d'alliage, tels que le tungstène, le molybdène, le chrome, etc. pour améliorer la trempabilité, la ténacité et la résistance à l'usure. Il offre un taux d'enlèvement de métal plus élevé mais il perd sa dureté à une température modérée d'environ 650°C. Il faut donc utiliser un liquide de refroidissement pour augmenter la durée de vie de l'outil. Il peut être utilisé plusieurs fois par réaffûtage. Un traitement de surface est effectué sur l'acier rapide pour améliorer ses propriétés figure (I.5)[5].



Figure I.5. Outils des usinages [7].

c) Les carbures

Une grande dureté -une haute résistance à l'usure - conservent leur dureté jusqu'à 900°C environ -vitesses de coupe quatre à six fois Ils se présentent sous forme de plaquettes brasées ou fixées mécaniquement sur un corps d'outil en acier figure (I.6) [7]



Figure I.6. Plaquettes brasées ou fixées sur un corps d'outil en acier [7]

d) Les cermets

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitride de Titane ou de nitrure de Titane. Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...) figure (I.7) [8]

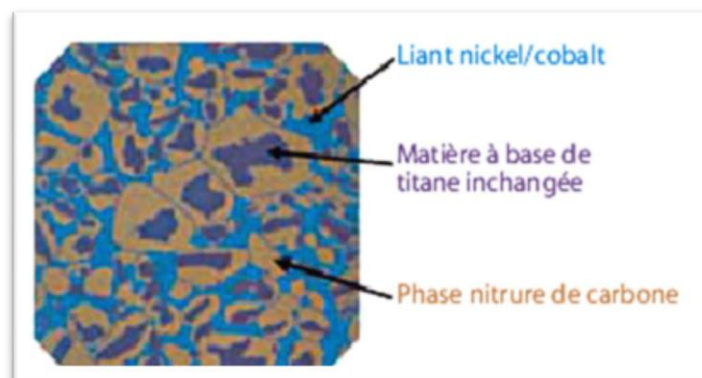


Figure I.7. Micrographie d'une nuance de cermet [9]

e) Les céramiques

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée. Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil) figure (I.8). [10].

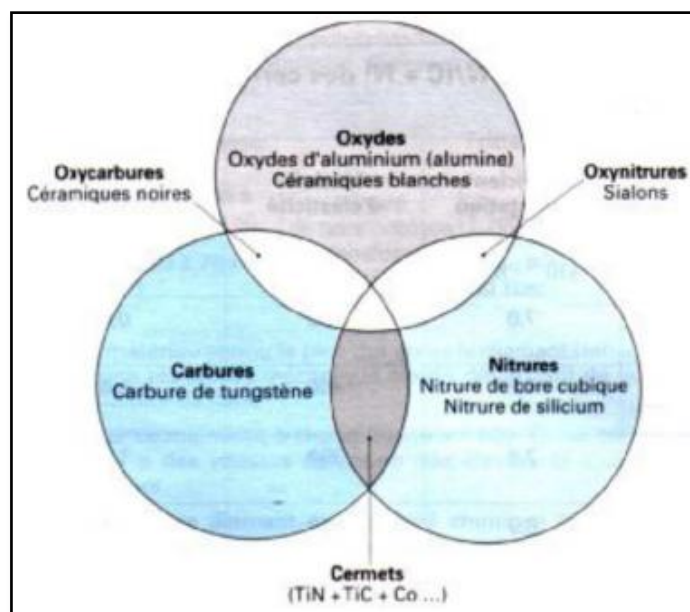


Figure I.8. Différents type de céramiques [8]

f) Nitrure de bore cubique (CBN)

Le CBN figure (I.9) offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures... Son utilisation requiert.

- Une machine stable.
- Une grande rigidité de la pièce et de la porte pièce.



Figure I.9. Microstructure du nitrure de bore cubique (CBN) [11].

g) Le diamant

C'est le matériau le plus dur que l'on connaisse est de ce fait il constitue un excellent outil de coupe. Son prix d'achat est très élevé. Il se présente sous forme d'un grain serti ou brasé sur un corps pour les outils à tranchant unique. Le diamant permet de réaliser des outils de coupe autorisant des vitesses très élevées sans usure appréciable, d'où un excellent état de surface et une excellente précision dimensionnelle. Malheureusement le diamant industriel, naturel ou

synthétique, dans sa forme monocristalline (un seul cristal massif), ne peut être obtenu facilement sous un gros volume ; aussi la dimension des arêtes actives et la section de copeau restent-elles faibles (opérations de finition). Toutefois, le diamant (constitué du carbone pur), est capable de se décomposer par réaction chimique avec les matériaux ferreux. De ce fait, il est mal adapté à l'usinage des aciers. Il est par contre très efficace en finition sur les alliages légers, la céramique, plastiques renforcés de fibres de verre, carbone, roches (granit), caoutchoucs durs figure (I.10).

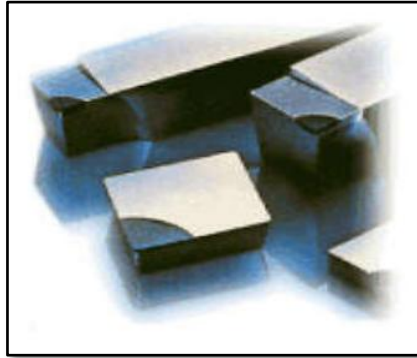


Figure I.10. Plaquette en tête de diamant [7]

Les principales matières utilisées pour les outils de coupes modernes sont représentées dans la figure (I.11)

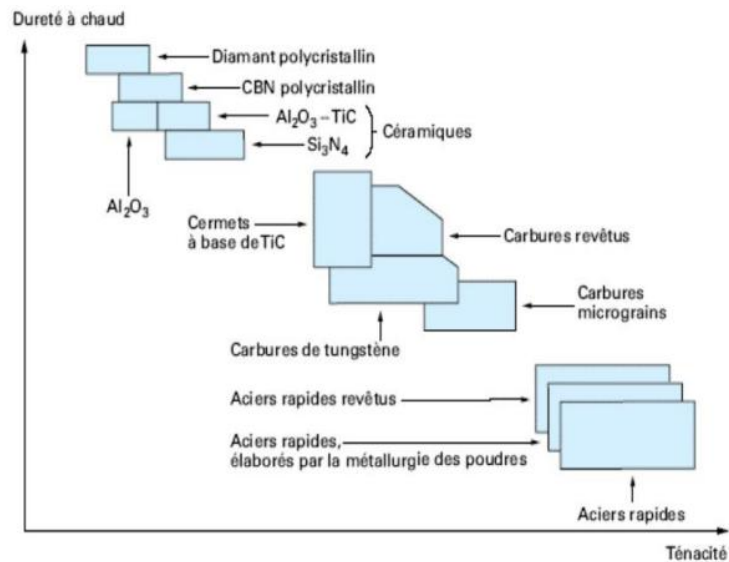


Figure I.11. Disposition les matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté [12]

I.3. Paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont listés ci-après [10]

- **La vitesse de coupe v_c** : en mètre par minute (m/min) : caractérise la vitesse relative entre la pièce et l'outil au point de contact

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

- **L'avance par tour f_n** : en millimètre par tour (mm/tr) : caractérise l'état de surface obtenu. Les paramètres de coupe sont choisis en fonction des caractéristiques mécaniques de la matière à usiner et de l'outil. Ils sont indépendants de la machine utilisée et des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil.

- **la fréquence de rotation de la broche N** : en tours par minute (tr/min)

$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (I.2)$$

- **la vitesse d'avance V_f** en millimètre par minute (mm/min).

$$V_f = N \times f \quad (I.3)$$

Les paramètres machines sont calculés à partir des paramètres de coupe et des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil.

- La profondeur de passe a_p : en millimètre (mm) ;
- Le nombre de passes n_p .
- La longueur usinée l_{us} en millimètre (mm).
- La longueur totale usinée L en millimètre (mm).
- Puissance nette P_c (kW)

$$P_c = \frac{V_c \times K_c \times f \times a_p}{60 \times 10^3} \quad (I.4)$$

Temps réel de coupe T_c (min)

$$T_c = i \frac{L_{us}}{f \times N} \quad (I.5)$$

Force de coupe F_c (N)

- Force de coupe spécifique K_c (N/mm²)
- Pression spécifique de coupe K_c (N/mm²)

$$K_c = F_c / A_D \quad (I.6)$$

- Débit du copeau MRR (cm³ /min)

$$MRR = V_c \times a_p \times f \quad (I.7)$$

- Section du copeau A_D (mm²)

I.4. Les efforts de coupe

L'effort de coupe est la résistance opposée par le matériau à l'intrusion de l'outil de coupe. Les directions et amplitudes de l'effort diffèrent en fonction des procédés de coupe (tournage, fraisage, perçage, etc.) Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours du processus d'usinage [15].

a) Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage figure (I.12)

La résultante de coupe F , peut utiliser en pratique, est la somme de 3 composantes :

F_v : Composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

F_a : Composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.

F_p : Composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.

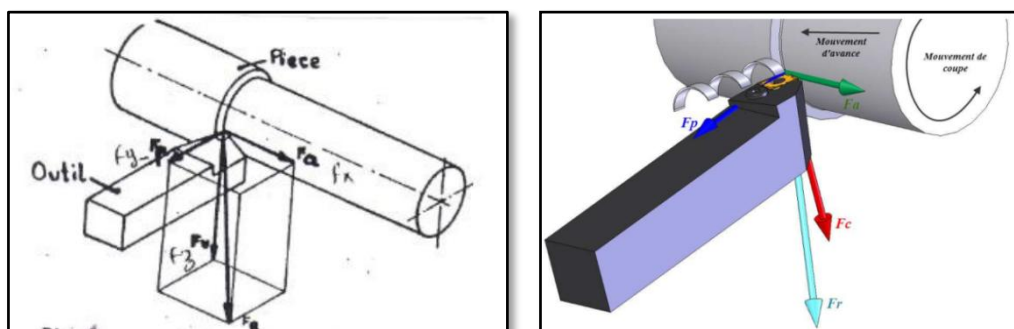
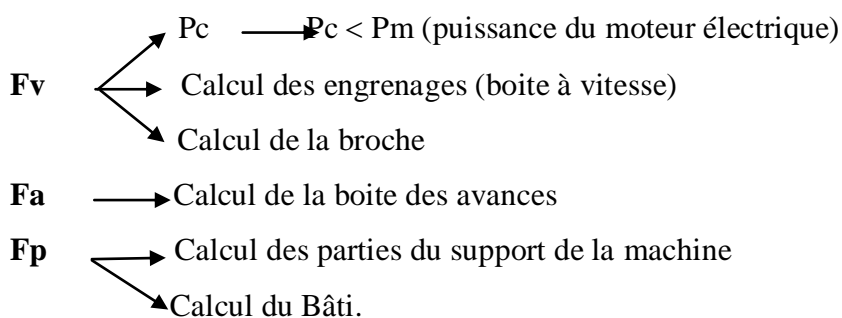


Figure I.12. Composantes de l'effort de coupe [17]

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évolution de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau.



b) Rapport des composantes

La résultante de coupe F_r , étant une diagonale de parallélépipède est égale à :

$$F_r = \sqrt{F_v^2 + F_a^2 + F_p^2} \quad (I.8)$$

On a établi expérimentalement qu'aux conditions de coupe suivantes :

$$\chi = 45^\circ ; \gamma = 15^\circ ; \lambda = 0$$

$$F_a = (0,2 \text{ à } 0,3) F_v \quad (1)$$

$$F_p = (0,4 \text{ à } 0,5) F_v \quad (2)$$

$$\text{Alors on aura : } F_r = \sqrt{F_v^2 + F_a^2 + F_p^2}$$

Avec (1) et (2) on aura :

$$F_r = \sqrt{(0,25F_v)^2 + (0,45F_v)^2 + F_v^2} = 1,12 F_v \quad (I.9)$$

D'après cette formule la force de coupe F_r diffère peu de F_v .

C'est pourquoi pour le calcul pratique on peut admettre que ces forces sont égales ($F_r = F_v$).

c) Formules pour le calcul des efforts : F_v, F_p, F_a

Voici les formules empiriques les plus utilisées pour le calcul pratique :

$$F_v = C_1 P^{x_1} \cdot a^{y_1} \cdot V^{n_1} \cdot K_v \quad (I.10)$$

$$F_p = C_2 P^{x_2} \cdot a^{y_2} \cdot V^{n_2} \cdot K_p \quad (I.11)$$

$$F_a = C_3 p^{x_3} \cdot a^{y_3} \cdot V^{n_3} \cdot K_a \quad (I.12)$$

- Les coefficients C_1, C_2, C_3 sont des constantes qui dépendent des propriétés mécaniques du métal à usiner et des conditions de son usinage .

- Les coefficients $K_{fv}; K_{fa}; K_{fp}$ se sont les coef. Correctif relatif aux conditions d'usage concrète.

- Les coefficients $X_{1,2,3}; Y_{1,2,3}; N_{1,2,3}$ se sont des exposants qui caractérise le degré d'influence des paramètres p, a, v sur les forces de coupes f_v, f_a, f_p .

d) Puissance absorbée par la coupe

Pour calculer la puissance absorbée par le copeau, il convient d'additionner les puissances suivantes

$$P_c = P_{fv} + P_{fa} + P_{fp} \quad (I.13)$$

Comme la puissance étant le travail par seconde ; chaque relation doit être multipliée par la vitesse relative correspondante de l'outil et de la pièce

$$P_c = F_v \cdot V_c + F_p \cdot V_p + F_a \cdot V_a \quad [F_a = (1-2\%) \text{ de } P_c].$$

On sait qu'on chariotage $V_p = 0$ et que la puissance absorbées par le mouvement d'avance est petit donc :

$$P_c = F_v \cdot V \quad (\text{kw}) \quad (\text{I.14})$$

Compte tenu du rendement η de la machine, il est aisé de calculer la puissance sur la broche de la machine :

$$P_b = P_m \cdot \eta \quad (\text{I.15})$$

Pour réaliser la coupe sur la machine choisie, la puissance sur la broche doit être plus grande que la puissance pratique de coupe, c'est à dire : $P_b \text{ sup } P_c$

e) Influence des paramètres de coupe sur l'usure

Les principaux facteurs influençant l'usure des outils de coupe sont [11] ;

Les propriétés physiques et mécaniques du métal en œuvre ;

Nature du matériau constituant l'outil;

La géométrie de la partie active de l'outil ;

Les facteurs mécaniques d'usinage (V_c , f et a_p) ;

L'état de l'arête tranchante et des surfaces qui la déterminent ;

L'état de la machine-outil, la rigidité de l'ensemble porte-pièce/pièce ; porte-outil/outil.

f) Vitesse de coupe : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe. Ce paramètre a une très grande influence sur l'usure figure (I.13) [11],

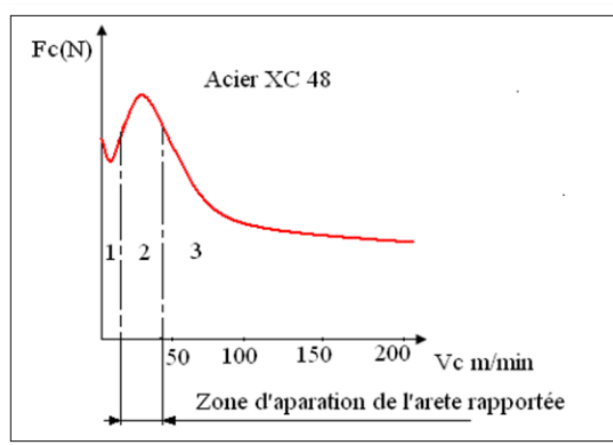


Figure I.13. Influence de la vitesse sur l'effort de coupe lors de l'usinage des matériaux ductiles [11]

- Zone 1: diminution de F avec les vitesses bases due à une diminution de frottement copeau - outil.
- Zone 2: l'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation des frottements et par suite de l'effort tangentiel de coupe.
- Zone 3: la V_c augmente \Rightarrow arête rapportée diminue. L'effort tangentiel de coupe F diminue et se stabilise vers 200 m/mn.)

* **Avance** : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe et diminuent la durée de vie de l'outil, avec l'augmentation de la vitesse de coupe l'usure croit

* **Profondeur de passe** : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur de long de l'arête tranchante son influence reste modeste sur l'usure.

* **Matériau usiné**: Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de ces certains éléments d'addition).

* **Lubrification** : Son influence permet une amélioration de 25% sur la durée de vie. De nombreux essais ont été effectués pour démontrer l'effet des différents facteurs sur l'usure des outils. Il est bien établi que la vitesse de coupe est une variable importante influant sur l'usure des outils [18].

g) Influence du matériau de coupe

Les matériaux de coupe revêtus, en particulier ceux avec des revêtements **TiN** ou **Ti(C, N)**, accusent un frottement moindre et des efforts de coupe plus faible que les matériaux de coupe non revêtus. Les faces d'attaque superfinies (rectifiées, rodées, polies) et dotées d'une arête de coupe dure et tranchante, réduisent les efforts de coupe figure (I.14).

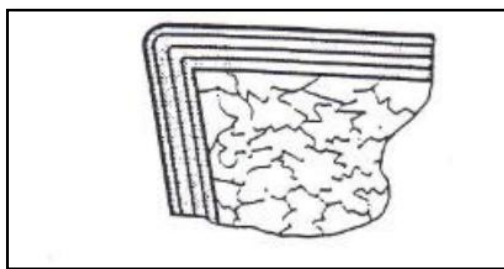


Figure I.14. Influence du matériau de coupe [18]

I.5. Mesure des efforts

Pour mesurer l'amplitude de l'effort de coupe, un dynamomètre (par exemple : KISTLER 9257 B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments parmi lesquelles on cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel (DYNOWARE). Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est animé du mouvement d'avance. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz figure (I.15). Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties par les capteurs piézo-électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimé en trois composantes (I.15).

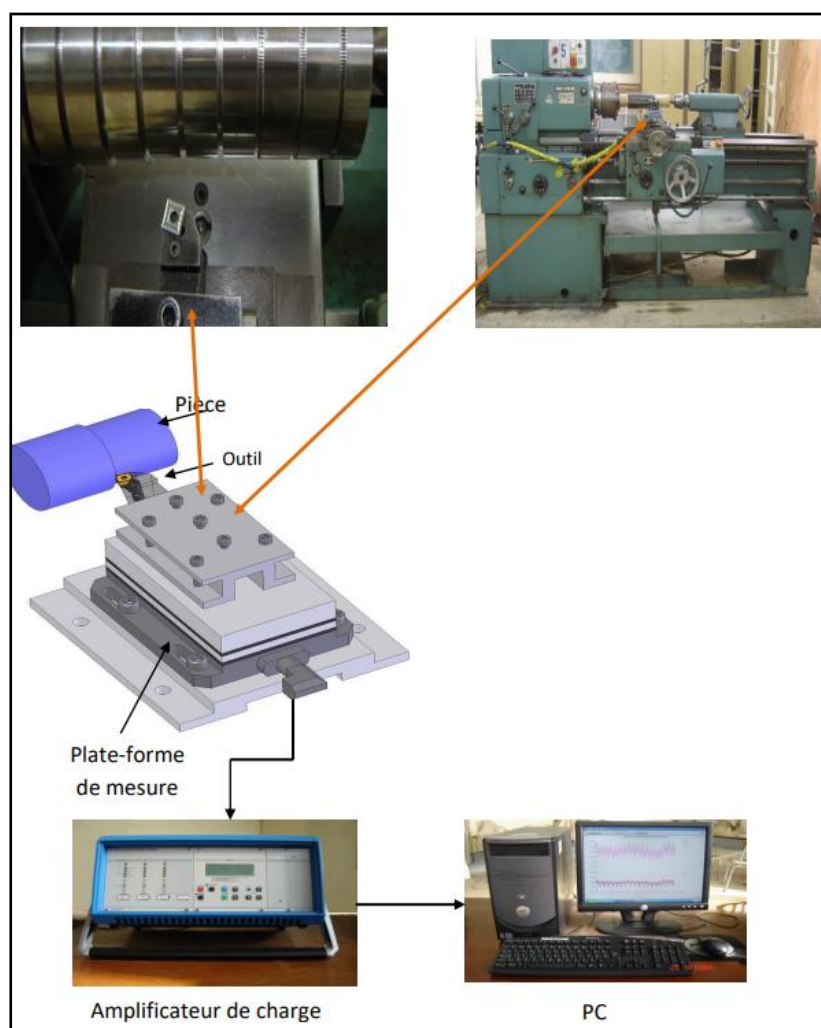


Figure I.15. Montage du dynamomètre et chaîne de mesure de l'effort de coupe

I.6. Rugosité des surfaces usinées

L'aptitude d'une pièce, à une fonction donnée, dépend d'un ensemble de conditions, notamment des caractéristiques de ses états de surface. Par exemple, l'examen de la Figure (I.16) montre que l'étanchéité et l'usure du joint sont essentiellement fonction de l'état de surface de l'alésage du cylindre

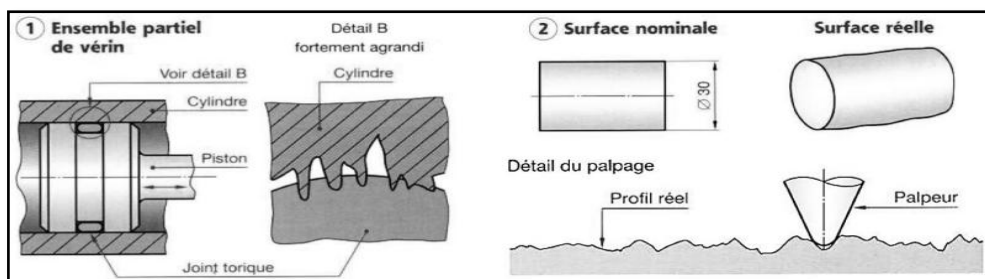


Figure I.16. Profile de surface 2D [14].

La rugosité concerne les défauts micro géométriques de la surface réelle. La cotation des états de surface fait principalement référence à l'usinage par enlèvement de matière. Les défauts sont des stries et des sillons creusés par les arêtes coupantes des outils (outils de tournage, fraises, meules, etc...) [14].

I.6.1. Différentes représentations de la surface

a) **Surface géométrique** : C'est une surface parfaite. Elle est définie géométriquement par des cotes nominales.

b) **Surface spécifiée** : c'est la surface géométrique affectée des tolérances de fabrication.

c) **Surface mesurée** : La surface mesurée est le résultat de l'exploration, à l'aide des instruments de mesure, de la surface réelle. Par exemple, avec l'appareil représenté, il arrive que le palpeur ne touche pas le fond de la surface réelle. C'est ce qui explique, en partie, la différence entre la surface réelle et la surface mesurée.

d) **Surface réelle** : c'est la surface qui résulte des procédés de fabrication. La figure (I.17) montre(en amplifiant les défauts)que la surface réelle diffère sensiblement de la surface géométrique.

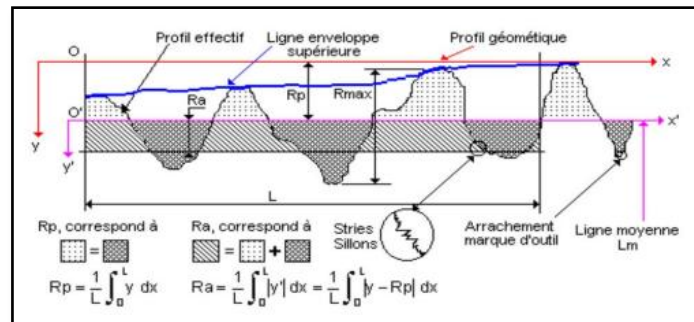


Figure I.17. Caractéristiques du profil [15]

- **L** : Longueur de base du profil moyen
- **R_q** : Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L.
- **R_a** : Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y'(entre chaque point de la courbe et l'axe Ox')

I.6.2. Principaux critères d'états de surface

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage

Soit ox la ligne moyenne telle que : $\int_0^L y dx = 0$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [15].

a) Rugosité totale Rt : Représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.

b) Rugosité Rz : Représente la distance moyenne entre les sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

c) Rugosité moyenne arithmétique Ra : Représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à ox. **Ra** est calculée sur une longueur d'évaluation (L). Figure (I.18)

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (I.16)$$

d) Rugosité Maximum Rmax : C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de Rugosité Rmax étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

e) Rugosité Rp : Est la hauteur maximale de saillie de rugosité.

Rp est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

Remarque : Ces différents critères s'expriment en (μm).

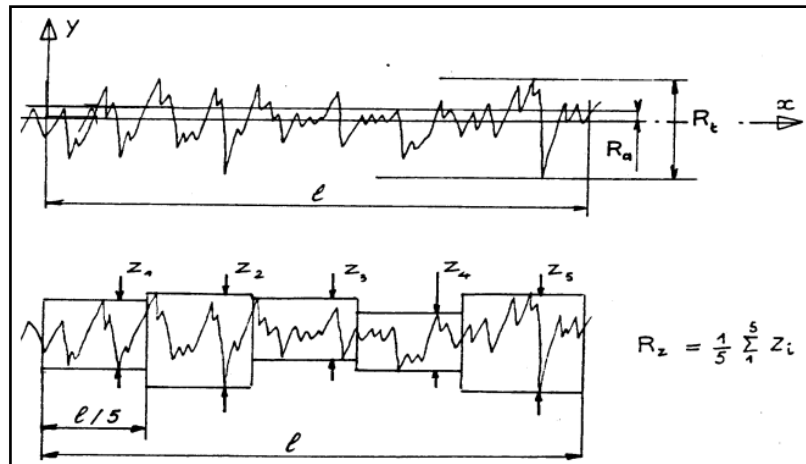


Figure I.18. Principaux critères de rugosité [15].

I.7. Usinabilité

L'usinabilité est l'aptitude d'un matériau solide à se faire usiner. Plusieurs caractéristiques des matériaux influencent l'usinabilité et ce, de plusieurs façons à savoir ; Dureté, Propriétés mécaniques, Composition chimique, Microstructure, Rigidité de la pièce, Susceptibilité à l'érouissage, Degré de travail à froid, Forme et dimension de la partie usinée.

L'usinabilité est évaluée sur plusieurs critères parmi eux :

- Les forces impliquées (sur l'outil, la machine, et la consommation d'énergie)
- La qualité du fini de surface
- La durée de vie des outils

I.8. Température de coupe

I.8.1. Origine de la chaleur :

Dans le processus de coupe, la pièce, l'outil de coupe et le copeau, s'échauffent. C'est à dire que dans la zone de coupe la température augmente. Cela est dû à la transformation de l'énergie mécanique - déformation élastique et plastique, ainsi que le frottement du copeau sur les surfaces d'attaques et de dépouille de l'outil- en énergie thermique figure (I.19).

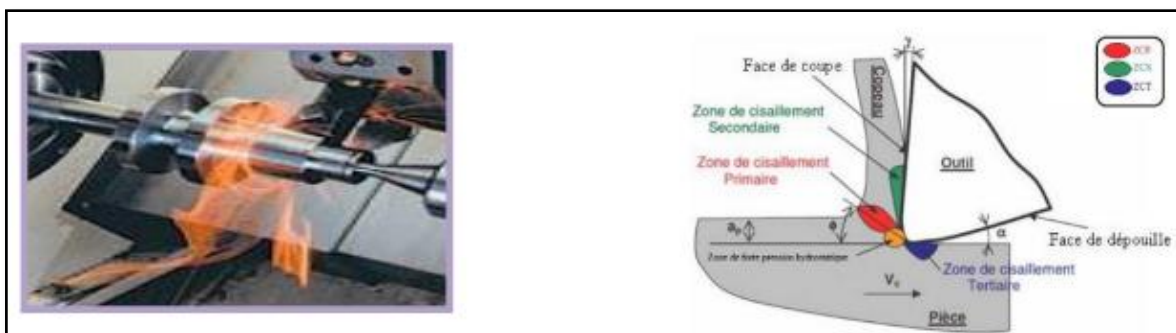


Figure I.19. Origine de la chaleur en Usinage

$$Q = Q_{fr} \cdot \gamma + Q_{fr} \cdot \alpha + Q_{d\acute{e}f} \tag{I.17}$$

Le bilan thermique de la coupe des métaux peut s'établir ainsi avec les quantités de chaleur répartie en figure (I.20)

$$Q = \sum_{i=1}^4 Q_i \tag{I.18}$$

Q1 de chaleur emportée par le copeau

Q2 de chaleur absorbée par l'outil

Q3 de chaleur prise par l'ébauche

Q4 de chaleur échangée avec le milieu ambiant

Donc on a le bilan thermique de la coupe $Q1 + Q2 + Q3 + Q4 = Q_{fr} \cdot \alpha + Q_{fr} \cdot \gamma + Q_{d\acute{e}f}$

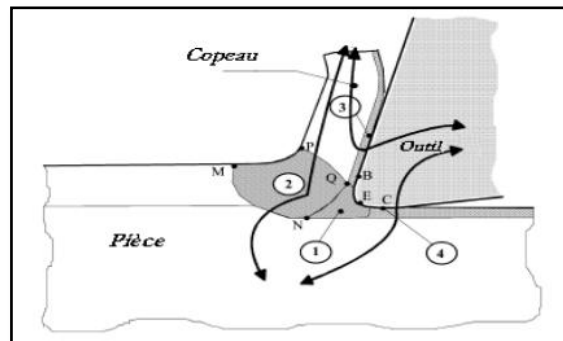


Figure I.20. Répartition de la chaleur dans la zone de l'usinage [19]

I.8.2. Répartition de la température dans l'outil :

La distribution de la chaleur dans l'outil n'est pas uniforme. La température maximale de la surface d'attaque se situe à une certaine distance de l'arête tranchante car la pression du copeau est grande en ce point de l'ordre de 250Kgf/mm². La température des couches du copeau proches de la surface de coupe est plus élevée que celles des couches éloignées figure (I.21)

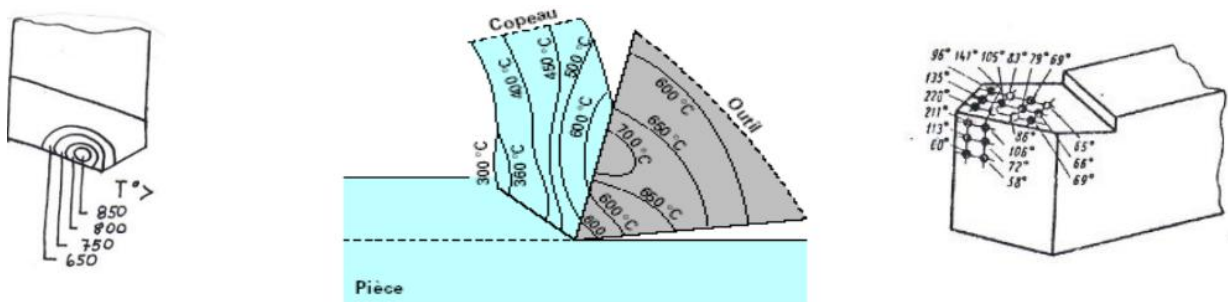


Figure I.21. Température en divers points de l'outil, la pièce et le copeau [16]

La quantité de chaleur qui se dégage en une unité de temps peut être déterminée selon la formule :

$$Q = A \cdot \alpha / E \text{ (Kcal/min)} \quad (\text{I.19})$$

E : équivalent mécanique de la chaleur (coef qui permet d'établir la relation entre les joules et les calories).

$$E = 427.9,81 \text{ Nm / Kca}$$

$$\alpha = (0,90 / 0,99)$$

$$Q = A \cdot \alpha / E = F_z \cdot V / E \text{ (kcal/ mn)} \quad F_z: \text{ force de coupe ; } V: \text{ vitesse de coupe}$$

I.9. Phénomène de l'arête rapportée

Dans certaines conditions de coupe, on peut observer, sur la surface de coupe au voisinage de l'arête, une accumulation de forme pyramidale faite de particules du métal de base, très déformées, adhérentes à l'outil, que l'on appelle **arête rapportée** ou encore **copeau adhérent** et dont la dureté peut atteindre deux à trois fois celle de la matière usinée [20].

La combinaison de la pression et de la t° conduit sur la face d'attaque au soudage de particules se détachant de la face inférieure du copeau solidifié. Des parties de l'arête rapportée migrent périodiquement et sont remplacées par des nouvelles particules de matériaux venant s'ajouter à l'arête rapportée déjà formée.

I.9.1. Mécanisme de formation de l'arête rapportée

Le mécanisme de sa formation peut être décomposé en quatre temps voir figure (I.22) :

- a) Sous l'effet de la pression exercée par la coupe et de l'échauffement, il se forme des micro-soudures du métal usiné sur la surface d'attaque de l'outil.
- b) L'augmentation induite de la rugosité de la face de coupe entraîne une augmentation du frottement entre le copeau et l'outil ce qui a pour effet d'amplifier le phénomène de micro-soudures.
- c) La formation du copeau ne se fait plus par l'arête de l'outil, mais par l'arête rapportée qui joue, malgré sa stabilité variable, le rôle d'arête auxiliaire (voir schéma).
- d) Lorsque ' d ' devient trop élevée, une partie de l'arête rapportée s'effondre et s'imprime, en partie, dans la surface usinée.



Figure I.22. Représentation la formation de la migration de l'arête rapportée [20].

I.9.2. Règles pour limiter les risques d'arête rapportée :

On peut empêcher la formation de l'arête rapportée en prenant les mesures suivantes :

- Polir les faces de coupe et de dépouille pour diminuer le coefficient de frottement.
- Utiliser un lubrifiant approprié au type de travail et de matériau à usiner.
- Augmentation de la pente effective de coupe.
- Utilisation de revêtement.
- Choisir une vitesse de coupe pour laquelle le copeau adhérent ne se forme pas facilement

I.10. Etat de l'art

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à l'usinabilité des matériaux métalliques tel que l'acier inoxydable et ont eu recours à l'optimisation pour déterminer les régimes optimaux correspondants à la gamme des paramètres de coupe choisies par les décideurs.

I.10.1. Etude de l'usure des outils de coupe lors du tournage de l'Inox 316L dans les conditions de lubrification minimale (MQL)

Szczotkarz et al. (2021) [21] Ont mené une recherche basée sur une comparaison de différents modes de lubrification, à savoir, usinage à sec, lubrification MQL et lubrification MQCL+EP/AW. Des essais de tournage ont été réalisés sur tour conventionnel avec un outil sous forme de plaquette SNUN120408-PF et un porte outil CSRNR2525. La plaquette de coupe contient un revêtement résistant en TiAlN d'épaisseur 3 μm déposée par la méthode PVD. Les paramètres de coupe ont été sélectionnés conformément aux recommandations du fabricant d'outils.

Au cours de cette étude, deux critères d'usure des arêtes de coupe ont été déterminés. La bande d'usure qui se forme sur la face en dépouille (zone B), indiquée par VB et la largeur du cratère KB figure (I.23). Les expériences ont été menées jusqu'à la valeur admissible de

VB = 0.3 mm selon la norme standard ISO3685:1993. Les paramètres de coupe sont présentés dans le Tableau (I.1). La Figure (I.23) montre les valeurs de VB en fonction du mode de lubrification employée sur la zone de coupe lors du tournage de l'inox 316L. Une valeur maximale de VB a été enregistrée lors du tournage à sec voir détails sur la figure (I.24). En revanche, l'utilisation d'une lubrification MQL a permis de minimiser l'usure VB de 3%. Le MQCL +La méthode EP/AW ne réduit pas les frottements par rapport à l'MQL.

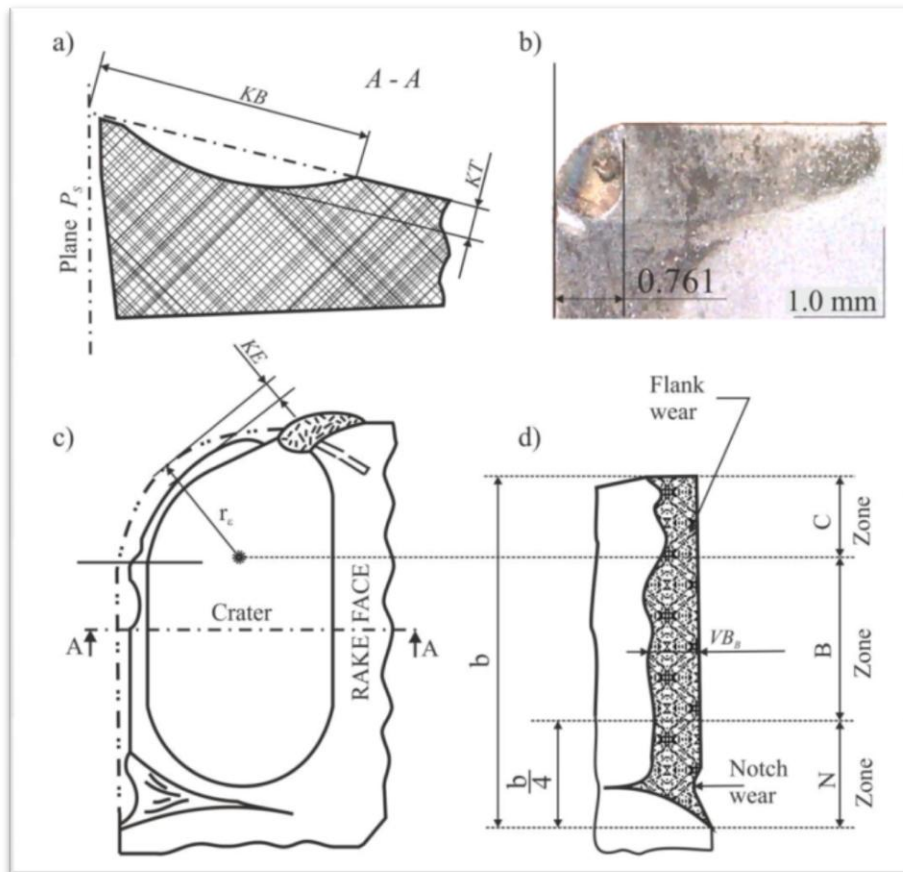


Figure I.23. Critères d'usure selon ISO 3685:1993.

- a) largeur de cratère sur la face de coupe KB ;
- b) vue générale de la mesure KB au microscope
- c) face de coupe avec mesure d'usure KE
- d) usure majeure VB et usure des entailles.

Tableau I.1. Paramètres de coupe

Cutting parameters			Parameters for active medium lubrication		
Cutting speed v_c [m/min]	Feed f [mm/rev]	Depth of cut a_p [mm]	Volume air flow [l/min]	Mass flow of active medium [g/min]	Distance between the nozzle and the cutting zone [m]
210	0.1	0.5	5.8	0.44	0.3

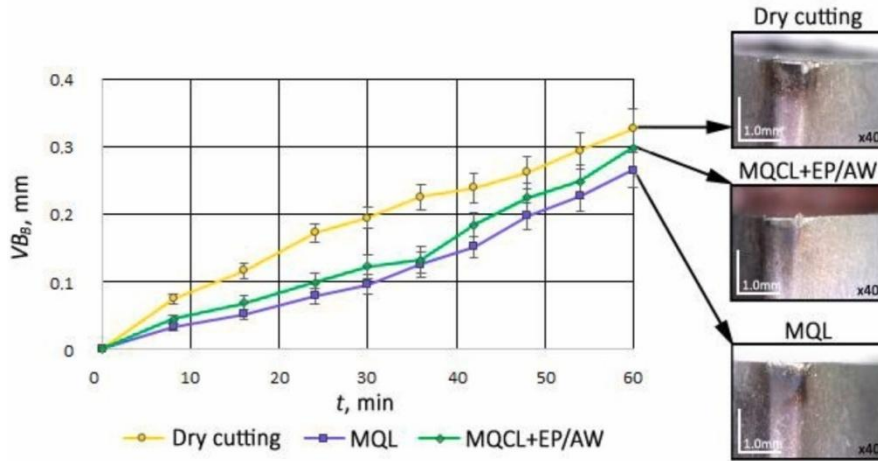


Figure I.24. Usure VB Our différents modes de lubrification testés.

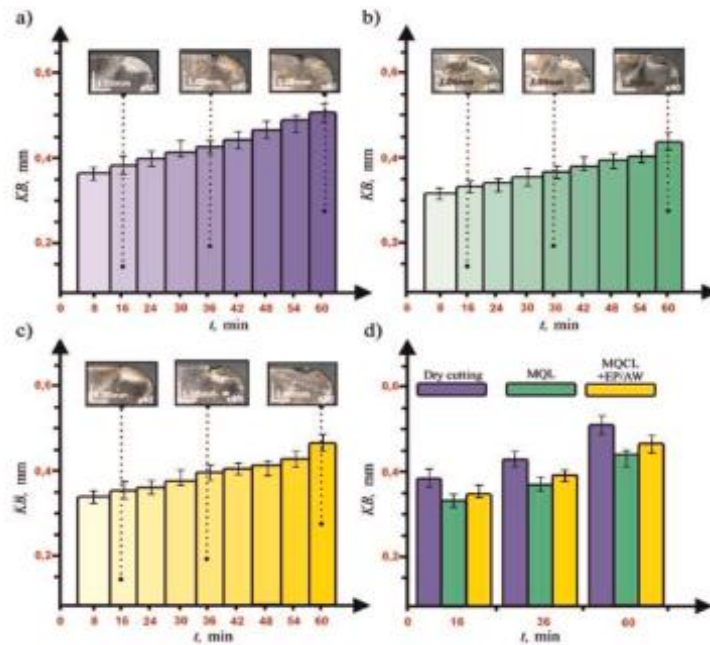


Figure I.25. Variation de KB lors du tournage de l'acier 316L.

- a) usinage à sec ;
- b) Méthode MQL ;
- c) MCQL +méthode EP/AW ;
- d) La progression de l'assemblage pour des périodes de temps sélectionnées.

La Figure (I.26). présente les détails des différents modes d'usure, identifiés sur la zone de coupe de la plaquette de coupe, générées en raison des divers modes de lubrification. L'analyse menée sur les images topographiques associées aux arêtes de coupe Figure (I.26) révèle que l'usure principale se trouve près du bec, sous forme d'une entaille d'usure.

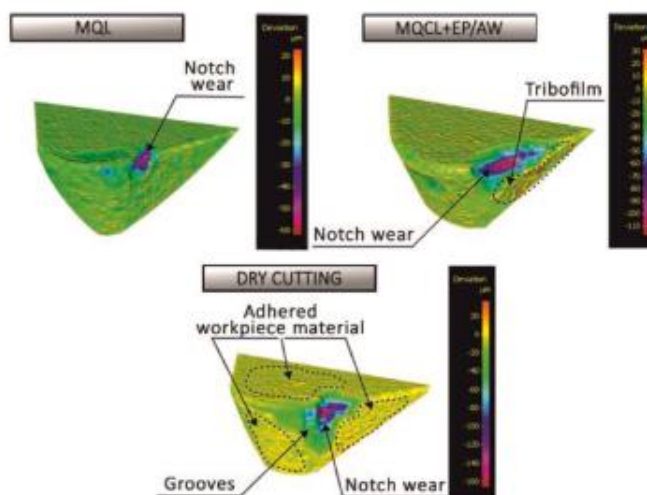


Figure I.26. Usure en fonction du mode de lubrification.

I.10.2. Optimisation du régime de coupe lors du tournage de l'acier AISI316L à usage biomédical

Del Risco-Alfonso et al. (2021) [22] ont réalisé une étude dans le but d'identifier la dépendance entre l'effort de coupe principal, la vitesse initiale d'usure de l'outil, la rugosité et les paramètres du régime de coupe. Pour l'étude expérimentale, une barre en acier AISI 316L de 63 mm de diamètre et 270 mm de longueur a été utilisée. La dureté moyenne de la pièce était de 148 HRB. L'outil de coupe utilisé était un « BIDE MICS » RNGN 120700E004 JX1 (NTK Cutting Tools, Aichi, Japon) de la famille des céramiques sans revêtement, spécialement conçu pour l'usinage des alliages réfractaires figure (I.27).

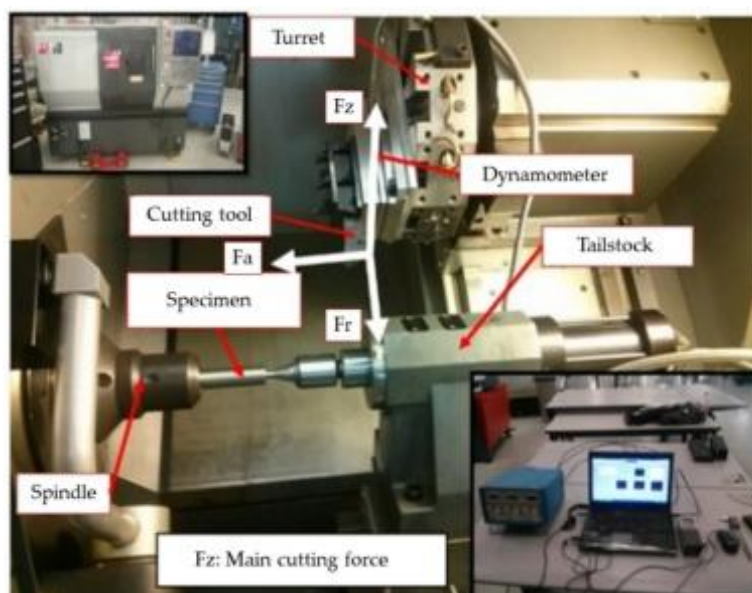


Figure I.27. Banc d'essai

Les éléments suivants ont été sélectionnés comme variables de réponse : (a) la rugosité de surface en raison de son influence sur la biocompatibilité du matériau ; (b) l'usure initiale de l'outil de coupe due à son incidence sur la rugosité de surface ; et (c) les valeurs des efforts de coupe comme indicateur de l'usinabilité du matériau.

Une optimisation multi - objectif est proposée pour minimiser l'énergie consommée et le taux d'usure, ainsi que pour maximiser la productivité, en maintenant les valeurs de rugosité de surface inférieures à celles établies par la norme ISO 5832-1. L'usure de l'outil de coupe a été mesurée par un microscope électronique à balayage. Pour le processus d'optimisation, un algorithme génétique basé sur NSGA-II (Non - nominated Sorting Genetic Algorithm) a été implémenté. Les variables d'entrée étaient la vitesse de coupe et l'avance (trois niveaux). L'effort de coupe et la rugosité de surface ont été définis comme restrictions. Les auteurs ont conclu que le modèle mathématique permet d'optimiser le régime de coupe lors du tournage à sec et avec l'utilisation de MQL (Minimum Quantity Lubrication) avec les outils céramiques BIDE MICS JX1 (NTK Cutting Tools, Wixom, MI, USA), en acier AISI 316 L à usage biomédical.

D'autre part, à partir des valeurs d'usure de l'outil de coupe obtenues et en considérant que la longueur d'usinage était constante (100 mm pour chaque passe de coupe dans les deux conditions de lubrification), La progression de l'usure pourrait être définie par les équations du Tableau (I.2).

Tableau I.2. Modèles de la progression de l'usure de l'outil. en SEC et MQL.

Régime de lubrification	Équation de l'initiale Progression de l'usure de l'outil	R ²
Sec	$VB_0 = \frac{V^{1.52} \times F^{0.820}}{3.25 \times 10^3}$	0.99
MQL	$VB_0 = \frac{V^{1.42} \times F^{0.911}}{2.33 \times 10^3}$	0.92

La figure (I.28, a,b) montre comment la progression de l'usure de l'outil pour les deux conditions de lubrification augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, c'est le facteur qui a le plus grand impact. Cela correspond à la théorie de la coupe des métaux, où l'on observe que l'usure de l'outil de coupe est moindre lors de l'usinage avec le MQL.

La mesure de l'usure en dépouille (VB) des plaquettes a été réalisée après usinage sur toute la longueur (100 mm) pour chaque combinaison des variables (avance, vitesse de coupe

et type de lubrification). Dans la figure (I.29.a,b), l'usure de l'outil de coupe sur la surface d'incidence est indiquée pour une vitesse de coupe de 200 m/min et une vitesse d'avance de 0,1 mm/tr pour l'usinage à sec et avec MQL, respectivement. On peut voir que l'insert qui a été utilisé avec MQL avait un meilleur comportement à l'usure. On observe également que l'amplitude de l'usure (VB) était inférieure dans le cas de l'usinage avec MQL. Dans le cas de l'usinage à sec, l'aspect de décollement de matière dans l'outil de coupe a également été identifié sur la surface d'attaque.

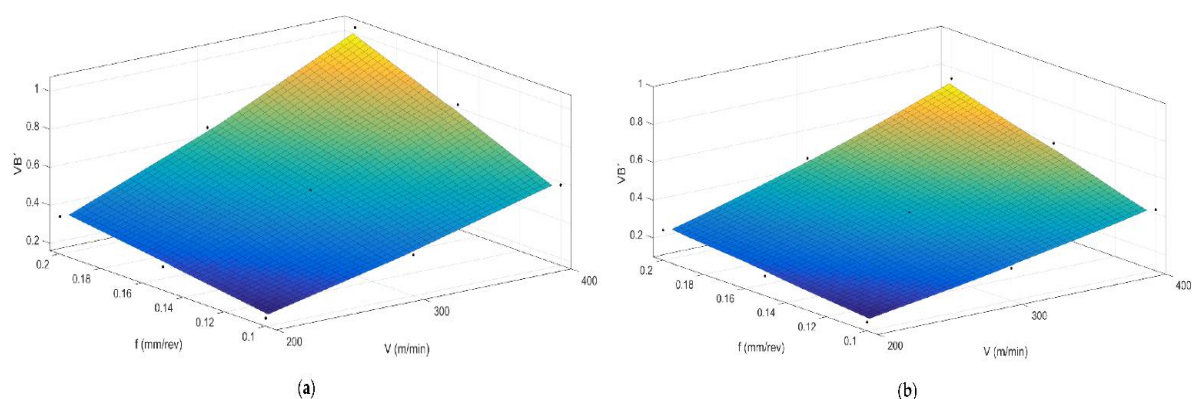
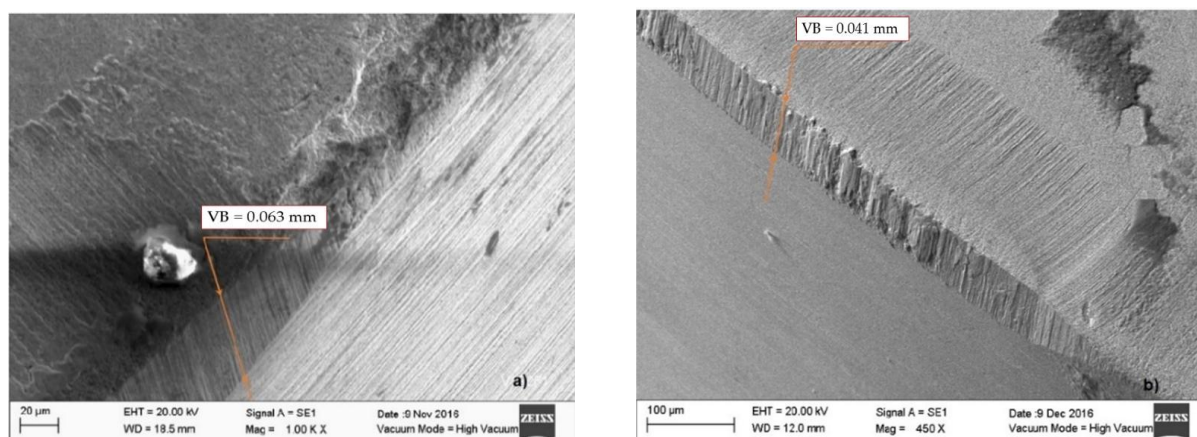


Figure I.28. Comportement de l'usure pour
a) usinage à sec et
b) l'usinage MQL (Minimum Quantité Lubrification).



a) à Sec

b) avec MQL.

Figure I.29. Usure de l'outil de coupe pour $V = 200$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr

I.10.3. Une étude comparative des performances des plaquettes de coupe en cermet et en carbure revêtu lors du tournage de l'acier inoxydable austénitique AISI 316L

L'objectif principal de l'étude de *Tougui et al. (2020) [23]* est d'étudier expérimentalement les effets des paramètres de coupe, y compris la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe sur les réponses tels que la surface rugosité et l'effort de coupe. Ensuite, les résultats expérimentaux ont été utilisés pour formuler des modèles mathématiques de prédiction basés sur RSM. Après cela, les modèles d'optimisation ont été développés en adoptant la simulation recuit (SA), algorithme génétique (GA) et fonction de désirabilité (DF) afin d'obtenir des combinaisons de paramètres de coupe optimaux. Ces les modèles sont censés aider les ingénieurs et les opérateurs en métallurgie industries de coupe pour un meilleur contrôle de la rugosité de surface et force de coupe lors du tournage en AISI 316L. De plus, l'évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage et de la surface topographie (3D) ont également été présentées.

La figure (I.30 a–b) montre les tracés 3D des réponses étudiées (Ra et Fz) par rapport à Vc, f et ap pour les deux inserts. Selon la Figure (I.30.a), les valeurs de Ra ont augmenté car l'avance a également augmenté de 0,08 à 0,16 mm/tr pour les deux Plaquettes GC 1525 et GC 1125. On peut discerner que cette augmentation des valeurs de Ra peut s'expliquer par la génération de rainures hélicoïdales produites par le mouvement relatif entre la pièce et l'outil. Dès que ces rainures étaient plus profondes et plus large, l'alimentation a pris des valeurs plus élevées. De plus, les valeurs de Fz augmentaient lors que ap et f augmentaient de 0,1 à 0,3 mm et de 0,08 à 0,16 mm/tr, respectivement, pour les deux inserts figure (I.30.b).

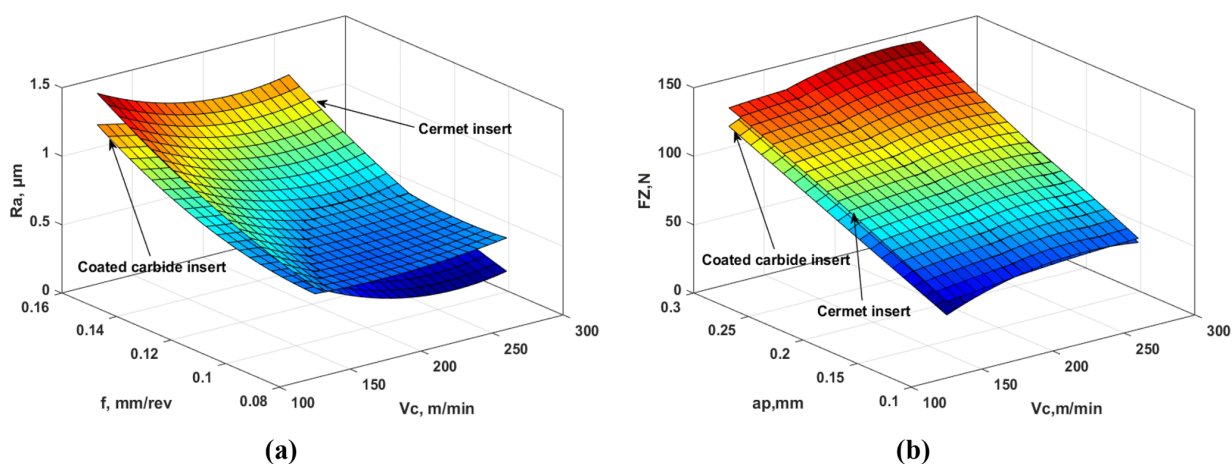


Figure I.30. Réponse de surface 3D pour
(a) Ra et (b) Fz pour le cermet (GC 1525) et le carbure revêtu (GC 1125)

Dans cette section, l'optimisation par les méthodes SA, GA et DF ont été employées en utilisant des modèles RSM (considérés comme la fonction objectif).

a) Optimisation mono-objective par la méthode SA

Quelques critères des paramètres de SA ont été testés à l'aide de MATLAB Optimization Toolbox 7.6. Le Tableau (I.3) présente les résultats d'optimisation SA pour Ra et Fz pour les deux inserts. Les régimes optimaux de paramètres de coupe pour les valeurs de Ra minimales proposés par SA sont : une vitesse de coupe de 214,293 m/min, une avance de 0,08 mm/tr et une profondeur de coupe de 0,198 mm pour la plaquette GC 1525. La vitesse de coupe de 177,588 m/min, avance de 0,08 mm/tr et profondeur de passe de 0,1 mm pour la plaquette GC 1125. Les paramètres de coupe optimaux pour les valeurs minimales de Fz ont été calculés pour une vitesse de coupe de 125 m/min, une avance de 0,08 mm/tr et une profondeur de coupe de 0,1 mm pour les deux plaquettes. Les meilleurs résultats pour le minimum Ra et Fz ont été obtenus à 0,3988 μm et 26,2491 N, respectivement, pour l'insert GC 1525, et à 0,5440 μm et 24,0642 N, respectivement, pour l'insert GC 1125.

Tableau I.3. Paramètres de coupe optimaux pour l'optimisation mono-objectif de Ra et Fz par SA

Réponses	Plaquettes de coupe	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	Valeur minimum
Ra (μm)	Cermet	214.293	0.08	0.198	0.3988
	Carbure revêtu	177.588	0.08	0.1	0.5440
Fz (N)	Cermet	125	0.08	0.1	24.0642
	Carbure revêtu	125	0.08	0.1	24.3405

b) Optimisation mono-objective par la méthode GA

MATLAB Optimization Toolbox 7.6 a également été utilisé avec certaines combinaisons de paramètres GA. Le Tableau (I.4). Répertorie les résultats d'optimisation GA pour Ra et Fz pour les deux inserts. Les ensembles optimaux de paramètres de coupe qui ont conduit à minimiser les valeurs Ra ont été déterminés comme la vitesse de coupe de 216,1 m/min, l'avance de 0,08 mm/tr et la profondeur de coupe de 0,198 mm pour la plaquette GC 1525 et comme la vitesse de coupe de 172,199 m/min, avance de 0,08 mm/tour et profondeur de coupe de 0,198 mm pour la plaquette GC 1125, alors que la vitesse de coupe de 125–260 m/min, l'avance de 0,08 mm/tour et la profondeur de coupe de 0,1 mm ont été adoptées pour des régimes de coupe qui ont conduit à minimiser les valeurs Fz pour les deux inserts. Les

résultats pour les valeurs minimales Ra et Fz ont été déterminés à 0,3987 μm et 24,0642 N, respectivement, pour l'insert GC1525 et à 0,5436 μm et 19,7918 N, respectivement pour l'insert GC1125.

Tableau I.4. Paramètres de coupe optimaux pour l'optimisation mono-objectif de Ra et Fz par GA

Réponses	Plaquettes de coupe	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Valeur minimum
Ra (μm)	Cermet	216.1	0.08	0.198	0.3987
	Carbure revêtu	172.199	0.08	0.1	0.5436
Fz (N)	Cermet	125	0.08	0.1	24.0642
	Carbure revêtu	260	0.08	0.1	19.7918

Dans ce contexte, l'optimum de Pareto aide l'utilisateur à trouver un compromis entre les différentes fonctions objectives (deux, dans ce cas) est illustré dans figure (I.31). Par conséquent, en utilisant le GA pour les deux fonctions objectives (Ra et Fz), 17 solutions optimales (étoiles violettes) ont été trouvées dans la plage considérée comme illustré dans (figure I.30).

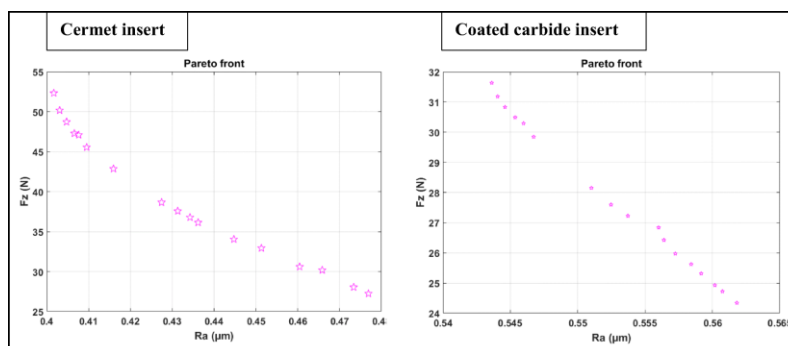


Figure. I.31. Diagrammes de front de Pareto pour les plaquettes de coupe en cermet (à gauche) et (à droite) en carbure revêtu

Aussi, dans cette étude, la fonction de désirabilité a été réalisée utilisant le logiciel Design-Expert (10) pour valider les solutions optimales décidées par optimisation multi-objectifs du cas GA. Ici, les paramètres de coupe (Vc, f, et ap) ont été maintenus dans la plage expérimentale. Le minimum Les valeurs Ra et Fz dérivées de DF étaient de 0,46 μm et 27,29 N, respectivement, dans le cas de GC 1525 insert et 0,56 μm et 24,31 N, respectivement, dans le cas du GC1125 insérer comme indiqué dans le Tableau (I.5).

Tableau I.5. Paramètres de coupe optimaux pour l'optimisation multi-objectif de Ra et Fz par GA

Plaquettes de coupe	Paramètres de coupe			Réponses		désirabilité
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	
Cermet	228.82	0.08	0.1	0.46	27.29	0.969
Carbure revêtu	125	0.08	0.1	0.56	24.31	0.904

c) Evolution de l'usure en dépouille en fonction d'usinage temps

Ainsi, pour comparer les performances du GC1525 et Plaquettes GC1125, il est impératif de quantifier l'usure (VB) qui a une valeur admissible de 0,3 mm pour l'opération de tournage selon la norme ISO 3685. Au-delà de cette valeur, l'usure s'accélère fortement ce qui induit la perte de performances de l'outil de coupe. Ce qui affecte négativement à la fois l'état de surface et la précision dimensionnelle. L'usure en dépouille a été mesurée par rapport au temps d'usinage sous une vitesse de coupe de 340 m/min, avance de 0,08 mm/tour et profondeur de passe de 0,2 mm pour les inserts GC1525 et GC1125 comme illustré à la figure (I.32). Les résultats ont montré que les valeurs de VB admissibles étaient atteintes après 30 min et 24 min de temps d'usinage pour Inserts GC1525 et GC 1125, respectivement. La figure (I.32) indique clairement que le VB augmentait rapidement à mesure que le temps d'usinage augmentait. Les durées de vie des outils ont été déterminées à 30 min et 24 min pour les plaquettes cermet (GC 1525) et carbure revêtu (GC 1125), respectivement.

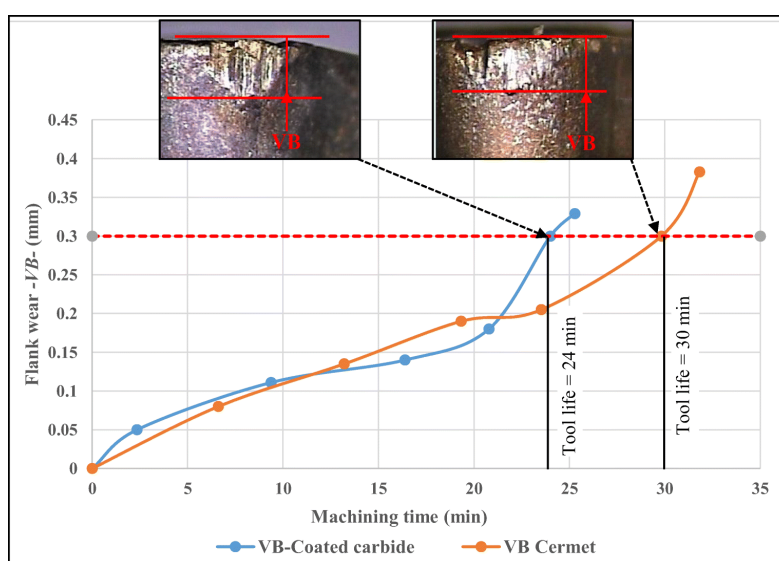


Figure I.32. Évolution de VB avec par rapport au temps d'usinage pour cermet (GC 1525) et revêtu plaquettes de coupe en carbure (GC1125) à $V_c = 340$ m/min, $f = 0,8$ mm/tr, et $a_p = 0,2$ mm

I.10.4. Modélisation et optimisation multi-objective des paramètres de coupe lors du tournage de l'AISI 316L par RSM et de l'approche de la fonction de désirabilité DF

Dans l'étude de Benkhelifa et al. (2022) les effets de différents paramètres d'usinage tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de coupe (a_p) sur la rugosité de surface et l'usure de l'outil en tournage du matériau AISI 316L sont présentés. Les expériences d'usinage ont été réalisées à sec sur un tour conventionnel avec plaquette carbure revêtu TP2501. Des essais expérimentaux étaient réalisés selon un plan L27 Taguchi. Les méthodes des surfaces de réponse (RSM) et de l'analyse de la variance (ANOVA) ont été appliquées pour déterminer et classer les paramètres de coupe influant la rugosité de surface et l'usure de l'outil et pour en déduire les modèles mathématiques à utiliser dans l'étape d'optimisation lors de la mise en œuvre de la fonction de désirabilité (DF). De plus, Afin de localiser les défauts de surface dans les profilés usinés, une analyse topographique 3D basée sur l'histogramme des pics et vallées (courbe d'Abbott-Firestone) a été utilisée. Les surfaces de réponse tridimensionnelles pour l'usure de l'outil (VB) sont illustrées à la figure (I.33) en termes de V_c et f pour trois valeurs de a_p (0,15, 0,3 et 0,45 mm) (Figure I.33. a), V_c et a_p pour trois valeurs de f (0,12, 0,18 et 0,24 mm/tr) figure (I.33.b). Les figures (I.34 et I.35) représentent les topographies 3D des surfaces usinées (en AISI 316L) à trois valeurs d'avance et la vitesse de coupe, respectivement.

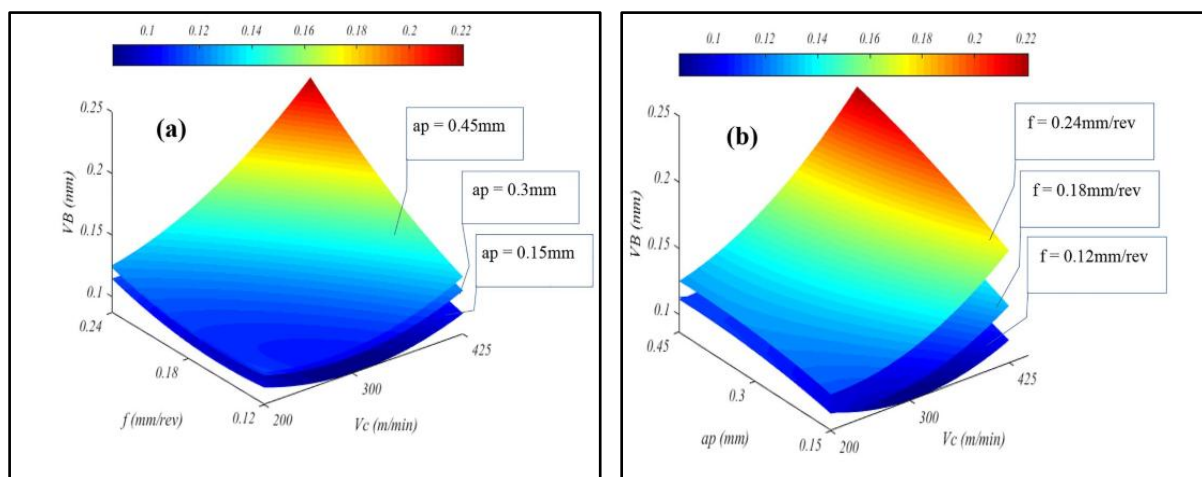


Figure I.33. Graphiques 3D de Vb

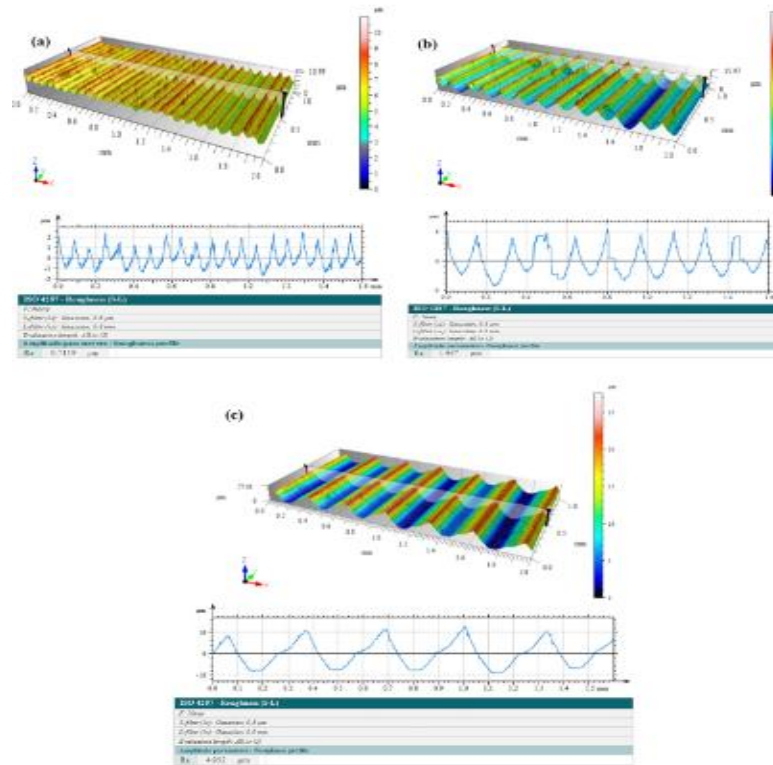


Figure I.34. Topographie 3D lors du tournage avec
 a) $f=0.12\text{mm/tr}$, b) $f=15\text{ mm/tr}$
 c) $f=0.24\text{ mm/tr}$ et $V_c=300\text{m/min}$ et $a_p=0.30\text{mm}$.

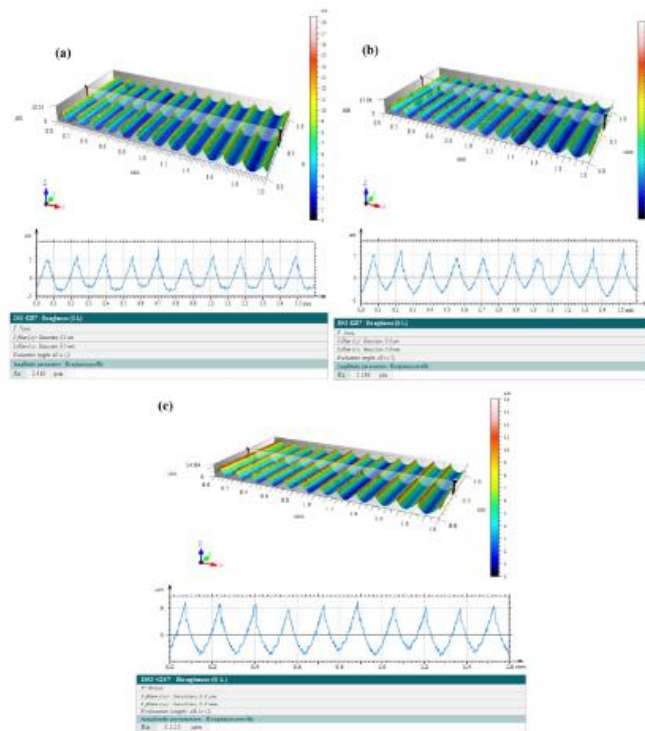


Figure I.35. Topographies lors du tournage pour
 a) $V_c=200\text{m/min}$, b) $V_c=300\text{m/min}$
 c) $V_c=425\text{ mm/min}$ et $f=0.18\text{mm/tr}$ et $a_p=0.30\text{mm}$.

Les résultats ont révélé aussi que la rugosité de surface est largement influencée par l'avance (avec une contribution de 79,61 %), suivi par la vitesse de coupe et la profondeur de passe (avec une contribution de 30,47% et 26,369%, respectivement).

I.11. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases théoriques nécessaires à la compréhension de notre travail. La première partie concerne un rappel des bases scientifiques et les différents concepts et définition de l'usinabilité, de la coupe des métaux, la rugosité...etc. La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à une revue de l'état de l'art concernant l'usinage dur et l'application de plusieurs méthodes d'optimisation afin d'améliorer les paramètres de performance.

Chapitre II

Méthodes et essais

II.1. Introduction

Dans ce qui suit nous listons les principaux équipements et matériaux exploités pour l'exécution et la réalisation de nos expériences, aussi nous présenterons le plan choisi ainsi que les conditions de réalisation.

II.2. Matériels utilisés

Les essais d'usinage sont réalisés sur un tour universel de type SN40C au sein du Laboratoire (LMS) de génie mécanique, université 08 Mai 1945 de Guelma.

II.2.1. Machine-outil

La machine-outil qui a servi à la réalisation de nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN40C, de puissance sur la broche égale à 6.6 kW figure (II-1). Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont entre (22.5 à 2000) tr/min. Les avances disponibles pour cette machine (0.08 à 0.8) mm/tr.



Figure II.1. Tour à charioter et à fileter modèle SN40

Le tour modèle SN40 est équipé d'un variateur de vitesse figure (II.2), il permet de sélectionner n'importe nombre de tour. La figure (II.3) illustre un capteur de vitesse, il permet d'indiquer le nombre de tour en temps réel lors de l'utilisation de variateur de vitesse.



Figure II.2. Variateur de vitesse



Figure II.3. Capteur de vitesse

II.2.2. Matériau utilisé

L'acier inoxydable AISI 316L est un acier inoxydable austénitique modifié à très faible teneur en carbone de la série Cr-Ni-Mo à base d'AISI 316. Il est recommandé pour les pièces qui ne peuvent pas être recuites après soudage dans certains environnements corrosifs. L'ajout de molybdène peut fournir une résistance aux piqûres dans l'acide phosphorique et l'acide acétique et des solutions diluées de chlorure et une résistance à la corrosion dans l'acide sulfureux. Le SS316L résiste aux précipitations de carbure dans la plage de température de 425 à 870 °C (800 à 1600 °F), de sorte qu'un soudage normal peut être effectué sans réduire la résistance à la corrosion. Cependant, lorsqu'il est chauffé et maintenu dans la plage de température de sensibilisation pendant une longue période pendant l'utilisation, une grande quantité de carbures précipitera, il est donc généralement recommandé de l'utiliser en dessous de 425 °C (800 °F) [24].

Pour les différents essais réalisés nous avons usiné une éprouvette de 70 mm de diamètre ($\varnothing = 70$ mm) et de 270 mm de longueur ($L = 270$ mm), voir figure (II.4.).



Figure II.4. Epreuve utilisée

Tableau II.1. Composition chimique d'éprouvette utilisée

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cr %	Ni %	Mo %
0.03	1.7	0.4	0	0	17	9	2

Caractéristiques mécaniques (à 20°C) :

Etat : Recuit

Densité ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) : 8.00

Résistance en traction (MPa) : 600

Module de Young (GPa) : 200

Allongement en rupture (%) : 46

Caractéristiques électriques (à 20°C) :

Conductivité ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$). 10^6 : 1.33

Résistivité ($\Omega\cdot\text{m}$). 10^{-8} : 75

Caractéristiques thermiques :

Température de fusion (°C) : 1650

Température d'utilisation max (°C) : 450

Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) : 15

II.2.3. Outils de coupe utilisés

Pour la réalisation des essais, toutes les opérations de tournage ont été effectuées avec un outil en carbure revêtu. figure (II.5)



Figure II.5. la plaquette de coupe utilisée.

II.2.4. Porte-plaquette

Les plaquettes utilisées dans notre étude, sont fixées mécaniquement par trou central sur un porte-plaquette dont la désignation est la suivante : PSBNR2525 M12 figure (II.6).



Figure II.6. Porte plaquette avec plaquette montée.

II.2.5. Matériels de mesure

Pour les différentes mesures des paramètres de sortie, nous avons utilisé les instruments de mesure suivant ; Un Rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.

- Un dynamomètre KISTLER 9257B pour la mesure des efforts de coupe.
- Un Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250).
- Un Pyromètre à infrarouge pour mesurer la température

II.2.5.1. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Lors de nos expériences nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface. Les critères de la rugosité de surface (R_a , R_z , et R_q) ont été mesurés instantanément après chaque passage de l'outil (essai) au moyen d'un appareil de rugosité Mitutoyo SurfTest SJ-210 muni d'une pointe en diamant de $5 \mu\text{m}$ et se déplaçant linéairement sur la surface usinée. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision,

les mesures de la rugosité ont été effectuées directement sur la pièce à trois reprises à 120 degrés sans avoir recours à la démonter figure (II.7)

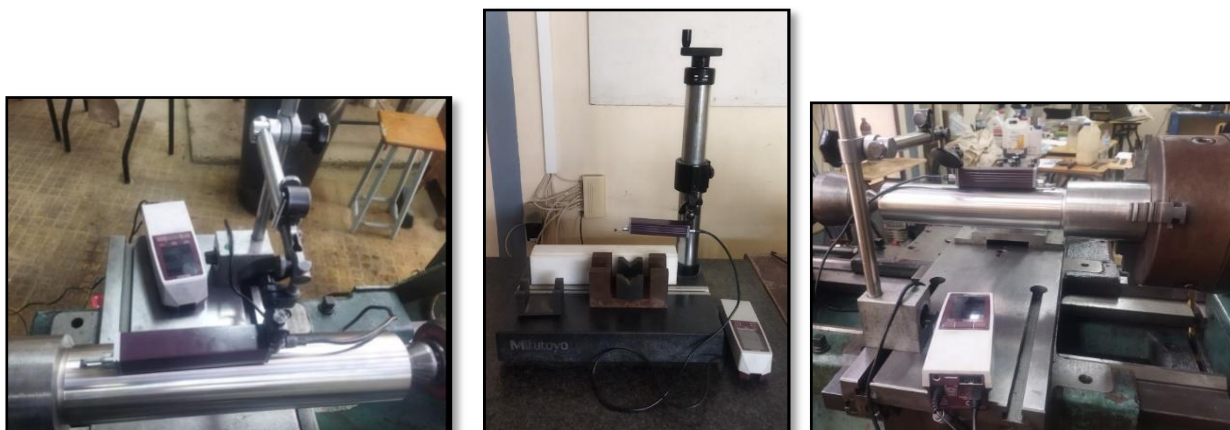


Figure II.7. Rugosimètre 2D (Surftest SJ-210)

II.2.5.2. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe (Plateforme kistler)

On a utilisé un dynamomètre (KISTLER9257 B) figure (II.8) pour mesurer l'amplitude des efforts de coupes, il est parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe, il comporte plusieurs éléments auxquels on cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel DYNOWARE et enfin une imprimante pour tracer les courbes.



Figure II.8. Dynamomètre (KISTLER9257 B)

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil a le mouvement de translation. Ce dernier est monté sur la plate-forme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation. La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de

quatre capteurs en quartz. Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes figure (II.9).

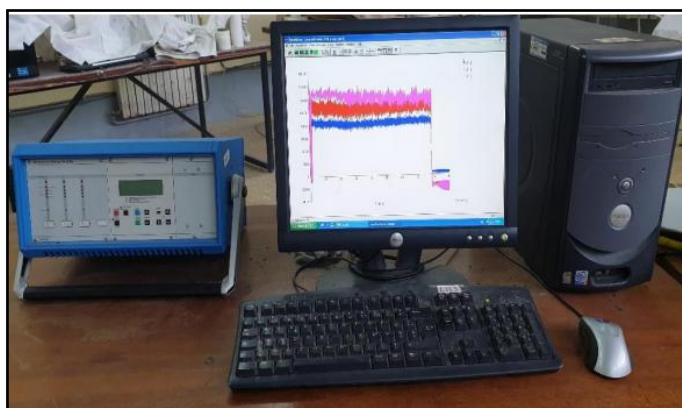


Figure II.9. PC piloté par le logiciel (DYNOWARE)

II.2.5.3. Microscope pour la mesure de l'usure (Visuel Gage 250)

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille VB est un dispositif binoculaire de marque (Visuel Gage 250), avec un ordinateur équipé d'un logiciel Visual Gage 2.2.0. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure figure (II.10). Notons aussi, qu'une nouvelle arête de coupe est utilisée pour chaque essai



Figure II.10. Microscope pour la mesure de l'usure VB (Visuel Gage 250)

II.2.5.4. Mesure de la température de coupe

Pour mesurer la température dans la zone de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle CAUTION 9U0401 figure (II.11). Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il concentre l'énergie infrarouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (maximale, moyenne et minimale) qui seront affichées sur l'écran digital en degrés Celsius ou Fahrenheit. Une sortie analogique/digitale permet le transfert des données enregistrées. Le pyromètre à infrarouge CAUTION 9U0401 présente les caractéristiques suivantes :

- Gamme de mesure : -40 °C à 550 °C (-40°F à 1022 °F).
- Gamme spectrale : 8 à 14 microns.
- Précision : $\pm 1 \%$ ou $\pm 1 \text{ °C}$ (2 °F).
- Temps de réponse (95 %) : 500 ms.
- Visée : Laser mono point.



Figure II.11. Pyromètre à infrarouge.

II.2.6. Système avec un minimum de quantité de lubrification (MQL)

La figure (II.12) présente l'ensemble des équipements utilisés lors de lubrification avec le système MQL,

- La boîte contrôle de système MQL, elle comprend les éléments suivants: afficheur de débit (aire et huile), la pression du réseau de l'air pulvérisé, la pression du réservoir, réglage air pulvérisation et réglage pression produit.
- Compresseur
- Le réservoir d'huile et ses composants (Réservoir de 24 L et débitmètre).



Figure II.12. Système MQL

II.2.7. Autres équipements utilisés

- Un appareil photo numérique pour prendre les photos.
- Un pied à coulisse pour mesurer les dimensions de la pièce.
- Logiciels Minitab18 et Design-Expert 10

II.3. Planification des expériences

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe à savoir; les éléments du régime de coupe V_c , f et a_p , la géométrie de la partie active de l'outil (τ , α , γ , λ , β , ε etc...), ainsi que les conditions de coupe (rigidité de la machine et lubrification). Ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, les efforts de coupe, l'usure (durée de vie de l'outil), la rugosité et la température de coupe, représentent les paramètres de sortie.

En ce qui concerne notre étude plusieurs points apparaissent importants à traiter (la géométrie de l'outil de coupe, le matériau de coupe, lubrification et les paramètres du régime de coupe). Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution de la rugosité R_a , R_q et R_z , la composante F_z de l'effort de coupe l'usure de l'outil de coupe VB et le taux d'enlèvement de matière MRR .

II.3.1. Méthodologie de recherche

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe. La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Considérant $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètre de sortie. L'influence d'un ou plusieurs facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre Y [25], peut être obtenue en utilisant la méthode suivante : "Méthode multifactorielle".

II.3.2. Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y_j . C'est une relation qui a la forme :

$$Y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (\text{II.1})$$

Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

$$N = q k \quad (\text{II.2})$$

Où :

N : Nombre d'essai;

q : Nombre de niveau de variation des facteurs de base;

k : Nombre de facteurs de base.

Dans notre étude, deux séries d'essais ont été réalisées. La première série est un plan réduit selon la table orthogonale de Taguchi. En effet, nous avons trois facteurs ($k = 3$) et chaque facteur de base à trois niveaux de variation ($q = 3$). Le plan complet contient 27 essais ($N = 27$). Pour diminuer le nombre d'essais sans pour autant diminuer la précision des résultats nous avons opté pour le plan **L9** à 9 essais. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le Tableau (II.2)

Tableau II.2. Plan Taguchi L9.

N° Essai	Facteurs					
	Vc (m/min)		ap (mm)		f (mm/tr)	
	A		B		C	
1	1	250	1	0.1	1	0.08
2			2	0.2	2	0.12
3			3	0.3	3	0.16
4	2	320	1	0.1	2	0.12
5			2	0.2	3	0.16
6			3	0.3	1	0.08
7	3	390	1	0.1	3	0.16
8			2	0.2	1	0.08
9			3	0.3	2	0.12

Une seconde série d'essais paramétriques, a été réalisée pour investiguées, les deux critères de rugosité Rq et Rz, l'effort Fz l'usure VB et le mode de lubrification. Pour cela, trois valeurs de la vitesse de coupe ont été choisies et deux modes de lubrification (Sec et MQL). Les autres paramètres de coupe sont maintenus constants f et ap.

II.3.3. Débit d'enlèvement de copeau (MRR)

Le débit d'enlèvement de copeau permet de mesurer la productivité d'un processus d'usinage. L'on applique le principe selon lequel la cadence de base de la machine diminue à mesure de l'augmentation du débit d'enlèvement de copeaux.

Le débit d'enlèvement de copeaux **MMR** désigne la quantité (volume) de copeaux enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante :

$$MRR = Vc \times ap \times f \quad (II.3)$$

MRR : Débit d'enlèvement de copeaux (cm³/min).

Vc : Vitesse de coupe (m/min).

f : Avance par tour (mm/tr)

ap : Profondeur de coupe (mm)

II.4. Conclusion Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. Les propriétés techniques des éprouvettes et les caractéristiques de l'outil de coupe ont été définies. Les instruments de mesure utilisés, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

Chapitre III

*Etude de l'usinage et
modélisation lors des
paramètres technologiques*

III.1. Introduction

Ce chapitre est divisé en deux parties. Une première partie est consacrée à l'étude de l'évolution, à différentes vitesses de coupe, des différents phénomènes qui apparaissent dans la zone de coupe tels que : les critères de rugosité de surface R_q , R_z , la composante de l'effort de coupe F_z , le volume du copeau enlevé MRR et l'usure de l'outil de coupe, pour différentes conditions de lubrification, à savoir, l'usinage à SEC et avec MQL, lors du chariotage de l'acier inoxydable AISI 316L par un carbure métallique avec revêtement CVD (GC4215).

La seconde partie est consacré à la présentation des résultats de l'étude expérimentale (suivant un plan d'expériences L9) afin d'évaluer l'influence des conditions de coupe, à savoir : vitesse de coupe V_c , l'avance par tour f et la profondeur de passe a_p , sur les réponses suivantes : rugosité de surface R_q et R_z , effort de coupe tangentiel F_z , l'usure d'outil VB , taux d'enlèvement de copeaux MRR . La relation qualitative et quantitative entre les paramètres d'entrée et les paramètres technologiques de sortie est exprimée à travers des modèles mathématiques extraits de la méthodologie de surface de réponse (MSR). L'utilisation du logiciel Design-Expert 10 nous a permis de déterminer les modèles mathématiques et de générer une analyse de variance ANOVA, qui à son tour nous a permis d'analyser et de quantifier la contribution en pourcentage des facteurs, des interactions sur les paramètres étudiés. De plus, ces données expérimentales ont permis de calculer certains paramètres technologiques non directement mesurables lors des essais, et qui ont fait l'objet d'un traitement similaire.

III.2. Etude de l'usinabilité de l'acier inoxydable AISI 316L

Dans ce chapitre, une série d'essais paramétriques, a été réalisée pour investiguer l'effet de la lubrification et de la vitesse de coupe sur les deux critères de rugosité R_q et R_z , l'effort tangentiel F_z ainsi que l'usure en dépouille VB . Pour cela, trois valeurs de la vitesse de coupe ont été choisies et deux modes de lubrification (SEC et MQL). Les autres paramètres de coupe sont maintenus constants ($f = 0,12$ mm/tr et $a_p = 0,3$ mm). Il est à noter aussi que la longueur usinée est la même pour tous les essais, à savoir $L_c = 270$ mm.

Sur le Tableau (III.1) sont exposées les valeurs des paramètres du régime de coupe et celles des réponses considérées.

Tableau III.1. Evolution des paramètres en fonction des conditions d'usinage.

Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Rq (μm)		Rz (μm)		Fz (N)		VB (mm)	
			SEC	MQL	SEC	MQL	SEC	MQL	SEC	MQL
a - 250	0,12	0,3	1,451	0,849	6,361	3,880	110,91	104,14	0,125	0,113
b - 300	0,12	0,3	0,833	0,946	4,357	4,435	109,57	95,90	0,122	0,109
c - 350	0,12	0,3	0,887	0,869	4,171	3,870	103,29	78,32	0,055	0,054

III.2.1. Effet des conditions de coupe sur les critères de la rugosité de surface (Rq et Rz)

Afin de caractériser la qualité de la surface usinée, les critères de la rugosité retenus dans cette étude sont la rugosité moyenne quadratique Rq et la rugosité en dix points Rz. Les figures (III.1.a et b) présentent l'évolution des deux critères de rugosité Rq et Rz lors de l'usinage à SEC et avec lubrification MQL. La vitesse de coupe Vc, l'avance f et la profondeur de passe ap sont considérées constantes ($f = 0,12$ mm/tr, $ap = 0,3$ mm et $Vc = 250$ m/min). On constate que le mode de la lubrification a une grande influence sur l'état de surface usinée et que cette influence varie selon les valeurs des vitesses de coupe utilisées figure (III.2 et III.3). En effet, à petite vitesse ($Vc = 250$ m/min) l'utilisation de la lubrification MQL contribue à améliorer l'état de surface ($Rq_{SEC} = 1,451 \mu\text{m}$, $Rq_{MQL} = 0,849 \mu\text{m}$) et ($Rz_{SEC} = 6,361 \mu\text{m}$, $Rz_{MQL} = 3,880 \mu\text{m}$).

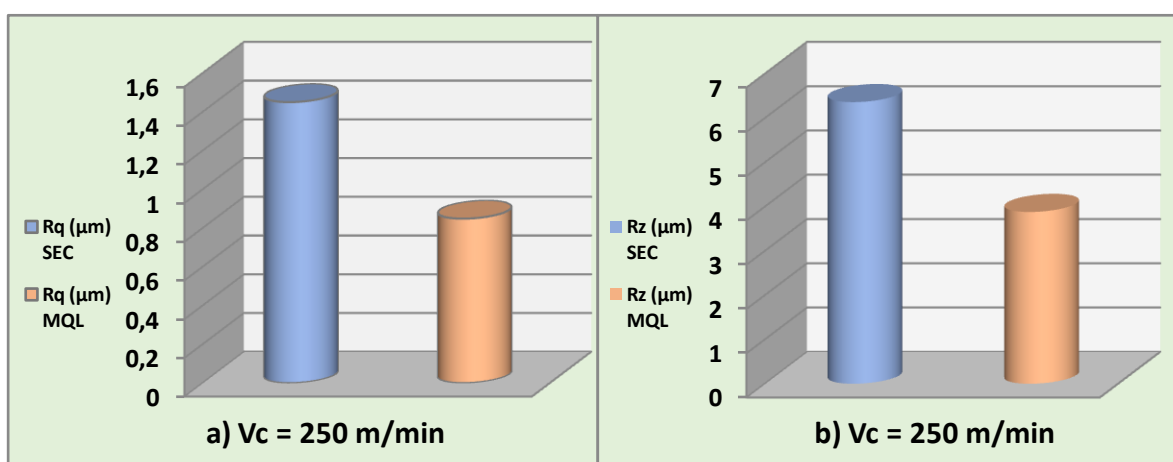


Figure III.1. Evolution des critères de la rugosité de surface (Rq et Rz) avec le mode de lubrification à petites vitesses de coupe ($Vc = 250$ m/min).

Les figures (III.2.a et b) présentent l'évolution des deux critères de rugosité Rq et Rz, lors de l'usinage à sec ou avec lubrification MQL, avec une vitesse de coupe ($Vc = 300$ m/min).

On constate Tableau (III.1) qu'à cette vitesse de coupe, l'utilisation de la lubrification MQL ne contribue pas à l'amélioration de l'état de surface par rapport à l'usinage à SEC ($Rq_{SEC} = 0,833 \mu\text{m}$, $Rq_{MQL} = 0,946 \mu\text{m}$) et ($Rz_{SEC} = 4,357 \mu\text{m}$, $Rz_{MQL} = 4,435 \mu\text{m}$).

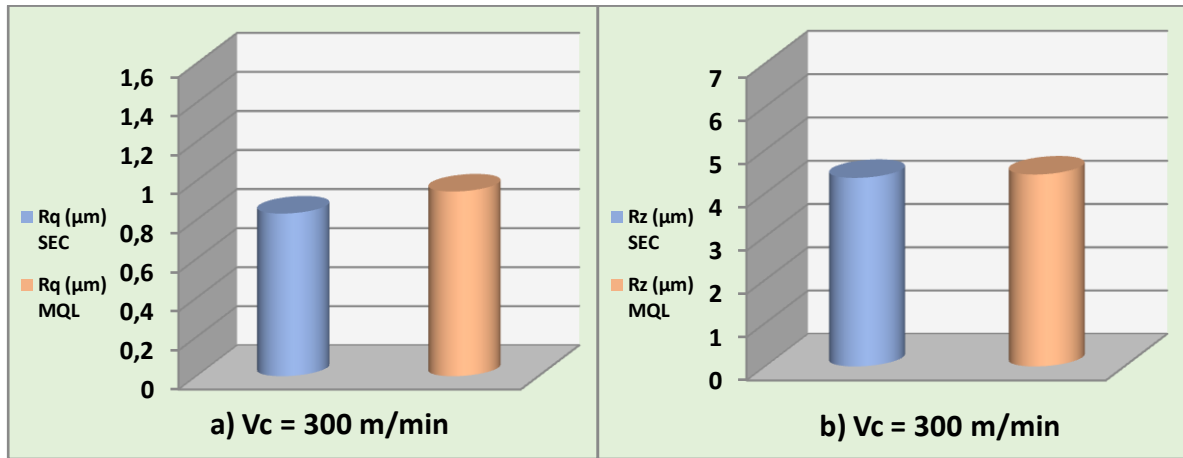


Figure III.2. Evolution des critères de la rugosité de surface (Rq et Rz) avec le mode de lubrification vitesse de coupe ($V_c = 300 \text{ m/min}$).

Les figures (III.3.a et b) montrent l'évolution des deux critères de rugosité Rq et Rz, lors de l'usinage à SEC et avec lubrification MQL. La vitesse de coupe V_c , l'avance f et la profondeur de passe a_p sont considérées constantes ($f = 0,12 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$ et $V_c = 300 \text{ m/min}$). On note que lorsque la vitesse de coupe est égale à ($V_c = 350 \text{ m/min}$), les valeurs de rugosités sont très proches ($Rq_{SEC} = 0,887 \mu\text{m}$, $Rq_{MQL} = 0,869 \mu\text{m}$) et ($Rz_{SEC} = 4,171 \mu\text{m}$, $Rz_{MQL} = 3,870 \mu\text{m}$).

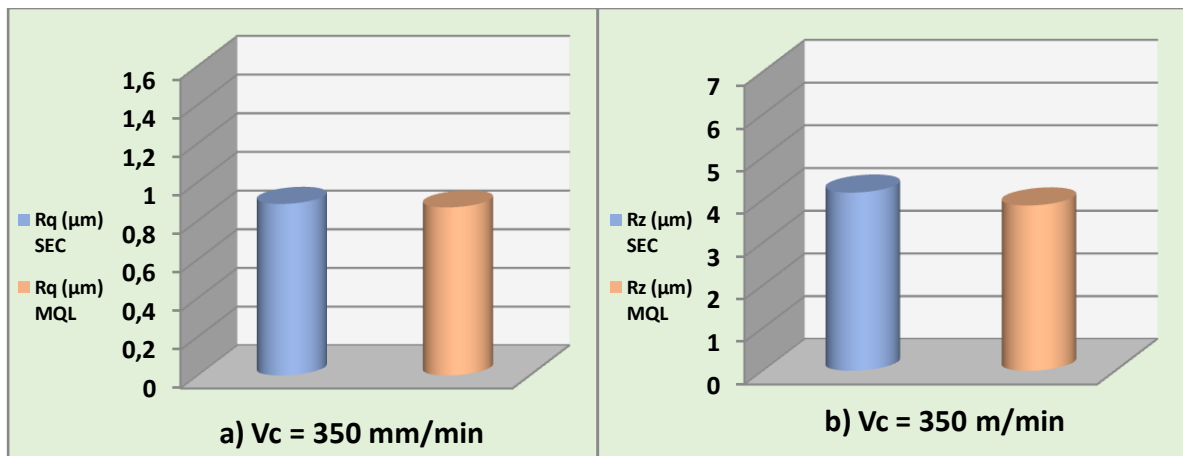


Figure III.3. Evolution des critères de la rugosité de surface (Rq et Rz) avec le mode de lubrification vitesse de coupe ($V_c = 350 \text{ m/min}$).

III.2.2. Effet des conditions de coupe sur l'effort tangentiel F_z (N)

Les figures (III.4.a-c) montrent l'évolution de l'effort transversal F_z en fonction du mode de lubrification pour différentes vitesses de coupe. La vitesse de coupe V_c , l'avance f et la profondeur de passe a_p sont considérées constantes ($f = 0,12$ mm/tr, $a_p = 0,3$ mm et $V_c = 300$ m/min). On note que pour les trois valeurs de la vitesse de coupe l'effort transversal F_z , est meilleur lors de l'usinage avec la lubrification MQL. En effet, pour $V_c = 250$ m/min, F_z à SEC est égal à 110,91 N et avec la lubrification MQL, F_z est égal à 104,14 N. Pour, $V_c = 300$ m/min, F_z à SEC est égal à 109,57 N et avec la lubrification MQL, F_z est égal à 95,90 N. en fin, pour $V_c = 350$ m/min, F_z à SEC est égal à 103,29 N et avec la lubrification MQL, F_z est égal à 78,32 N.

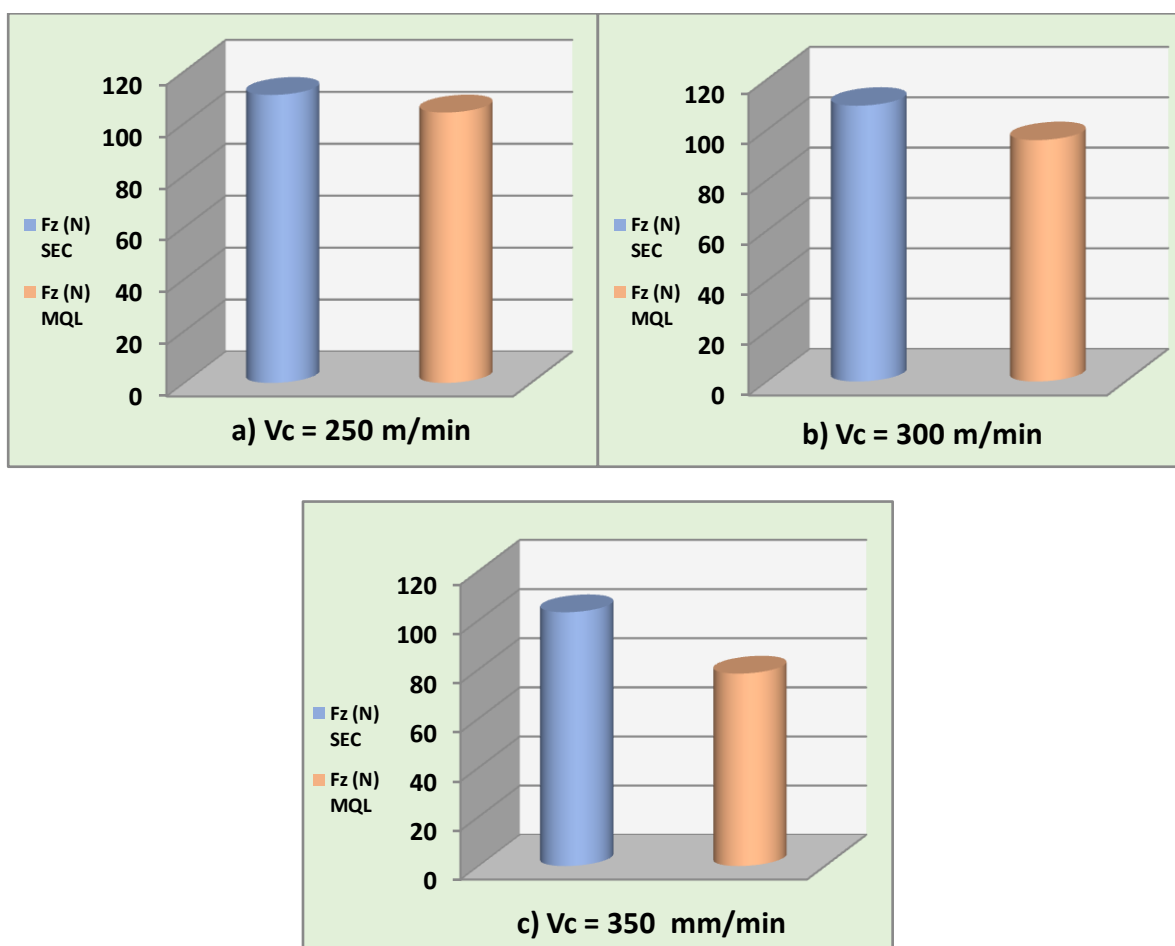


Figure III.4. Evolution de l'effort tangentiel (F_z) en fonction en fonction du mode de lubrification pour différentes valeurs de (V_c).

III.2.3. Effet des conditions de coupe sur l'usure de l'outil VB (mm)

Les figures (III 5. a-c) montrent l'évolution de l'usure en dépouille de l'outil VB en fonction de la vitesse de coupe, lors d'un usinage à SEC et avec lubrification MQL. La vitesse de coupe V_c , l'avance f et la profondeur de passe a_p sont considérées constantes ($f = 0,12$ mm/tr, $a_p = 0,3$ mm et $V_c = 300$ m/min).

L'analyse des résultats montre qu'une augmentation de la vitesse de coupe V_c entraîne une diminution de la largeur de la bande d'usure de l'outil VB, lors d'un usinage à SEC et avec une lubrification MQL. D'autre part, l'utilisation de la lubrification MQL contribue à la diminution de l'usure VB pour les petites valeurs de la vitesse de coupe ($V_c = 250$ m/min et $V_c = 300$ m/min). Par contre, pour la vitesse de coupe $V_c = 350$ m/min l'effet de la lubrification n'est pas visible. En effet, à $V_c = 250$ m/min ($VB_{SEC} = 0,125$ mm, $VB_{MQL} = 0,113$ mm), à $V_c = 300$ m/min ($VB_{SEC} = 0,122$ mm, $VB_{MQL} = 0,109$ mm) et $V_c = 350$ m/min ($VB_{SEC} = 0,055$ mm, $VB_{MQL} = 0,054$ mm)

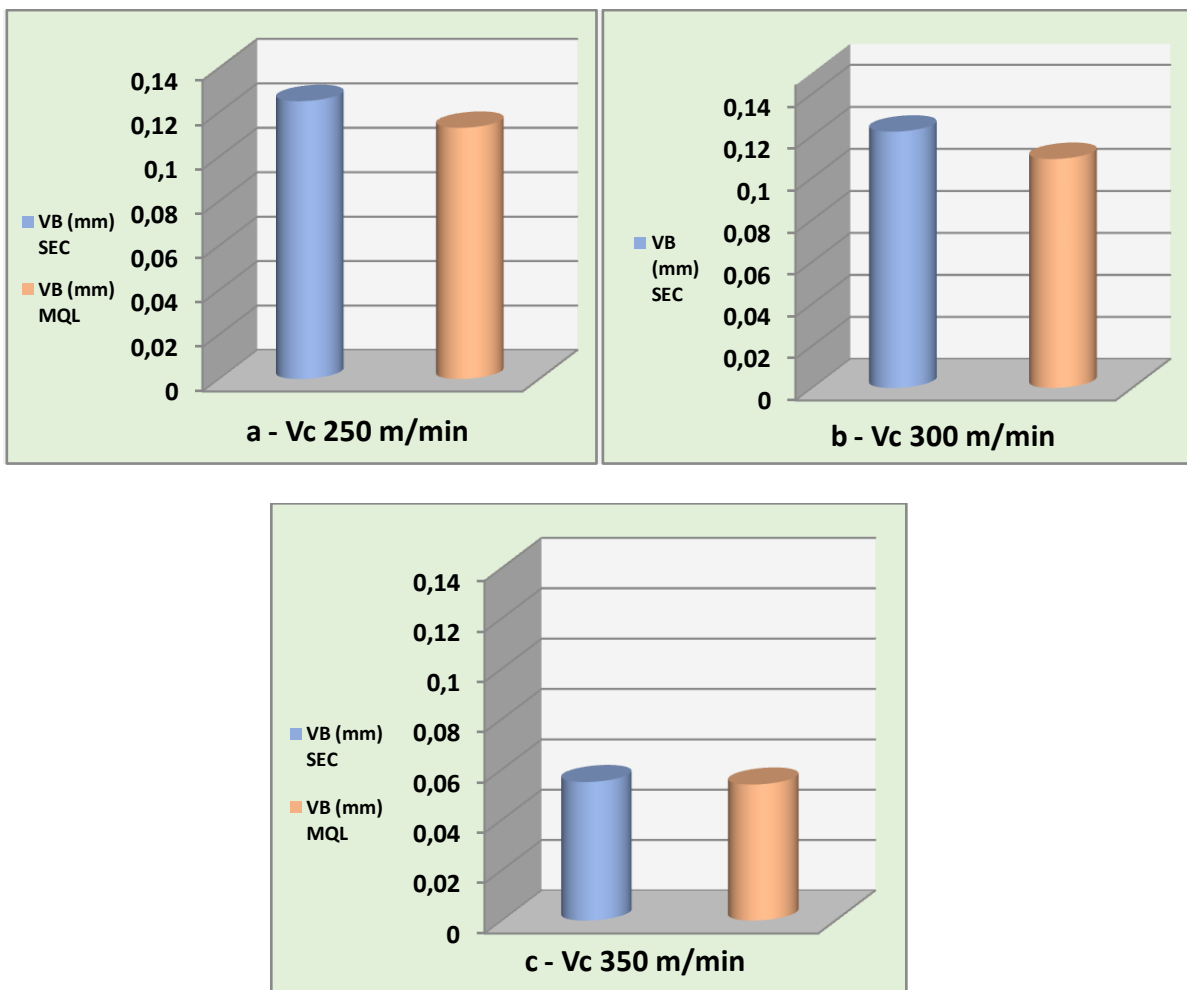


Figure III.5. Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction en fonction du mode de lubrification pour différentes valeurs de (V_c).

III.3. Modélisation de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 316L

Le Tableau (III.2), présente les résultats expérimentaux de la réalisation du plan L9. Les valeurs des paramètres de réponse, à savoir la rugosité de la surface usinée Ra, la composante tangentielle de l'effort de coupe Fz, l'usure d'outil VB et le débit de copeaux MRR sont présentées dans le Tableau (III.1). Il est à noter que Ra, VB et Fz sont mesurés directement pendant les expérimentations, alors que le MRR est calculé par l'équation (III. 1) [26].

$$\text{MRR} = V_c \times f \times a_p \quad (\text{III. 1})$$

Tableau III.2. Résultats expérimentaux

Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	tc (min)	Ra (µm)	Fz (N)	VB (mm)	MRR (cm ³ /min)
250	0.08	0.1	5	0.522	38.47	0.047	2.00
250	0.12	0.2	10	0.699	77.00	0.069	6.00
250	0.16	0.3	15	2.574	143.75	0.154	12.00
320	0.08	0.2	15	1.881	140.54	0.086	5.12
320	0.12	0.3	5	0.673	103.12	0.064	11.52
320	0.16	0.1	10	1.126	60.12	0.080	5.12
390	0.08	0.3	10	0.755	86.81	0.100	9.36
390	0.12	0.1	15	3.128	56.34	0.162	4.68
390	0.16	0.2	5	1.455	93.28	0.098	12.48

Les essais ont été planifiés suivant un plan d'expériences de Taguchi L9 (3⁴) avec 4 facteurs à 3 niveaux chacun.

L'analyse des résultats expérimentaux portés au Tableau (III.2) montre que la rugosité de surface Ra est enregistrée dans l'intervalle [0.522 et 3.128] µm ; l'effort tangentiel Fz varie entre 38.47 et 143.75 N, l'usure d'outil (VB) [0.047 et 0.162] mm, nous remarquons aussi que les valeurs du volume de copeaux enlevé MRR varient dans l'intervalle [2.00 et 12.48] cm³/min.

III.3.1. Résultats de L'ANOVA et modélisation de Ra

III.3.1.1. Effet des paramètres de procédé sur Ra

La figure (III.6) présente les droites des effets principaux des éléments du régime de coupe considérés sur le critère de rugosité Ra.

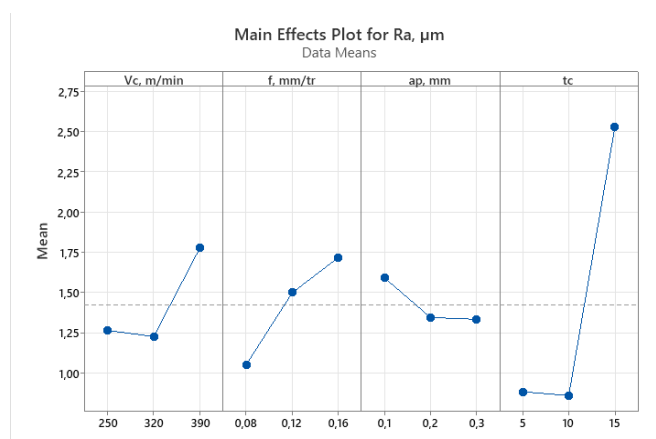


Figure III.6. Diagramme des effets principaux pour Ra

Sur cette figure, on remarque que le temps de coupe t_c affecte fortement la rugosité Ra vu qu'elle possède la plus grande pente. Le deuxième facteur qui influence Ra, c'est la vitesse de coupe V_c suivie par l'avance f , suivie par la profondeur de passe a_p . On peut voir que l'augmentation le temps de d'usinage t_c induit une élévation de Ra, par contre, l'élévation de V_c contribue à la diminution de Ra.

Le Tableau (III.3) montre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface Ra. L'analyse des résultats montre que le temps de coupe t_c a une influence significative sur la rugosité de surface Ra vient en premier avec une contribution de 58,99%, suivi par l'avance f , sa contribution est de 9,67%. Suivi par les interactions ($f * a_p$, $V_c * f$, $V_c * a_p$) ont les contributions (9,25 %, 7,70 % et 6,89 %) respectivement, suivie par la vitesse de coupe V_c avec une contribution de 5,77%. Enfin, la profondeur de passe a_p n'est pas significative car sa contribution sur la rugosité Ra est aussi faible que 1,45 %.

Tableau III.3. Analyse de la variance pour Ra

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Valeur	P-Valeur
Model	7	6,85650	99,72%	6,85650	0,97950	51,50	0,107
Vc	1	0,39681	5,77%	1,02993	1,02993	54,15	0,086
f	1	0,66467	9,67%	0,05533	0,05533	2,91	0,338
ap	1	0,09985	1,45%	0,07419	0,07419	3,90	0,298
tc	1	4,05575	58,99%	0,29803	0,29803	15,67	0,158
Vc * f	1	0,52926	7,70%	0,01536	0,01536	0,81	0,534
Vc * ap	1	0,47402	6,89%	0,05345	0,05345	2,81	0,342
f * ap	1	0,63616	9,25%	0,63616	0,63616	33,45	0,109
Erreur	1	0,01902	0,28%	0,01902	0,01902		
Total	8	6,87552	100,00%				

III.3.1.2. Equation de Régression de Ra

L'équation III.2 présente le modèle mathématique de la rugosité moyenne arithmétique (Ra) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

$$Ra = -3,1 + 0,0246 Vc - 13,8 f - 10,4 ap + 0,1179 tc - 0,0580 Vc * f - 0,0432 Vc * ap + 184,6 f * ap \quad (\text{III.2})$$

$$R^2 = 99,72\%$$

La vérification du modèle a été effectuée en se basant sur l'analyse des valeurs de l'erreur du modèle développé. Sur la figure (III.7) on constate que les points de Ra-prévue se rapprochent de la droite à 45° donc des valeurs expérimentales de Ra.

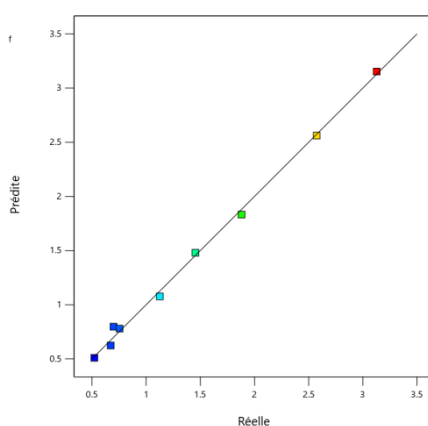
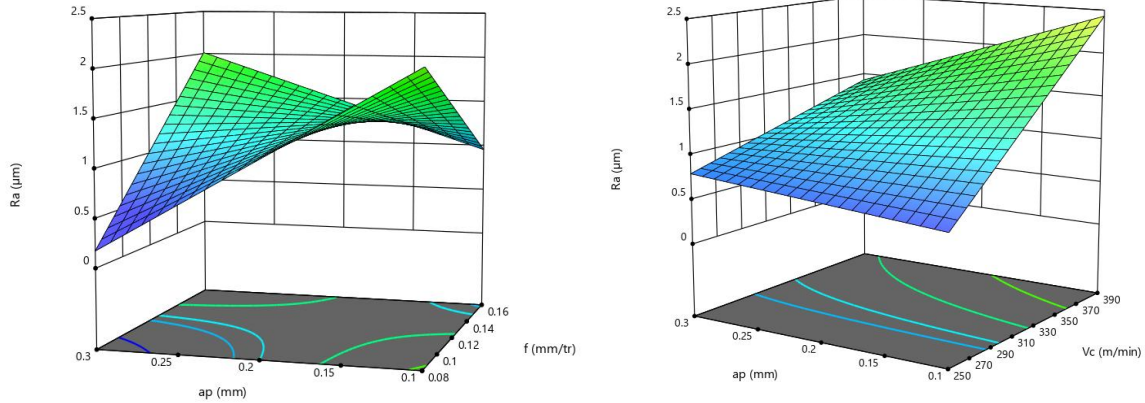


Figure III.7. Valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour (Ra)

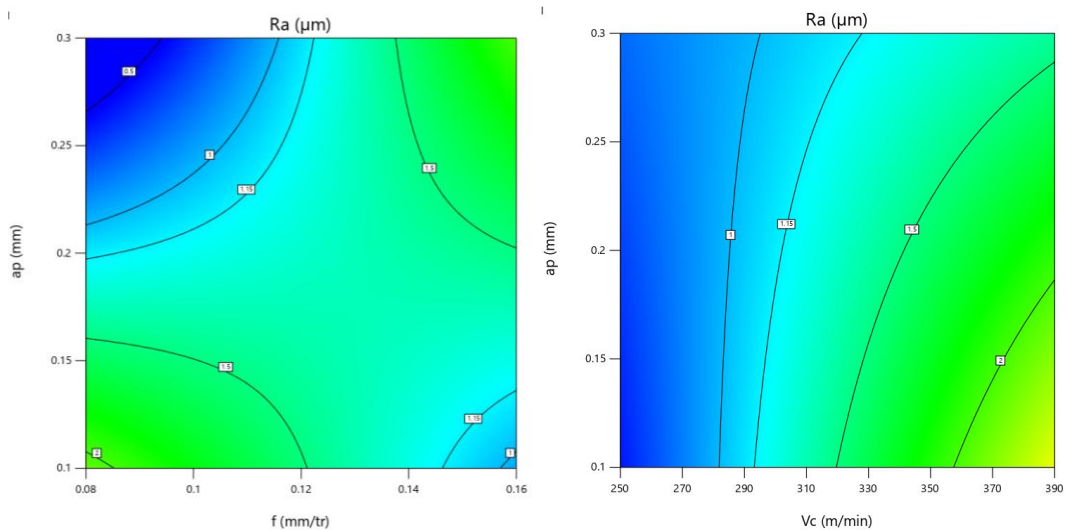
Les figures (III.8 et III.9) montrent les surfaces de réponse de Ra en fonction de Vc, f, ap et tc, ces tracés montrent d'une part, que, l'effet de f sur Ra dépend du niveau de la valeur de ap ; En effet, Pour ap = 0.2 mm, f n'a pas d'effet sur Ra par contre pour ap = 0.3 mm l'augmentation de f conduit à une augmentation considérable du critère Ra ce qui confirme l'existence de l'interaction entre les effets de ap et de f qui possède une contribution de 9,25%, d'après l'ANOVA



$V_c = 320 \text{ m/min}$ $t_c = 10 \text{ min}$

$f = 0,12 \text{ mm/tr}$ $t_c = 10 \text{ min}$

Figure III.8. Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (V_c , f et ap)



$V_c = 320 \text{ m/min}$ $t_c = 10 \text{ min}$

$f = 0,12 \text{ mm/tr}$ $t_c = 10 \text{ min}$

Figure III.9. Contour de rugosité Ra en fonction de (V_c , f , ap)

III.3.2. Résultats de l'ANOVA et modélisation de F_z

III.3.2.1. Effet des paramètres de procédé sur F_z

La figure (III.10) montre l'effet de différents paramètres de coupe (V_c , f , ap et t_c) sur l'évolution de F_z . D'après ce que nous pouvons voir, la profondeur de passe ap possède la plus grande influence sur F_z , puisque son augmentation conduit à une augmentation considérable de l'effort tangentiel. En plus, nous constatons que ses valeurs augmentent proportionnellement à l'augmentation du temps de coupe t_c . Les paramètres V_c et f n'ont pas d'effet claire sur l'évolution de l'effort F_z , ceci est probablement due au fait qu'avec la variation de ces paramètres. Par contre, une augmentation de la vitesse de coupe V_c entraîne une diminution de l'effort F_z .

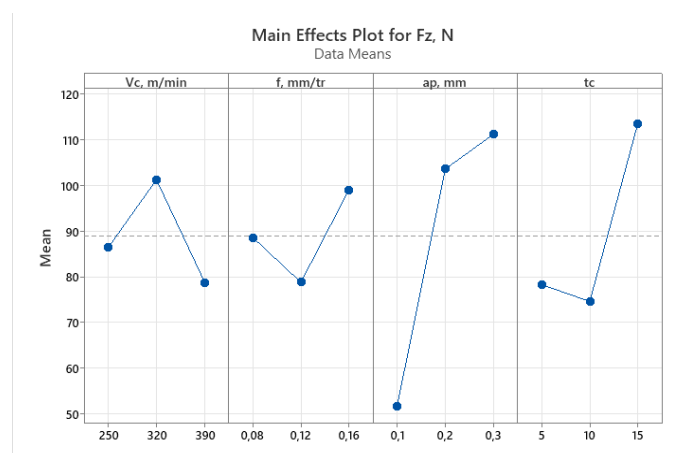


Figure III.10. Diagramme des effets principaux pour Fz.

Une analyse L'ANOVA de la composante de force tangentielle Fz présentée dans le Tableau (III.4) montre que la profondeur de coupe ap affecte d'abord la force transversale Fz avec une contribution de 50,84 %, suivie par l'interaction (Vc * f) avec 18,02 % de contribution, suivi par le temps de coupe tc avec une contribution de 17,80 %. Les autres termes peuvent être supposés non significatifs

Tableau III.4. Analyse de la variance pour Fz

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Valeur	P-Valeur
Model	7	9718,9	92,79%	9718,92	1388,42	1,84	0,515
Vc	1	86,6	0,83%	158,09	158,09	0,21	0,727
f	1	163,6	1,56%	278,93	278,93	0,37	0,652
ap	1	5325,3	50,84%	5909,32	5909,32	7,82	0,219
tc	1	1864,2	17,80%	2574,66	2574,66	3,41	0,316
Vc * f	1	1887,5	18,02%	2032,85	2032,85	2,69	0,348
Vc * ap	1	318,6	3,04%	137,04	137,04	0,18	0,744
f * ap	1	73,3	0,70%	73,26	73,26	0,10	0,808
Erreur	1	755,2	7,21%	755,24	755,24		
Total	8	10474,2	100,00%				

III.3.2.2. Équation de régression en unités non codées

L'équation (III.3) exprime le modèle mathématique de l'effort de coupe Fz avec tous les facteurs principaux et leurs interactions avec $R^2 = 92,79\%$

$$Fz = 760 - 3,08 Vc - 6028 f + 130 ap + 10,96 tc + 21,1 Vc * f + 2,19 Vc * ap - 1981 f * ap \quad (III.3)$$

$$R^2 = 92,79\%$$

La figure (III.11) montre que les différents points expérimentaux ont une très bonne approximation avec la ligne à 45° les valeurs d'erreur du modèle sont toujours incluses dans la région de confiance.

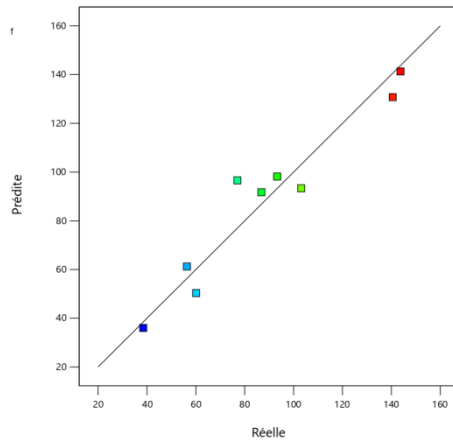


Figure III.11. Valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour Fz.

Les figures (III.12) et (III.11) montrent l'importance de l'influence de a_p sur l'évolution de Fz. Ils permettent d'évaluer l'influence simultanée de (V_c, f) et (V_c, a_p) sur la composante de l'effort de coupe Fz. La figure indique que la pente de la profondeur de coupe a_p et l'incrément d'avance par tour f sont les plus grandes et donc les plus importantes, suivies de la vitesse de coupe V_c .

La figure (III.13) nous montre les courbes de niveau qui nous permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, et elles nous permettent également de spécifier les valeurs de réponse ainsi que les conditions de fonctionnement requises.

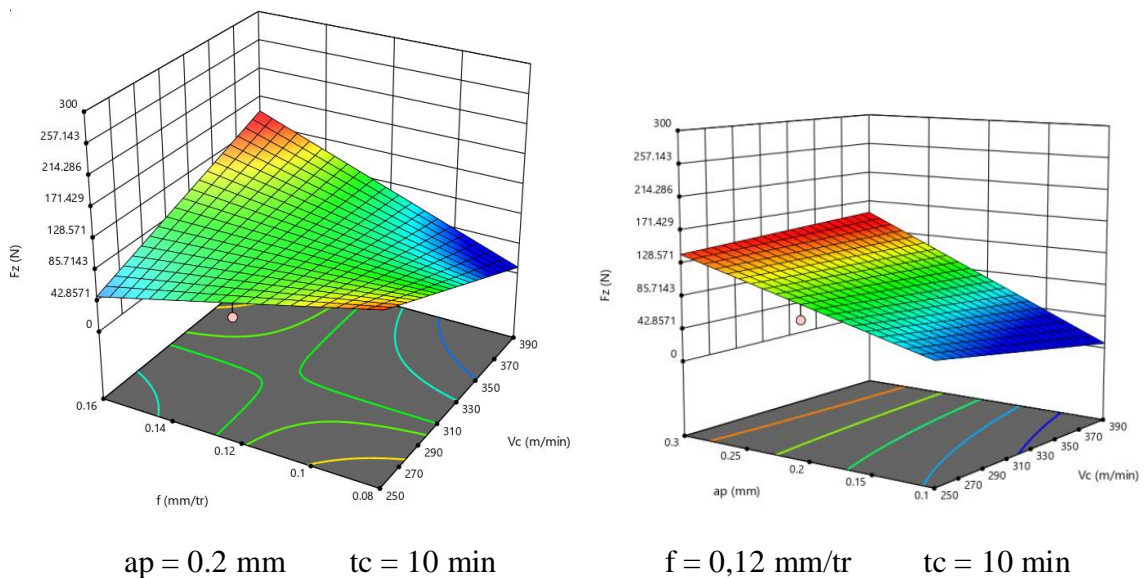


Figure III.12. Diagrammes de surface 3D de Fz en fonction de $(V_c, f$ et $a_p)$

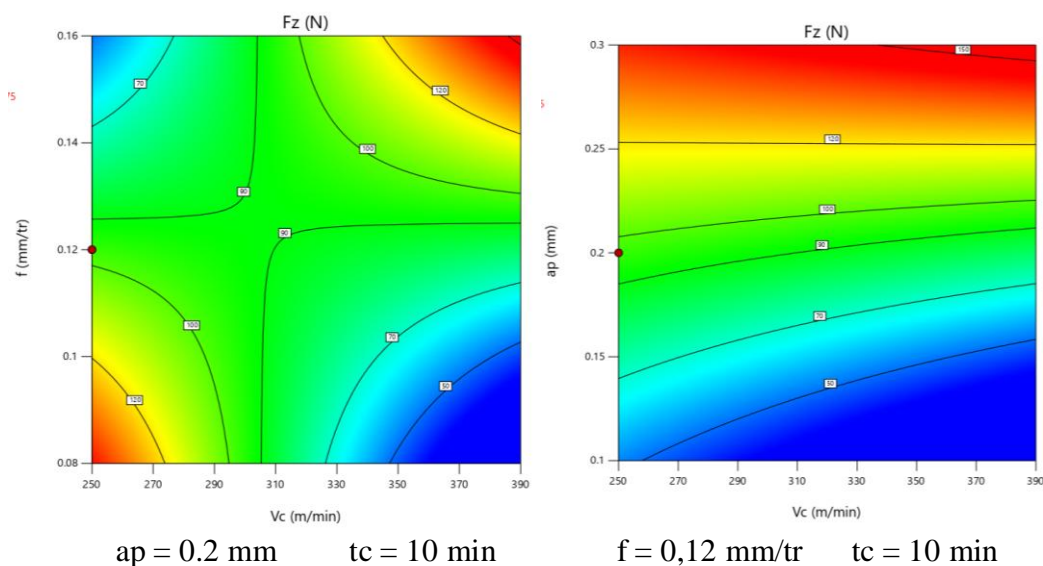


Figure III.13. Contour de l'effort F_z en fonction de (V_c , f , a_p)

III.3.3. Résultats de l'anova et modélisation de VB

III.3.3.1. Effet des paramètres de processus sur VB

Après chaque essai, la plaquette de coupe a été retirée et l'usure en dépouille. La figure (III.14), montre que l'usure en dépouille apparaît comme une bande striée brillante sur les arêtes de la plaquette de coupe. Il peut être clairement mentionné que cette apparence a été observée pour tous les essais de coupe. Les résultats présentés à la figure (III.15) montrent clairement qu'avec l'augmentation du temps d'usinage et de la vitesse de coupe, les valeurs VB augmentent en conséquence. Cette augmentation des valeurs VB peut s'expliquer par l'expansion de la zone de contact outil-pièce et par l'effet de la vitesse de glissement relative entre l'outil de coupe et le matériau coupé, ce qui entraîne une augmentation de la température à l'interface entre l'outil et le matériau. Les effets de la vibration peuvent également entraîner une augmentation de VB, surtout à des vitesses de coupe supérieures à 390 m/min, où la valeur maximale de VB est atteinte (essai numéro 8). maximale est atteinte (essai numéro 8). La même explication a été donnée par Nicolodi et al [27]. Une faible valeur de VB a été observée dans l'essai 4. Cela peut probablement être attribué à la présence d'une arête rapportée au moment de l'essai 4. à une vitesse de coupe de 320 m/min. En conséquence, l'arête rapportée peut avoir un effet bénéfique en termes de protection de l'arête de l'outil. En effet, cela peut réduire la progression de l'usure d'outil, comme l'ont souligné Seid Ahmed et al [28].

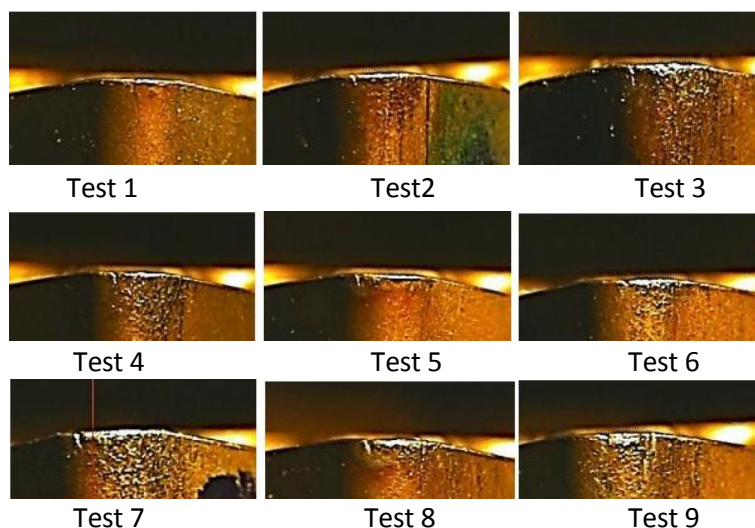


Figure III.14. Visualisation de l'usure en dépouille des arêtes de coupe en fin de l'usinage.

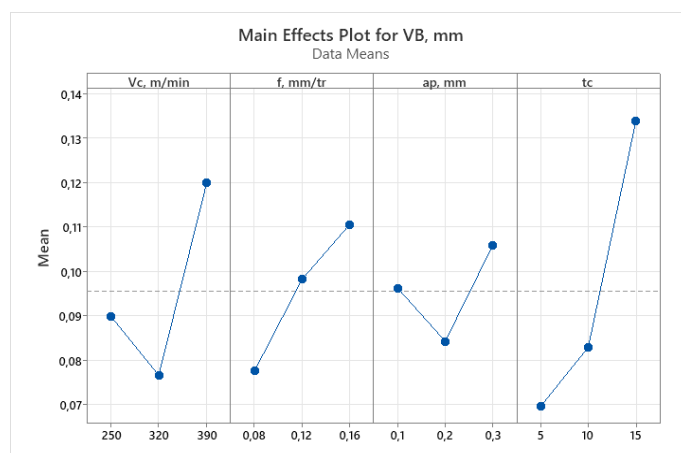


Figure III.15. Diagramme des effets principaux pour VB

Une analyse L'ANOVA de l'usure VB présentée dans le Tableau (III.5) montre que le temps de coupe t_c affecte d'abord VB avec une contribution de 50,69%, suivie par l'interaction ($f * ap$) avec 17,03 %, suivie par l'avance f avec 13,34 % de contribution, suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec 11,02 % de contribution, suivie par l'interaction ($V_c * ap$) avec 5,27 %, Les autres termes peuvent être supposés non significatifs

Tableau III.5. Analyse de la variance pour VB

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Valeur	P-Valeur
Model	7	0.012067	98.52%	0.012067	0.001724	9.53	0.245
Vc	1	0.001350	11.02%	0.003429	0.003429	18.95	0.144
f	1	0.001633	13.34%	0.000426	0.000426	2.36	0.368
ap	1	0.000140	1.14%	0.000409	0.000409	2.26	0.374
tc	1	0.006208	50.69%	0.000107	0.000107	0.59	0.583
Vc * f	1	0.000004	0.03%	0.000974	0.000974	5.38	0.259
Vc * ap	1	0.000645	5.27%	0.000001	0.000001	0.00	0.959
f * ap	1	0.002086	17.03%	0.002086	0.002086	11.53	0.182
Erreur	1	0.000181	1.48%	0.000181	0.000181		
Total	8	0.012248	100.00%				

III.3.3.2. Équation de régression dans les unités non codées

$$VB = -0,426 + 0,002300 Vc + 2,95 f - 1,37 ap + 0,00223 tc - 0,01459 Vc * f - 0,00016 Vc * ap + 10,57 f * ap \quad (III.4)$$

$$R^2 = 98.52 \%$$

La figure (III.16) montre que les différents points expérimentaux ont un très bon rapprochement avec la droite à 45°, représentant les valeurs prévues par le modèle mathématique.

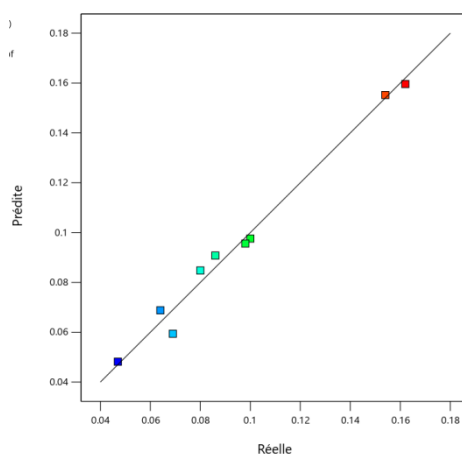


Figure III.16. Les valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour VB

Les figures (III.17) et III.18 montrent l'importance de l'influence de f et Vc sur le développement de VB. Ils permettent d'évaluer l'effet simultané de (Vc, f) sur la composante VB. La figure montre que la pente de la vitesse de coupe Vc et l'avance f ont une amélioration significative de VB suivie de l'augmentation de la profondeur de coupe ap

La figure (IV.18) nous montre les courbes de niveau qui nous permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, et elles nous permettent également de spécifier les valeurs de réponse ainsi que les conditions de fonctionnement requises.

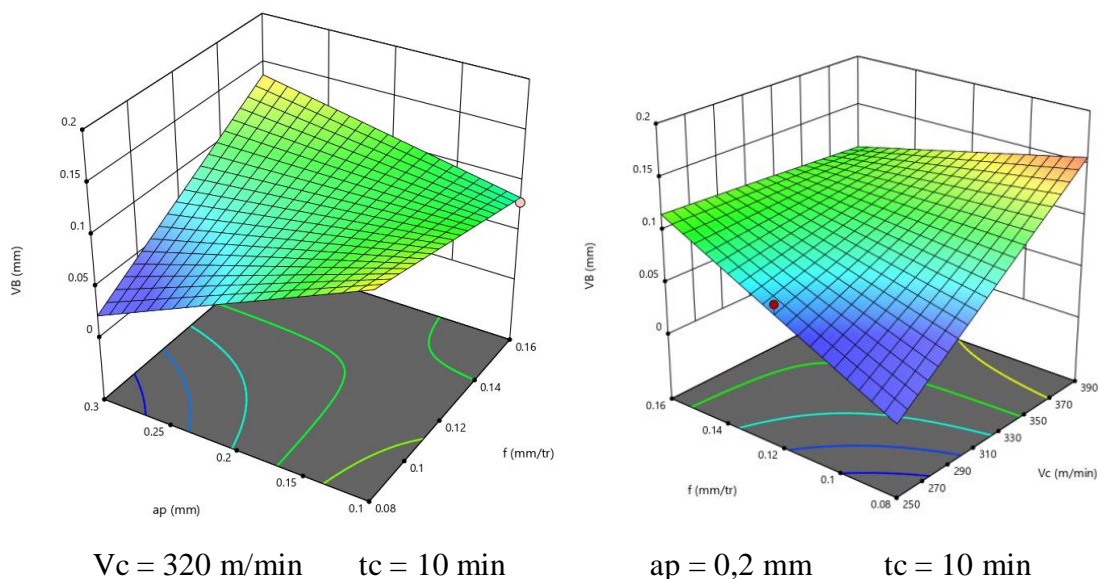


Figure III.17. Diagrammes de surface 3D de VB en fonction de (V_c , f et a_p)

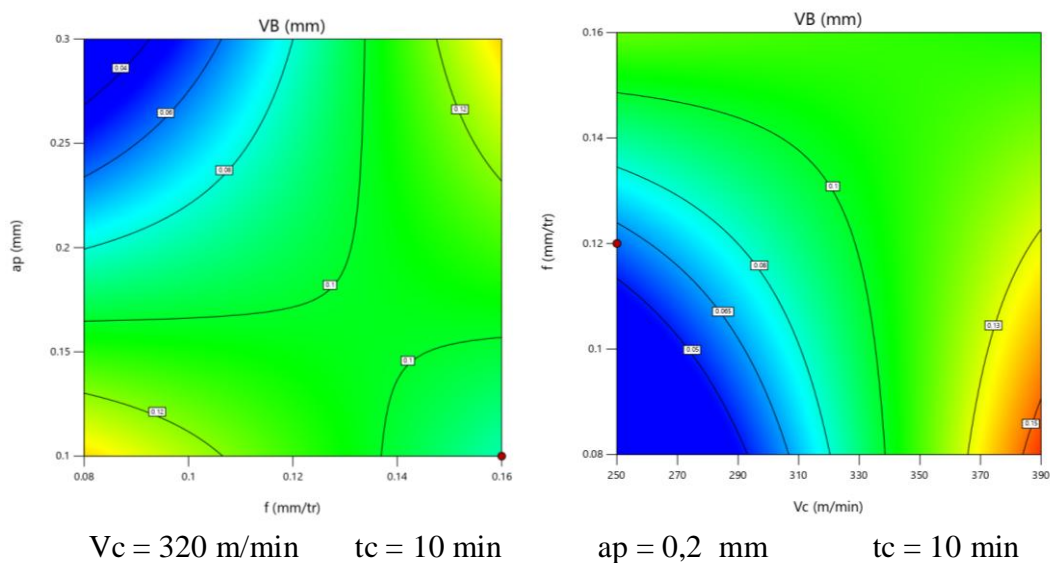


Figure III.18. Contour de VB en fonction de (V_c , f , a_p)

III.3.4. Analyse du débit de copeaux MRR :

La figure (III.19) les graphiques de diagnostic tels que les valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles nous aident à juger si le modèle est satisfaisante. Ces graphiques indiquent une concordance adéquate entre les données réelles et les résultats des modèles

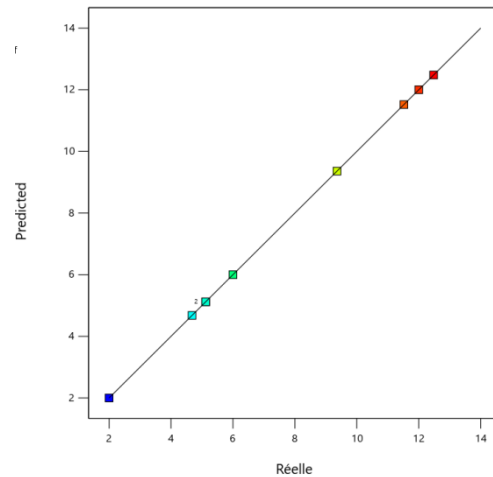


Figure III.19. Les valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour MRR

Les figures (III.20 et III.21) montrent le graphique de surface de réponse du taux d'enlèvement de matière MRR en fonction de V_c , f et a_p ainsi que les courbes de niveau. Il est à noter que le MRR augmente avec l'augmentation des paramètres de coupe, et l'effet de a_p est le plus important suivi de V_c et f , et cela provient de la pente de variance de MRR le long des axes a_p , V_c et f .

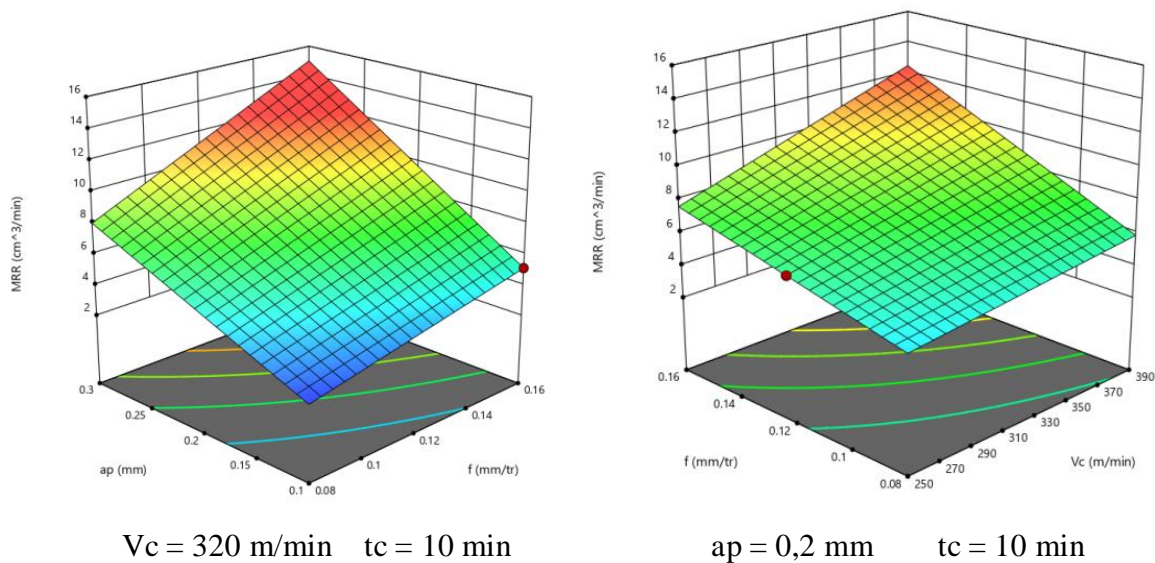


Figure III.20. Diagrammes de surface 3D de MRR en fonction de (V_c , f et a_p)

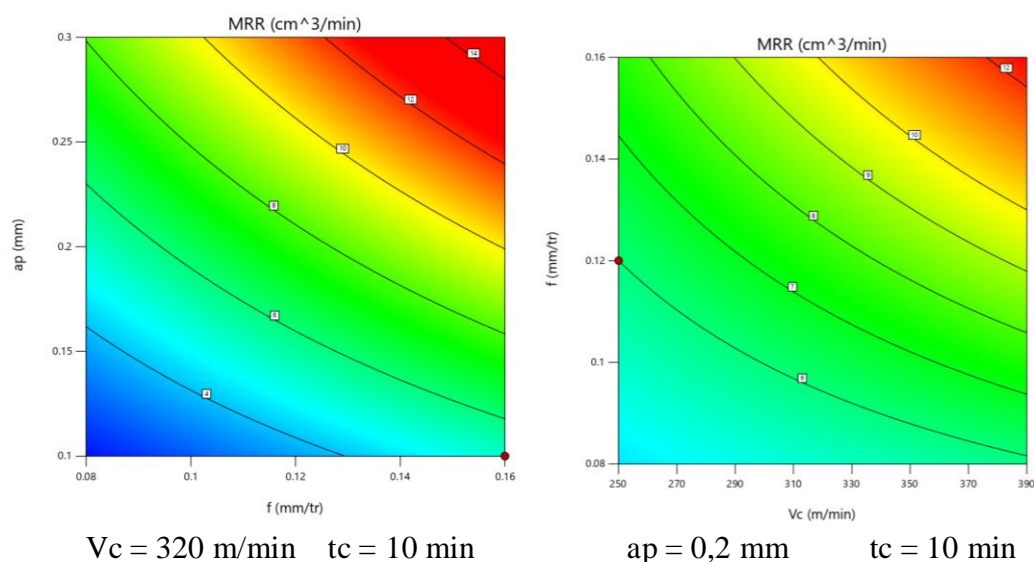


Figure III.21 Contour de MRR en fonction de (V_c , f , a_p)

III.4. Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la détermination du degré d'influence des paramètres de coupe, vitesse de coupe V_c , avance par cycle f , profondeur de passe a_p et temps de marche t_c , sur la rugosité R_a , l'effort de coupe F_z , l'usure de l'outil VB , le taux d'enlèvement de matière MRR, basé sur une étude expérimentale qui nous a permis de définir des modèles mathématiques de prédiction et de préciser les coefficients pour chaque paramètre. Une analyse de variance ANOVA à l'aide du logiciel Design-Expert a montré que : pour la rugosité R_a , la vitesse de coupe est le facteur le plus influent, tandis que l'avance par tour, la profondeur de coupe et le temps de fonctionnement n'ont pas d'effet significatif. En ce qui concerne les résultats de l'effort de coupe transversale F_z , il a été démontré que tous les éléments du système de coupe ont un impact significatif. Le temps de fonctionnement est le plus grand et donc le plus important, suivi de l'avance par tour f et enfin de la vitesse de coupe V_c . L'ANOVA a également montré l'effet des paramètres de coupe sur l'usure de l'outil, tous les paramètres affectant de manière significative, en particulier la vitesse de coupe V_c . Pour le MRR, tous les paramètres sont influents, en particulier la profondeur de coupe a_p .

Chapitre IV

Optimisation des conditions de coupe

IV.1. Introduction

L'amélioration des paramètres de coupe en fabrication a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche utilisant différentes techniques, telles que Taguchi, GRA, GA, PSO, DF... etc. [17]. Il permet de sélectionner les conditions de coupe les plus appropriées afin d'obtenir les résultats souhaités pour les paramètres technologiques requis. Cela a généralement un impact économique direct sur la production tel que : la disponibilité technologique ou le coût total d'exploitation. L'objectif de ce chapitre est d'améliorer les conditions

Il existe différentes méthodes d'optimisation. Nous nous réjouissons d'utiliser deux types d'optimisation dans ce chapitre :

- Amélioration mon-objectifs en utilisant la méthode Taguchi.
- Optimisation multi-objectifs par la méthode TOPSIS.

IV.2. Optimisation mono-objective de Taguchi

La méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes des plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets. Elle a pour but de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets des facteurs sur la réponse.

Cette méthode se distingue par une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant une bonne précision. Elle place le modèle comme un élément clef de la stratégie du plan d'expériences. L'expérimentateur choisit librement les facteurs et les interactions à étudier selon le modèle qu'il propose, en étroite adéquation avec ses objectifs.

Cette analyse peut être complétée en utilisant le rapport signal sur bruit (S/N). Ce rapport dépend de la qualité des critères du processus à optimiser [29]. Les deux types de rapports S/N utilisées dans cette étude sont les suivants :

1. Le plus petit est le meilleur (SB), l'expérimentateur est intéressé à minimiser la réponse.

$$\frac{S}{N_{NB}}(y) = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (\text{IV.1})$$

2. plus c'est grand, mieux c'est (LB), l'expérimentateur cherche à maximiser la réponse.

$$\frac{S}{N_{LB}}(y) = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (\text{IV.2})$$

Analyse les effets moyens des niveaux de différents facteurs

Dans l'industrie moderne, nous choisissons de fabriquer des pièces de haute qualité à très faible coût et en un minimum de temps. L'objectif de ce travail est d'améliorer les modèles statistiques de rugosité de surface Ra, d'efforts tangentiels Fz, d'usure VB et de taux

d'enlèvement Matière MRR. Dans la présente étude, étant donné qu'un faible R_a , F_z et VB élevé étaient souhaitables, l'équation (IV.1) et l'équation (IV.2) ont été exploitées, respectivement.

IV.2.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface

La moyenne des rapports S/N de R_a pour les neuf essais de coupe sont donnés dans le Tableau (IV.1) Selon la figure (IV.1) et le Tableau (IV.1) où nous avons considéré la qualité «moins c'est mieux», Il convient de noter que les paramètres d'usinage (V_c , f , a_p et t_c) ont des effets différents sur la rugosité de surface R_a . L'effet le plus significatif correspond au temps de coupe t_c avec un effet de 9,8114 suivi de l'avance f avec un effet de 5,0334 suivi de la vitesse de coupe V_c avec un effet de 3,7555 et enfin vient la profondeur de coupe a_p avec un effet de 1,1011.

Tableau IV.1. Réponse des rapports S/N pour R_a

Niveau	V_c m/min	f mm/tr	a_p mm	t_c min
1	0.1816	0.8666	-1.7632	1.9430
2	-1.0263	-1.1184	-1.8782	1.5069
3	-3.5738	-4.1667	-0.7771	-7.8684
Delta	3.7555	5.0334	1.1011	9.8114
Rang	3	2	4	1

Selon la méthode de Taguchi, la condition optimale pour réduire la rugosité de surface R_a correspond aux valeurs les plus élevées du rapport Signal/Bruit du paramètre considéré. Les valeurs des paramètres de coupe choisis pour le régime optimal sont les suivantes : un temps de coupe $t_c = 5$ min Suivie par une avance $f = 0.08$ mm/tr. Suivie par une vitesse de coupe $V_c = 250$ m/min et en dernier lieu une profondeur de passe $a_p = 0.3$ mm.

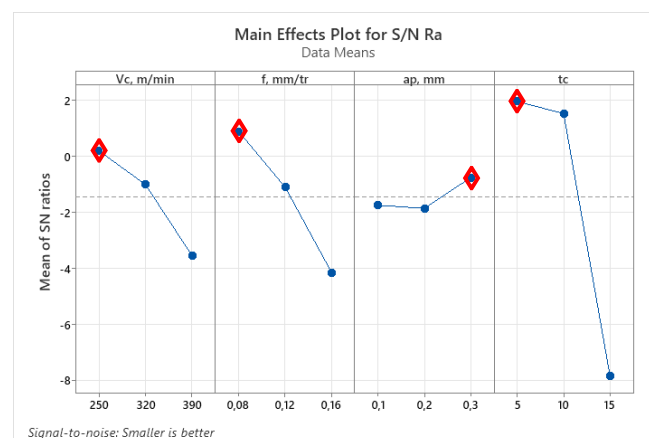


Figure IV.1. Diagramme des effets principaux pour les rapports S/N du R_a

IV.2.2. Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe tangentiel

La figure (IV. 2) et le Tableau (IV.2) Présentent les effets des différents paramètres de coupe (V_c , f , a_p , et t_c) sur la composante de l'effort tangentiel F_z .

Sur le Tableau IV.2 nous constatons que la plus importante influence correspond à celle de la profondeur de passe a_p avec un effet de 6.63. Suivie par le temps de coupe t_c avec un effet de 3.25. Suivie par la vitesse de coupe V_c avec un effet de 2.07, et en dernier lieu vient l'avance f avec un effet de 1.71. La qualité « le plus petit est le meilleur est considérée ».

Tableau IV.2. Réponse des rapports S/N pour F_z

Niveau	V_c m/min	f mm/tr	a_p mm	t_c min
1	-37.53	-37.81	-34.10	-37.12
2	-39.60	-37.67	-40.03	-37.36
3	-37.73	-39.38	-40.73	-40.37
Delta	2.07	1.71	6.63	3.25
Rang	3	4	1	2

Les valeurs des paramètres de coupe choisies pour une vitesse optimale sont les suivantes : la plus efficace est la profondeur de coupe $a_p = 0,3$ mm, suivi du temps de coupe $t_c = 5$ min suivi de la vitesse de coupe $V_c = 250$ m/min et enfin avance $f = 0,08$ mm/tr. Voir Fig. (IV.2).

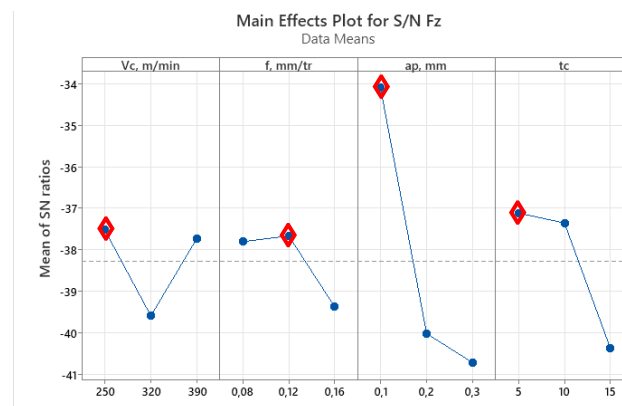


Figure IV.2. Diagramme des effets principaux pour les rapports S/N du F_z

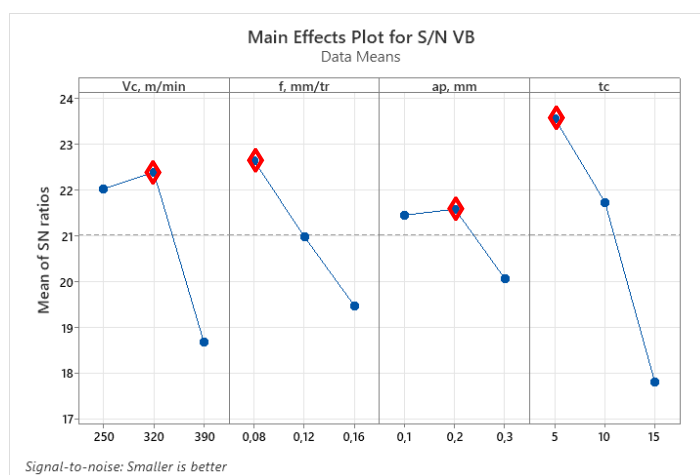
IV.2.3. Analyse des effets principaux sur l'usure en dépouille VB

Du Tableau (III. 3) et de la figure (IV. 3), on remarque que les paramètres d'usinage (V_c , f , a_p et t_c) présentent des effets différents sur l'usure VB. La plus importante influence correspond temps de coupe t_c avec un effet de 5.75 suivie par la vitesse de coupe V_c avec un effet de 3.71 suivie par l'avance f avec un effet de 3.17 et puis et en dernier lieu vient la profondeur de passe a_p avec un effet de 1.53

Tableau IV.3. Réponse des rapports S/N pour VB

Niveau	Vc m/min	f mm/tr	ap mm	Tc min
1	22.01	22.62	21.44	23.54
2	22.37	20.97	21.57	21.72
3	18.66	19.45	20.04	17.79
Delta	3.71	3.17	1.53	5.75
Rang	2	3	4	1

Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de l'usure VB sont donc la vitesse de coupe $V_c = 320$ m/min, le temps de coupe $t_c = 5$ min, la grande avance $f = 0,08$ mm et la grande profondeur de passe $a_p = 0,2$ mm Figure (III.24).

**Figure IV.3.** Diagramme des effets principaux pour les rapports S/N du VB

Le tableau (IV.4) résume les résultats de l'optimisation mono-objectif.

Tableau IV.4. Résultats de l'optimisation mono-objectif.

Objectifs	Vc, m/min	f, mm/tr	ap, mm	tc, min	Ra, μm	Fz, N	VB, mm	MRR, cm^3/min
Ra-min	250	0,08	0,30	5	<u>0,461</u>	82,53	0,055	06,00
Fz-min	250	0,12	0,10	5	0,656	<u>37,86</u>	0,057	03,00
VB-min	320	0,08	0,20	5	0,608	96,64	<u>0,044</u>	05,12
MRR-max	350	0,16	0,3	5	1,282	101,24	0,117	<u>18,72</u>

Ces résultats montrent qu'il n'y a pas un régime unique permettant de satisfaire différents objectifs. C'est pour cette raison que nous faisons appel à une méthode d'optimisation multi-objectifs, à savoir, la méthode TOPSIS.

IV.2. Optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe basée sur TOPSIS

L'ordre de préférence par similarité à la technique de solution parfaite (TOPSIS) est une approche basée sur une méthode de décision multicritère pour évaluer la meilleure solution alternative. Il est souligné ici que l'objectif principal est de déterminer les paramètres de coupe optimaux pour minimiser VB, Fz et Ra et maximiser le MRR. TOPSIS est basé sur l'idée que l'alternative choisie doit être la plus proche de la meilleure solution (également appelée l'idéal positif) et la plus éloignée de la pire solution (la solution idéale négative). Dans cette étude l'approche TOPSIS et couplée à l'approche de Taguchi, c'est-à-dire que les différents calculs seront basés sur le rapport Signal/Bruit, qui sont présentés dans le Tableau (IV.5) ci-dessous.

Tableau IV.5. Rapport S/N des résultats expérimentaux

Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	tc (min)	Ra (µm)	Fz (N)	VB (mm)	MRR (cm ³ /min)
250	0,08	0,1	5	5,64658994	- 31,7024437	26,5580428	6,02059991
250	0,12	0,2	10	3,11045649	- 37,7298145	23,2230182	15,563025
250	0,16	0,3	15	- 8,21217085	- 43,1521571	16,2495856	21,5836249
320	0,08	0,2	15	- 5,48777591	- 42,955999	21,310031	14,1853992
320	0,12	0,3	5	3,43969872	- 40,2668581	23,8764005	21,2290496
320	0,16	0,1	10	- 1,03076781	- 35,5803794	21,9382003	14,1853992
390	0,08	0,3	10	2,44106097	- 38,7713951	20	19,425517
390	0,12	0,1	15	- 9,90533489	- 35,0163369	15,8096997	13,4049171
390	0,16	0,2	5	- 3,25725987	- 39,3957707	20,1754785	21,9242917

Étape 1 : Former une matrice de décision comme indiqué dans l'équation (IV.3) qui couvre les informations de tous les attributs (caractéristiques de sortie) et les options du processus,

$$Zm = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (IV.3)$$

Les alternatives prometteuses sont indiquées en ligne ($i = 1, 2, \dots, m$) et toutes les qualités associées à chacune des alternatives sont indiquées en colonne ($j = 1, 2, \dots, n$).

Étape 2 : Obtention d'une matrice de conception normalisée à l'aide de la formule suivante Equation (IV.4.) Le Tableau (IV.6) présente les résultats. :

$$Q_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (IV.4)$$

Où Q_{ij} est la valeur normalisée de x_{ij} .

La matrice des valeurs normalisées est présentée dans le Tableau (IV.6)

Tableau IV.6. Matrice des valeurs normalisées.

Essai N°	Q_{ij}			
	Q_{Ra}	Q_{Fz}	Q_{VB}	Q_{MRR}
1	0,34576483	-0,27484664	0,41623303	0,11728357
2	0,19046654	-0,32710137	0,36396459	0,30317363
3	-0,50286631	-0,37411077	0,25467292	0,42045721
4	-0,33603997	-0,37241016	0,33398315	0,27633696
5	0,21062745	-0,34909646	0,37420478	0,41354994
6	-0,06311832	-0,30846669	0,34382818	0,27633696
7	0,14947659	-0,33613143	0,31345158	0,37841644
8	-0,60654598	-0,30357668	0,24777877	0,26113287
9	-0,19945594	-0,3415445	0,31620178	0,42709352

Dans un premier temps, nous avons utilisé des poids égaux, de sorte que les quatre réponses de sortie étaient ($w_{Ra} = 0,25$, $w_{Fz} = 0,25$, $w_{VB} = 0,25$, et $w_{MRR} = 0,25$)

Étape 3 : Une fois qu'une matrice de conception normalisée est établie, les poids de la matrice de décision normalisée (B_{ij} ; $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$) sont calculés à l'aide de l'équation (IV.5). Le Tableau (IV.7) présente les résultats.

$$B_{ij} = n_{ij}w_j \quad (IV.5)$$

Où w_j présente le poids de la performance de la mesure, dans notre étude est pris égal à 0,25 pour les quatre réponses de sortie (Ra, Fz, VB, et MRR) avec $\sum_{i=1}^m w_j = 1$

Tableau IV.7. Valeurs normalisées pondérées.

Essai N°	Normalisation et poids B_{ij}			
	$w_{Ra} = 0,25$	$w_{Fz} = 0,25$	$w_{VB} = 0,25$	$w_{MRR} = 0,25$
	Ra	Fz	VB	MRR
1	0,08644121	-0,06871166	0,10405826	0,02932089
2	0,04761664	-0,08177534	0,09099115	0,07579341
3	-0,12571658	-0,09352769	0,06366823	0,1051143
4	-0,08400999	-0,09310254	0,08349579	0,06908424
5	0,05265686	-0,08727411	0,09355119	0,10338749
6	-0,01577958	-0,07711667	0,08595704	0,06908424
7	0,03736915	-0,08403286	0,0783629	0,09460411
8	-0,15163649	-0,07589417	0,06194469	0,06528322
9	-0,04986398	-0,08538613	0,07905045	0,10677338

Étape 4 : La distance entre la solution positive idéale (la plus élevée) et la solution négative idéale (la plus basse). Les équations (IV.6) et (IV.7) sont utilisées pour calculer les deux distances euclidiennes pour chaque alternative. Le Tableau (IV.8) présente les résultats obtenus.

$$B^+ = \{B_1^+, B_2^+, \dots, B_n^+\} = \{(\max B_{ij} \setminus j \in K_1), (\min B_{ij} \setminus j \in K_2, i = 1, 2, \dots, n)\} \tag{IV.6}$$

$$B^- = \{B_1^-, B_2^-, \dots, B_n^-\} = \{(\min B_{ij} \setminus j \in K_1), (\max B_{ij} \setminus j \in K_2, i = 1, 2, \dots, n)\} \tag{IV.7}$$

Où B^+ et B^- sont définis comme la solution idéale positive et la solution idéale négative, respectivement, et K_1 et K_2 sont des indices définis pour les réponses positives et négatives respectivement

Tableau IV.8. Solutions idéales positives et solutions idéales négatives.

Essai N°	$B_{ij}-B^+$				$B_{ij}-B^-$			
	Ra	Fz	VB	MRR	Ra	Fz	VB	MRR
1	0	0	0	-0,07745249	0,2380777	0,02481603	0,04211356	0
2	-0,03882457	-0,01306368	-0,01306711	-0,03097997	0,19925313	0,01175235	0,02904646	0,04647252
3	-0,21215778	-0,02481603	-0,04039003	-0,00165908	0,02591992	0	0,00172354	0,07579341
4	-0,1704512	-0,02439088	-0,02056247	-0,03768914	0,0676265	0,00042515	0,02155109	0,03976335
5	-0,03378434	-0,01856245	-0,01050706	-0,0033859	0,20429336	0,00625358	0,0316065	0,07406659
6	-0,10222079	-0,00840501	-0,01810121	-0,03768914	0,13585692	0,01641102	0,02401235	0,03976335
7	-0,04907206	-0,0153212	-0,02569536	-0,01216927	0,18900564	0,00949483	0,0164182	0,06528322
8	-0,2380777	-0,00718251	-0,04211356	-0,04149016	0	0,01763352	0	0,03596233
9	-0,13630519	-0,01667446	-0,02500781	0	0,10177251	0,00814157	0,01710575	0,07745249

Étape 5 : calculer la mesure de séparation pour chaque alternative en utilisant les équations (IV.8) et (IV.9). Le Tableau (IV.9) présente les résultats.

(a) Séparation de la meilleure solution (idéal positif)

$$Si^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (B_{ij} - B^+)^2}, (i=1, 2, 3, \dots, m) \tag{IV.8}$$

(b) Séparation de la pire solution (idéal négatif)

$$Si^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (B_{ij} - B^-)^2}, (i=1, 2, 3, \dots, m) \tag{IV.9}$$

Où Si^+ et Si^- sont respectivement les solutions idéales positives et négatives.

Étape 6 : Calcul de la proximité relative de la solution idéale à l'aide de la formule donnée ci-dessous. Equation (IV.10). Le Tableau (IV.9) présente les résultats.

$$C_i = \frac{s^-}{s^+ + s^-}, \quad 0 \leq C_i \leq 1 \quad (\text{IV.10})$$

Étape 7 : Après avoir classé la proximité relative par ordre décroissant, nous avons attribué un rang à chacun d'eux, où la plus grande valeur de proximité relative indique une bonne mesure de qualité. Le Tableau (IV.9) présente les résultats.

Tableau IV.9. Mesure de séparation pour chaque alternative

Essai N°	S_i^+	S_i^-	C_i	Rang
1	0,07745249	0,24304399	0,75833591	4
2	0,05299543	0,20698628	0,79615709	2
3	0,21739565	0,08012149	0,26930042	8
4	0,17745933	0,08135784	0,31434484	7
5	0,0400975	0,21968094	<u>0,84564732</u>	<u>1</u>
6	0,11076037	0,14451346	0,56611154	5
7	0,05874648	0,20086	0,77370951	3
8	0,24541305	0,04005284	0,14030692	9
9	0,13957985	0,12928814	0,48086104	6

Étape 8 : D'après le classement des « C_i », le régime n°5 est le meilleur régime parmi les 9 essais réalisés. Le tracé des droites des effets principaux du critère « C_i » de la figure (IV.4), a permis de sélectionner la combinaison optimale, correspondant aux niveaux des paramètres d'entrée permettant de maximiser le « C_i ».

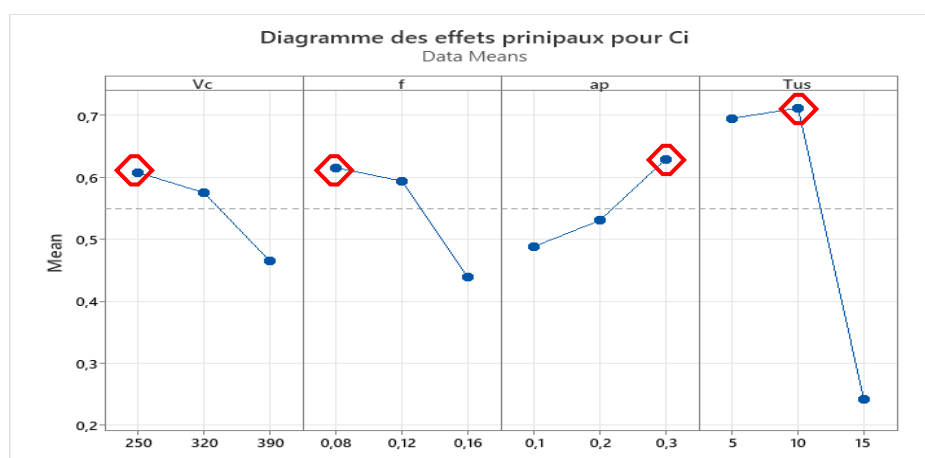


Figure IV.4. Droites des effets principaux du coefficient « C_i »

Étape 9 : Une fois que les niveaux optimaux sont sélectionnés, le test de validation a occupé la dernière étape dans la procédure d'optimisation pour confirmer la fiabilité des niveaux optimaux proposés par la méthode TOPSIS.

L'équation (IV.11) est utilisée pour calculer les valeurs prédites des différentes réponses, correspondant aux niveaux optimaux des différents facteurs d'entrée.

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (\text{IV.11})$$

Où

η_m : la moyenne totale du rapport S/N

$\bar{\eta}$: la moyenne du rapport S/N au niveau optimal

q : le nombre des facteurs principaux d'entrée qui ont un effet significatif sur les réponses.

Les résultats de prédiction du régime optimal sont présentés dans le Tableau (IV.11).

Tableau IV.10. Valeurs optimales prédites des réponses.

	$w_{Ra} = 0,25$	$w_{Fz} = 0,25$	$w_{VB} = 0,25$	$w_{MRR} = 0,25$
	Ra (μm)	Fz (N)	VB (mm)	MRR (cm^3/min)
S/N-Pred	6,19653	-38,57170	23,34849	15,56303
Y-Pred	0,49	84,837	0,068	6

Les valeurs prédites des réponses optimales, correspondant à la combinaison optimale du régime de coupe, montre que les valeurs de Ra, Fz et VB sont assez proches des valeurs idéales obtenues lors des expérimentations, alors que la valeur du MRR reste loin de la valeur maximale ($MRR_{\text{maxi}} = 12,48 \text{ cm}^3/\text{min}$). Pour améliorer ces résultats et équilibrer les paramètres de sortie nous proposons de modifier les poids des réponses pour redonner de l'importance aux paramètres qui ne sont pas assez satisfaisants. Pour ce faire nous proposons la pondération suivante : $w_{Ra} = 0,1$, $w_{Fz} = 0,2$, $w_{VB} = 0,2$, et $w_{MRR} = 0,5$

Étape 10 : À partir de l'équation (III.5). Le Tableau (III.11) présente le résultat de B_{ij} obtenu après changement du poids de la performance de mesure.

Tableau IV.11. Valeurs normalisées pondérées.

Essai N°	Normalisation et poids B_{ij}			
	$W_{Ra} = 0,1$	$W_{Fz} = 0,2$	$W_{VB} = 0,2$	$W_{MRR} = 0,5$
	B_{Ra}	B_{Fz}	B_{VB}	B_{MRR}
1	0,03457648	- 0,05496933	0,08324661	0,05864179
2	0,01904665	- 0,06542027	0,07279292	0,15158682
3	- 0,05028663	- 0,07482215	0,05093458	0,2102286
4	- 0,033604	- 0,07448203	0,06679663	0,13816848
5	0,02106274	- 0,06981929	0,07484096	0,20677497
6	- 0,00631183	- 0,06169334	0,06876564	0,13816848
7	0,01494766	- 0,06722629	0,06269032	0,18920822
8	- 0,0606546	- 0,06071534	0,04955575	0,13056644
9	0,03457648	- 0,05496933	0,08324661	0,05864179

Étape 11 : À partir de Les équations (III.6 et III.7). Le Tableau (III.12) présente le résultat de $B_{ij}-B^+$ et $B_{ij}-B^-$ obtenu après changement du poids de la performance de mesure.

Tableau IV.12. Solutions idéales positives et solutions idéales négatives.

Essai N°	$B_{ij}-B^+$				$B_{ij}-B^-$			
	Ra	Fz	VB	MRR	Ra	Fz	VB	MRR
1	0	0	0	-0,15490498	0,09523108	0,01985282	0,03369085	0
2	-0,01552983	-0,01045095	-0,01045369	-0,06195994	0,07970125	0,00940188	0,02323716	0,09294503
3	-0,08486311	-0,01985282	-0,03231202	-0,00331816	0,01036797	0	0,00137883	0,15158682
4	-0,06818048	-0,0195127	-0,01644998	-0,07537828	0,0270506	0,00034012	0,01724088	0,07952669
5	-0,01351374	-0,01484996	-0,00840565	-0,00677179	0,08171734	0,00500286	0,0252852	0,14813319
6	-0,04088831	-0,00672401	-0,01448097	-0,07537828	0,05434277	0,01312882	0,01920988	0,07952669
7	-0,01962882	-0,01225696	-0,02055629	-0,02433854	0,07560226	0,00759587	0,01313456	0,13056644
8	-0,09523108	-0,00574601	-0,03369085	-0,08298033	0	0,01410682	0	0,07192465
9	-0,05452208	-0,01333957	-0,02000625	0	0,040709	0,00651325	0,0136846	0,15490498

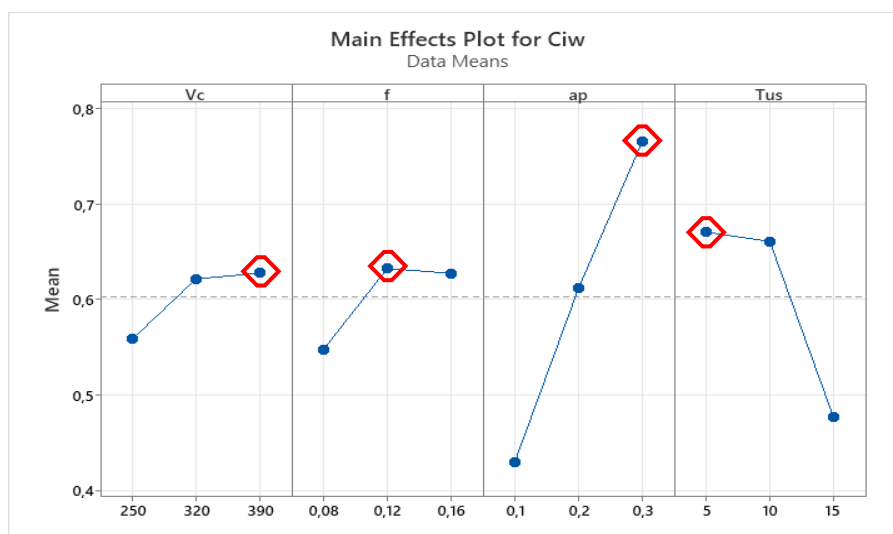
Étape 12 : Les coefficients Si^+ et Si^- sont obtenus à partir des équations (III.8) et (III.9), En fin, le coefficient C_i est évalué par l'équation (III.10), Le Tableau (IV.13) présente les résultats.

Étape 13 : Après avoir classé la proximité relative par ordre décroissant, nous avons attribué un rang à chacun d'eux, où la plus grande valeur de proximité relative indique une bonne mesure de qualité. Le Tableau (IV.13) présente les résultats.

Tableau IV.13. La proximité relative de la solution idéale

Essai N°	Si^+	Si^-	C_{iw}	Rang
1	0,15490498	0,1029474	0,39924937	8
2	0,06556457	0,12497772	0,65590543	4
3	0,09301054	0,15194722	0,6202997	5
4	0,10479413	0,0857531	0,45003591	7
5	0,02279593	0,17113017	0,88245041	1
6	0,08722758	0,09909095	0,53183627	6
7	0,03937574	0,15163611	0,79385706	2
8	0,13085405	0,073295	0,3590269	9
9	0,05958902	0,16088028	0,72971739	3

Comme pour le cas de l'égalité, le tracé des droites des effets principaux du paramètre C_{iw} , nous permet de déterminer les niveaux optimaux des facteurs d'entrée, figure (IV.5).

Figure IV.5. Droites des effets principaux du coefficient « C_{iw} »

Étape 14 : L'équation (IV.11) est utilisée pour calculer les valeurs prédites des différentes réponses, en prenant en compte les nouveaux poids w_i , correspondant aux niveaux optimaux des différents facteurs d'entrée

Tableau IV.14. Valeurs optimales prédites des réponses pour les nouveaux poids w_i .

	$w_{Ra} = 0,1$	$w_{Fz} = 0,2$	$w_{VB} = 0,2$	$w_{MRR} = 0,5$
	Ra (μm)	Fz (N)	VB (mm)	MRR (cm^3/min)
S/N-Pred	0,89214	-38,39361	20,16325	22,94734
Y-Pred	0,9024	83,115	0,0981	14,04

La comparaison des résultats obtenus avec les deux pondérations montre que la nouvelle pondération a permis une nette amélioration du MRR contre une augmentation de Ra et VB, tout en ayant des valeurs acceptables, alors que l'effort tangentiel n a pas subi de changement.

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthode d'optimisation topsis qui présente un compromis évident, si en plus on cherche à obtenir la rugosité, l'effort de coupe transversal, l'usure de l'outil et d'autre part à augmenter la productivité en augmentant la taille du copeau enlevé, il semble qu'il ne soit pas si facile de choisir ou de sélectionner un système de coupe qui réponde à tous ces objectifs en même temps.

L'utilisation du programme Design-Expert a permis d'obtenir un système de coupe optimal qui permet d'une part de réduire la rugosité, l'effort de coupe transversal et l'usure de l'outil, et d'autre part de maximiser le flux de copeaux

Conclusion général

Une étude expérimentale menée dans le cadre d'un projet de fin d'études sur le chariotage de l'acier inoxydable AISI 316L en milieu sec et avec lubrification minimale MQL, à l'aide d'une plaquette carbure revêtu.

L'objectif de ce travail est de proposer une modélisation des critères de rugosité de surface R_q et R_z , de l'effort transversal F_z , de l'usure de l'outil VB et du taux d'enlèvement de matière MMR. La méthode utilisée pour optimiser les conditions de coupe pour les modes de lubrification SEC et MQL est la méthode TOPSIS. Les résultats conduisent aux conclusions suivantes :

- Les essais paramétriques ont montré qu'en général l'utilisation de la lubrification MQL permet d'améliorer l'état de surface, de réduire l'effort de coupe et l'usure de la plaquette.
- Les résultats de l'ANOVA pour le critère de la rugosité de surface R_a , pour un niveau de confiance de 95 %, montrent que le temps d'usinage t_c , est le facteur le plus important qui affecte R_a , sa contribution est de 58,99 %, suivie par l'avance f avec 9,67% % de contribution, suivie par les interactions ($f * a_p$, $V_c * f$ et $V_c * a_p$) ont les contributions (9,25 %, 7,70 % et 6,89 %) respectivement, suivie par la vitesse de coupe V_c avec 5,77 % % de contribution Les autres termes peuvent être supposés non significatifs.
- Les résultats de l'ANOVA pour l'effort tangentiel F_z , montrent que la profondeur de passe a_p est le facteur le plus important qui affecte F_z , sa contribution est de 50,84 %, suivie par l'interaction ($V_c * f$) avec 18,02 % de contribution, suivie par le temps d'usinage t_c avec 17,80 %. Les autres termes sont supposés non significatifs.
- Les résultats de l'ANOVA pour l'usure de l'outil VB, montrent que le temps d'usinage t_c est le facteur le plus important qui affecte VB, sa contribution est de 50,69 %, suivie par l'interaction ($f * a_p$) avec 17,03 %, suivie par l'avance f avec 13,34 % de contribution, suivie par la vitesse de coupe V_c avec 11,02 % de contribution. suivie par l'interaction ($V_c * a_p$) avec 5,27 %, Les autres termes sont supposés non significatifs.
- **L'optimisation mono-objective** réalisée dans ce travail est basée sur l'analyse de Taguchi basée sur le rapport du signal/bruit. L'analyse résultats obtenus par méthode

de Taguchi montre que cette approche est très efficace dans le cas d'une seule réponse, car elle est simple et rapide. Par contre, les résultats obtenus montrent une divergence des solutions correspondant aux différents objectifs traités. D'où, la nécessité de recours à une des méthodes d'optimisation mut-objectifs.

- **L'optimisation multi-objective** La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de l'optimisation multi-objective par la méthode TOPSIS : vitesse de coupe $V_c = 250$ m/min, avance $f = 0,08$ mm/tour, profondeur de coupe $a_p = 0,3$ mm, temps d'usinage $t_c = 10$ minutes, les paramètres de sortie correspondants sont : $R_a = 0,49$ μm , $F_z = 84,837$ N, $V_B = 0,068$ mm et $MRR = 6$ cm^3/min .
- Afin d'améliorer le débit de copeaux, une pondération est utilisée. Les résultats de prédiction du régime optimal devient : $V_c = 390$ m/min, avance $f = 0,12$ mm/tour, profondeur de coupe $a_p = 0,1$ mm, temps de d'usinage $t_c = 5$ minutes, les paramètres de sortie deviennent : $R_a = 0,9042$ μm , $F_z = 83,115$ N, $V_B = 0,0981$ mm et $MRR = 14,04$ cm^3/min . ou on remarque une nette amélioration du MRR contre une augmentation de R_a et V_B , tout en ayant des valeurs acceptables, alors que l'effort tangentiel n'a pas subi de changement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Olivier Oullié, Éléments d'usinage et métrologie dimensionnelle, cours-TEC 040, 2009, ESTML Québec.
- [2] BAGUR F, Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7080.
- [3] Sandvik Coromant http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H.PDF
- [4] CLAUDE Barlier, LIONEL Girardin, Memotech productique matériaux et usinage, 1999, Editions Casteilla, PARIS.
- [5] Mecholic is an online resource for mechanical engineers that focuses on the information needs of engineers. Copyright © 2022 Mecholic. [En ligne]. Consulté le 26 avril 2021) Disponible à l'adresse: <https://www.mecholic.com/2016/02/different-types-of-cutting-tools-materials-and-their-properties.html>
- [6] AOUCI H, Production Mécanique II, Ecole nationale supérieure de technologie, 2013
- [7] ROB ELET M, ODIN G, Etude comparée de deux tests rapides d'usinabilité, corrélation avec les résultats d'essais de longue durée, Revue de met, pp. 1021-1032, 1973.
- [8] NOUIOUA M. Optimisation des paramètres de coupe lors de l'usinage à sec et avec quantité minimale de lubrification, Thèse de doctorat Génie mécanique et matériaux avancés (2019) Université du 8 Mai 45 Guelma
- [9] DOCUMENTATIONS GARANT-TOOLS, Manuel d'usinage GARANT, Principes de base, 2007, pp. 142-152.
- [10] BUTIN R & PINOT M, Fabrications mécaniques technologie, tome III, Fouchier, juillet 1988.
- [11] SANJIP K. H., Machinability Study of AISI 316 Grade Austenitic Stainless Steel Using P 30 Grade Cemented Carbide Insert
- [12] Khochtali, H., Zemzemi, F., & Bensalem, W. Approche analytique de prédiction des changements de microstructure durant l'usinage dur de l'acier AISI 52100: Etude de l'influence de la vitesse de coupe et de l'usure d'outil.
- [13] Michel.Baehrel, Paramètres de coupe, Cours, 2005, TS1CPI,

- [14] Moradi, M., Hormozi, E., Shamohammadi, M., & Rakhshan, V. (2018). Effets de la dépose des attaches orthodontiques sur la topographie et la rugosité de surface des restaurations en composite. *International Orthodontics*, 16(4), 623-637.
- [15] CETIM. Etude de l'usinage à grande vitesse, Décision d'aide N°: 72-7-0669. 1979.
- [16] Regnier, T. (2018). Analyses expérimentales et modélisation de la formation de bavures dans l'alliage AlSi7Mg0,3+0,5Cu—Application en coupe orthogonale et en fraisage (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).
- [17] BELHADI S, Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau, Thèse de doctorat de Productique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2009.
- [18] A. Moisan « Optimisation économique des opérations de tournage » *Ingénieurs et techniciens* 12,1975, pp.43-48.
- [19] Battaglia, J. L., Cois, O., Puigsegur, L., Oustaloup, A., (2001). Solving an inverse heat conduction problem using a non-integer identified model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 2671-2680.
- [20] <https://docplayer.fr/52576792-Manuel-technique-tournage-gorges-et-filetage.html>
- [21] SZCZOTKARZ, Natalia, MRUGALSKI, Roland, MARUDA, Radosław W., *et al.* Cutting tool wear in turning 316L stainless steel in the conditions of minimized lubrication. *Tribology International*, 2021, vol. 156, p. 106813.
- [22] DEL RISCO-ALFONSO, Ricardo, PÉREZ-RODRÍGUEZ, Roberto, ZAMBRANO ROBLEDO, Patricia del Carmen, *et al.* Optimization of the cutting regime in the Turning of the AISI 316L steel for biomedical purposes based on the initial progression of tool wear. *Metals*, 2021, vol. 11, no 11, p. 1698.
- [23] Touggui, Y., Belhadi, S., Uysal, A. *et al.* A comparative study on performance of cermet and coated carbide inserts in straight turning AISI 316L austenitic stainless steel. *Int J Adv Manuf Technol* **112**, 241–260 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06385-5>
- [24] A. Uysal, F. Demiren, E. Altan, Investigation of surface roughness and chips forms in milling of stainless steel by MQL Method, *Acta Physica Polonica A* 129(4): 439-441, 2016.
- [25] Wilhelm Hanglund. [JPG].in: Sandvik Coromant. Sandviken, Sweden [en ligne]. Consulter le 10 mai 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.sandvik.coromant.com/frfr/products/pages/productdetails.aspx?c=SNGN120408T01020%20%20%20%20670>
- [26] W. Grzesik, Procédés d'usinage avancés des matériaux métalliques : théorie, modélisation et applications, Elsevier, 2008.

[27] K. Bouacha, M.A. Yallese, K. Chaoui, S. Belhadi, Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool, *Int J Refract Metal Hard Mater* 45: 160- 178, 2014.

[28] B. Rajeswari and K.S. Amirthagadeswaran, Study of machinability and parametric optimization of end milling on aluminim hybrid composites using multi-objective genetic algorithm. *Journal of thr Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, 40:377, 2018.

[29] BOUZID, L. (2015). Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13 (Doctoral dissertation).