



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technologique-Skikda



Département de Technologie
Filière : Génie Mécanique

Mémoire

Présenté En Vue De l'Obtention du Diplôme De
Professeur d'Enseignement Supérieur

Thème:

**Prédiction et modélisation de la rugosité de surface lors du
tournage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 en
utilisant un plan complet L27**

Présenté par : **Taguig Ahlem**

Encadrant(e) : **Dr. Fnides Mohamed**

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Role
Mohamed kherief Nacereddine	MCA	ENSET	Président
Fnides Mohamed	MCA	ENSET	Encadrant
Mahmoud Bensaci	MCB	ENSET	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu ma directeur Fnides Mohamed de recherche, qui s'est montré disponible pour me guider avec des conseils et des commentaires rigoureux.

Je remercie vivement les membres du jury Mohamed kherief Nacereddine et Mahmoud Bensaci, qui ont eu l'amabilité de porter une appréciation sur ce travail et de participer au jury de soutenance.

Un hommage éternel à tous les enseignants qui m'ont encadré depuis mes premières années d'études jusqu'à aujourd'hui. Merci également à tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicace

Du profond de je dédie ce modeste travail:

**À l'homme, mon précieux offre du dieu mon exemple éternel ma réussite à
mon amour cher père Moussa.**

**A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a épargné aucun
effort pour me rendre heureuse : mon adorable Nadira.**

A mes chères frères: Mohamed Oussama et Raid Abed al Hamid.

**A mes chères sœurs: Wissem, Amani pour leurs encouragement permanents
et leur soutien morale.**

A mon oncle Abed al Hamid Allah yerahmo

et ses enfant Chemsou et Khaled.

**A tout qui m'ont aidé de près et de loin et ceux qui ont partagé avec moi les
moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail et qui m'ont
chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.**

Taguig ahlem.

Résumé

La qualité et la performance des pièces mécaniques sont devenues un objectif majeur du processus de fabrication. L'acier inoxydable se caractérise par une mauvaise usinabilité due à sa grande ductilité et à sa faible conductivité thermique.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet des paramètres de coupe sur les critères de la rugosité de surface (R_a , R_y et R_t), pour l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 en utilisant des outils de coupe en carbure (NC3030). Les méthodes ANOVA et RSM ont été utilisées pour la planification expérimentale (L27).

Mots clés : plans d'expérience ; usure ; ANOVA ; RSM.

Abstract

Abstract

The quality and performance of mechanical parts have become a major objective in the manufacturing process. Stainless steel is known for its poor machinability due to its high ductility and low thermal conductivity.

Summary The objective of this study is to evaluate the effect of cutting parameters on surface roughness criteria (R_a , R_y , and R_t) for austenitic stainless steel X2CrNi18-9 using carbide cutting tools (NC3030). ANOVA and RSM methods were used for experimental planning (L27).

Key words: experimental designs; wear; ANOVA; RSM.

ملخص

أصبحت جودة وأداء الأجزاء الميكانيكية هدفًا رئيسيًا في عملية التصنيع. يتميز الفولاذ المقاوم للصدأ بصعوبة التشغيل بسبب مرونته العالية وقلة توصيله الحراري.

هدف هذه الدراسة هو تقييم تأثير معلمات القطع على معايير خشونة السطح (Ra و Ry و Rt) للفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي 9-X2CrNi18 باستعمال أدوات قطع من الكربيد (NC3030). تم استخدام طرق ANOVA و RSM لتخطيط التجريبي (L27).

الكلمات الرئيسية: خطط التجربة ؛ التآكل ؛ ANOVA ؛ RSM

Index Des Figures

Index des figures

Figure I.1: Comparaison de matériaux de coupe.....	7
Figure I.2: Schéma des différentes composantes de l'effort de coupe en tournage.....	7
Figure. I.3.1: Le chariotage cylindrique et conique.....	9
Figure. I.3.2: Dressage extérieure et intérieur.	9
Figure. I.3.3: Le perçage.....	9
Figure. I.3.4: Le filetage intérieur et extérieur.....	10
Figure .I.4.1: Les outils à charioter.	10
Figure.I.4.2: Le dressage extérieur cylindrique et conique.....	11
Figure.I.4.3: Outils à fileter.....	11
Figure .I.5.1: Usure en caractère de la surface d'attaque.....	12
Figure .I.5.2: Usure en dépouille..	12
Figure I.5.3: Usure en entaille.....	13
Figure .I.5.4: Usure par déformation plastique.....	13
Figure .I.5.5: Usure par écaillage et fissuration thermique d'arête tranchante.	13
Figure .I.5.6: Rupture par cassure en pointe.....	14
Figure .I.5.7: Arête rapportée ou copeau adhérent.....	14
Figure .I.6: Principaux critères de rugosité.....	16
Figure .I.7 : copeaux.	17
Figure.I.8: le choix du lubrifiant.	19
Figure .I.9: Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface pour $f = 0.2$ mm/tr,	

Index Des Figures

$V_c=120\text{m/min}$ et $a_p = 1\text{mm}$ (acier AISI 4340).	19
Figure.I.10: Topographies typiques obtenus par l'interférométrie blanche légère, (a) sur la surface d'attaque de l'outil et (b) sur une surface usinée.	20
Figure. I.11: Effet de la vitesse sur l'évolution de rugosité en fonction de l'usure VB.....	21
Figure II.1 : Machine-outil utilisée.	23
Figure II.2 : La puissance de machine.	23
Figure II.3: Tableau des Nombres de tours par minute.	24
Figure II.4: Tableau d'avances.	24
Figure II.5: Photos des éprouvettes utilisées.	24
Figure II.6: Plaquettes de coupe utilisées.	26
Figure II.7: couches de revêtement.	27
Figure II.8: porte outil utilisé.....	27
Figure II.9: Rugosimètre.....	28
Figure II.10 : Méthode de mesure de la rugosité.	28
Figure III.1 : Effet de l'avance sur la rugosité : $V_c= 79,12 \text{ m}\backslash\text{min}$; $a_p=0,4\text{mm}$	38
Figure III.2 : Effet de l'avance sur la rugosité : $V_c= 197,82 \text{ m}\backslash\text{min}$; $a_p=0,7\text{mm}$	39
Figure III.3 : Effet de la profondeur de passe sur la rugosité: $V_c=79,12 \text{ m/min}$; $f=0,082 \text{ mm/tr}$	40
Figure III.4 : Effet de la profondeur de passe sur la rugosité : $V_c=197,82\text{m}\backslash\text{min}$; $f=0,25$	40
Figure III.5 : Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité : $a_p= 0,4\text{mm}$; $f=0,082 \text{ mm/tr}$	41
Figure III.6 : Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité : $a_p=0,7$; $f=0,25\text{mm/tr}$	42
Figure IV.1 : Graphiques des effets principaux pour R_a , R_y , R_t	52

Index Des Figures

Figure IV.2 : Graphiques des interactions pour Ra, Ry, Rt.....	53
Figure IV.3 : Graphe Résiduel pour (Ra).	54
Figure IV.4 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de (Ra).....	54
Figure IV.5 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de (Ry)	55
Figure IV.6 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de (Rt)	55
Figure IV.7 : Surface de réponse pour Ra en tant que fonction de (V_c, f), (V_c, ap) et (ap, f).56	56
Figure IV.8 : Surface de réponse pour Ry en tant que fonction de (V_c, f), (V_c, ap) et (ap, f).56	56
Figure IV.9 : Surface de réponse pour Rt en tant que fonction de (V_c, f), (V_c, ap) et (ap, f).57	57
Figure IV.10 : Graphique de Contour de (Ra) en fonction de V_c, f, ap	58
Figure IV.11: Graphique de Contour de (Ry) en fonction de V_c, f, ap	58
Figure IV.12 : Graphique de Contour de (Rt) en fonction de V_c, f, ap	59
Figure IV.13: Probabilités normales des résidus pour Ra, Rt et Rz.....	60

Index Des Tableaux

Index des tableaux

Tableau I.1: les machines de tournage.....	5
Tableau I.2: Classification normalisé des formes des copeaux obtenue en tournage.....	18
Tableau II.1: Les caractéristiques mécaniques de l'acier X2CrNi18-9.....	25
Tableau II.2: Les caractéristiques physiques de l'acier X2CrNi18-9.....	25
Tableau II.3: Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.....	26
Tableau II.4: Désignation des plaquettes.	26
Tableau II.5: les caractéristiques de porte outil utilisées.....	27
Tableau II.6 : Matrice L4 : 3 facteurs à 2 niveaux.....	32
Tableau II.7: Matrice de planification par la méthode unifactorielle.....	33
Tableau II.8: Conditions de coupe pour les essais unifactorielle.....	33
Tableau II.9: Plan général des expériences.....	35
Tableau IV.1: Essais expérimentaux et résultats pour les paramètres technologiques (L27).47	47
Tableau IV.2: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Ra.....	49
Tableau IV.3: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Ry.....	50
Tableau IV.4: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Rt.....	51

Table Des Matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I:ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.Procédés d'usinage.....	4
-----------------------------	---

I.2.Définition du tournage.....	4
---------------------------------	---

I.2.1.Les machines de tournage.....	4
-------------------------------------	---

I.2.2.Evolution des matériaux à outil6

a) L'acier rapide (AR).....	5
-----------------------------	---

b) Le carbure de tungstène cémenté	6
--	---

c) Céramique	6
--------------------	---

d) Le CBN (nitrure de bore cubique)	6
---	---

e) Le PCD (Diamant poly-cristallin)	6
---	---

I.2.3.Les efforts de coupe.....	7
---------------------------------	---

I.2.4.Conditions de coupe	8
---------------------------------	---

1. Vitesse de coupe	8
---------------------------	---

2. Vitesse d'avance	8
---------------------------	---

3. profondeur de coupe	8
------------------------------	---

I.2.5.Les définitions des principales opérations de tournage	9
--	---

<input type="checkbox"/> Le chariotage	9
--	---

<input type="checkbox"/> Le dressage	9
--	---

<input type="checkbox"/> Le perçage.....	9
--	---

<input type="checkbox"/> Le filetage.....	10
---	----

Table Des Matières

I.2.6. Les outils de tournage	10
a. Les outils à charioter	10
b. Les outils à dresser	10
c. Les outils à fileter	11
I.2.7. Le tournage dur	11
I.2.8. Endommagement des outils de coupe	12
a) Usure en cratère	12
b) Usure en dépouille	12
c) Usure en entaille	12
d) Usure par déformation plastique	13
e) Usure par écaillage et fissuration d'arête	13
f) Rupture brutale de la pointe d'outil	13
g) Usure par arête rapportée ou copeau adhérente	14
I.3. Rugosité	14
I.3.1. Défauts de rugosité	15
I.3.2. Principaux critères de rugosité	15
a) La rugosité totale R_t	15
b) La rugosité R_z	15
c) La rugosité moyenne arithmétique R_a	15
d) La rugosité maximale R_{max}	16
e) La rugosité R_p	16

Table Des Matières

I.4.copeau.....	16
I.4.1.Morphologie du copeau	16
I.4.2.Types de copeaux.....	17
I. 5.Lubrifiant et son rôle	18
I.5.1.Choix du lubrifiant.....	18
I.6.Etat de l’art.....	19
I.7.Conclusion.....	21

CHAPITRE II Moyens et procedure experimentale

II.1.Moyens utilisés	23
II.1.1.Machine –outil.....	23
II.1.2.Matériau à usiné	24
□ Les caractéristiques mécaniques	24
□ Les caractéristiques physiques	25
II.1.3.Outils de coupe utilisés	25
• II.1.3.1.Les plaquettes.....	25
□ II.1.3.2.Porte outil	27
II.1.4.Mesure de la rugosité.....	27
II.2. Planification des expériences	28
II.2.1. Objectif de la méthode.....	28
II.2.2.Principe de la méthode	28
a) Méthode classique de réduction des pertes.....	29

Table Des Matières

b) Méthode du plan d'expériences	29
II.2.3.La méthode simple.....	30
II.2.4.LA METHODE TAGUCHI	30
II.2.4.1. Limites de la méthode simple.....	30
II.2.4.2. Les plans d'expérience Taguchi.....	31
II.2.4.3. Les plans produits.....	31
II.2.4.4. Le plan comporte	32
II.2.5.La méthode unifactorielle	32
II.2.6.Condition de coupe	33
II.2.7.Méthode multifactorielle.....	33
II.2.8.Conclusion.....	36

Chapitre III :Influence des paramètres de coupe sur la rugosité

III.1.Introduction.....	38
III.2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité.....	38
III.2.1. Influence de l'avance	38
III.2.2. Influence de la profondeur de passe	39
III.2.3. Influence de la vitesse de coupe.....	41
III.3. Conclusion	42

CHAPITRE IV:MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES

D'USINAGE

IV.1.Introduction.....	44
IV.2.Analyse de variance ANOVA	44

Table Des Matières

.....	46
IV.3.Analyse de régression	
IV.4.Modélisation de (Ra, Ry, Rt)	47
IV.4.1.Analyse de la variance (ANOVA) pour les rugosités Ra, Ry et Rt	48
IV.4.2.Les graphiques des effets principaux et des interactions	52
IV.4.3.Les graphes résiduels pour Ra, Ry, Rt	53
IV.4.4.Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de Ra, Ry, Rt	54
IV.4.5.Diagrammes de surfaces 3D	55
IV.4.6.Graphique de contour pour Ra, Ry, Rt	57
IV.4.7.Les courbes probabilités normales de Ra, Ry, Rt	59
IV.5.Conclusion	60
Conclusion générale	63
Référence	65

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

Le tournage est une opération très importante dans l'industrie mécanique. Ainsi, le choix des paramètres de coupe optimaux est très important afin d'assurer un meilleur état de surface des pièces usinées, une durée de vie plus importante des outils de coupe et une productivité plus élevée. Le résultat d'un bon choix de conditions de coupe peut être constaté par une diminution des niveaux d'efforts de coupe et de vibrations de l'outil [1].

L'objectif de ce travail est d'étudier les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance par tour) sur l'état de surface des pièces usinées pendant le tournage.

La présente mémoire est structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est réservé à l'étude bibliographique qui concerne le tournage, des outils de coupe et évolution des matériaux à outil, endommagement des outils de coupe, ainsi que de l'état de surface et des critères de rugosité, copeau et du rôle de la lubrification, Une autre partie très importante est réalisée dans ce chapitre, ayant pour but de présenter des travaux de recherche relatifs au tournage des aciers inoxydables, l'utilisation des plans d'expérience et les méthodes d'optimisation utilisées.

Dans **le deuxième chapitre**, nous exposons une méthodologie de recherche qui se base sur la planification des expériences, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe utilisées.

Dans **le troisième chapitre**, les résultats d'une étude sont présentés, l'impact de chaque élément des conditions de coupe sur les différents critères de rugosité de surface lors de l'usinage d'un acier inoxydable avec un outil de coupe en carbure (NC 3030).

Dans **le dernier chapitre**, nous déterminons les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés, en utilisant la méthodologie de surface de réponse RSM. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe (V_c , f et ap) et les paramètres technologiques d'usinage étudiés (rugosité de surface). L'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse ont été réalisées par l'utilisation des logiciels de statistique «Minitab19 et Design-Expert 12 ». L'objectif de cette analyse est de déterminer

Introduction Générale

les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés, et de proposer des modèles mathématiques pour chaque phénomène étudié.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.Procédés d'usinage

L'usinage par enlèvement de matière est la méthode la plus fiable pour produire des pièces de précision à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées. Cette technique largement utilisée dans l'industrie automobile, ferroviaire et aéronautique, etc... . Cependant, elle représente une part importante des coûts des pièces. Avec l'introduction de nouvelles générations de machines à grande vitesse de coupe et d'avance, le développement de nouveaux outils et la nécessité d'une productivité accrue et d'une meilleure qualité des produits finis, il est essentiel de bien comprendre les processus d'usinage.[2][3]

Les utilisations de l'usinage des métaux peuvent être définies dans les cas suivants:

- ✓ La production de pièces finies à partir de blocs bruts produits par moulage, forgeage ou laminage.
- ✓ L'obtention d'une grande précision dans les dimensions des pièces moulées.
- ✓ L'obtention d'une surface lisse de haute qualité pour les pièces moulées en sable et les pièces forgées dont la surface s'oxyde en raison de la chaleur élevée. [4]

I.2.Définition du tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance. Permettant de définir le profil de la pièce.




La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes). [5]

I.2.1.Les machines de tournage

Il existe plusieurs types de tours, en fonction de:

- ❖ **La surface à usiner :** externe, interne, cylindrique, plane ou conique
- ❖ **La taille de la pièce à travailler :** petite, moyenne ou grande
- ❖ **Le nombre de pièces nécessaires :** production à l'unité, en lot ou en continu [4]

Tableau I.1: les machines de tournage. [6]

Les machines	Tour
Conventionnel	
commande numérique	
de grande capacité	

I.2.2.Evolution des matériaux à outil

Les outils de coupe utilisés pour toutes les opérations de tournage doivent être conçus en tenant pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'user, ainsi que la matière qui la constitue doit être plus dure que celle de la pièce usiner. [7]

Le classement des matières premières de coupe pourra être effectué par dureté croissante de façon suivant:

a) L'acier rapide (AR)

Il possède la ténacité la plus élevée et demeure donc un choix privilégié pour les opérations instables et à coupe interrompue. De plus, il permet des arêtes très tranchantes, qui permettent la réalisation d'usinage sans bavures, à cet égard il est particulièrement intéressant pour l'usinage des polymères.

b) Le carbure de tungstène cémenté

Elle est obtenue par frittage de poudres métalliques constituées d'une « matière » dure et d'un liant fusible lors du frittage. Il présente un bon compromis dureté-ténacité et peut être utilisée à des températures supérieures à celles de l'acier rapide. Le carbure peut obtenir dans des proportions variables des carbures additifs souvent du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de Niobium (NbC) pour les plus utilisés. Ces carbures additionnels permettent de diminuer l'usure en cratère qui survient lors de l'usinage de l'acier. Le cobalt confère au substrat sa ténacité. [8]

c) Céramique

Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Ces matériaux sont très stables chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevé. Leur utilisation est Principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur Ténacité est faible. Ils sont très sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage. [9]

d) Le CBN (nitrure de bore cubique)

Possède une dureté extrêmement élevée, seulement par le diamant. Même à haute température, sa dureté reste excellente et il peut être utilisé jusqu'à $2000^{\circ}C$. Comparé à la céramique, il est moins fragile et résiste très bien à l'usure par abrasion. Cependant, Son coût élevé le limite principalement sa production en série. Les cristaux de CBN, similaires à ceux du diamant synthétique, sont maintenus ensemble par un liant céramique ou métallique. Un liant céramique offre une faible ténacité mais une meilleure stabilité chimique et une excellente résistance à l'usure. En revanche, un liant métallique offre des caractéristiques inverses, avec une bonne ténacité mais une résistance à l'usure. Le CBN est recommandé pour l'usinage de pièces dont la dureté est supérieure à 48HRC.

e) Le PCD (Diamant poly-cristallin)

Est un diamant synthétique qui possède une dureté similaire à celle du diamant naturel. Ce matériau est très onéreux et son utilisation est limitée à l'usinage des matériaux non-ferreux. Sa haute résistance à l'usure par abrasion le rend économiquement viable pour l'usinage de matériaux hautement abrasifs tels que les composites et le graphite. [8], [10], [11]

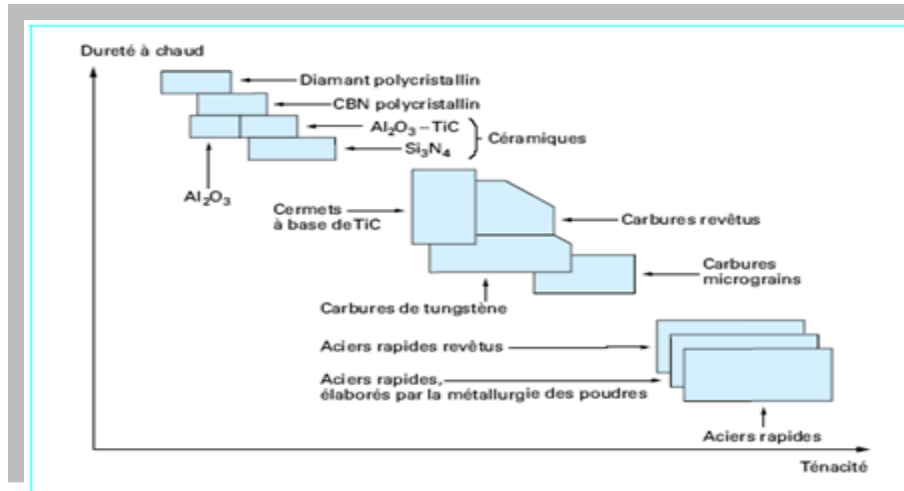


Figure I.1: Comparaison de matériaux de coupe [12].

I.2.3. Les efforts de coupe

- **L'effort axial (Fa):** il correspond à la force appliquée sur l'outil parallèlement à l'axe de rotation de la pièce à usiner.
- **L'effort radial (Fr):** qui est défini comme étant l'effort parallèle au rayon de la pièce. Il est appelé aussi effort de pénétration.
- **L'effort tangentiel (Ft):** c'est l'effort parallèle à la tangente à la surface de la pièce au niveau de la pointe de l'outil. [13]

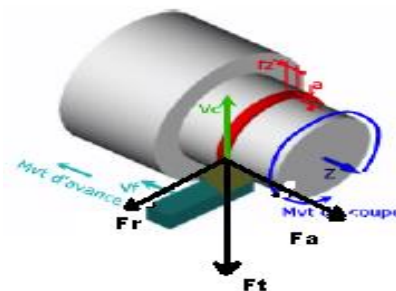


Figure I.2: Schéma des différentes composantes de l'effort de coupe en tournage.

I.2.4. Conditions de coupe

Elles sont choisies en fonction du matériau de la pièce, du matériau de l'outil de coupe, des angles de l'outil, de la présence d'un liquide de refroidissement et de lubrification, ainsi que de la durée de vie prévue de l'outil [4].

1. Vitesse de coupe :

C'est le déplacement d'un point de l'arête tranchante de l'outil par rapport à la surface de coupe en une unité de temps.

Cette vitesse de coupe lui est donnée par la formule suivante:

$$V_c = \pi \times D \times N / 1000 \quad (I.1)$$

V_c : vitesse de coupe est exprimée en m/min

D : le diamètre du cercle est exprimé en mm

N : la vitesse de rotation est exprimée en tr/min [14]

2. Vitesse d'avance:

Est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. [15]

Cette vitesse d'avance lui est donnée par la formule suivante:

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

V_f : vitesse d'avance est exprimée en mm/min soit en $mm/tour$

3. profondeur de coupe :

La mesure de la profondeur de coupe est toujours effectuée perpendiculairement à la direction de l'avance et non le long du bord de l'outil

a : profondeur de passe est exprimée en mm [15], [16].

I.2.5. Les définitions des principales opérations de tournage [17]

- ❖ **Le chariotage:** est l'opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.

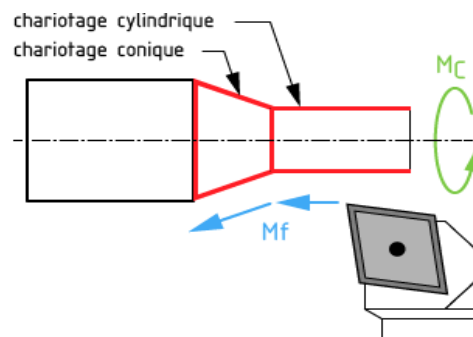


Figure. I.3.1: Le chariotage cylindrique et conique.

- ❖ **Le dressage:** Est l'opération qui consiste à usiner une surface plane (extérieure ou intérieure) perpendiculaire à l'axe de la broche.

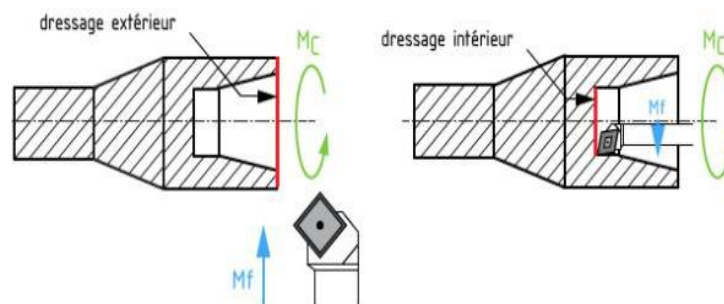


Figure. I.3.2: Dressage extérieure et intérieure.

- ❖ **Le perçage:** est l'opération qui consiste à usiner un trou dans la pièce (débouchant ou borgne) à l'aide d'une forêt. Souvent, l'axe du trou est confondu avec celui de la pièce.

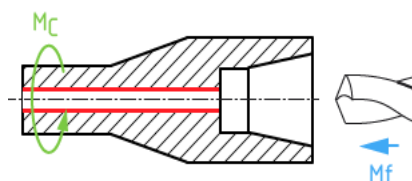


Figure. I.3.3: Le perçage.

❖ **Le filetage:** Est l'usinage consistant à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.

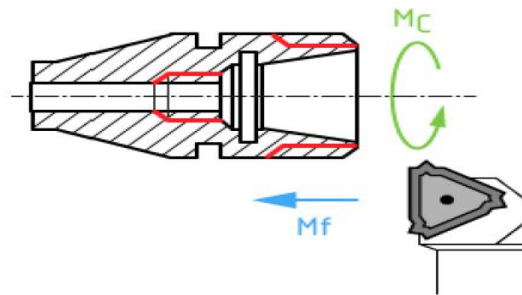


Figure. I.3.4: Le filetage intérieur et extérieur.

I.2.6. Les outils de tournage [17]

Ils y a plusieurs outils de tournage comme:

a. Les outils à charioter

Ces outils se caractérisent par une seule direction de travail possible pour la réalisation de cylindres ou de cônes extérieurs. Si la pièce comporte un épaulement, on obtient une surface en travail d'enveloppe et une surface en travail de forme.

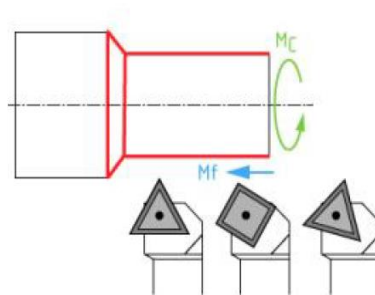


Figure .I.4.1: Les outils à charioter.

b. Les outils à dresser

Pour ce type d'outils une seule direction de travail est possible, perpendiculairement à l'axe de la pièce, pour la réalisation de surfaces planes extérieures ou intérieures. Si la pièce

comporte un épaulement on obtient une surface en travail d'enveloppe et une surface en travail de forme.

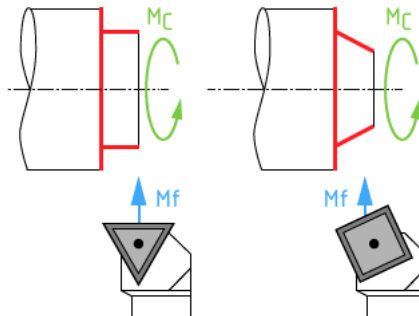


Figure.I.4.2: Le dressage extérieur cylindrique et conique.

c. Les outils à fileter

Ce sont des outils utilisés pour la réalisation des opérations de filetage.

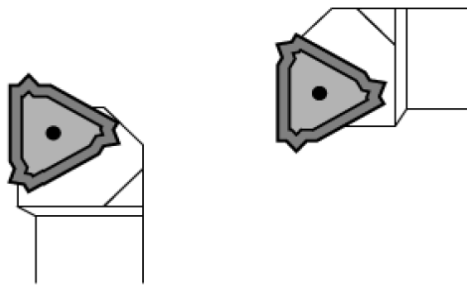


Figure.I.4.3: Outils à fileter

I.2.7.Le tournage dur [13]

Le tournage dur offre des taux d'enlèvement de matière bien plus élevés que la rectification classique, ce qui le rend adapté à une large gamme de productions, de petites à grandes séries, telles que l'industrie du roulement et de l'automobile. Sa flexibilité permet de travailler sur des formes complexes avec des réglages rapides, facilitant ainsi l'adaptation aux besoins de production changeants. Il est particulièrement avantageux pour les petites séries répétitives et les changements de fabrication fréquents, nécessaires dans les environnements de travail en flux tendu ou juste-à-temps. De plus, il permet de tourner des pièces de grandes

dimensions et de travailler aux chocs avec la bonne nuance d'outil, tout en consommant beaucoup moins de puissance que la rectification. Enfin, les plaquettes CBN peuvent être réaffûtées, ce qui contribue à réduire les coûts de production.

I.2.8. Endommagement des outils de coupe [18]

a) Usure en cratère

L'usure en forme cratère apparaît sur la surface de coupe de la plaquette. Elle est causée par une réaction chimique entre le matériau de la pièce et le matériau de coupe. La vitesse de coupe l'amplifie. Une usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre. Elle est définie par sa profondeur maximale K_T , ou par son rapport de caractérisation

$$\gamma_r = K_T / K_M \quad (I.3)$$



Figure .I.5.1: Usure en caractère de la surface d’attaque.

b) Usure en dépouille

C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable, étant donné qu'elle est plus stable et prévisible. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce

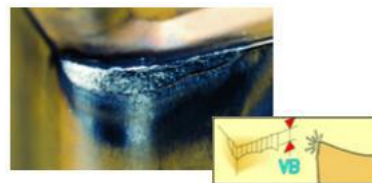


Figure .I.5.2: Usure en dépouille.

c) Usure en entaille

C'est une combinaison de l'usure en cratère et en dépouille au point de l'intersection de l'arrête tranchante principale avec la surface usinée (qui coïncide avec la ligne de la profondeur de passe). Elle est courante dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.

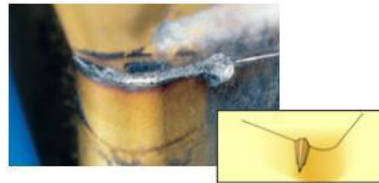


Figure.I.5.3:Usure en entaille.

d) Usure par déformation plastique

L'usure due à la déformation plastique se produit lorsque le matériau de coupe devient mou en raison d'une température excessive. En règle générale, plus la nuance est dure et plus le revêtement est épais, plus la résistance à la déformation plastique est élevée.

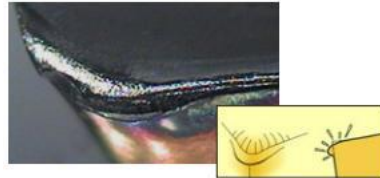
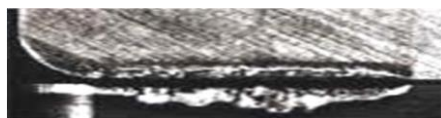


Figure.I.5.4: Usure par déformation plastique.

e) Usure par écaillage et fissuration d'arête

Se produit lorsque des efforts cycliques ou des chocs thermiques sont appliqués lors de l'usinage, ce qui entraîne l'apparition de fissures ou d'ébréchantures sur l'arête ou la face de coupe. Ces défauts réduisent considérablement la durée de vie de l'outil.



(a) Usure par écaillage



(b) Usure par fissuration thermique

Figure.I.5: Usure par écaillage et fissuration thermique d'arête tranchante.

f) Rupture brutale de la pointe d'outil

Ce genre de problème avec l'outil se produit lors de l'usinage de matériaux très durs et hétérogènes avec un outil fragile, les outils en céramique étant particulièrement sensibles lorsque les conditions de coupe ne sont pas bien définies dans les matériaux contenant des inclusions.

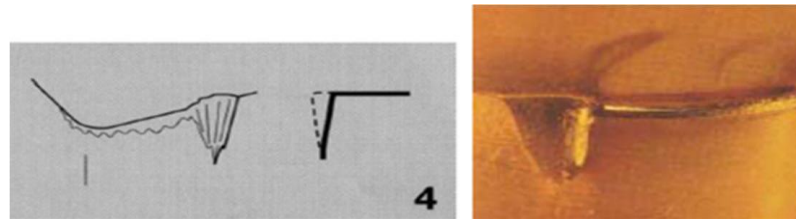


Figure.I.5.6: Rupture par cassure en pointe.

g) Usure par arête rapportée ou copeau adhérent

Est causée par le soudage sous pression du copeau sur la plaquette. C'est le type d'usure le plus fréquent avec des matériaux collants tels que les aciers à faible teneur en carbone, les aciers inoxydables et l'aluminium. Une vitesse de coupe faible accélère la formation d'une arête rapportée.



Figure .I.5.7: Arête rapportée ou copeau adhérent.

I.3.Rugosité

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique.

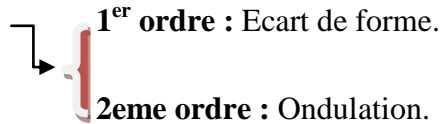
Les surfaces qui ont été usinées ne sont pas parfaites, elles ont des imperfections causées par les procédés d'usinage, les outils, les matériaux, etc. La fonctionnalité d'une surface dépend de plusieurs facteurs, notamment de son état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice

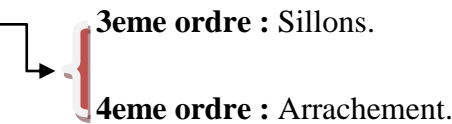
de rugosité est bas, plus il est difficile à obtenir, ce qui entraîne inévitablement une augmentation des coûts de fabrication [19].

I.3.1. Défauts de rugosité

En général, les imperfections de surface jouent un rôle important dans le bon fonctionnement d'une pièce. Ces imperfections peuvent être de nature géométrique ou physico-chimique. Dans ce cas, nous nous intéressons uniquement aux défauts géométriques, qui sont classés selon quatre numéros d'ordre [20].

Les défauts sont classés comme suit: [21]

Défauts Macro géométriques:  **1^{er} ordre** : Ecart de forme.
2^{eme} ordre : Ondulation.

Défauts Micro géométrique:  **3^{eme} ordre** : Sillons.
4^{eme} ordre : Arrachement.

I.3.2. Principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage soit OX la ligne moyenne tel que:

$$\int_0^l y dx = 0 \quad (I.4)$$

Les critères de rugosité les plus importants sont déterminés par rapport à cette ligne médiane [22].

a) La rugosité totale Rt: représente la différence totale entre le point le plus élevé et le point le plus bas du profil.

b) La rugosité Rz: représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

c) **La rugosité moyenne arithmétique Ra**: représente la moyenne arithmétique des différences (en valeur absolue) par rapport à OX. Ra est calculé sur une longueur d'évaluation.

$$Ra = (1/L) \int_0^L |Y| dx \quad (I.5)$$

d) **La rugosité maximale Rmax** : est la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité, mesurée entre une saillie et un creux consécutifs.

e) **La rugosité Rp**: est la hauteur maximale de la saillie de rugosité. Rp est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne sur une certaine longueur (L).

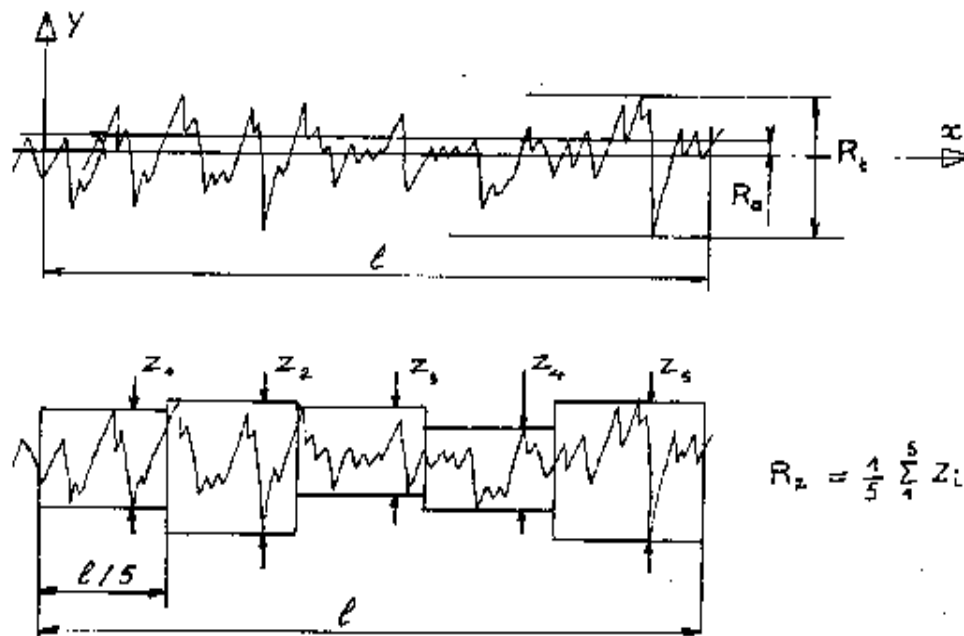


Figure .I.6: Principaux critères de rugosité.

I.4.copeau

I.4.1.Morphologie du copeau

Lorsque le copeau se forme, une nouvelle surface métallique est créée. En général, le copeau à une forme courbe et sa structure est grandement influencée par les paramètres de coupe, tels que l'avance et la profondeur de passe. Il se forme en poussant le métal devant la surface de

l'outil, suivi d'une découpe d'un élément du copeau et du glissement de cet élément découpé sur la surface de l'outil. [13]



Figure.I.7: copeaux.

I.4.2.Types de copeaux

Les mécanismes qui génèrent des morceaux de métal et les phénomènes thermomécaniques qui interviennent conduisent, à une échelle microscopique, à la formation de morceaux de différentes natures et morphologies. On peut classer ces morceaux en trois grandes catégories morceau continu, morceau avec une arête ajoutée, morceau discontinu [23], [24].

Dans l'industrie, il est préférable d'avoir des morceaux courts. Les morceaux longs, lorsqu'ils s'entremêlent avec la pièce, nuisent à sa surface. Il existe une classification normalisée pour la forme des morceaux. Les formes représentées dans le tableau **I.2** sont extraites de la norme ISO 3685.



















1 copeau ruban	2 copeau tubulaire	3 copeau en spirale	4 copeau hélicoïdal an rontelle	5 copeau hélicoïdal conique	6 copeau en arc	7 copeau élémentaire	8 copeau aiguille
1.1 Long 	2.1 Long 	3.1 Flat 	4.1 Long 	5.1 Long 	6.1 Attaché 		
1.2 Court 	2.2 Court 	3.2 Conique 	4.2 Court 	5.2 Court 	6.2 Détaché 		
1.3 Enchevêtré 	2.3 Enchevêtré 		4.3 Enchevêtré 	5.3 Enchevêtré 			

Tableau. I .2: Classification normalisé des formes des copeaux obtenue en tournage.

I. 5.Lubrifiant et son rôle [19]

Le procédé de lubrification est efficace uniquement si le liquide circule de manière efficace et abondante dans la zone de coupe. Cela permet de réduire l'usure de l'outil de coupe, d'augmenter la vitesse de coupe et donc de réduire les coûts d'usinage. De plus, cela diminue le coefficient de frottement entre les copeaux et l'outil ainsi que entre l'outil et la pièce, ce qui est l'effet lubrifiant. Dans certains cas, cela empêche la formation de microsoudures et améliore l'écoulement des copeaux, réduisant ainsi les risques d'arrachement et assurant une bonne rugosité de la surface usinée. En outre, cela permet de réduire la chaleur pour limiter l'usure, en refroidissant et en dégageant avec un effet lubrifiant pour réduire le coefficient de frottement du copeau. Dans ce cas, on utilise des huiles de coupe.

I.5.1.Choix du lubrifiant: Ci-dessous l’organigramme qui montre le choix du lubrifiant [25]

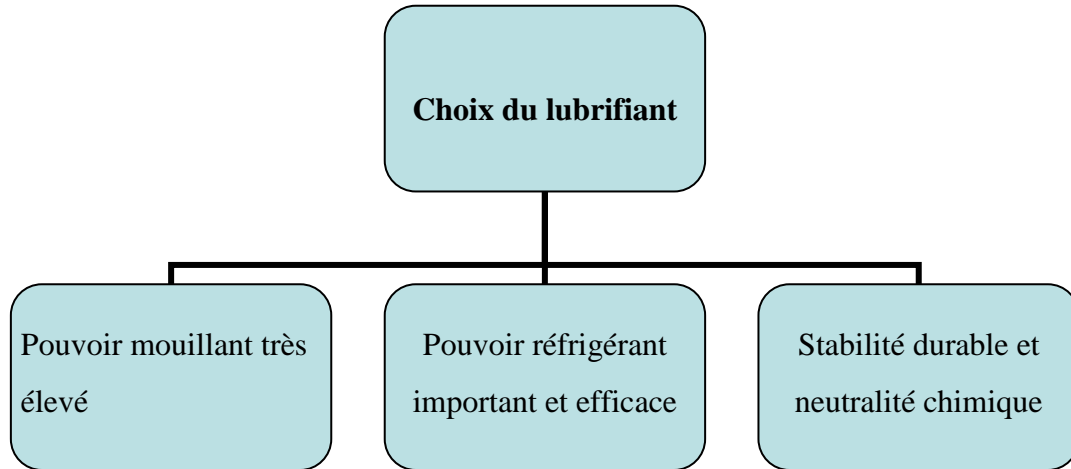


Figure.I.8: le choix du lubrifiant.

I.6. Etat de l’art

Davies [26] et autres ont effectué des expériences semblables pour comparer les taux d’usure de l’outil pour trois aciers de la même composition chimique mais de différentes microstructures. Ils ont notamment prouvé que le taux d’usure de l’outil diminue avec la décroissance de la taille des grains.

J.G. Lima [27] et d'autres chercheurs ont étudié la facilité d'usinage des aciers durcis à différents niveaux de dureté et en utilisant différents matériaux d'outil de coupe. Leur étude s'est concentrée sur l'usinage de l'acier AISI 4340 durci (un acier faiblement allié à haute résistance) et de l'acier AISI D2 (un acier d'outil pour le travail à froid). Les résultats ont montré que lors du tournage de l'acier AISI 4340, la rugosité de surface des pièces usinées s'est améliorée avec l'augmentation de la vitesse de coupe, mais s'est détériorée avec l'augmentation de l'avance. En revanche, la profondeur de passe a eu un effet moins significatif sur l'amélioration de la rugosité de surface. L'usinage de l'acier AISI D2 avec des plaquettes mixtes à base d'alumine a permis d'obtenir une surface comparable à celle obtenue par rectification cylindrique .

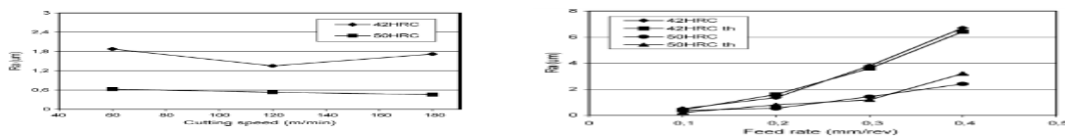


Figure .I.9: Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface pour

$f = 0.2 \text{ mm/tr}$, $V_c = 120 \text{ m/min}$ et $a_p = 1 \text{ mm}$ (acier AISI 4340).

Luo [28] et d'autres chercheurs ont étudié le phénomène d'usure lors du tournage de l'acier allié durci 35NCD6, dont la dureté varie entre 35 et 60 HRC. Ils ont utilisé des outils en CBN (composés de liants Tic et Al₂O₃) ainsi que des outils en céramique (composés d'Al₂O₃ et Tic). Leurs résultats ont montré que le principal mécanisme d'usure pour les outils en CBN était l'abrasion du liant du matériau par les particules dures en carbure de la pièce, tandis que pour les outils en céramique, l'usure était principalement due à l'adhésion et à l'abrasion.

F.Mahfoudi [29] et d'autres ont utilisé l'UGV pour usiner un acier durci à 50 HRC (AISI 4140/42CrMo4) avec un outil en PCBN, en utilisant des vitesses de coupe élevées (300 et 400 m/min). Les résultats montrent que l'UGV pour le tournage dur peut être considérée comme acceptable pour une application industrielle, car elle offre une très bonne rugosité de surface et une durée de vie significative de l'outil. Une corrélation qualitative est également établie entre l'usure en cratère et la distribution de la température à l'interface entre l'outil et les copeaux, déterminée à l'aide d'un modèle thermomécanique. L'usure en dépouille, l'usure en cratère et la rugosité de surface sont étudiées afin de choisir un critère d'usure approprié. Les analyses par MEB/DEX et l'interférométrie blanche légère mettent en évidence l'importance de l'usure en cratère et nous aident à mieux comprendre le rôle des phénomènes de diffusion/chimique dans les mécanismes d'usure.

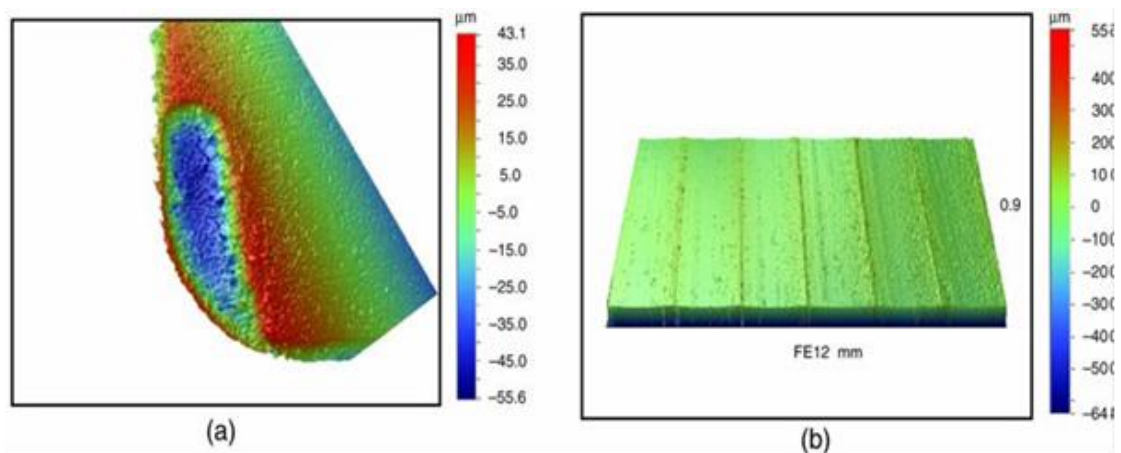


Figure.I.10: Topographies typiques obtenus par l'interférométrie blanche légère, (a) sur la surface d'attaque de l'outil et (b) sur une surface usinée.

Yaltese MA [30] et d'autres chercheurs ont noté que l'outil CBN présente une bonne résistance à l'usure lors du tournage dur de l'acier 100Cr6 trempé à (60HRC), même si ce

matériau dur est agressif. La qualité de surface obtenue avec l'outil CBN est considérablement améliorée par rapport à l'opération de rectification, même si l'avance est augmentée d'un facteur de 2,5.

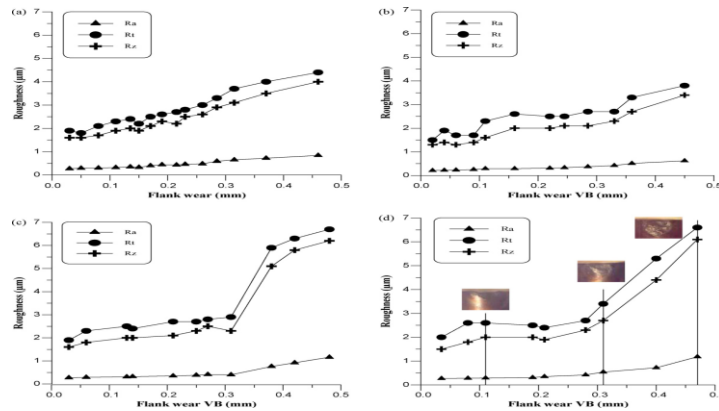


Figure. I.11: Effet de la vitesse sur l'évolution de rugosité en fonction de l'usure VB.

Paulo .J and al [31] et d'autres chercheurs ont examiné la facilité d'usinage de l'acier D2 lors du tournage dure à froid avec des outils en céramique en utilisant des méthodes statistiques. Les résultats montrent que, avec les bons paramètres de coupe, il est possible d'obtenir une rugosité de surface ($R_a < 0.8\mu\text{m}$) qui permet d'éviter les opérations de rectification cylindrique.

I.7.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la bibliographie sur les pièces métalliques dans les opérations de tournage .Nous avons parlé de la fabrication en général, du tournage et de ses outils, des forces de coupe, des conditions de coupe, de la rugosité et de copeaux. Enfin, nous avons abordé les recherches scientifiques.

CHAPITRE II

Moyens et procédure

Expérimentale

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, présente tous les moyens utilisés (machine-outil, Matériau à usiné, outils de coupe, appareil de mesure de la rugosité) pour effectuer des expériences afin de décrire et étudier l'effet des conditions de fonctionnement sur les critères de rugosité dans le tournage. Nous proposons également différentes méthodes pour planifier la réalisation des expériences. Ces expériences ont été réalisées dans une entreprise « Somatel ENMTP Ain Smara Constantine, service Usinage».

II.2.Moyens utilisés

II.2.1.Machine –outil

L'usinage a été réalisé sur un tour conventionnel SONACOM LIEBHERR d'une puissance de 18,5kw.



Figure II.1: Machine-outil utilisée.



Figure II.2: La puissance de machine.

-Les différentes Nombres de tours par minute de cette machine(tr /min): 45- 56-71 -90- 112- 140 - 180 - 224 - 280 - 350 - 355 - 450 - 560 - 710 - 900 - 1120 - 1400.

-Les différentes d'avance de cette machine (mm/tr):

0,063 - 0,071 - 0,082 - 0,09 - 0,1 - 0,125 - 0,14 - 0,165 - 0,18 - 0,2 - 0,25 - 0,28 - 0,33 - 0,355- 0,4 - 0,5 - 0,56 - 0,66 - 0,71 - 0,8.



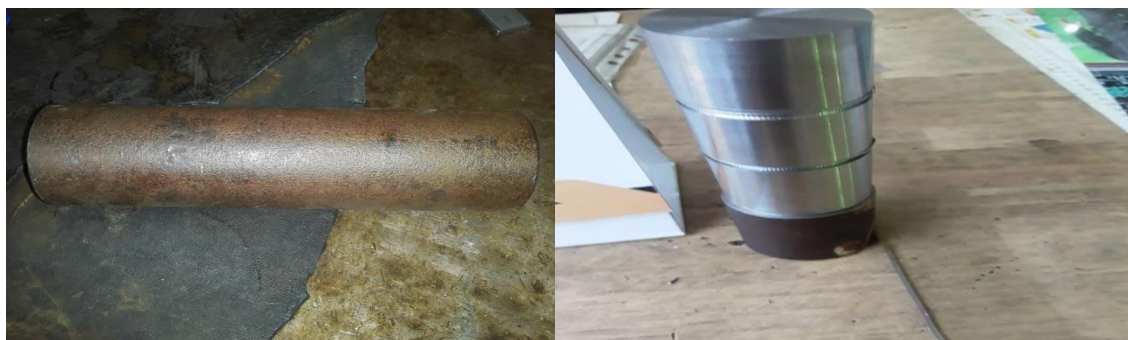
Figure II.3: Tableau des Nombres de tours par minute.

Figure II.4: Tableau d'avances.

II.2.2. Matériau à usiné

Dans notre étude, nous avons utilisé de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9, qui présente une bonne résistance à la corrosion, ce qui permet de l'utiliser dans différents secteurs (secteur médical l'agroalimentaire, automobiles...etc.) [32][33]. Il est classé parmi les aciers difficiles à usiner en raison de sa ductilité et de sa mauvaise conductivité thermique. [34][35]

- ◆ Un diamètre de 45mm.
- ◆ Une longueur de 164mm.



Bruit

éprouvette

Figure II.5: Photos des éprouvettes utilisées.

- **Les caractéristiques mécaniques:** Les caractéristiques mécaniques de la nuance d'acier utilisé est donnée dans le tableau suivant:

CHAPITRE II : MOYENS ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Tableau.II.1: Les caractéristiques mécaniques de l'acier X2CrNi18-9. [36]

D (mm)	Dureté (HB)	Limite d'élasticité		Résistance à la traction	Allongement à la rupture	
		$R_{p0,2}$	$R_{p1,0}$	R_m	A%	
$d \leq 160$	142	N/mm ²		N/mm ²	long.	Trans.
		175	210	450-680	45	-

- **Les caractéristiques physiques:** Les caractéristiques mécaniques de la nuance d'acier utilisé est donnée dans le tableau suivant :

Tableau II.2: Les caractéristiques physiques de l'acier X2CrNi18-9. [36]

Masse volumique	Module d'élasticité à 20°C	Conductivité thermique à 20°C	Capacité thermique massique à 20°C	Résistivité électrique à 20°C	Magnétisable
(kg/dm ³)	(KN/mm ²)	(W.m.K ⁻¹)	(j.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	($\Omega \times$ mm ² /m)	
7,9	200	15	500	0,73	non

II.2.3.Outils de coupe utilisés

• II.2.3.1.Les plaquettes

Les plaquettes choisies pour cette étude elle se distingue par les caractéristiques et les informations suivantes: [37]

1. Une durée de vie prolongée de l'outil grâce à une résistance accrue et une résistance à la chaleur renforcée par l'adoption d'un film de revêtement CVD à haute résistance de liaison.
2. Ses différentes applications sur des pièces en acier, en acier doux et en acier inoxydable éliminent les changements fréquents d'outil.

CHAPITRE II : MOYENS ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Tableau. II.3: Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Marque
Carbure Métallique avec Revêtement CVD	NC3030	KNUX 160405R11	KORLOY

Tableau.II.4: Désignation des plaquettes.

NC3030	NC	3	0	30
Désignation	CVD	acier	tournage	Grad P30



Figure.II.6: Plaquettes de coupe utilisées.

Ces plaquettes possèdent plusieurs couches de revêtement:

- 1) **Al₂O₃**: adapté à la coupe à grande vitesse.
- 2) **Couche de liaison**: couche de revêtement à haute résistance de liaison pour une grande stabilité.
- 3) **Tic**: Meilleure résistance à l'usure lors de l'usinage à basse vitesse.
- 4) **TicN**: Meilleure résistance à l'usure et couche anti-écaillage basée sur la technologie de revêtement micro-grain MT_CVD.
- 5) **Substrat**: substrat en carbure P30 résistant.

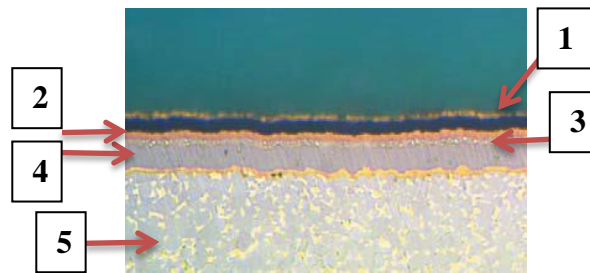


Figure.II.7: couches de revêtement.

- **II.2.3.2. Porte outil**

Pour mener les essais, nous avons utilisé un outil de support (SANDVIK) sur lequel les plaquettes sont fixées mécaniquement par un trou central. Selon la norme ISO, le support est désigné **CKJN R 3225P16** elle se distingue par les caractéristiques suivantes [38].

Tableau.II.5: les caractéristiques de porte outil utilisées.

Désignation de coupe	Direction du manche (mm)	Entrée angle(°)	Angle de coupe(°)	Angle d'inclinaison	Matière	Angle et forme plaquette	Plaquette
CKJN R 3225P16	25	93	-6	0	Acier	55°K	KNUX 160405R11



Figure II.8: porte outil utilisé.

II.2.4. Mesure de la rugosité

Pour mesurer les différents critères de rugosité (R_a , R_y , R_t), nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) SurfTest 301 (Mitutoyo) avec une résolution de $0,1 \mu\text{m}$. Il était équipé d'une imprimante de profil de rugosité. Cet appareil est composé d'une pointe de diamant (palpeur)

avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ qui se déplace linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpage est de 4 mm avec une longueur de base de 0,8 mm (0,8x5). La plage de mesure des critères de rugosité est de 0,05 à $40\mu\text{m}$ pour Ra et de 0,3 à $160\mu\text{m}$ pour Rt et Rz.



Figure II.9: Rugosimètre



Figure II.10: Méthode de mesure de la rugosité.

II.3. Planification des expériences

II.3.1. Objectif de la méthode

Les plans d'expériences ont pour objectif de résoudre le problème de variabilité des éléments d'entrée et des conditions de fabrication dans un procédé industriel visant à fabriquer des produits à partir de matières premières ou de pièces détachées.

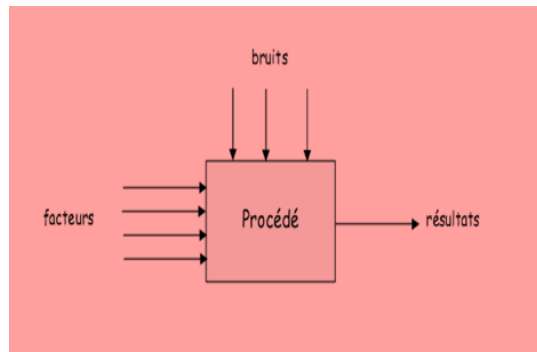
L'objectif du responsable de production est de :

- ✓ rendre le système de production robuste (c'est à dire insensible aux bruits),
- ✓ limiter la perte de qualité en produisant conformément aux critères de qualité.

II.3.2.Principe de la méthode

Les résultats issus du système de production doivent respecter des valeurs nominales dictées par la qualité.

Les variations des facteurs d'entrée (maîtrisables) et les bruits(ne pas maîtrisables) sont des causes de perte de qualité.



a) Méthode classique de réduction des pertes

Dans la méthode classique, on agit directement aux causes qui provoquent la perte de qualité on apporte des modifications suivantes :

- changer les compositions des matières premières.
- sélectionner les pièces détachées.
- utiliser des machines plus performantes.
- climatiser les locaux.
- filtrer l'air des locaux.

Toutes ces solutions ont souvent un prix considérable. Cependant, le résultat n'est pas toujours à la hauteur l'investissement.

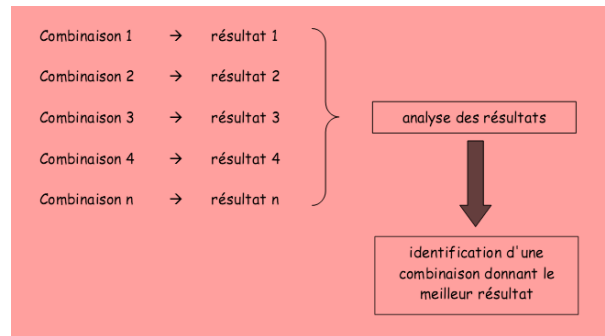
b) Méthode du plan d'expériences

L'objectif du plan d'expériences n'est pas de supprimer la cause, mais l'effet. Le principe général de cette méthode est :

- consiste à trouver la meilleure combinaison optimale des facteurs d'entrée qui donne toujours le meilleur résultat en sortie.
- Les influences cumulées des différents facteurs se compensent pour minimiser l'écart par rapport aux valeurs nominales en sortie.

La seule façon de trouver cette combinaison est de tester plusieurs combinaisons afin de mettre en évidence l'influence de chaque facteur et de déduire la combinaison optimale.

- Chaque facteur est défini avec 1, 2, 3, 4 ou 5 niveaux de valeurs.
- Les combinaisons et leur nombre sont normalisés.
- La combinaison finale peut différer de toutes celles utilisées lors des expériences.



II.3.3.La méthode simple

La méthode simple met en œuvre un plan d'expériences dont le but est de ramener le taux de rebut à une valeur admise au niveau de la qualité. Cette démarche est supervisée par un groupe de travail composé du responsable qualité, du responsable production, du responsable méthodes et du chef d'équipe de la ligne de production concernée.

Le plan d'expériences se déroule en 6 étapes:

Étape 1 : Définir la cible et planifier les expériences.

Étape 2 : Sélection des facteurs et choix de leurs niveaux.

Étape 3 : Choisir une matrice d'expériences.

Étape 4 : La réalisation des essais.

Étape 5 : L'analyse des résultats.

Étape 6: Vérification expérimentale.

II. 3.4.LA METHODE TAGUCHI

II.3.4.1. Limites de la méthode simple

Le but de l'expérimentation est de fixer la valeur de sortie à la valeur nominale, mais aussi de rendre le système résistant aux bruits non maîtrisés (système robuste). Cela signifie qu'il est nécessaire d'optimiser à la fois le résultat moyen et la dispersion du résultat autour de la moyenne (résultat précis et stable). La méthode simple ne prend pas en compte la dispersion des résultats expérimentaux autour de la moyenne. Il est donc possible d'obtenir un

système avec une bonne moyenne, mais des résultats individuels très dispersés et en dehors des tolérances, ce qui ne serait pas conforme aux exigences de qualité.

La méthode Taguchi prend en compte la dispersion des résultats en intégrant une information supplémentaire dans l'analyse : le ratio signal/bruit. Cette information est appelée ratio S/N ou simplement S/N par la suite (ratio Signal/Bruit).

II.3.4.2. Les plans d'expérience Taguchi

L'idée principale est de se concentrer uniquement sur les quelques expériences qui sont essentiels pour l'analyse. Les résultats obtenus ne peuvent pas être optimale, mais lorsque ces résultats sont mis en œuvre, le procédé est amélioré. Par conséquent, moins d'argent et de temps sont dépensés lorsque la méthode de Taguchi est employée. La méthode est identique à la méthode simple, mais on cherche à optimiser à la fois la moyenne et le rapport S/N, en donnant toutefois la priorité à ce dernier. Cette méthode est repose sur l'utilisation de tableaux orthogonaux, qui montrent que les niveaux de facteur doivent être choisis chaque fois pour faire le moins de passages possibles.

La méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires [18].

Son objectif est de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. Elle permet d'obtenir des résultats en utilisant moins d'essais expérimentaux que les autres méthodes. Taguchi a démontré que si ces essais expérimentaux sont choisis de manière appropriée, il n'est pas nécessaire de réaliser des expériences factorielles complètes.

II.3.4.3. Les plans produits

Dans un plan produit, on cherche, en plus de l'effet des facteurs maîtrisables, à connaître l'effet de certains facteurs non maîtrisables. Ainsi, on définit des facteurs de bruits pour lesquels on fixe des niveaux.

Il est évident que pour mener les expériences relatives à ces facteurs, il est indispensable de mettre en œuvre des moyens technologiques exceptionnels permettant, pour le temps des essais, de rendre ces facteurs bruits maîtrisables.

Ainsi, l'influence des facteurs maîtrisables pourra être optimisée en présence des bruits.

II.3.4.4. Le plan comporte

- 3 facteurs bruits O, M, N.
- 3 facteurs maîtrisables A, B, C combinés en une matrice L4.

Chaque case centrale contient une moyenne d'échantillon combinant une combinaison ABC avec une combinaison OMN. et chaque case "moyenne générale" contient la moyenne des 4 essais de la même ligne et chaque case "ratio S/N" contient le rapport S/N correspondant aux 4 essais de la même ligne.

N° essai	Facteurs contrôlés		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tableau II.6: Matrice L4 : 3 facteurs à 2 niveaux.

II.3.5. La méthode unifactorielle

Cette méthode est indispensable lorsqu'il s'agit de caractériser l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y. On utilise cette méthode pour évaluer l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y. L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné X [$X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$], tout en maintenant tous les autres facteurs constants (Tab. II.7). Pour chaque valeur de $X=X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i , ($i=1 \div N$). Cette méthode est souvent utilisée Pour étudier et optimiser un processus technologique, ce qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$. Dans ce cas, seul le facteur X est modifié, tout en maintenant les autres facteurs constants. [19]

Tableau II.7: Matrice de planification par la méthode unifactorielle.

N°	Facteur Variable	Paramètre de sortie						
	X	Y ₁	Y ₂	-	Y _g	-	Y _n	Y _{moy}
1	X ₁	Y ₁₁	Y ₂₁	-	Y _{g1}	-	Y _{n1}	Y _{moy1}
2	X ₂	Y ₁₂	Y ₂₂	-	Y _{g2}	-	Y _{n2}	Y _{moy2}
3	X ₃	Y ₁₃	Y ₂₃	-	Y _{g3}	-	Y _{n3}	Y _{moy3}
I	X _i	X _{1i}	Y _{2i}	-	Y _{gi}	-	Y _{ni}	Y _{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X	Y ₁	Y ₂	-	Y _g	-	Y _n	Y _{moy}

II.3.6. Condition de coupe

Les conditions de coupe (V_c , f , ap) utilisées pour les différentes expériences sont indiquées dans le tableau suivant:

Tableau II.8: Conditions de coupe pour les essais unifactorielle.

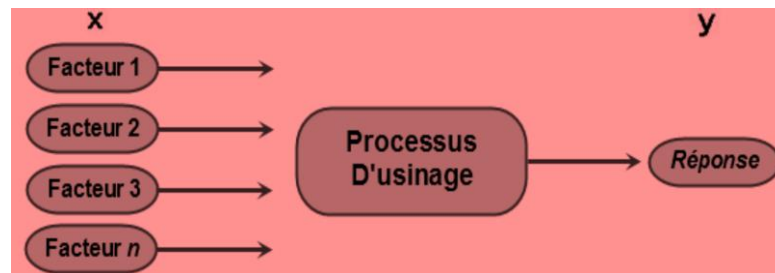
Les paramètres Constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
V_c (m/min)	79,12	f (mm/tr)	0,082 -0,25 -0,4- 0,5 - 0,6
ap (mm)	0,4		
V_c (m/min)	79,12	ap (mm)	0,3- 0,4- 0,5- 0,6- 0,7
f (mm/tr)	0,082		
ap (mm)	0,4	V_c (m/min)	31,65-63,58-100,32 - 127,17 -197,82
f (mm/tr)	0,082		

II.3.7. Méthode multifactorielle

Un plan d'expérience est une méthode statistique qui permet de résoudre un problème avec plusieurs paramètres en suivant un programme prédéfini d'expériences à effectuer. Son

CHAPITRE II : MOYENS ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

objectif est de réduire le nombre d'essais nécessaires pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la véritable variation du phénomène étudié en fonction de ses différentes caractéristiques. Le schéma ci-dessous résume de manière plus concise cette définition. [39]



L'Output d'un processus est dépendant d'un ou plusieurs facteurs (les variables X), d'où la relation suivante :

$$Y = f(X) \quad (II.1)$$

Dans notre étude, nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (Vc, f, ap) sur les critères de la rugosité. Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires, nous utilisons l'équation suivant: [19]

$$N = qk \quad (II.2)$$

Où ;

N : Nombre d'essais;

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

k : Nombre de facteurs de base.

Dans notre situation, nous avons choisi trois facteurs de base ($k = 3$) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau inférieur (-1), un niveau moyen (0) et un niveau supérieur (+1)). Ainsi, nous avons un total de $N = 3^3 = 27$ essais.

Les essais ont été classés de 1 à 27. Le tableau II-7 expose le plan global des expériences réalisées :

- La première colonne (C1): représente la vitesse de coupe Vc .
- la deuxième colonne (C2): représente l'avance f .

CHAPITRE II : MOYENS ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

- la cinquième colonne (C5): représente la profondeur de passe ap.

Les autres colonnes correspondent aux différentes interactions.

Tableau II.9: Plan général des expériences.

Test	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
4	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	+1	+1	+1
5	-1	0	0	0	0	0	0	+1	+1	+1	-1	-1	-1
6	-1	0	0	0	+1	+1	+1	-1	-1	-1	0	0	0
7	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0	0	0
8	-1	+1	+1	+1	0	0	0	-1	-1	-1	+1	+1	+1
9	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	0	0	-1	-1	-1
10	0	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
11	0	-1	0	+1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1
12	0	-1	0	+1	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0
13	0	0	+1	-1	-1	0	+1	0	+1	-1	+1	-1	0
14	0	0	+1	-1	0	+1	-1	+1	-1	0	-1	0	+1
15	0	0	+1	-1	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	-1
16	0	+1	-1	0	-1	0	+1	+1	-1	0	0	+1	-1
17	0	+1	-1	0	0	+1	-1	-1	0	+1	+1	-1	0
18	0	+1	-1	0	+1	-1	0	0	+1	-1	-1	0	+1
19	+1	-1	+1	0	-1	+1	0	-1	+1	0	-1	+1	0

CHAPITRE II : MOYENS ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

20	+1	-1	+1	0	0	-1	+1	0	-1	+1	0	-1	+1
21	+1	-1	+1	0	+1	0	-1	+1	0	-1	+1	0	-1
22	+1	0	-1	+1	-1	+1	0	0	-1	+1	+1	0	-1
23	+1	0	-1	+1	0	-1	+1	+1	0	-1	-1	+1	0
24	+1	0	-1	+1	+1	0	-1	-1	+1	0	0	-1	+1
25	+1	+1	0	-1	-1	+1	0	+1	0	-1	0	-1	+1
26	+1	+1	0	-1	0	-1	+1	-1	+1	0	+1	0	-1
27	+1	+1	0	-1	+1	0	-1	0	-1	+1	-1	+1	0

II.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. La désignation, les caractéristiques (mécaniques, physiques) des matériaux de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

CHAPITRE III

INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR LA RUGOSITÉ

III.1.Introduction

Dans ce chapitre présent Influence des paramètres de coupe sur la rugosité dans notre étude sur l'acier inoxydable X2CrNi18-9 (l'avance, la profondeur de passe, la vitesse de coupe).

III.2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité

III.2.1. Influence de l'avance

Nous observons à travers les résultats obtenus et présentés sur la figure III-1 que l'effet de l'avance sur la rugosité indique que lorsque ce paramètre augmente, la rugosité de surface se détériore. la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont fixées à $V_c=79,12$ m/min et $ap=0,4$ mm Pour l'avance minimale de 0,082mm, les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt) sont respectivement de (2,89; 12,78; 10,45) μm , tandis que pour l'avance maximale de 0,66 mm/tr, les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt) sont respectivement de (3,29; 15,78; 12,49) μm . Ces résultats nous permettent de conclure que l'augmentation est de (12,15%; 19,01% ; 16,33%) pour les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt).

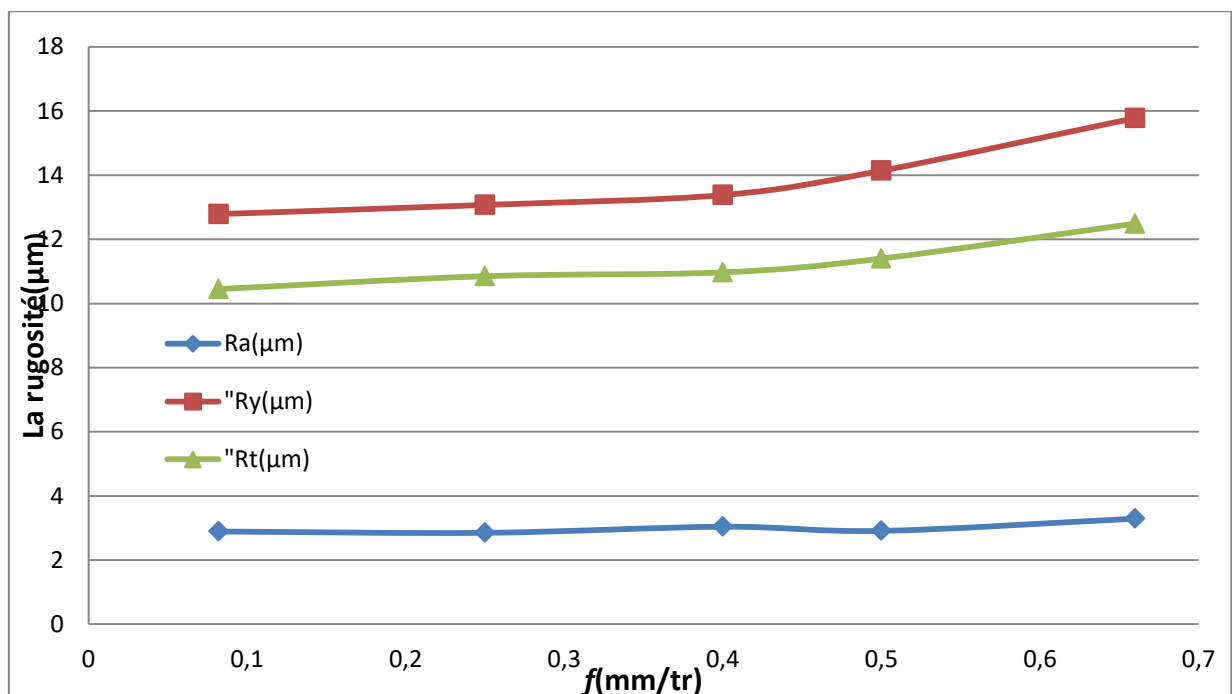


Figure III.1: Effet de l'avance sur la rugosité : $V_c=79,12$ m/min; $ap=0,4$ mm.

la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont fixées à $V_c=197,82$ m/min et $a_p=0,7$ mm Pour l'avance minimale de 0,082mm, les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt) sont respectivement de (2,93; 12,56; 10,82) μm , tandis que pour l'avance maximale de 0,66 mm/tr, les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt) sont respectivement de (3,31; 17,37; 13,22) μm . Ces résultats nous permettent de conclure que l'augmentation est de (9,66%;27,69 %; 18,15 %) pour les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt).

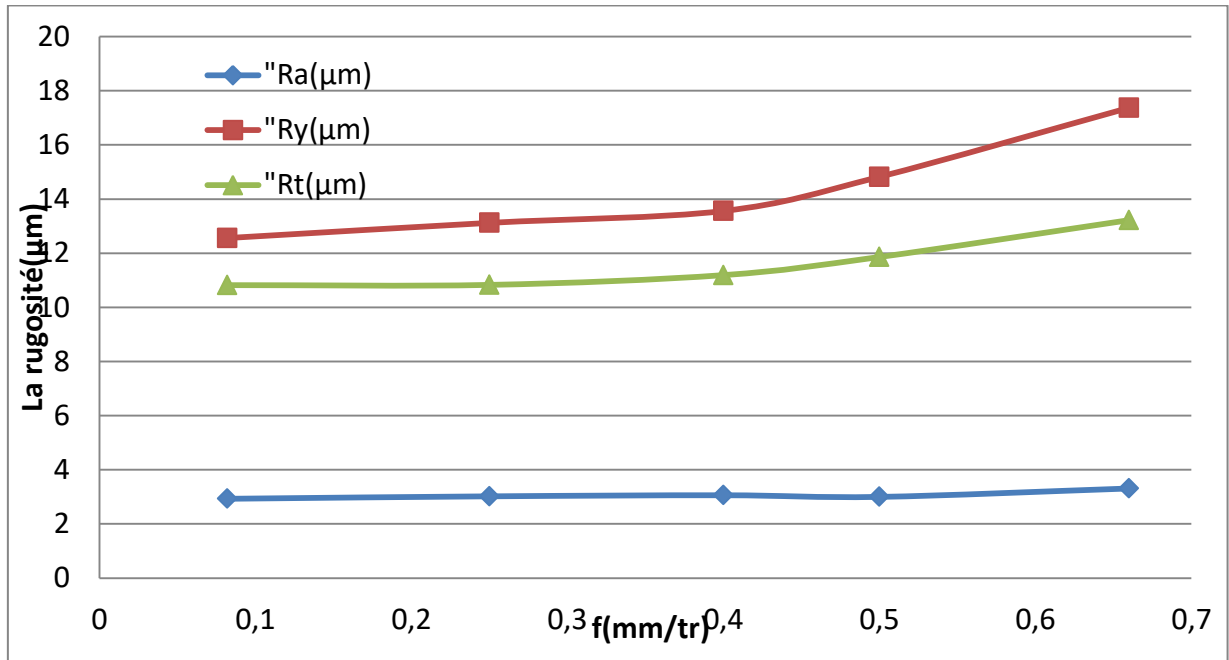


Figure III.2: Effet de l'avance sur la rugosité: $V_c=197,82$ m/min ; $a_p=0,7$ mm.

III.2.2. Influence de la profondeur de passe

Nous observons à travers les résultats obtenus et présentés sur la figure III-3 que l'effet de la profondeur de coupe (a_p) n'a pas d'impact déterminant sur la qualité des surfaces usinées. La vitesse de coupe et l'avance de coupe sont fixées à $V_c=79,12$ m/min et $f=0,082$ mm/tr Pour une profondeur de coupe minimale de 0,3 mm, les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt) sont respectivement de (1,9; 6,66; 6,38) μm , tandis que pour une profondeur de coupe maximale de 0,7 mm, les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt) sont respectivement de (1,96; 6,90; 6,77) μm . Ces résultats nous permettent de conclure que l'augmentation est de (3,06%;3,47 %; 5,76%) pour les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt).

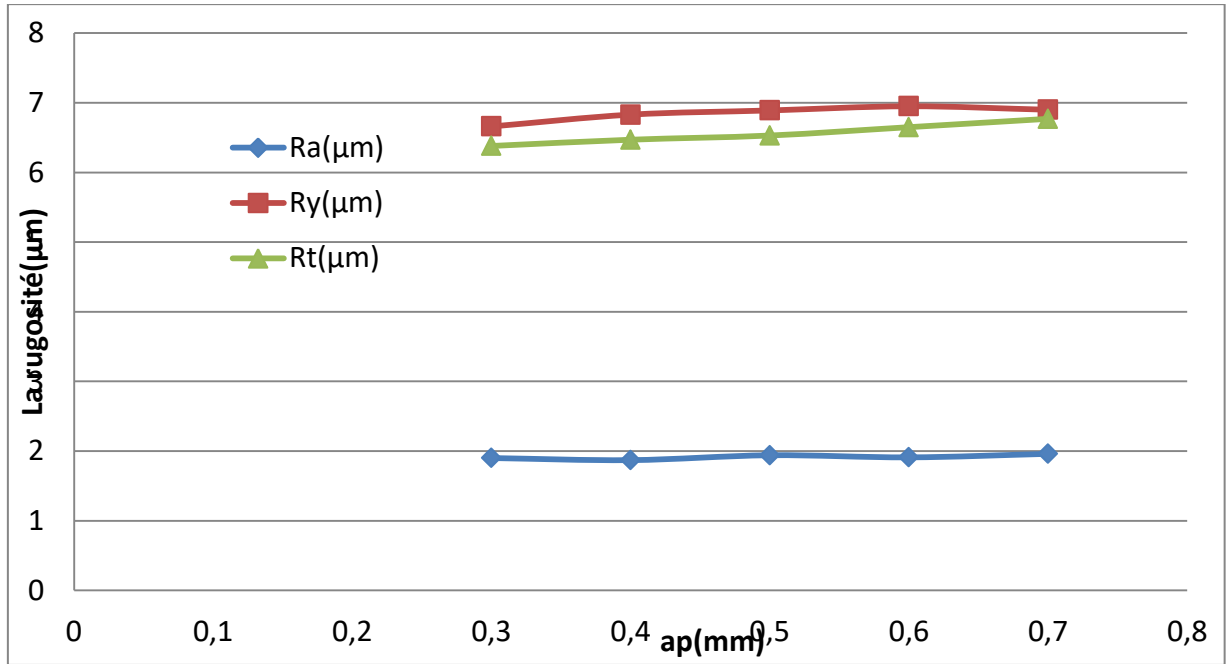


Figure III.3: Effet de la profondeur de passe sur la rugosité : $V_c=79,12$ m/min ; $f=0,082$ mm/tr.

la vitesse de coupe et l'avance de coupe sont fixées à $V_c=197,82$ m/min et $f=0,25$ mm/tr Pour une profondeur de coupe minimale de 0,3 mm, les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt) sont respectivement de (2,01; 7,23; 6,56) μm, tandis que pour une profondeur de coupe maximale de 0,7 mm, les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt) sont respectivement de (2,04; 7,86; 7,07) μm. Ces résultats nous permettent de conclure que l'augmentation est de (1,47%; 8,01%; 7,21%) pour les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt).

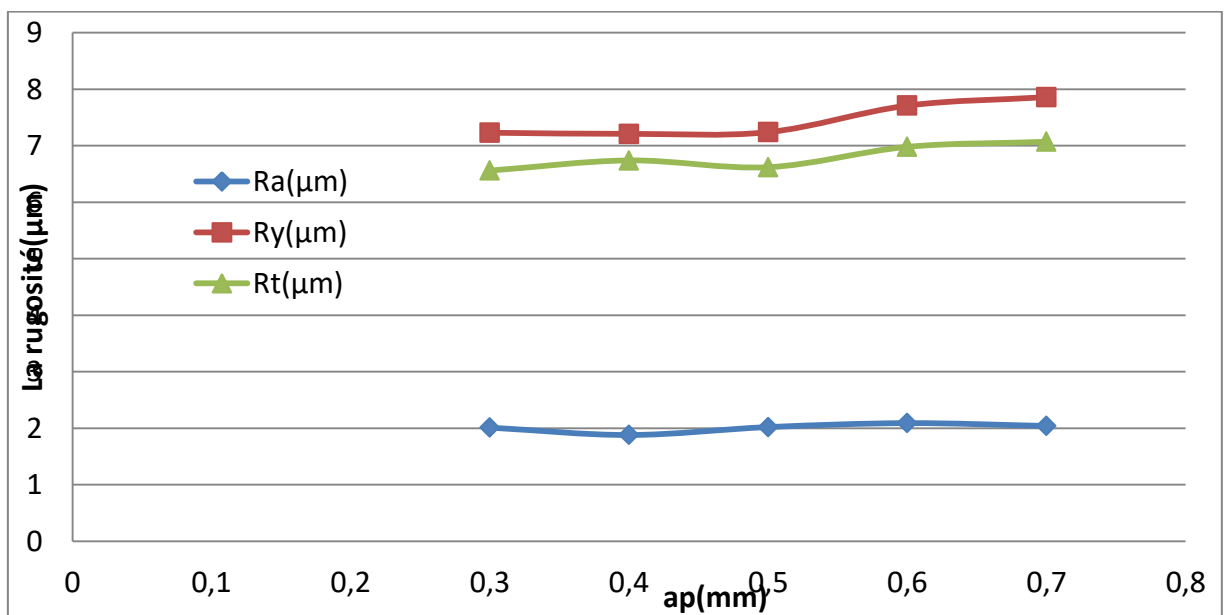


Figure III.4: Effet de la profondeur de passe sur la rugosité: $V_c=197,82$ m/min; $f=0,25$.

III.2.3. Influence de la vitesse de coupe

Nous observons à travers les résultats obtenus et présentés sur la figure III-5 que l'effet de la vitesse de coupe sur la rugosité indique que lorsque ce paramètre augmente, la rugosité de surface s'améliore d'une manière très significative.

la vitesse de coupe et l'avance de coupe sont fixées à $ap= 0,4\text{mm}$ et $f=0,082 \text{ mm/tr}$ Pour la vitesse de coupe minimale de $31,65 \text{ m/min}$, les critères de rugosité (R_a , R_y , R_t) sont respectivement de $(2,82;11,70;10,41) \mu\text{m}$, tandis que pour la vitesse de coupe maximale de $197,82 \text{ m/min}$, les critères de rugosité (R_a , R_y , R_t) sont respectivement de $(0,63;2,76; 2,33) \mu\text{m}$. Ces résultats nous permettent de conclure que l'augmentation est de $(75,77\%; 76,41\%; 77,61\%)$ pour les critères de rugosité (R_a , R_y , R_t).

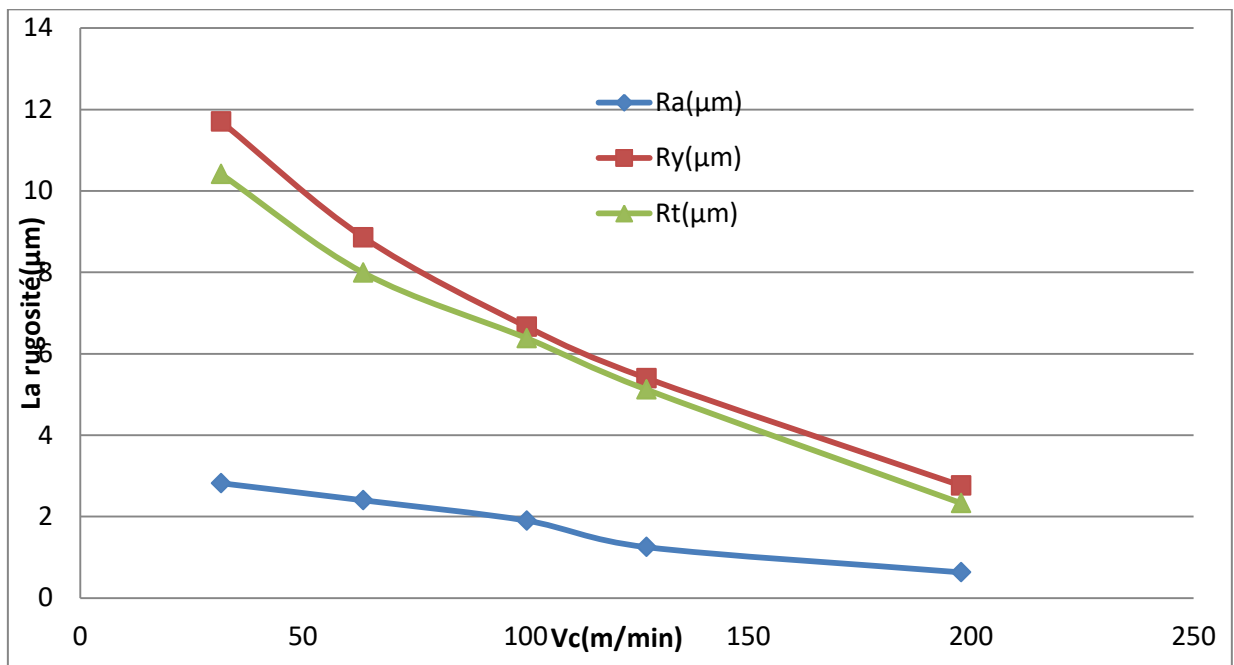


Figure III.5: Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité : $ap=0,4\text{mm}$; $f=0,082 \text{ mm/tr}$.

la vitesse de coupe et l'avance de coupe sont fixées à $ap=0,7 \text{ mm}$ et $f=0,25 \text{ mm/tr}$ Pour la vitesse de coupe minimale de $31,65 \text{ m/min}$, les critères de rugosité (R_a , R_y , R_t) sont respectivement de $(2,89;12,78;10,45) \mu\text{m}$, tandis que pour la vitesse de coupe maximale de $197,82 \text{ m/min}$, les critères de rugosité (R_a , R_y , R_t) sont respectivement de $(0,60;3,13; 2,57) \mu\text{m}$. Ces résultats nous permettent de conclure que l'augmentation est de $(79,23\%; 75,50\%; 75,40\%)$ pour les critères de rugosité (R_a , R_y , R_t).

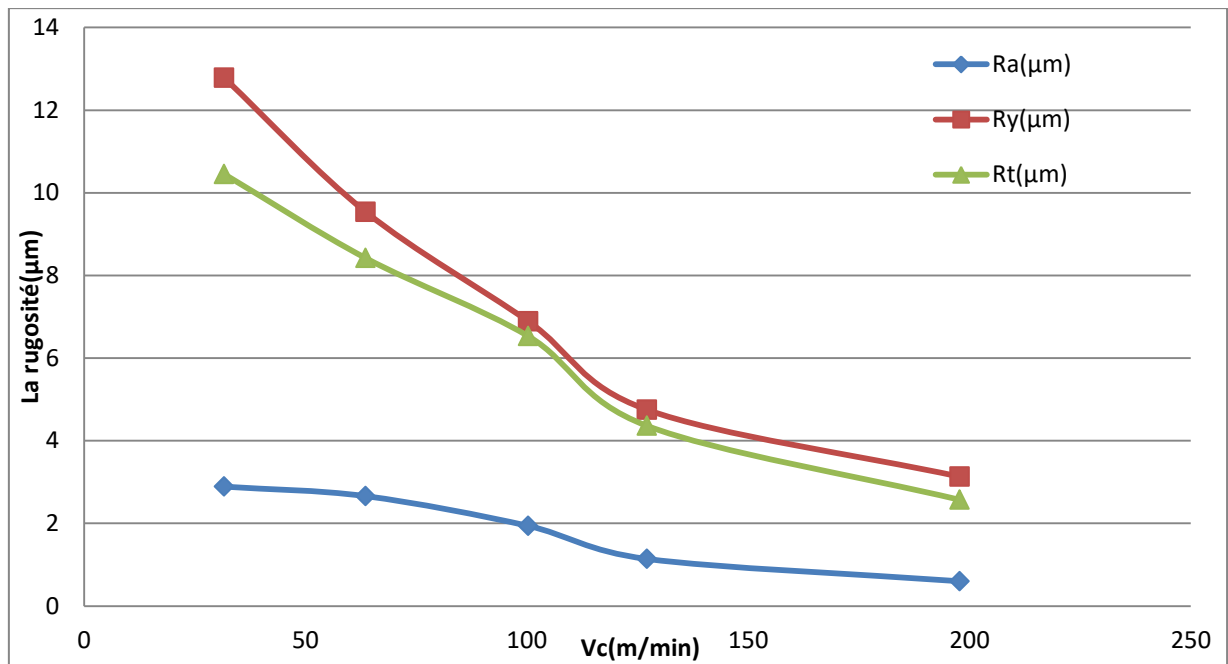


Figure III.6: Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité: $ap=0,7$; $f=0,25\text{mm/tr}$.

III.3. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer l'impact des paramètres de coupe sur la rugosité en utilisant de matériaux l'acier inoxydable X2CrNi18-9 et un outil de coupe en Carbure Métallique avec Revêtement CVD, ce qui nous a donné les résultats suivants:

- ✓ l'effet de l'avance (f) sur la rugosité indique que lorsque ce paramètre augmente, la rugosité de surface se détériore.
- ✓ l'effet de la profondeur de coupe (ap) n'a pas d'impact déterminant sur la qualité des surfaces usinées.
- ✓ l'effet de la vitesse de coupe (V_c) sur la rugosité indique que lorsque ce paramètre augmente, la rugosité de surface s'améliore d'une manière très significative.

CHAPITRE IV
***MODELISATION DES
PARAMETRES
TECHNOLOGIQUES***

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, présenté des modèles mathématiques qui expriment la relation entre les éléments du régime de coupe (V_c, f, ap) et les paramètres technologiques que nous avons étudiés (rugosité). Pour extraire ces modèles mathématiques et effectuer une analyse de variance (ANOVA) ainsi que présenter une surface de réponse en trois dimensions, nous avons utilisé les logiciels Minitab19 et Design Expert12.

L'objectif de cette analyse est d'identifier les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés.

Les étapes que nous avons suivies pour atteindre objectif sont:

1. Définir les paramètres d'entrée et les paramètres technologiques de sortie souhaités;
2. Sélectionner un plan de conception expérimentale;
3. Réaliser une analyse de régression et détermination des modèles;
4. Réaliser une analyse de la variance (ANOVA) des paramètres d'entrée qui influencent les paramètres technologiques;

IV.2.Analyse de variance ANOVA

L'analyse de variance(ANOVA) est considérée comme une méthode des plans d'expériences pour les processus d'usinage et elle est l'un des outils importants pour comprendre l'effet des paramètres d'entrée sur une série de résultats expérimentaux et interpréter les données de sortie [40]. Son principe consiste à diviser la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et aux erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par P-value et F value d'ANOVA.

Dans le tableau d'ANOVA, P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou des résultats plus extrêmes) se soient produits par hasard.

- Si $P > 0.05$, le paramètre est considéré comme insignifiant.

- Si $P < 0.05$, le paramètre est considéré comme signifiant.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

La somme des carrés (SS) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale:

$$SS_f = \frac{N}{Nn_f} \sum_{i=1}^{Nn_f} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (IV.1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (IV.2)$$

Où:

\bar{y} : la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son niveau i ème.

N : nombre total d'expériences.

Nn_f : niveau de chaque facteur f .

La moyenne des carrés (MS) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté.

$$MS = \frac{SS_i}{DF_i} \quad (IV.3)$$

Pour vérifier si le modèle est approprié, on utilise l'indice de valeur F, en partant du principe que les valeurs de F calculées doivent être supérieures à celles obtenues à partir de la table de F.

$$F - value = \frac{MSS_i}{MS_{error}} \quad (IV.4)$$

Avec: **MS_{error}**: les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA présente le pourcentage de contribution de chaque facteur à la variation totale, ce qui indique le degré d'influence sur le résultat obtenu par l'équation suivante:

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

$$Cont.\% = \frac{SS_i}{SS_{mod}} \times 100 \quad (IV.5)$$

R²(R-sq): Le coefficient de détermination représente la proportion de variation de la réponse qui est expliquée par le modèle. Il est déduit par l'équation **IV.6**. Plus ce coefficient s'approche de l'unité, meilleur est le modèle.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{error}}{SS_{Total}} = \frac{SS_{regression}}{SS_{Total}} \quad (IV.6)$$

IV.3. Analyse de régression

La régression est une méthode statistique utilisée pour étudier la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre l'entrée, appelé les conditions de coupe (Vc, f, ap) et la sortie (Y), qui est définie comme l'un des aspects de l'usinabilité, est exprimée par l'équation suivante:

$$Y = \Phi(Vc, f, ap) \quad (IV.7)$$

Où:

Y : est la réponse désirée;

Φ : est la fonction de réponse.

Le modèle mathématique non-linéaire (quadratique) est utilisé pour estimer L'approximation des Y et est adapté pour étudier les effets d'interaction des paramètres de coupe.

Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale, est présenté:

$$Y = \beta_0 + \beta_1.Vc + \beta_2.f + \beta_3.ap + \beta_4.Vc.f + \beta_5.Vc.ap + \beta_6.f.ap + e. \quad (IV.8)$$

Où:

Y : réponse;

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

X_i : Variable prédictive ;

β_i : Coefficients de régression;

e : le terme d'erreur.

Pour tester la validité du modèle, on utilise l'analyse de variance (ANOVA) pour évaluer l'importance et l'adéquation du modèle .si la valeur de F calculée est supérieure à la valeur de F table , Le modèle est considéré comme approprié avec un niveau de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérés statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le R^2 se rapproche de 1, plus le modèle est en accord avec les valeurs réelles (expérimentales). [41]

IV.4.Modélisation de (Ra, Ry, Rt)

Afin d'étudier l'impact des différents paramètres de coupe (V_c, f, ap) sur la rugosité de la surface, nous avons réalisé un plan factoriel comprenant 3^3 facteurs, chacun variant à deux niveaux (2), ce qui donne un total de 27 essais.

En analysant les résultats expérimentaux obtenus dans le tableau IV.1, nous sommes en mesure de déterminer des modèles mathématiques statistiques qui expriment la relation entre les différents critères de la rugosité et les paramètres du régime de coupe (V_c, f, ap).

Tableau IV.1: Essais expérimentaux et résultats pour les paramètres technologiques (L27).

RUN	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Ry (μm)	Rt (μm)
1	49,45	0,1	0,3	2,83	11,7	10,42
2	49,45	0,1	0,5	2,77	11,78	9,57
3	49,45	0,1	0,7	2,68	12,35	9,63
4	49,45	0,18	0,3	5,52	15,98	16,18
5	49,45	0,18	0,5	4,98	15,1	15,22
6	49,45	0,18	0,7	4,94	15,12	15,28
7	49,45	0,33	0,3	6,34	20,6	19,63

**CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES
D'USINAGE**

8	49,45	0,33	0,5	5,62	21,44	18,49
9	49,45	0,33	0,7	5,85	21,12	19,38
10	63,58	0,1	0,3	2,2	9,52	8,42
11	63,58	0,1	0,5	2,23	9,55	8,53
12	63,58	0,1	0,7	2,19	9,74	8,82
13	63,58	0,18	0,3	3,29	12,87	10,23
14	63,58	0,18	0,5	3,27	13,07	10,82
15	63,58	0,18	0,7	3,37	13,6	11,2
16	63,58	0,33	0,3	4,4	14,68	15,99
17	63,58	0,33	0,5	4,5	14,83	15,95
18	63,58	0,33	0,7	4,54	14,92	16,02
19	158,25	0,1	0,3	1,45	8,21	6,76
20	158,25	0,1	0,5	1,7	8,23	7,08
21	158,25	0,1	0,7	1,64	8,27	7,2
22	158,25	0,18	0,3	2,4	9,35	8,69
23	158,25	0,18	0,5	2,5	9,83	8,84
24	158,25	0,18	0,7	2,9	9,89	8,95
25	158,25	0,33	0,3	4,3	13,81	14,08
26	158,25	0,33	0,5	4,25	13,93	14,11
27	158,25	0,33	0,7	4,29	14,14	14,14

IV.4.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les rugosités Ra, Ry et Rt

Cette analyse a été réalisé pour les valeurs de p inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance). Le tableau **IV.2** représente les résultats de l'analyse de variance ANOVA pour la rugosité Ra. Le facteur le plus important qui influence la rugosité de surface Ra est l'avance (f) avec une contribution de 61,36%. L'augmentation de l'avance génère des rainures résultant

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

de la cinétique d'usinage qui sont parallèles à la direction de la vitesse de coupe. Ces rainures sont plus profondes et plus large lorsque l'avance (f) augmente. Après on va remarquer l'effet de V_c avec des contributions 18, 97%. Les effets des produits (V_c^2 , f^2) sont significatifs avec des contributions respectivement de (10,92 % et 3,50%). la profondeur de passe (ap) et les interactions ($V_c \times f$ et $V_c \times ap$) restent insignifiantes.

Tableau IV.2: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_a .

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont%
Regression	9	48.7570	48.7570	5.41745	37.9784	0.000000	95.26
V_c	1	9.7106	6.5537	6.55373	45.9442	0.000003	18.97
f	1	31.4055	3.6263	3.62634	25.4220	0.000100	61.36
ap	1	0.0060	0.0687	0.06872	0.4818	0.496996	0.011
$V_c * f$	1	0.0008	0.0008	0.00075	0.0053	0.942914	0.0015
$V_c * ap$	1	0.1949	0.1949	0.19490	1.3663	0.258578	0.38
$f * ap$	1	0.0145	0.0145	0.01450	0.1016	0.753767	0.028
$V_c * V_c$	1	5.5922	5.5922	5.59222	39.2037	0.000009	10.92
$f * f$	1	1.7914	1.7914	1.79139	12.5584	0.002496	3.50
$ap * ap$	1	0.0411	0.0411	0.04111	0.2882	0.598321	0.080
Error	17	2.4250	2.4250	0.14265			4.73
Total	26	51.1820					100

L'équation(IV.9) exprime le modèle de la rugosité R_a avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

$$R_a = 8.3268 - 0.185076 V_c + 32.3076 f - 2.83245 ap + 0.00078486 V_c \times V_c + 0.00114705 V_c \times f + 0.0107709 V_c \times ap - 46.2319 f \times f - 1.48839 f \times ap + 2.06944 ap \times ap \quad (IV.9)$$

Le coefficient de détermination (R^2) de cette analyse est:

$$S = 0.377684 \quad , \quad R\text{-Sq} = 95.26\% \quad , \quad R\text{-Sq (adj)} = 92.75\%$$

**CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES
D'USINAGE**

PRESS = 5.85657 , R-Sq (pred) = 88.56%

Le tableau IV .3 montre l'analyse (ANOVA) du critère de rugosité (R_y). L'avance (f) est le facteur le plus important avec une contribution de 55.05% suivi par La vitesse de coupe (V_c) et ($V_c \times V_c$) avec une contribution (26.95%, 11,58%) et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec une contribution presque inexistante de 0.089%. Les interactions ($V_c \times f$, $V_c \times ap$, $f \times f$, $ap \times ap$ et $f \times ap$) n'ont aucune influence sur (R_y).

Tableau IV.3: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_y .

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
Régression	9	345.818	345.818	38.4242	34.2833	0.000000	94.77
<i>V_c</i>	1	98.353	45.275	45.2747	40.3955	0.000007	26.95
<i>f</i>	1	200.881	9.619	9.6186	8.5820	0.009358	55.05
<i>ap</i>	1	0.328	0.000	0.0004	0.0003	0.985511	0.089
<i>V_c*f</i>	1	2.486	2.486	2.4857	2.2179	0.154740	0.68
<i>V_c*ap</i>	1	0.008	0.008	0.0081	0.0072	0.933313	0.0021
<i>f*ap</i>	1	0.006	0.006	0.0064	0.0057	0.940569	0.0016
<i>V_c*V_c</i>	1	42.267	42.267	42.2669	37.7118	0.000011	11.58
<i>f*f</i>	1	1.487	1.487	1.4867	1.3265	0.265368	0.407
<i>ap*ap</i>	1	0.002	0.002	0.0023	0.0020	0.964640	0.00054
Error	17	19.053	19.053	1.1208			5.22
Total	26	364.872					100

L'équation (IV.10) exprime le modèle de la rugosité R_y avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

$$R_y = 26.8144 - 0.486445 V_c + 52.617 f - 0.210811 ap + 0.00215774 V_c \times V_c - 0.0658883 V_c \times f + 0.00219355 V_c \times ap - 42.1176 f \times f + 0.99022 f \times ap + 0.486111 ap \times ap \quad (IV.10)$$

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

Le coefficient de détermination (R^2) de cette analyse est :

$$S=1.05867 \quad , \quad R-Sq = 94.78\% \quad , \quad R-Sq (adj) = 92.01\%$$

$$PRESS = 46.3132 \quad , \quad R-Sq (pred) = 87.31\%$$

Le tableau **IV.4** montre l'analyse (ANOVA) du critère de rugosité (R_t). L'avance (f) est le facteur le plus important avec une contribution de 69,10% suivi par La vitesse de coupe (V_c) et ($V_c \times V_c$) avec une contribution (19,21%, 7,42%). Les interactions (ap , $V_c \times f$, $V_c \times ap$, $f \times f$, $ap \times ap$ et $f \times ap$) n'ont aucune influence sur (R_t).

Tableau IV.4: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_t .

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
Regression	9	397.691	397.691	44.1878	51.1762	0.000000	96,44
<i>V_c</i>	1	79.217	34.214	34.2136	39.6246	0.000008	19,21
<i>f</i>	1	284.985	10.727	10.7273	12.4238	0.002601	69,10
<i>ap</i>	1	0.003	0.310	0.3101	0.3592	0.556880	0,00072
<i>V_c*f</i>	1	1.136	1.136	1.1359	1.3156	0.267271	0,27
<i>V_c*ap</i>	1	0.208	0.208	0.2080	0.2408	0.629873	0,050
<i>f*ap</i>	1	0.007	0.007	0.0067	0.0078	0.930782	0,0016
<i>V_c*V_c</i>	1	30.624	30.624	30.6245	35.4677	0.000016	7,42
<i>f*f</i>	1	1.243	1.243	1.2430	1.4396	0.246665	0,30
<i>ap*ap</i>	1	0.267	0.267	0.2674	0.3097	0.585117	0,064
Error	17	14.679	14.679	0.8634			3,55
Total	26	412.369					100

L'équation (**IV.11**) exprime le modèle de la rugosité R_t avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

$$R_t = 23.7538 - 0.422869 V_c + 55.5669 f - 6.01684 a_p + 0.00183668 V_c \times V_c - 0.0445408 V_c \times f + 0.0111259 V_c \times a_p - 38.5105 f \times f - 1.01263 f \times a_p + 5.27778 a_p \times a_p \quad (IV.11)$$

Le coefficient de détermination (R^2) de cette analyse est :

$$S = 0.929218 \quad , \quad R\text{-Sq} = 96.44\% \quad , \quad R\text{-Sq (adj)} = 94.56\%$$

$$PRESS = 33.4009 \quad , \quad R\text{-Sq (pred)} = 91.90\%$$

IV.4.2. Les graphiques des effets principaux et des interactions

En observant les graphiques des effets principaux et des interactions (**figure IV.1, IV.2**) sont on remarque, il apparaît clairement que l'avance par tour (f) affecte fortement les rugosités R_a , R_y et R_t , la vitesse de coupe a un faible effet sur l'évolution des rugosités R_a , R_y et R_t . De plus, aucune variation significative n'a été observée sur les trois critères de rugosité en raison de la variation de la profondeur de passe (a_p). Les interactions ($V_c \times a_p$, $V_c \times f$ et $f \times a_p$) n'ont pas d'effet significatif. Cela a été confirmé par les résultats de l'analyse statistique ANOVA.

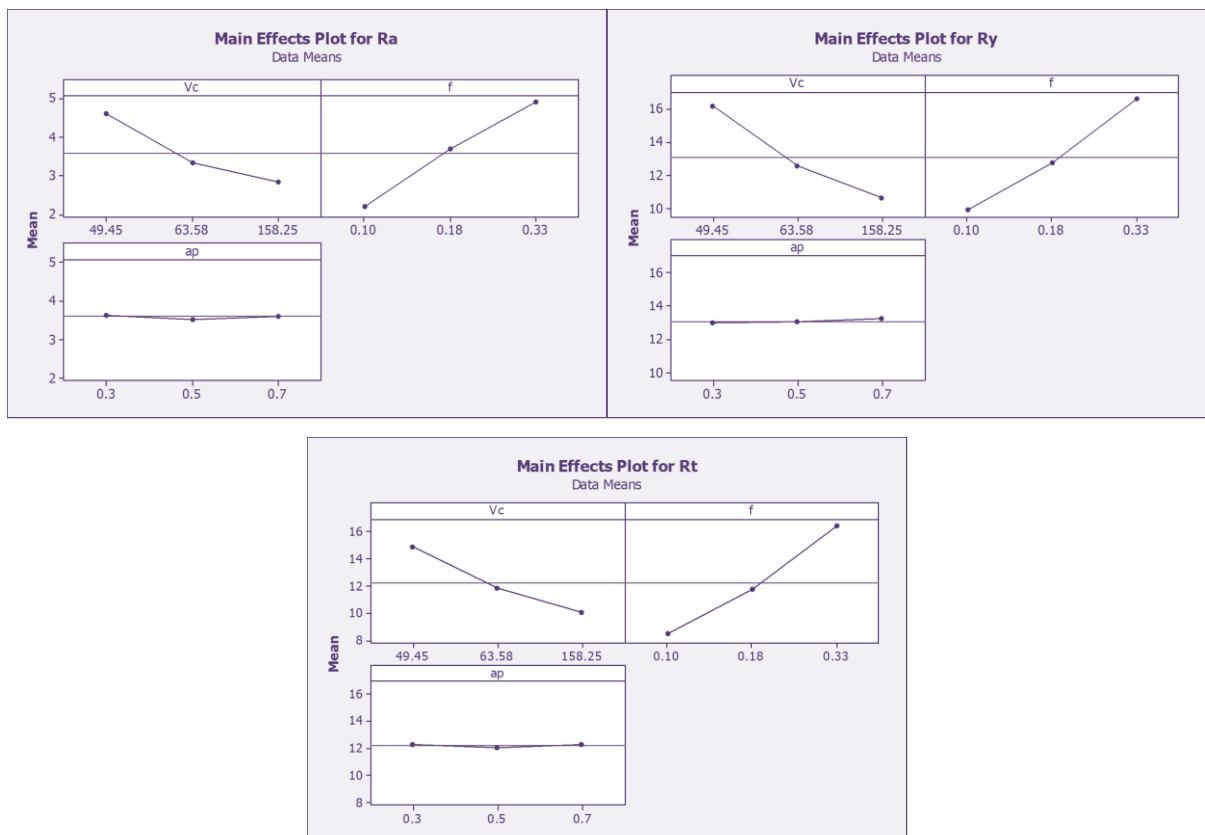


Figure IV.1: Graphiques des effets principaux pour R_a , R_y , R_t .

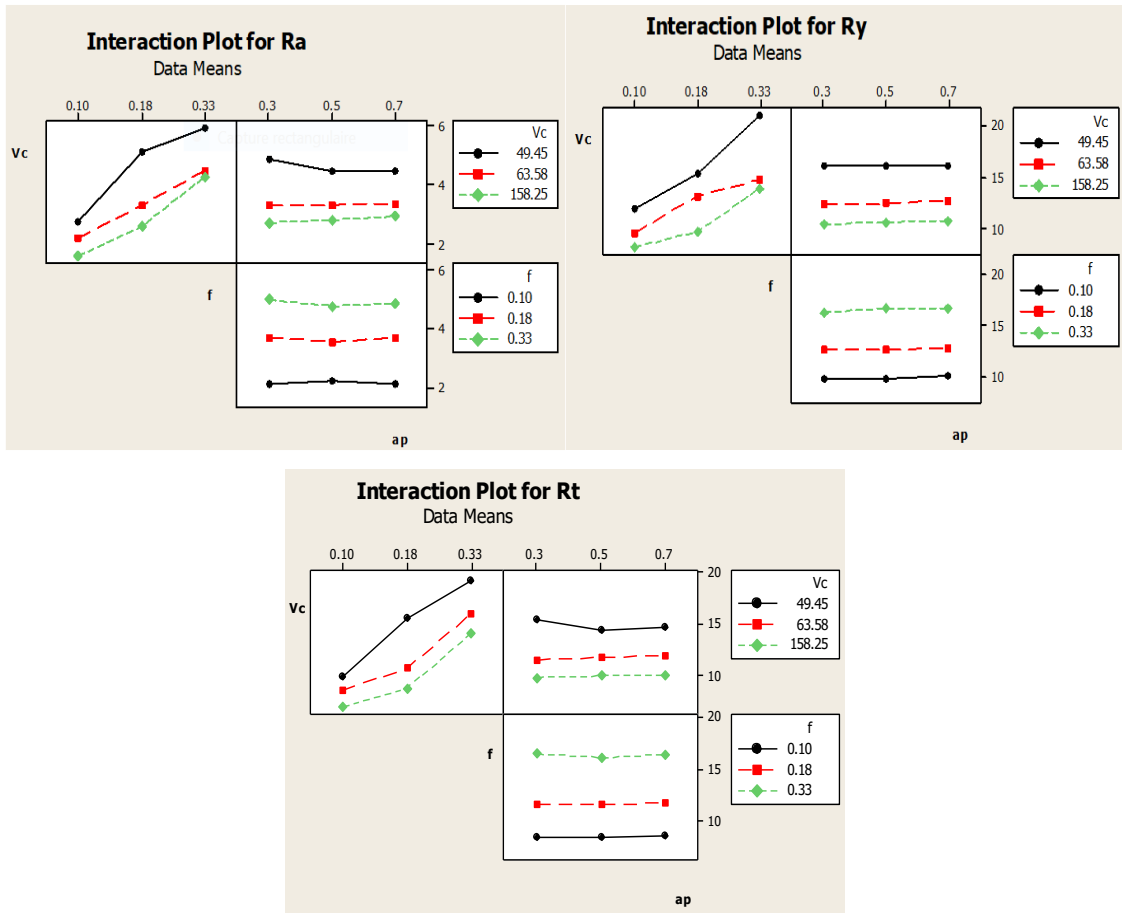


Figure IV.2: Graphiques des interactions pour Ra, Ry, Rt.

IV.4.3. Les graphes résiduels pour Ra, Ry, Rt

- **Le graphe de la normale probabilité plot:** permet de repérer une non-normalité. Si les points forment une ligne à peu près droite, cela signifie que les valeurs résiduelles sont réparties normalement.
- **le graphique de la Histogramme:** permet de détecter les pics multiples, les valeurs aberrantes et la non-normalité. Un histogramme normal doit être à peu près symétrique et avoir la forme d'une cloche.
- **le graphique de la Versus fits (en fonction des valeurs ajustées):** permet de détecter les variances non-constantes, les termes d'ordre supérieurs manquants et les valeurs aberrantes. Les valeurs résiduelles sont normalement distribuées de manière aléatoire autour du zéro.
- **le graphique de la Versus Order (en fonction de l'ordre):** permet de détecter la dépendance temporelle des valeurs résiduelles.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

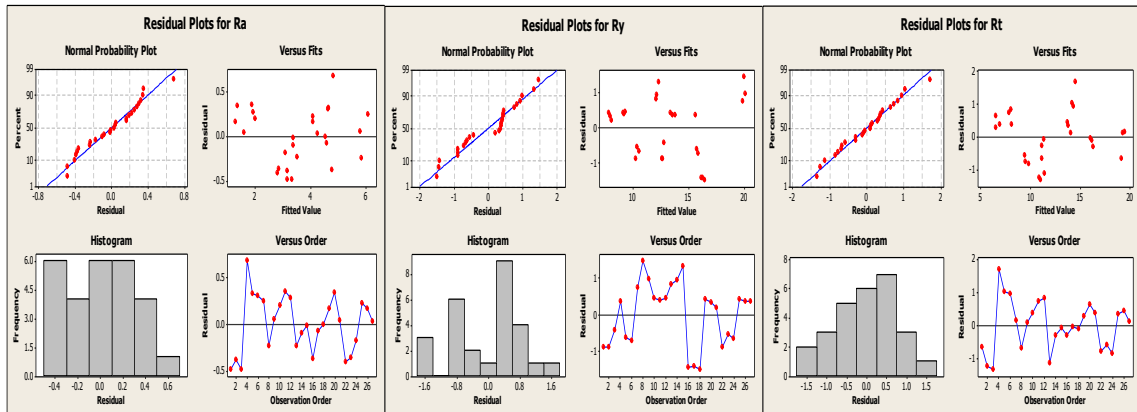


Figure IV.3: Graphe Résiduel pour (Ra).

IV.4.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de Ra, Ry, Rt

Les courbes de la figure (IV.4, IV.5, IV.6) sont utilisées pour comparer les valeurs prédites des critères de la rugosité de surface (Ra, Ry et Rz) avec les valeurs expérimentales afin d'évaluer l'ajustement du modèle. L'analyse a démontré une corrélation entre les deux courbes. Les valeurs expérimentales et prédites des critères de la rugosité (Ra, Ry et Rz) sont très proches les unes des autres. Ainsi, les modèles mathématiques développés peuvent effectivement être utilisés pour prédire la rugosité de la surface.

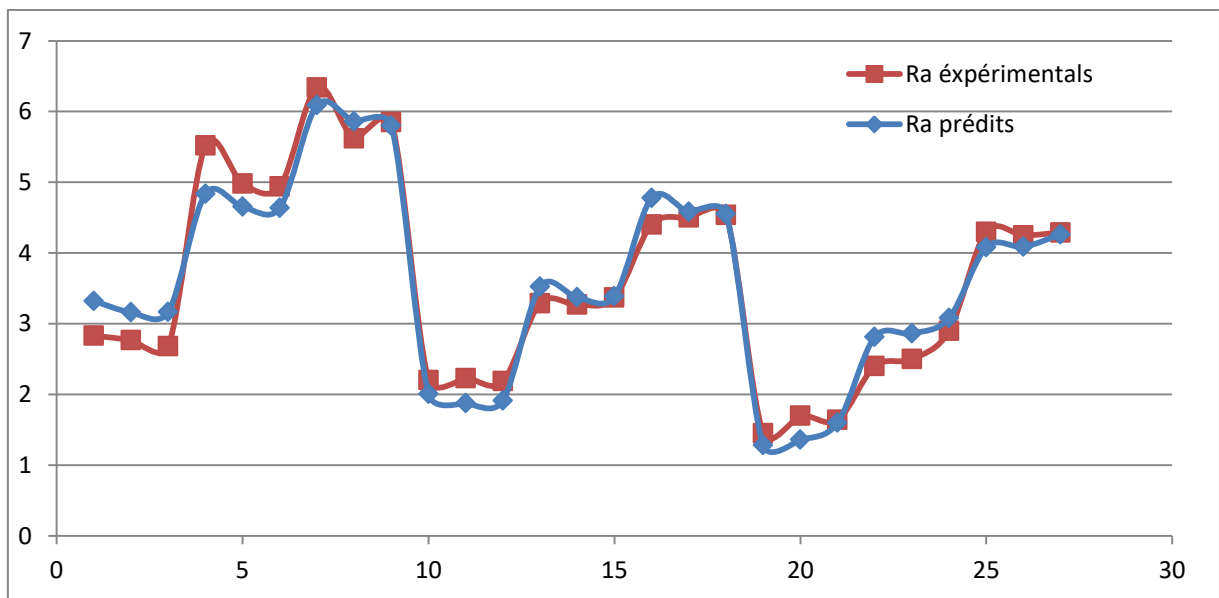


Figure IV.4: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de (Ra).

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

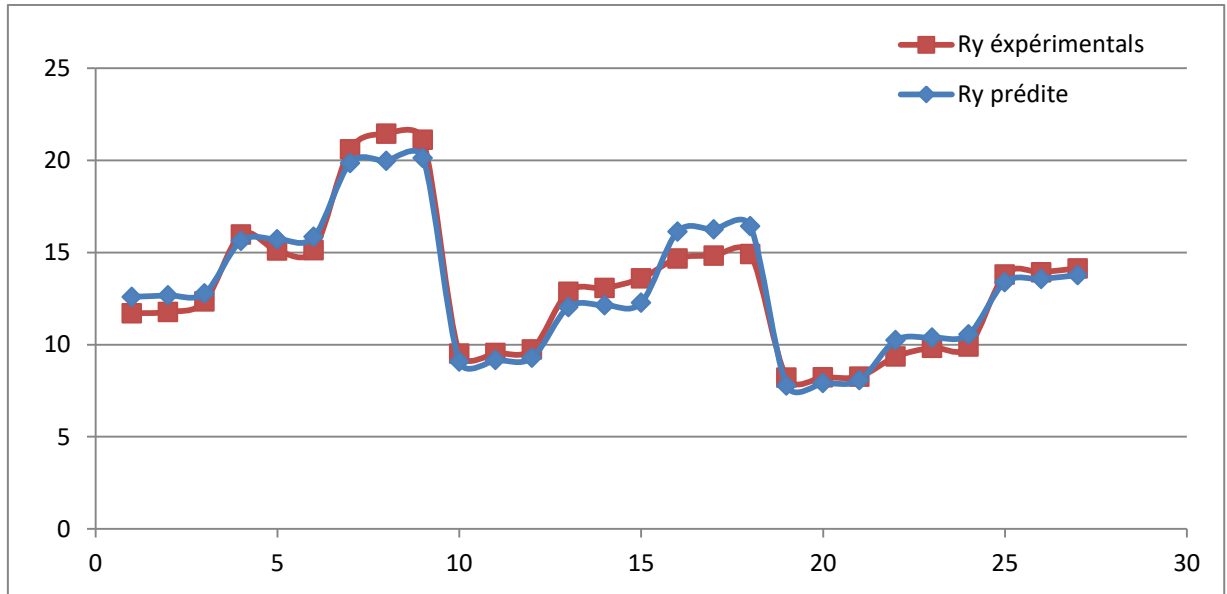


Figure IV.5: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de (Ry).

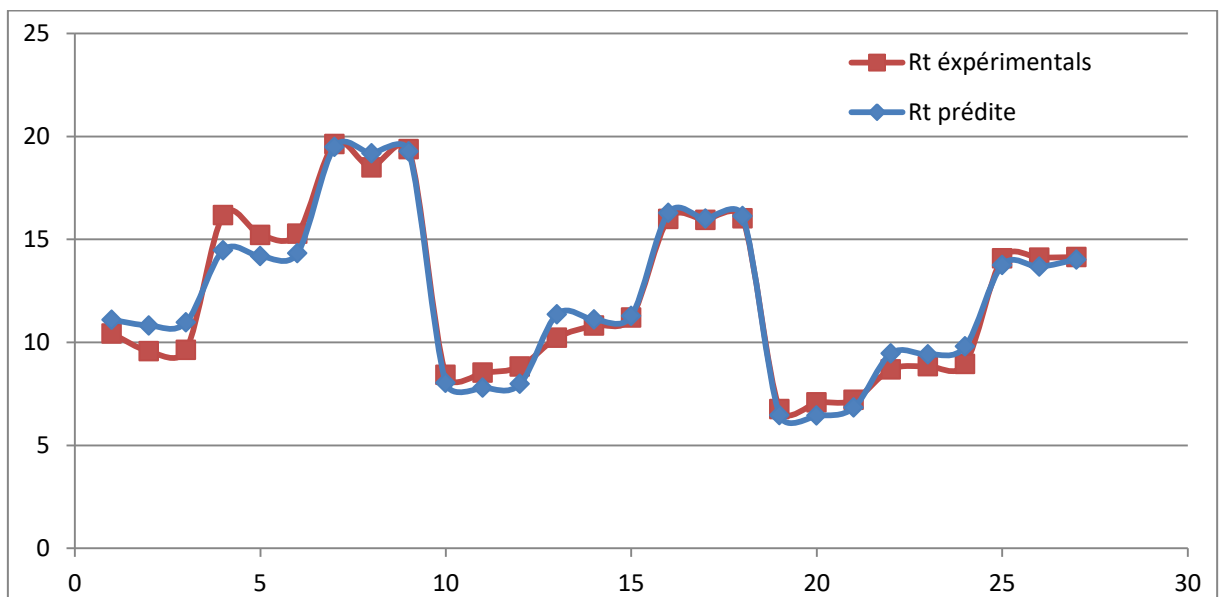


Figure IV.6.: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de (Rt).

IV.4.5. Diagrammes de surfaces 3D

Les surfaces de réponse ont été tracées dans les figures suivantes pour étudier l'effet des conditions de coupe (V_c , f , a_p) sur les critères de rugosité (Ra, Ry, Rt). D'après Les résultats obtenus on remarque l'avance par tour (f) est le facteur le plus influent sur l'évolution de la rugosité de surface .De plus, la rugosité de la surface augmente rapidement à mesure que

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

l'alimentation augmente. Nous remarquons également que la vitesse de coupe et la profondeur de coupe n'ont pas un impact significatif sur les critères de rugosité de la surface.

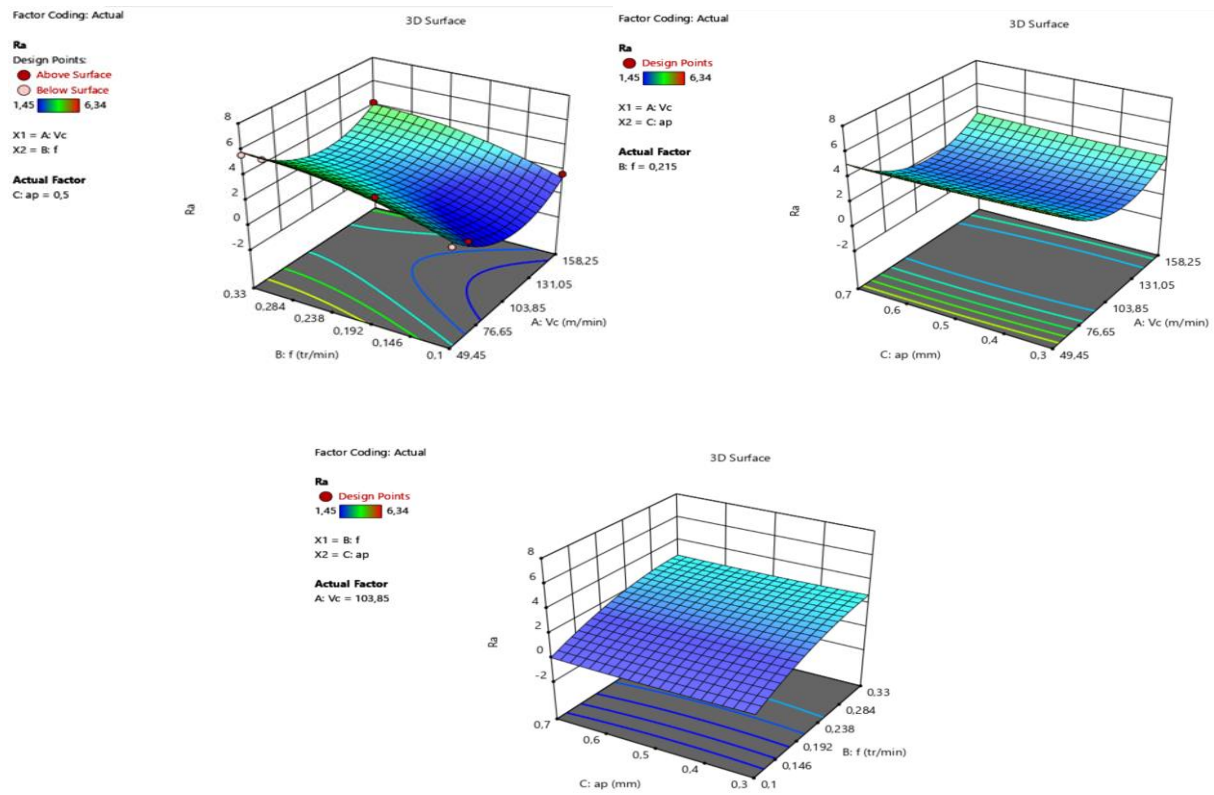


Figure IV.7: Surface de réponse pour R_a en tant que fonction de (V_c, f) , (V_c, ap) et (ap, f) .

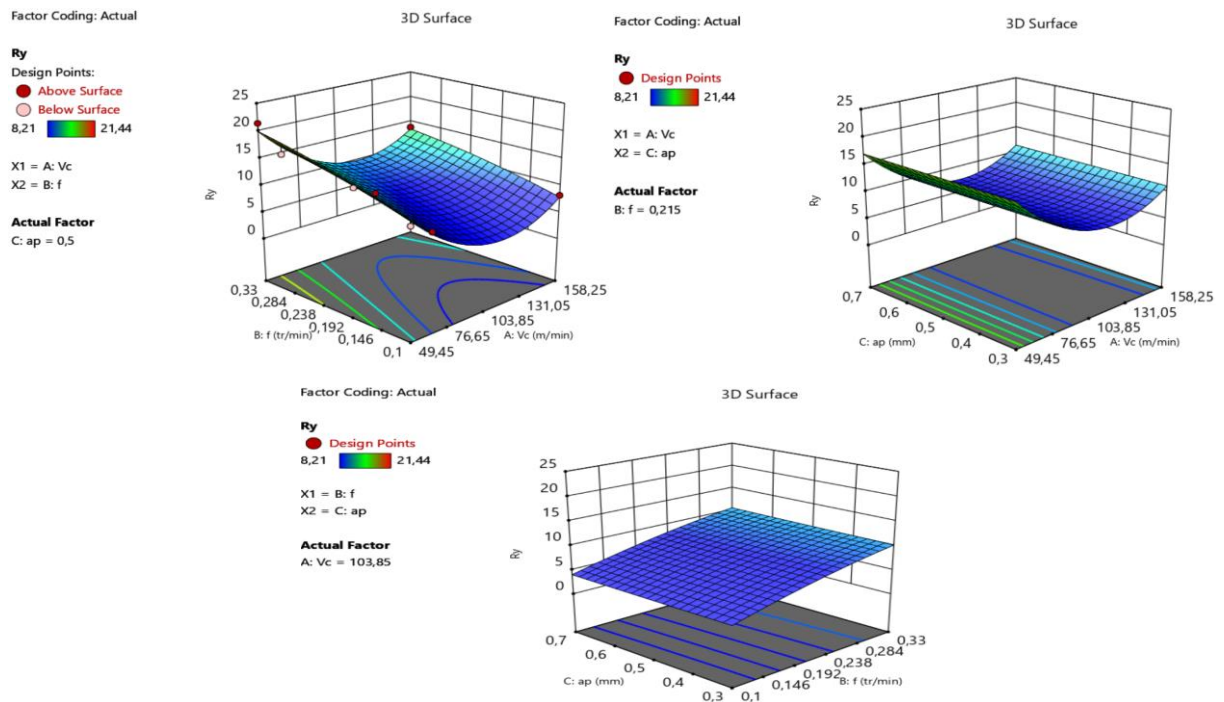


Figure IV.8: Surface de réponse pour R_y en tant que fonction de (V_c, f) , (V_c, ap) et (ap, f) .

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

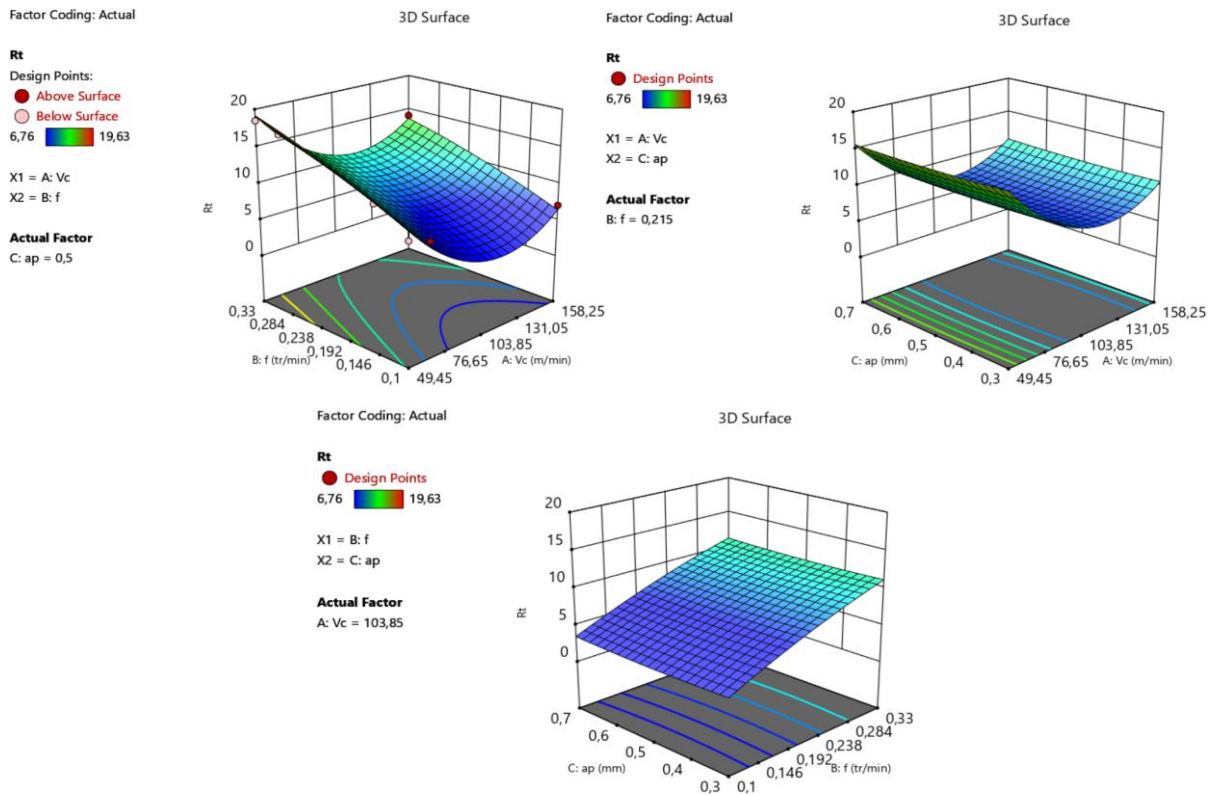
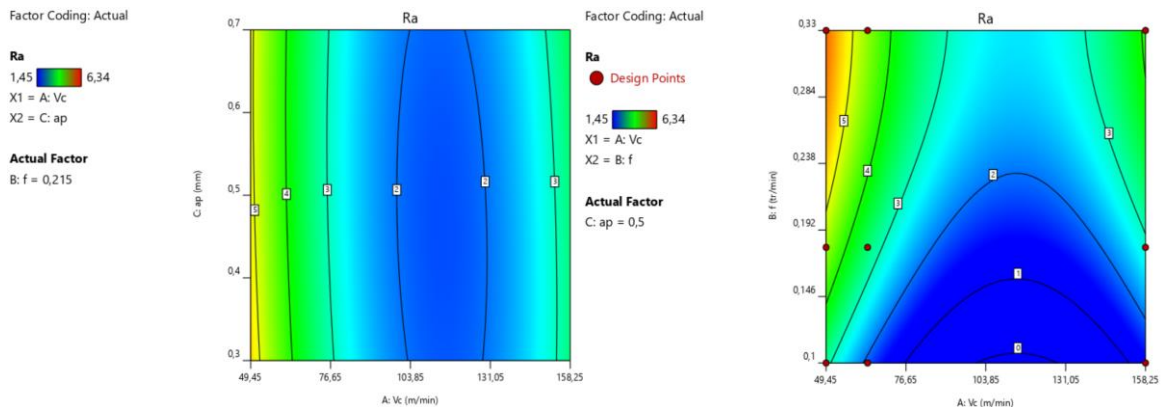


Figure IV.9: Surface de réponse pour R_t en tant que fonction de (V_c, f) , (V_c, ap) et (ap, f) .

IV.4.6. Graphique de contour pour R_a , R_y , R_t

Les graphes suivantes présente la relation entre la valeur de la réponse et 3 facteurs du modèle d'équation .les points ayant la même réponse sont relis pour former des lignes de contour des réponses constantes, Cela nous permet de visualiser la surface de réponse et de déterminer ses valeurs ainsi que les conditions de fonctionnement souhaitées.



CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

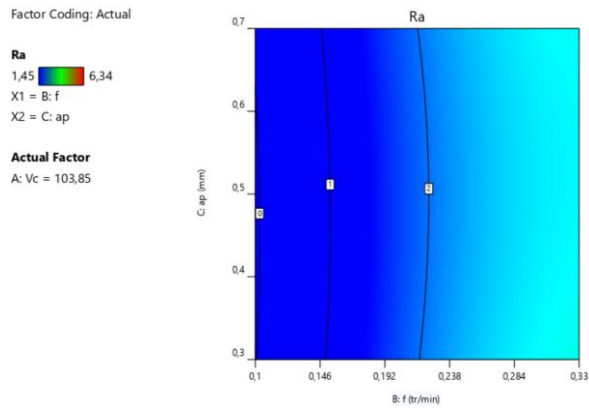


Figure IV.10: Graphique de Contour de (Ra) en fonction de V_c, f, ap .

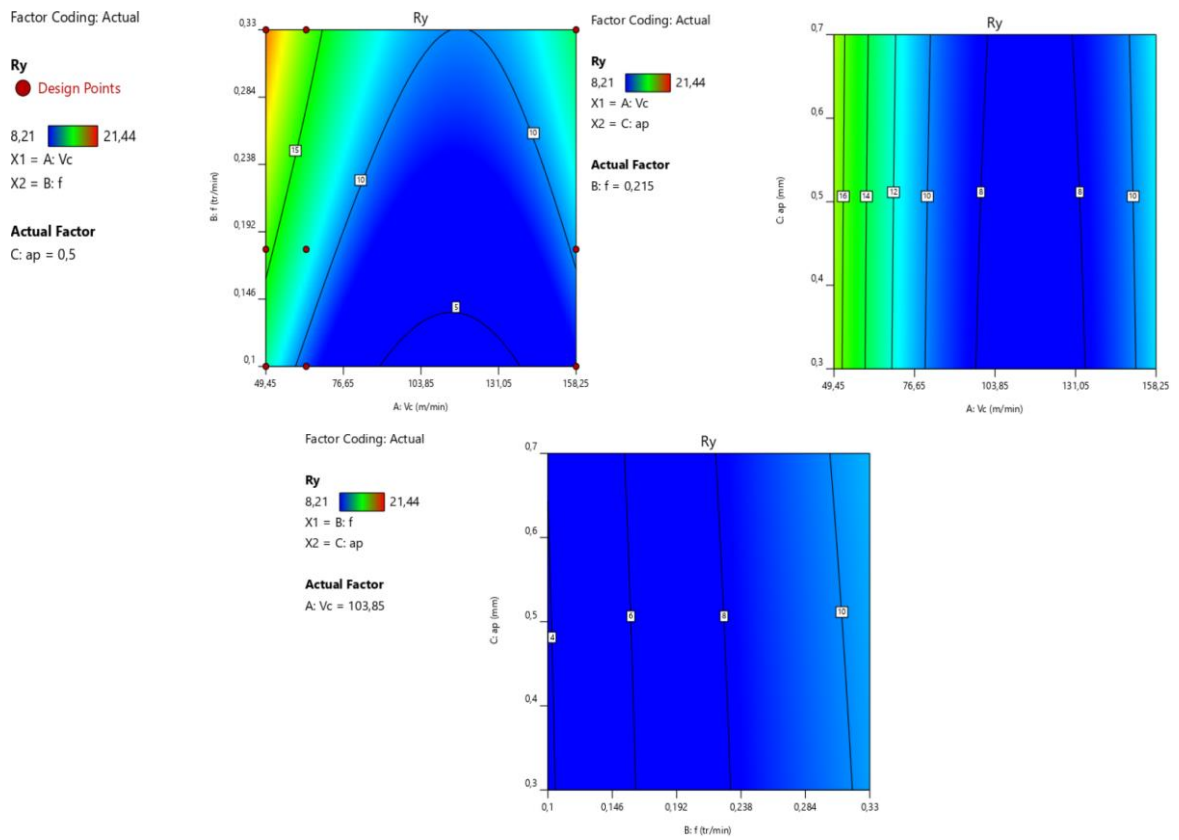


Figure IV.11: Graphique de Contour de (Ry) en fonction de V_c, f, ap .

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

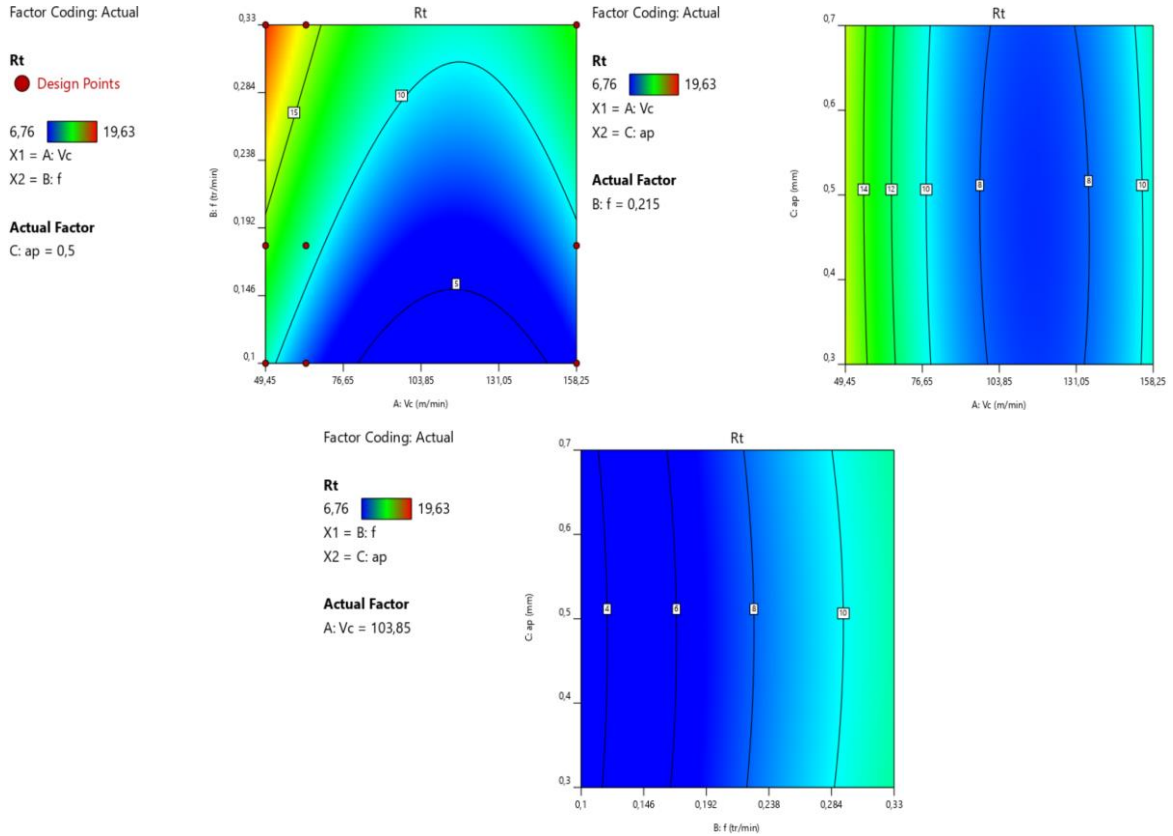


Figure IV.12: Graphique de Contour de (R_t) en fonction de V_c, f, a_p .

IV.4.7. Les courbes probabilités normales de R_a, R_y, R_t

Les courbes suivantes présentent la probabilité normale de R_a, R_y, R_t . On remarque que les points colorés indiquent la valeur de la rugosité de surface. Il est évident que les résidus sont très proches de la ligne droite de la distribution normale, ce qui signifie que les erreurs sont réparties de manière normale.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

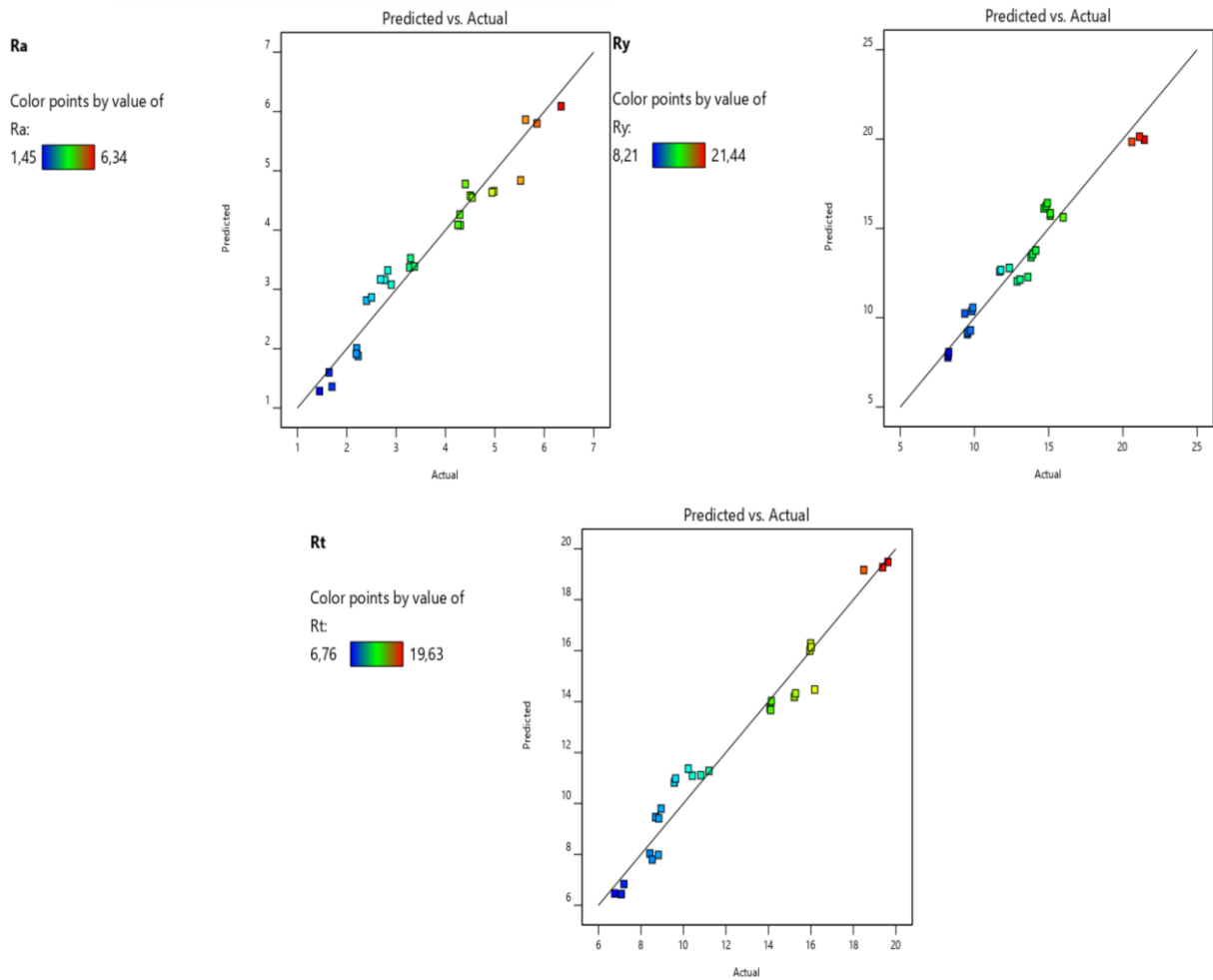


Figure IV.13: Probabilités normales des résidus pour Ra, Rt et Rz.

IV.5.Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer les coefficients de détermination et les modèles mathématiques qui nous permettent de mieux voir le degré d'influence des différents paramètres du régime de coupe (V_c, f, a_p) sur les différents paramètres technologiques étudiés (rugosité de la surface usinée) lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9. Ces modèles qui sont d'une grande importance économique dans le milieu industriel. A partir de ces résultats, nous avons tiré les conclusions suivantes:

- ✓ l'avance (f) a un impact considérable sur les différents critères de la rugosité étudié (Ra, Ry, Rt) avec des contributions de (96,05, 86,75 et 92,21) % respectivement.
- ✓ l'avance (f) et la vitesse de coup (V_c) sont les paramètres les plus influents suivis par la profondeur de passe.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

- ✓ L'analyse de résultat montre que le modèle mathématique R_t est le modèle le plus représentatif car son $R^2 = 96,44\%$ suivi par le modèle de R_a avec un $R^2 = 95,26\%$ et en dernier le modèle de R_y avec une $R^2 = 94,77\%$.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail étude est d'étudier les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance par tour) sur l'état de surface des pièces usinées pendant le tournage.

Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

- ✓ L'avance est l'un des paramètres de coupe dont l'effet est significatif sur les critères de la rugosité de surface, L'augmentation de l'avance de 0,082mm/tr à 0,66 mm/tr fait accroître les critères de la rugosité (Ra, Ry, Rt) de (12,15% ; 19,01% ; 16,33%) et (9,66% ; 27,69 % ; 18,15 %) pour $V_c=79,12$ m/min, $ap=0,4$ mm et $V_c=197,82$ m/min et $ap=0,7$ mm respectivement.
- ✓ L'augmentation de la vitesse de coupe améliore d'une manière très significative l'état de surface, L'augmentation de la vitesse de coupe de (Ra, Ry, Rt) de 31, 65 m/min à 197, 82 m/min fait diminuer les critères de la rugosité (Ra, Ry, Rt) de (75,77% ; 76,41% ; 77,61%) et (79,23% ; 75,50% ; 75,40%) pour $ap= 0,4$ mm , $f=0,082$ mm/tr et $ap=0,7$ mm et $f=0,25$ mm/tr respectivement.
- ✓ La profondeur de passe (ap) est moins importante que l'avance et la vitesse de coupe, elle ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées.
- ✓ L'analyse ANOVA de la rugosité de surface révèle que l'avance est le facteur le plus important qui affecte la rugosité (Ra,Ry,Rt) avec des contributions de (61,36%, 55,05%,69,10%) suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec des contributions de (18,97%,26,95%,19,21%) et en fin la profondeur de passe avec des contributions de(0,011%,0,089%,0,00072%),Les interactions ($f \times ap$) , ($V_c \times ap$)et($V_c \times f$) ont des faibles contributions par conséquent, ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (V_c^2 , f^2 et ap^2) ne sont pas aussi significatifs.
- ✓ Les graphes de contour déterminés dans ce travail, permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.
- ✓ Les coefficients de détermination (R^2) des différents modèles (Ra, Ry et Rt) sont tous élevés et qui varient entre (95.26%,94.78%,96.44%) ce qui prouve la bonne adéquation. Ces modèles ont un intérêt industriel parce qu'ils peuvent être employés pour la prédiction des paramètres technologiques d'usinage.

Référence

Référence

- [1] http://www.researchgate.net/publication/257298002_Optimisation_des_parametres_de_coupe_en_tournage.
- [2] **Segreti, M.** (2002). Vibrations en coupe orthogonale. Modélisation, étude de stabilité et validation expérimentale, Thèse, Université de Metz.
- [3] **Claudiu-Florinel, B., Philippe, D., Jean-Yves, K., Olivier, C., Raynald, L., Alain, G., Constantin, I.** (2007). New vibrations phenomena analysis in turning. *Mécanique & Industries*, 8 (5) 497-503.
- [4] تخصص ميكانيكا إنتاج تقنية تشغيل (نظري) 121 ميك، طبعة 1429هـ، صفحة 17، 4.
- [5] **REMLI Fethi** .L'effet d'usinage par tournage sur un acier XC18. Mémoire de doctorat, université Mohamed khider –Biskra.
- [6] **Philippe Depeyre.** 2004 /2005 Fabrication Mécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la réunion.
- [7] **S.BENSAADA**, COUPE DES METAUX, page 11.
- [8] **Brigitte Vasques**, étude du comportement du rayon d'arête et de son influence sur l'intégrité de surface en tournage à sec. Docteur de l'université François – Rabelais, 17 juin 2008.
- [9] **Pastor H.**, Etat actuel et développement des matériaux durs et superdurs, *Matériaux et techniques*, 2 ème partie, 1987, pp.319-327. G
- [10] **Boutin Y.**, L'usinage à Grande Vitesse (6 de 6), section : les matériaux d'outils de coupe <http://magazinemci.com/supmetal/articles/2005/08/aout0506.htm> _ 16/01/2008.
- [11] **Mach 'Pro** Qui coupe quoi. Edition 15 novembre 2000.
- [12] **F. BAGUR.** Matériaux pour outils de coupe, *Techniques de l'ingénieur, Traité de génie mécanique*. BM 7080, 1990.
- [13] **BOUCHELAGHEM HADJIRA.** Etude du comportement des outils CBN Lors de l'usinage de l'acier fortement ALLIE AISI D3. Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [14] **Alexandre Toumine**, « Cours d'usinage », Groupe conception production, INSA de Lyon, France.
- [15] **D. Gelin, M. Vincent**, « Eléments de fabrication », Les Editions Foucher, 1995.
- [16] **J. L. Fanchon** « Guide des sciences et technologie industrielle » Edition Nathan Paris, 1994, France.
- [17] **Rocdacier**, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011.

Référence

- [18] **LAKHDER BOUZID**. 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-, Mémoire de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [19] **FNIDES MOHAMED**. Etude de l'impact des conditions d'usinage sur la rugosité de surface et des vibrations lors de fraisage de face. Mémoire de doctorat, Faculté des Sciences et de la Technologie Université 8 Mai 1945 Guelma Département de Génie Mécanique.
- [20] **Bedrin.C; Roumesy.B.**, Usinage par outil coupant Fascicule 1-2, INSA Lyon 1989.
- [21] **A. CHEVALIER**. Guide du dessinateur industriel, Hachette technique - édition - 2004.
- [22] **CETIM**. Etude de l'usinage à grande vitesse, Décision d'aide N°: 72-7-0669. 1979.
- [23] **Le Calvez C.**- Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone- Thèse de doctorat de L' ENSAM Paris ,1995.
- [24] **M. Habek**, étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100cr6, l'école nationale supérieure d'arts et métiers, spécialité“ mécanique - matériaux - procédés ”, le 11 décembre, 2006.
- [25] **l'usinabilité.de** **mâtereau**
http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition.
- [26] **[DAV 96] Davies, M.A., Fick, S.E., Evans, C.J.**, “ Dynamic Measurement of Shear Band Formation in Precision Hard Turning”, in Liber Amicorum, Professor Paul Vanherck, Ingenieur and Pedagoog, ISBN 90-73802-56-3, Katholieke Universiteit Press, Leuven, Chapter 5; 1996.
- [27] **J.G. Lima, R.F. Vila, A.M. Abraˆo, M. Faustino, J. Paulo Davim**. Hard turning: AISI 4340 high strength alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. J Mater Process Tech 2005;169:pp.388–95.
- [28] **Luo, S.Y.; Liao,Y.S.,Tsai, Y.Y.**, wear characteristics turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools; Journal of Materiels processing technology, vol.(88),1999,pp.114-121.
- [29] **F.Mahfoudi, G.List, A. Molinari et A.H Moufki, L.Boulanouar**, High speed turning for hard material with PCBN inserts: tool wear analysis, Int. J. Machining and Machinability of Materials, Vol. 3, Nos. 1/2, 2008, pp.62-79.

Référence

- [30] Yallese MA, Chaoui K, Zeghib N, Boulanouar L, Rigal JF. Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, journal of materials processing technology 2009, 2009, pp.1092–1104.
- [31] Paulo .J and al., Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. Materials et design, 2006, pp.1187-1191.
- [32] P-J.CUNAT, Aciers inoxydables, Critères de choix et structure, Technique de l'ingénieur, M 4540, (2004).
- [33] M. YASIR, T.L. GINTA, B. ARIWAHJOEDI, A. U. ALKALI, M. DANISH, Effect of cutting speed and feed rate on surface roughness of AISI 316L using end-milling. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11 (2016) 2496-2500.
- [34] S. BERKANI, M. A. YALLESE, L. BOULANOUAR, Statistical analysis of AISI304 austenitic stainless steel machining using Ti (C, N)/Al₂O₃/TiN CVD coated carbide tool, International Journal of Industrial Engineering Computations, 6 (2015) 539-552.
- [35] I. KORCUT, M. KASAP, I. CIFTICI, U. SEKER, Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel, Materials and Design, 25 (2004) 303–305.
- [36] P-J.CUNAT, Aciers inoxydables, Propriétés et résistance à la corrosion, Technique de l'ingénieur, M4541, (2004).
- [37] <https://www.Korloy.com/en/download/technews.do> .
- [38] <https://www.metiers-et-passions.com>.
- [39] Technique d'ingénieur f1006. Plans d'expériences méthode de Taguchi (2007).
- [40] Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G.L. Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coated carbide tool. Measurement, 45, pp.1872–1884 (2012).
- [41] Süleyman N, Süleyman Y, Erol T. Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology, Measurement, 44, pp. 580–587 (2011).