

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Laboratoire de structure (LS)

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Fabrication Mécanique et Productique

Titre
Modélisation et optimisation mono et multi objectif des
paramètres de coupe Lors de tournage d'un acier inoxydable
304L

Proposé et encadré par :
Pr. TEMMER Mustapha
Mr. TOUGGUI Youssef

Réalisé par :
Badek Mhand
Bouzidi Adlane

Année universitaire 2018/2019

Dédicace

Nous tient à dédier le fruit de ce travail à nos :

Parents,

À nos frères,

À nos sœurs,

À nos familles,

À tous mes chers amis et mes collègues de l'Université de Saad

Dahleb.

Remercîment

Avant tout, nous remercions DIEU le tout puissant de nous a donné la Force, le courage, et la patience pour mener à terme ce modeste travail.

On tient à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre stage et qui nous ont aidées lors de la rédaction de ce mémoire.

On voudrait dans un premier temps remercier, notre promoteur Mr TAMAR MOUSTAPHA et le copromoteur TOUGGUI YOUCEF, pour leurs patience, leurs disponibilité et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

On remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de Saad dahleb à Blida et les intervenants professionnels responsables de notre formation.

Nous voulons remercier nos collègues, avec lesquels nous avons passé des moments inoubliables au cours des années théoriques et pendant la réalisation de ce travail.

Un grand remerciement à nos chers Parents frères et sœurs.

Enfin, nous remercions, également, toute personne qui a participé de Près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Bouziđi Adlane, Badek mhand

Index des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1. Composition de quelques aciers inoxydables : nuance austénitique AISI 304L et AISI 316L, nuances ferritique AISI 430, martensitique AISI 416 et duplex AISI 2205	13
Tableau 1.2. Parts de marché mondiales de type d'acier inoxydable	14

Chapitre 2

Tableau 2.1. Matrice de planification pour un plan de Taguchi L9	29
--	----

Chapitre 3

Tableau 3.1. Composants chimique et physique de l'acier inoxydable 304 L	33
Tableau 3.2. Paramètres de coupe et leurs niveaux	39

Chapitre 4

Tableau 4.1. Résultats expérimentaux	40
Tableau 4.2 ANOVA pour Fz	41
Tableau 4.3 ANOVA pour Ra	41
Tableau 4.4. ANOVA pour Pc	42
Tableau 4.5. ANOVA pour Kc	42
Tableau 4.6. Rapports signal/bruit (S/B) pour Ra, Fz, Pc, Kc et MRR	47
Tableau 4.7. Réponses pour les rapports signal /bruit de Ra	48
Tableau 4.8 des réponses pour les rapports signal /bruit de Fz	49
Tableau 4.9. Réponses pour les rapports signal /bruit de Pc	50
Tableau 4.10. Réponses pour les rapports signal /bruit de Kc	50
Tableau 4.11. Réponses pour les rapports signal /bruit de MRR	51
Tableau 4.12. Résultats expérimentale normalisé ($\xi_i(k)$)	52
Tableau 4.13. Calcul de Delta	53
Tableau 4.14. Calcul de coefficients du GRA	53
Tableau 4.15. Qualité Grise GRG et son ordre	54
Tableau 4.16. Effets principaux de la qualité grise	55
Tableau 4.17. ANOVA pour GRG	56

Index des figures

Figure 1.1. Procédé de tournage	2
Figure 1.2. L'avance par tour	3
Figure 1.3. profondeur de passe	3
Figure 1.4. Les choix des paramètres de coupe.....	4
Figure 1.5. Géométrie d'un outil simple	5
Figure 1.6. Principaux plans de l'outil de coupe.....	5
Figure 1.7. Angles de coupe d'un outil simple	6
Figure 1.8. Illustration du rayon de bec.....	7
Figure 1.9. Composantes de l'effort de coupe	8
Figure 1.10. Les composantes de l'effort de coupe	8
Figure 1.11. Illustration du profil de Ra	9
Figure 1.12. Illustration sur un profil du paramètre Ry	9
Figure 1.13. Illustration sur un profil du paramètre Rz.....	10
Figure 1.14. Illustration sur un profil du paramètre Rt.....	10

Chapitre 2

Figure 2.1. Le domaine du facteur	22
Figure 2.2. L'espace expérimental.....	22
Figure 2.3. Le domaine d'étude	23
Figure 2.4. La surface de réponses	24
Figure 2.5. les étapes de l'utilisation de la méthode de Taguchi	28

Chapitre 3

Figure 3.1. Toure conventionnelle	32
Figure 3.2. La pièce usinée	33
Figure 3.3. Le porte outil	34
Figure 3.4. Géométrie de la plaquette de coupe carbure revêtue	34
Figure 3.5. Chaîne de mesure des efforts de coupe et la rugosité de surface	35
Figure 3.6. Dispositif de montage	36
Figure 3.7. Rugosimètre	36
Figure 3.8. Dynamomètre <i>KISTLER9257 B</i>	37

Figure 3.9. Plateforme d'effort de coupe (KISTLER) 37
Figure 3.10. Acquisition de résultats l'effort tangentiel 38

Chapitre 4

Figure 4.1. Comparaison entre les valeurs mesurées et prévues de Ra, Fz, Pc et KC 43
Figure 4.2. Influence des paramètres de coupe sur Ra 44
Figure 4.3. Influence des paramètres de coupe sur Fz 45
Figure 4.4. Influence des paramètres de coupe sur Pc 45
Figure 4.5. Influence des paramètres de coupe sur KC 46
Figure 4.6. Influence des paramètres de coupe sur MRR 47
Figure 4.7 Graphique des effets principaux pour S/B de Ra 48
Figure 4.8 Graphique des effets principaux pour S/B de Fz 49
Figure 4.9. Graphique des effets principaux pour S/B de Pc 50
Figure 4.10. Graphique des effets principaux pour S/B de Kc 51
Figure 4.11 Graphique des effets principaux pour S/B de MRR 52
Figure 4.12. Qualité Relationnelle Grise (GRG)) 54
Figure 4.13. Graphique des effets principaux pour GRG 55

Nomenclature

ANOVA : Analyse de variance.

GRA: Analyse Relationnelle Grise

CBN : Nitrure de bore cubique.

V_c : Vitesse de coupe (m/min).

a_p: Profondeur de passe (mm).

f : Avance par tour (mm/tr).

F : Effort de coupe résultant (N).

F_a (F_x) : Effort de coupe axial (N).

F_r (F_y) : Effort de coupe radial (N).

F_t (F_z) : Effort de coupe tangentiel (N).

R_a : Rugosité moyenne arithmétique (μm).

R_t : Rugosité totale (μm).

R_z : Profondeur moyenne de la rugosité (μm).

r_ε : Rayon de bec de l'outil (mm).

α : Angle de dépouille principal (degré).

γ : Angle d'attaque (degré).

λ : Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).

χ : Angle de direction principal (degré).

Frés : Effort de coupe résultant [N].

MRR : Volume de copeau enlevé (Débit de copeau) [cm³/min].

P_c : Puissance de coupe [W]

K_s : Effort spécifique (Pression de coupe) [MPa] ou [N/mm²].

HRC : Dureté Rockwell.

S/N : Rapport signal sur bruit [dB].

Sommaire

Dédicace	I
Remercîment	II
Index des tableaux	III
Index des figures	IV
Nomenclature	VI
Résume	VII
Abstract	VIII

Chapitre 1 Etude et analyse bibliographique

Introduction générale.....	1
1.1. Introduction	2
1.2. Définition de base.....	2
1.2.1. Définition de tournage.....	2
1.2.2. Les paramètres de coupe	3
1.2.2.1. La vitesse de coupe.....	3
1.2.2.2. L'avance	3
1.2.2.3. La profondeur de passe.....	3
1.2.3. Réglage des conditions de coupe	4
1.3. Développement des matériaux d'outil de coupe.....	4
1.3.1. Matériaux des outils de coupe	4
1.3.2. Géométrie des outils de coupe.....	4
1.3.3. Les principaux plans.....	5
1.3.4. Les angles de coupe.....	6
1.3.5. Le rayon de bec	6
1.4. Les paramètres technologiques.....	7
1.4.1 Les efforts de coupe	7
1.4.1.1. Généralités.....	7
1.4.1.2. Définition et intérêt de leur mesure	7
1.4.2. La rugosité.....	9
1.4.2.1. Définition de la rugosité	9
1.4.2.2. Définition les critères de la rugosité.....	9
1.4.3. Puissance de coupe	10
1.4.4. Pression spécifique de coupe (Kc)	11

1.4.5. Taux d'enlèvement de matière	11
1.5. Usinabilité des aciers inoxydables.....	11
1.5.1. Les aciers inoxydables.....	11
1.5.1.1. Principales familles	12
1.5.2. Usinage des aciers inoxydable.....	13
1.5.2.1. Introduction	13
1.5.2.2. L'usinabilité des aciers inoxydable	14
1.5.2.3. Quelques problèmes d'usinage observés à partir de résultats expérimentaux	15
1.6. Etat de l'art des travaux existants.....	16
1.7. Conclusion.....	19

Chapitre 2 Procédure et équipements d'expérience

2.1. Introduction	20
2.2. Plans d'expériences	20
2.2.1. Définition.....	20
2.2.2. Notion d'espace expérimental	21
2.2.3. Notion de surface de réponse	22
2.3. Méthode des Surfaces de Réponse (MSR)	23
2.3.1. Définition.....	23
2.4. Analyse de variance (ANOVA).....	24
2.5. Analyse de régression.....	25
2.6. Méthode de Taguchi.....	25
2.6.1. Définition.....	26
2.6.2. Analyse de rapport signal/bruit (S/B).....	26
2.6.3. Etapes de la méthode de Taguchi	27
2.7. Méthode d'Analyse Relationnelle Grise (Grey method).....	28
2.7.1. Étape 1 : la normalisation	29
2.7.2. Étape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris	29
2.7.3. Étape 3 : Calcul du GRG (Grey relational grade)	30
2.7.4. Étape 4 : Choix le niveau optimal des paramètres de coupe	30
2.7.5. Étape 5 : ANOVA pour GRG.....	30
2.8. Conclusion.....	31

Chapitre 3 Etude de l'influence des paramètres de coupe

3.1. Introduction	32
3.2. Matériels utilise	32
3.2.1. Machine utilisée	32
3.2.2. La pièce usinée	33
3.2.3. Porte outil	34
3.2.4. Outil de coupe	34
3.3. Dispositif de Montage	35
3.4. Les moyens de mesures	36
3.4.1. Rugosimètre.....	36
3.4.2. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	37
3.5. Principe de mesure	37
3.6. Planification de plans des expériences	38
3.7. Conclusion.....	39

Chapitre 4 Optimisation

4.1. Introduction	40
4.2. Analyses des résultats expérimentaux	40
4.2.1. Analyse de variance ANOVA	40
4.2.1.1. ANOVA pour Fz	40
4.2.1.2. ANOVA pour Ra	41
4.2.1.3. ANOVA pour Pc	42
4.2.1.4. ANOVA pour Kc	42
4.2.1.5. Modèles mathématiques de régression	43
4.2.1.6. Comparaison.....	43
4.2.2. Effet des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques	44
4.2.2.1. Effet des paramètres de coupe sur Ra	44
4.2.2.2. Effet des paramètres de coupe sur Fz	45
4.2.2.3. Effet des paramètres de coupe sur Pc	45
4.2.2.4. Effet des paramètres de coupe sur Kc	46
4.2.2.5. Effet des paramètres de coupe sur MRR	46
4.2.3. Optimisation mono-objectif (méthode de Taguchi)	47
4.2.3.1. Rapport Signal sur Bruit (S/B) de paramètres technologiques	47
4.2.3.2. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur les paramètres technologiques	48
4.2.3.2.1. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur Ra	48
4.2.3.2.2. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur Fz	49
4.2.3.2.3. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur Pc	49
4.2.3.2.4. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur Kc	50

4.2.3.2.5. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur MRR.....	51
4.2.4. Mise en œuvre de la méthode d'optimisation multi-objectif GRA	52
4.2.4.1. Étape 1 la normalisation	52
4.2.4.2. Étape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris	53
4.2.4.3. Étape 3 : Calcul de GRG (Grey Relational Grade).....	54
4.2.4.4. Étape 4 : Choix le niveau optimal des paramètres de coupe	55
4.2.4.5. Étape 5 : ANOVA pour GRG.....	56
4.3. Conclusion.....	56
Conclusion générale	58

Introduction Générale

Introduction générale :

Aujourd'hui, les aciers inoxydables sont de plus en plus populaires et font partie de la vie de tous et sont de plus en plus utilisés dans tous les domaines d'industries.

On les trouve dans un certain nombre d'applications telles que composants automobiles (tuyaux d'échappement, moteur, châssis, fixations, tubes pour conduites de carburant, l'industrie des pâtes et papiers, raffinage du pétrole, tuyauterie d'alimentation en eau, produits de consommation, construction navale et l'industrie marine, l'équipement antipollution, les articles de sport etc...

Mais en matière d'usinage, les aciers inoxydables sont généralement considérés comme des aciers plus difficiles à usiner que d'autres nuances en raison de leur nature de la tendance de durcissement élevée, à haut degré de dureté, faible conductivité thermique et ductilité élevée.

Quelques problèmes courants associés à ces matériaux, surtout grade austénitique sont une rugosité de surface élevée, la présence des arrêtes rapportée sur la surface usinée et une forte usure de l'outil.

Notre travail s'intéresse à l'amélioration des usinabilités des aciers inoxydables, en effet il consiste à mener une étude expérimentale de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304L avec un outil de coupe Carbure revêtus (GC 1125), le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur certains paramètres technologiques tels que l'effort de coupe (F_z), le critère de rugosité (R_a), la puissance de coupe, la pression spécifique de coupe et le taux d'enlèvement de matière.

La rédaction de ce mémoire est structurée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique qui concerne le tournage dur, les définitions des paramètres technologiques et l'état de l'art sur les différents travaux de recherche en relation avec notre sujet d'étude.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une description méthodique de recherche qui basé sur la définition de la méthode de Taguchi et l'analyse de variance ANOVA.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté d'une part, une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences (plan et intervalle de variation des paramètres de coupe) et d'autre part, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences.

Dans la quatrième chapitre l'étude d'analyse a permis de voir le degrés d'influence des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques. L'application de la méthode Taguchi à l'aide l'utilisation du logiciel Minitab à permit d'obtenir le régime de coupe optimal des paramètres technologiques, permettant d'une part de minimiser le critère de rugosité, l'effort de coupe, la puissance de coupe et la pression spécifique de coupe et d'autre part de maximiser le taux d'enlèvement de matière.

A la fin de ce travail, nous concluons avec une conclusion générale.

Chapitre : 1

Etude Bibliographique

1.1. Introduction

L'usinage par enlèvement de matière tient une place considérable dans la fabrication industrielle, c'est la méthode qui permet de produire des formes complexes et très précises sans changement des caractéristiques de la matière usinée. En effet, selon le secteur d'activité, les matériaux usinés, les types d'outils et de conditions de coupe varient beaucoup. Ce dernier est utilisé dans plusieurs domaines tels que le transport (usinage de bloc moteur dans l'automobile ...), l'énergie (usinage d'une tête de cuve de réacteur nucléaire ...) et le médical (usinage de prothèse dentaire ...).

Les trois procédés les plus employés couramment dans l'usinage sont : tournage, fraisage et perçage. Dans notre étude, nous nous intéressons sur le procédé d'usinage notamment le tournage.

1.2. Définition de base

1.2.1. Définition de tournage

Le tournage est un processus utilise un point de l'outil unique qui enlève le matériel non désiré pour produire une surface de révolution (cylindrique, cône...). Dans ce procédé, la pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), et l'outil est animé d'un mouvement de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. Dans ce dernier, il existe différents opérations réalisables, en ce qui concerne le présente travail, l'opération de chariotage a été effectuée. La figure (1.1) montre le principe du procédé de tournage.

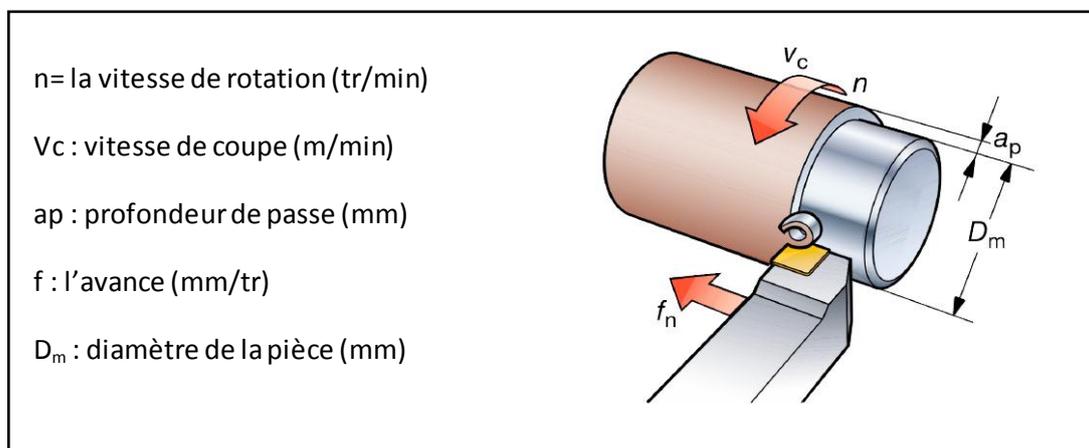


Figure 1.1. Procédé de tournage.

1.2.2. Les paramètres de coupe

1.2.2.1. La vitesse de coupe

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse angulaire ω , cette vitesse étant communiquée par la broche de la machine vers la porte pièce.

1.2.2.2. L'avance

L'avance par tour f (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. Figure (1.2).

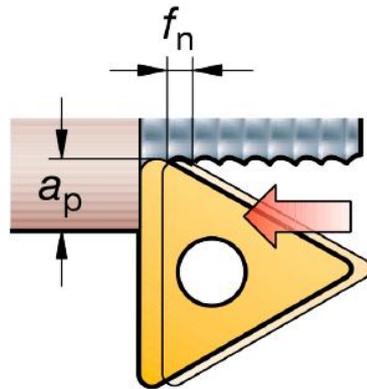


Figure 1.2. L'avance par tour.

1.2.2.3. La profondeur de passe

La profondeur de passe est le déplacement de l'outil détermine la quantité de matière à enlever sur la pièce. Elle est désignée par (a_p) est exprimée en millimètre (mm). Figure (1.3).

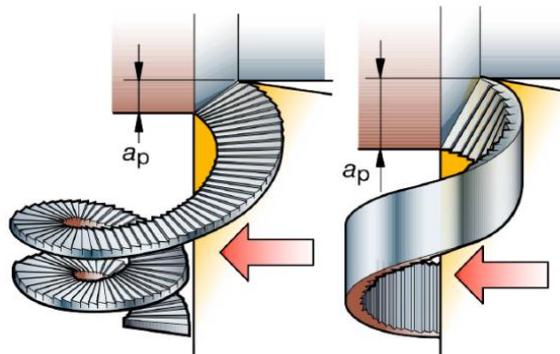


Figure 1.3. profondeur de passe.

1.2.3. Réglage des conditions de coupe en tournage

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...). Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment [1] :

- ✓ Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...)
- ✓ La puissance de la machine
- ✓ La matière de l'outil (ARS, carbure...)
- ✓ La matière usinée (acier, aluminium...)
- ✓ Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage...)
- ✓ L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement).

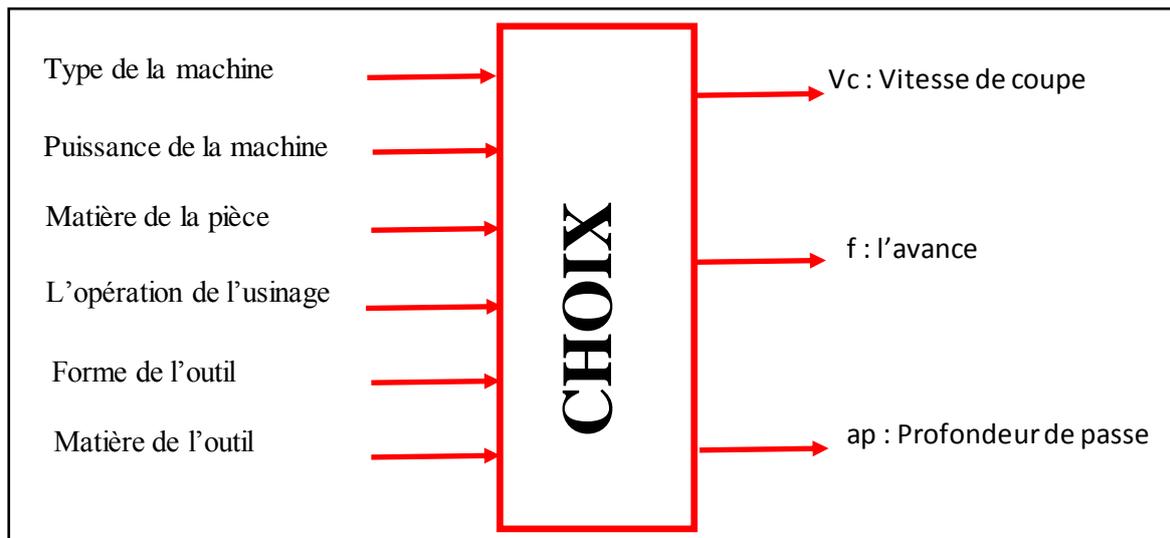


Figure 1.4. Les choix des paramètres de coupe.

1.3. Développement des matériaux d'outil de coupe

1.3.1. Matériaux des outils de coupe

Pour choisir le matériau d'un outil, la prise en compte de la matière à usiner et le type d'opération est primordiale. De ce fait, on peut regrouper les matériaux de coupe en 6 catégories : les aciers rapides, les carbures cémentés, les cermets, le diamant fritté PCD, les céramiques, le CBN. Le détail est référencé dans [2].

1.3.2. Géométrie des outils de coupe

L'outil de coupe est composé d'un corps d'outil et d'une queue. Un corps est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes et la queue de l'outil est la partie par laquelle celui-ci est maintenu. La partie de l'outil intervenant directement dans l'opération de coupe est appelée partie active. Elle est composée de face de coupe, des faces de dépouilles, les arêtes tranchantes. Cette partie peut être constituée du même matériau que le corps, on parle alors d'outils monoblocs (carbures et

aciers rapides) ou d'un matériau différent (plaquettes pour les carbures, les cermets, les céramiques etc...). La figure (1.5) montre les composantes d'outil

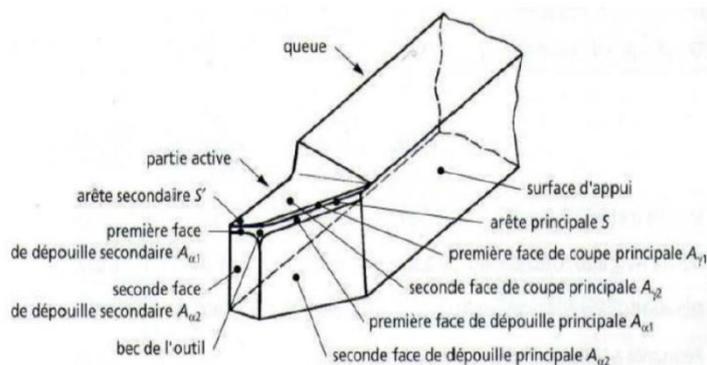


Figure 1.5. Géométrie d'un outil simple.

1.3.3. Les principaux plans

La notion de système de plan est nécessaire dans la géométrie de l'outil de coupe. En effet l'orientation, dans la configuration outil en main, figure (1.6), de l'arête de l'outil de coupe, de la face de coupe et de la face de dépouille est définie par les différents angles caractéristiques, [3], qui eux même sont définies par des plans de référence.

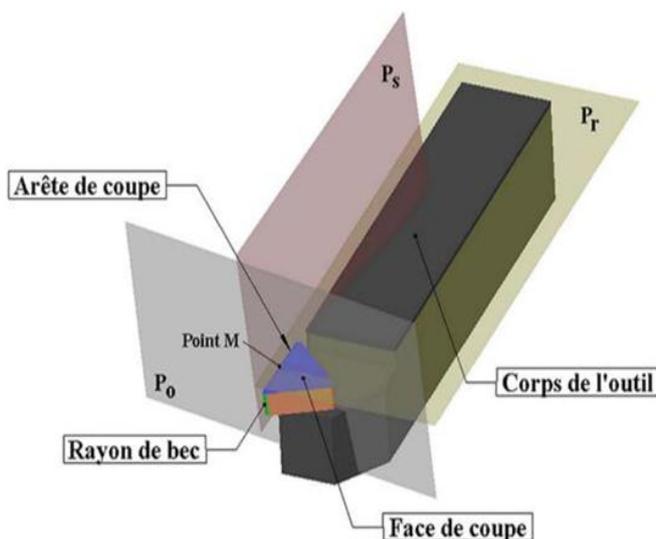


Figure 1.6. Principaux plans de l'outil de coupe.

Ainsi nous avons comme l'atteste la figure (1.6), les plans suivants :

- Le plan de référence de l'outil P_r passe par un point M (figure 1.6) de l'arête de coupe et est parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil.

- Le plan d'arête de l'outil P_s est tangent à l'arête de coupe au point M et perpendiculaire au plan de référence P_r .

-Le plan orthogonal de l'outil P_o est perpendiculaire au plan de référence P_r et au plan d'arête de l'outil P_s au point M.

1.3.4. Les angles de coupe

Afin de rendre plus simple le phénomène de coupe dans son explication, il est nécessaire de définir les angles ayant la plus grande influence sur ces dits phénomènes. On distingue trois angles de coupe principaux :

- L'angle de coupe γ
- L'angle du taillant β
- L'angle de dépouille α

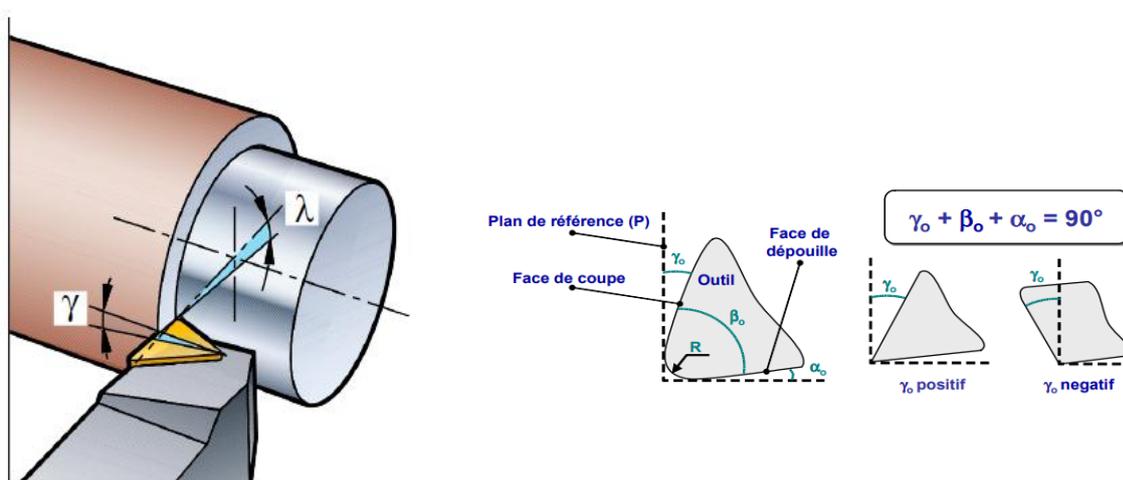


Figure 1.7. Angles de coupe d'un outil simple.

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90.

1.3.5. Le rayon de bec

Le rayon de bec est un facteur important dans l'obtention d'un bon état de surface et la diminution de l'usure de plaquette. Le choix du rayon de bec des plaquettes peut varier de 0,2 à 3 mm, mais 0,4 à 0,8 mm (la plage la plus communément utilisée) [1]. Il est généralement recommandé de retenir un rayon de bec plus faible avec une arête de coupe vive. Un faible rayon de bec engage une

plus petite surface de la plaquette dans la coupe, réduisant par là même les risques de vibration et la tendance à l'usure. Comparativement, un grand rayon de bec tend à provoquer des vibrations et un fléchissement de la pièce. Aux quelles l'on ajoute pour les petits rayons l'avantage de former des copeaux plus minces qu'il est facile d'évacuer de la pièce. Et pour les grands rayons, les copeaux se forment dans plusieurs directions. Figure (1.8), nécessitant une puissance supérieure de la machine et engendrant des efforts de coupe plus élevés.

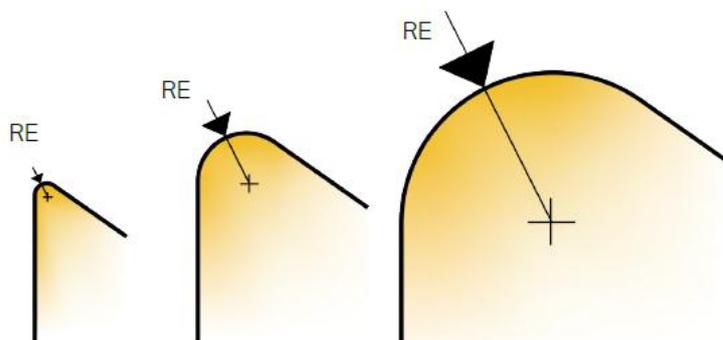


Figure 1.8. Illustration du rayon de bec.

1.4. Les paramètres technologiques

1.4.1 Les efforts de coupe

1.4.1.1. Généralités

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire : l'effort double environ quand la vitesse d'avance double).

1.4.1.2. Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe F_R , peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes (figure 1.9).

L'effort de coupe produit peut-être décomposé en trois composantes qui sont :

- $F_x (F_f)$: composante dans le sens de V_f , appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- $F_y (F_p)$: composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.
- $F_z (F_c)$: composante dans le sens de V_c , appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

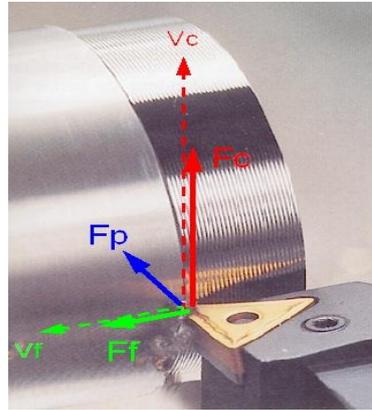


Figure 1.9. Composantes de l'effort de coupe.

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe, aussi elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau.

D'après la figure (1.10), la force de coupe résultante F_R , étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression.

$$F_R = \sqrt{F_v^2 + F_a^2 + F_p^2} \quad (1.1)$$

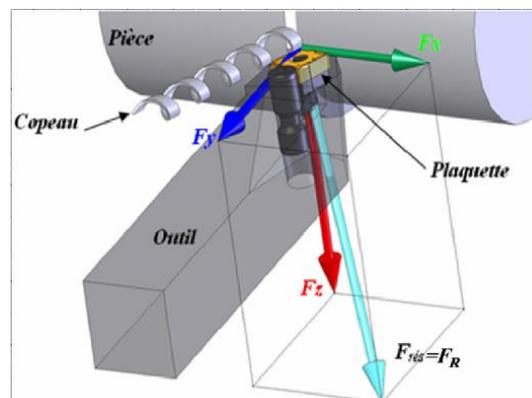


Figure 1.10. Les composantes de l'effort de coupe [4].

1.4.2. La rugosité

1.4.2.1. Définition de la rugosité

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière [5].

1.4.2.2. Définition des critères de la rugosité

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité [6]. Elle définit les termes et les équations des paramètres généraux. Ci-dessous, les définitions sont données pour les paramètres R.

Ra : écart moyen, c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. « Ra » mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale figure (1.11). On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité. Le paramètre Ra est déterminé par les équations :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1.2)$$

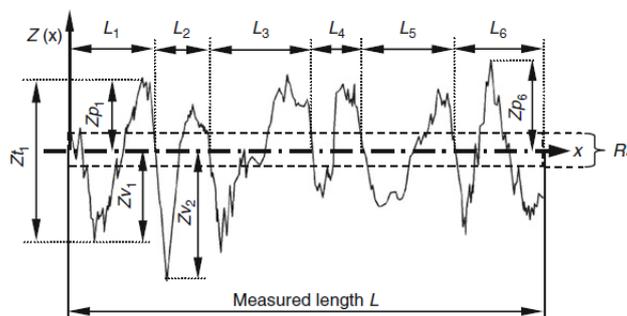


Figure 1.11. Illustration du profil de Ra.

Ry : écart total, c'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux. Figure (1.12).

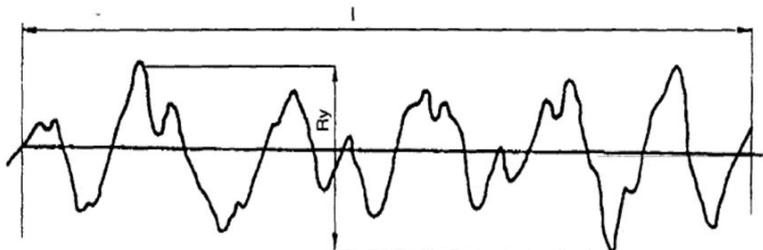


Figure 1.12. Illustration sur un profil du paramètre Ry.

Rz : régularité, c'est la moyenne des écarts totaux de rugosité « Rt » observés sur 5 Longueurs figure (1.13). Le paramètre Rz est déterminé par les équations :

$$Rz = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} Rz_j \quad (1.3)$$

Ou

$$Rz = \frac{\sum_{j=1}^5 y_i}{5} \quad (1.4)$$

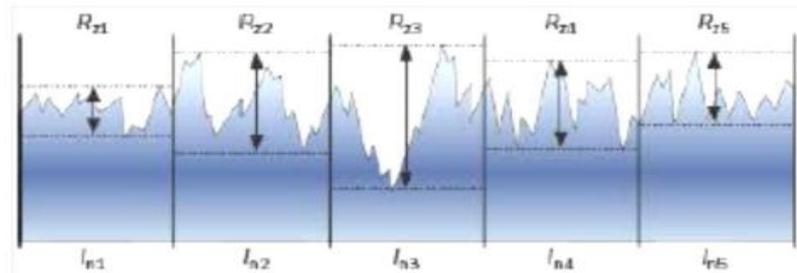


Figure 1.13. Illustration sur un profil du paramètre Rz.

Rt : C'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation figure (1.14). Une seule valeur Rt, non combiné à un Rz ou Ra est l'une des exigences les plus strictes du profil R.

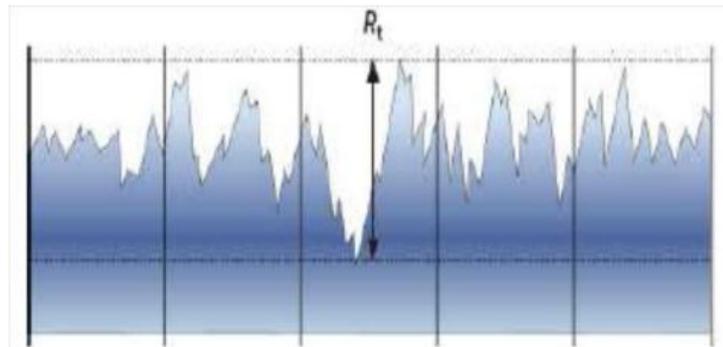


Figure 1.14. Illustration sur un profil du paramètre Rt.

1.4.3. Puissance de coupe

Cette puissance de coupe absorbée par la broche, se détermine à l'aide d'une formule qui tient compte :

- Des paramètres de coupe en fonction de la matière à usiner.
- Des forces de coupe de l'outil sur la pièce au travers d'une variable Kc appelée : " Pression spécifique de coupe "

La puissance s'exprime en watts (W) : il faut donc considérer l'effort de coupe en newtons (N) et la vitesse de coupe en mètres par minute (m/min) ;

La formule générale de la puissance de coupe P_c peut s'écrire :

$$P_c = \frac{AD * K_c * V_c}{60} \quad (1.5)$$

1.4.4. Pression spécifique de coupe (K_c)

La connaissance de la pression spécifique de coupe est nécessaire dans le domaine de la fabrication, c'est une constante de matériau. La pression spécifique désigne la force appliquée par unité de surface. Il en résulte l'équation suivante :

$$K_c = F_c / AD \quad (1.6)$$

K_c : pression spécifique de coupe (N/mm²)

F_c : Force de coupe (N)

AD : Section du copeau (mm²) égale ($ap * f$)

1.4.5. Taux d'enlèvement de matière

Le taux d'enlèvement de matière permet de mesurer la productivité d'une machine-outil d'usinage. L'on applique le principe selon lequel la cadence de base de la machine diminue à mesure de l'augmentation du débit d'enlèvement de matière.

Le taux d'enlèvement de matière MRR désigne la quantité de matière enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante :

$$MRR = V_c * f * ap \quad (1.7)$$

1.5. Usinabilité des aciers inoxydables

1.5.1. Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables est un métal constitué de divers éléments d'alliage. Le principal élément d'alliage est le fer (plus de 50%), c'est la base de l'acier inox. L'acier inoxydable est une famille d'aciers, un alliage de fer et de carbone auxquels on incorpore du chrome, au-delà de 10.5% en solution (selon la teneur de carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité et leur durabilité.

1.5.1.1. Principales familles

Les principales familles sont produites à travers l'ajout des différents alliages ce qui changent les propriétés mécaniques et la structure initiale de l'acier. Il y a cinq familles d'aciers inoxydables :

- Les aciers inoxydables austénitiques (exemples : 304L et 316L) : fer-chrome-nickel, carbone <0,1%, amagnétiques ; ces aciers constituent plus de 65% de l'utilisation d'aciers inoxydables [7], utilisés dans les secteurs alimentaire et pétrochimique.
- Les aciers inoxydables ferritiques (exemples : 430 et 444) : fer-chrome, carbone < 0,1%.
- Les aciers inoxydables martensitiques (exemples : 403 et 501) : fer-chrome, carbone > 0,1%, magnétiques et aptes à la trempe, utilisés pour la fabrication de moules.
- Les aciers inoxydables duplex (exemples : 44LN et 2205) : fer-chrome-nickel, structure mixte austénitique-ferritique, magnétiques, utilisés dans le secteur de la construction.
- Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation avec une teneur en chrome souvent comprise entre 15 et 17 %. Ces aciers souvent de matrice martensitique (parfois avec de l'austénite) ont subi un traitement spécifique permettant une précipitation de composés par exemple riches en cuivre. Ils permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques de résistance à la rupture des aciers inoxydables. Le tableau (1.1) nous montre la composition de quelques aciers inoxydables.

	Composition en %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Autre
	Carbone	Manganèse	Silicium	Chrome	Nickel	Phosphore	Soufre	N Azote Mo Molybdène
AISI 304L	0.03	2	1	18-20	8-10.5	0.045	0.03	0.1 N
AISI 316L	0.03	2	1	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3 Mo 0.1 N
AISI 430	0.12	1	1	16-18	0.75	0.04	0.03	...
AISI 416	0.15	1.25	1	12-14	...	0.04	>0.15	0.6 Mo
AISI 2205	0.03	2	1	21-23	4.5-6.5	0.03	0.02	2.5-3.5 Mo 0.08-0.2 N

Tableau 1.1. Composition de quelques aciers inoxydables : nuance austénitique AISI 304L et AISI 316L, nuances ferritique AISI 430, martensitique AISI 416 et duplex AISI 2205 [8].

1.5.2. Usinage des aciers inoxydables

L'usinabilité des matériaux dépend de plusieurs propriétés. Dans cette étude, on s'intéresse à l'usinabilité des aciers inoxydables austénitique 304L qui sont considérés comme des matériaux difficiles à usiner.

1.5.2.1. Introduction

Les premières utilisations de l'acier inoxydable se limitaient à quelques applications telles que la coutellerie, les canons de fusil, les réservoirs d'acide nitrique, etc. Diverses compositions ont été mises au point, ce qui lui confère une grande résistance à la corrosion, même à des températures élevées, et lui a donné une grande résistance, les fabricants ont commencé à l'utiliser pour un plus grand nombre d'applications. Maintenant les aciers inoxydables sont devenus plus populaires et font partie de la vie de tout le monde et sont aussi de plus en plus utilisés dans toutes sortes d'industries. On les retrouve dans de nombreuses applications telles que les équipements de manutention de matériaux en vrac, l'extérieur des bâtiments et les toitures, les composants automobiles (tuyaux d'échappement, moteur, châssis, fixations, tubes pour conduites de carburant, etc.), les usines de traitement chimique

(échangeurs de chaleur), l'industrie de la fabrication des pâtes et papiers, raffinage du pétrole, tuyauterie d'alimentation en eau, produits de consommation, construction navale et industrie maritime, équipement antipollution, articles de sport (skis à neige) et matériel de transport.

Les avantages de l'acier inoxydable comprennent un nettoyage facile avec un minimum d'entretien, une bonne résistance à la corrosion, une durabilité, une économie, une protection des arômes alimentaires et une conception sanitaire.

Les aciers inoxydables sont constitués de certains des éléments de base de la croûte terrestre, par exemple, minerai de fer, chrome, silicium, nickel, carbone, azote et manganèse. Ces aciers sont classés en cinq types de base en fonction de leur structure métallurgique. Il s'agit d'acier inoxydable martensitique, de durcissement par précipitation, duplex, austénitique et ferritique. Le tableau 1 indique les parts de marché mondiales de ces catégories. Il ressort clairement du tableau (1.2) que les aciers inoxydables austénitiques sont utilisés dans les volumes les plus importants (72 %), comparativement aux aciers inoxydables austénitiques. d'autres grades. Ceci est dû à sa capacité d'être fabriqué par toute la fabrication standard et à sa très grande ductilité [9].

Type d'acier inoxydable	Part de marché
Martensitique	2%
Durcissement par précipitation	1%
Duplex	0.6%
Austénitique	72%
Ferritique	24%

Tableau 1.2. Parts de marché mondiales de type d'acier inoxydable [9].

Mais en matière d'usinage, les aciers inoxydables austénitiques sont généralement considérés comme des aciers plus difficiles à usiner que d'autres nuances en raison de leur nature de la tendance de durcissement élevée, à haut degré de dureté, faible conductivité thermique et ductilité élevée [10]. Quelques problèmes courants associés à ce grade sont une rugosité de surface élevée et une forte usure de l'outil [11]. De nombreux travaux de recherche ont contribué leurs efforts pour surmonter le problème de la mauvaise usinabilité de l'acier inoxydable austénitique.

1.5.2.2. L'usinabilité des aciers inoxydables

Opérateurs des ateliers d'usinage peuvent avoir des points de vue et des opinions divergents au sujet des définitions de l'usinabilité. Certains d'entre eux s'intéressent à la vitesse de coupe à laquelle un matériau est coupé ; d'autres peuvent considérer la durée de vie de l'outil et la surface fini de produit. Mais il vaut la peine de noter que tous les facteurs doivent tenir compte du taux pour définir l'usinabilité d'un métal [12]. L'usinabilité indique le degré de difficulté de l'usinage dans des conditions spécifiées. Les aciers inoxydables austénitiques sont considérés comme les aciers inoxydables les plus difficiles à usiner en raison de leur tendance de durcissement élevées, de leur ductilité et ténacité élevées, de leurs faibles conductivités thermiques. En dehors de cela, d'autres facteurs qui influencent la difficulté d'usinage sont le niveau de dureté, la teneur en carbone et la teneur en nickel. Lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique, plusieurs facteurs doivent être pris en compte, tels que le choix de la géométrie de la plaquette et l'usinage avec des cermets revêtus afin d'éviter la formation d'arêtes rapportées (BUE), la géométrie du brise-copeaux et une vitesse d'avance élevée sont recommandés pour l'élimination des copeaux, et une rigidité adéquate de l'outil doit également être assurée pour surmonter le broutement [13].

1.5.2.3. Quelques problèmes d'usinage observés à partir de résultats expérimentaux

Les problèmes souvent signalés par les utilisateurs concernant l'usinage de l'acier inoxydable austénitique ont fait l'objet de diverses publications. En raison de la gravité de ces problèmes qui conduisent à une faible usinabilité, ces aciers sont classés comme matériaux difficiles à usiner. De plus, de nombreux chercheurs affirment avoir observé certains phénomènes qu'ils ont rencontrés au cours de leur expérimentation et qu'ils considèrent comme des raisons de la faible usinabilité des aciers inoxydables austénitiques.

- La présence de macro-particules sur le revêtement de la surface des outils rend difficile de réaliser des opérations d'usinage avec ces outils [14].
- Une distribution non homogène de l'épaisseur des copeaux est responsable d'un mauvais état de surface [15].
- L'utilisation d'aciers sulfurés pour l'usinage permet d'obtenir une plus grande rugosité de surface. D'autres l'arrête rapportée (BUE) sont également générés [10].
- L'écaillage de l'arête de coupe, la diminution de la vitesse de coupe, l'augmentation de la profondeur de passe et l'augmentation de la vitesse d'avance peuvent causer un mauvais état de surface de pièces usinées. De plus, on constate qu'à des vitesses de coupe plus faibles, la performance de l'outil est très faible [16, 15, 17,18].
- L'augmentation de la taille du grain de l'austénite est responsable de la détérioration de l'usinabilité [18].

- La durée de vie de l'outil est réduite en raison de l'augmentation de la température du matériau lors de l'usinage de barres trempées [18].
- Les variations des différentes nuances d'aciers inoxydables austénitiques (en raison de variations dans leur composition chimique) ont une influence sur leur usinabilité [16].
- Les outils de coupe non revêtus et à revêtement unique provoquent une défaillance de l'outil en raison des forces de coupe élevées et entraînent une faible usinabilité [19].
- Le broutement s'effectue à l'avance de 0,02 mm/tour lors de l'usinage à grande vitesse [20].
- L'usure de l'outil est affectée négativement par liquide de l'azote qui réduit la température de la pièce [10].

1.6. Etat de l'art des travaux existants

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués afin d'étudier l'usinabilité des aciers inoxydables, on peut citer les plus important : M. Kaladhar et al. [21] ont étudié la rugosité de surface durant l'usinage d'un acier inoxydable 304 avec une plaquette de coupe en cermet. Ils ont trouvé que les paramètres optimaux pour obtenir une rugosité minimale sont $V_c=150$ m/min, $f=0.25$ mm/tr, $a_p=2$ mm et $r=0.4$ mm Dans une étude récente, Acayaba et al. [22] ont estimé une rugosité de surface optimale en se basant sur la régression linéaire multiple et un réseau de neurone artificiel (ANN) durant le tournage d'acier inoxydable austénitique AISI 316. Ils ont observé que les valeurs minimales de la rugosité ont été obtenues à une combinaison de la vitesse de coupe de 49.3 m/min, à une l'avance de 0.156 mm/tr, une profondeur de passe de 0.52mm et un rayon de nez de 0.57mm.

Zerti et al [23] a utilisé la méthode Taguchi pour minimiser certains des paramètres technologiques lors du tournage à sec de l'AISI D3. Les effets de l'angle principal de l'arête de coupe, du rayon du bec, de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe sur la rugosité de surface, la force tangentielle, la force de coupe spécifique et la puissance de coupe ont été analysés et les résultats ont montré que l'avance de coupe et le rayon du bec de plaquette sont les paramètres les plus significatifs influençant la rugosité de surface. La profondeur de passe suivie de l'avance a été identifiée comme étant les paramètres prépondérants qui affectent la force tangentielle et la force de coupe spécifique.

Zerti et al. [24] résume que la vitesse d'avance est le paramètre prédominant qui influence la rugosité de la surface. Ainsi, la profondeur de passe a eu un effet considérable sur la force de coupe, la puissance de coupe et le taux d'enlèvement de matière lors de l'étude de l'effet des différents paramètres d'usinage sur certaines caractéristiques de performance de l'acier inoxydable trempé AISI 420.

Dans une autre étude récente, Kaladhar [25] a effectué des tests pratiques sur l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en utilisant cinq outils différents (GC 2025, GC 1025, GC 1025, GC1525, Kc 9229 et TP2500) pour comprendre l'évolution des performances de revêtement dur des outils sur la rugosité de surface, l'usure de dépouille et le taux d'enlèvement de matière.

Korkut et autres [26] ont conduit une étude expérimentale pour déterminer la vitesse de coupe optimale lors de l'usinage d'un acier inoxydable austénitique AISI 304 avec des outils en carbure cémenté. L'influence de la vitesse de coupe sur l'usure des outils et la rugosité de surface a été étudiée. Une diminution de l'usure d'outil avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à 180 m/min a été observée, la rugosité de surface a été également diminuée avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La corrélation a été faite entre usure/rugosité de surface et le copeau obtenus aux trois vitesses de coupe 120, 150, 180 m/min. les auteurs trouvent comme résultat que l'usure en dépouille diminué avec l'augmentation de la vitesse de coupe au-dessus de 180 m/min.

Ciftci [27] a présenté dans une recherche les résultats expérimentaux lors du tournage à sec des aciers inoxydables austénitiques (AISI 304 et AISI 316) à l'aide des outils en carbure cémentés avec un revêtement CVD. Les essais de tournage ont été effectués à quatre vitesses de coupe différentes (120, 150, 180 et 210 m/min) tandis que la vitesse d'avance et la profondeur de passe étaient maintenues constantes à 0.16 mm/tr et à 1 mm, respectivement. Les influences de la vitesse de coupe, l'outil de coupe revêtu et le matériau de la pièce sur la rugosité de surface usinée et les efforts de coupe ont été étudiés. Les parties usées des outils de coupe ont été également examinées sous le microscope à balayage électronique (MEB). Les résultats ont prouvé que la vitesse de coupe a affecté de manière significative les valeurs de rugosité de surface usinées. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les valeurs de la rugosité de surface diminuent jusqu'à atteindre une valeur minimum d'au-delà elles augmentent l'usure des outils affecte les dimensions et la qualité de surface de la pièce et il est également l'un des critères importants dans la détermination de la durée de vie de l'outil. Quand l'outil atteint le critère d'usure admissible, l'arrêt de coupe s'use et ne peut pas être employé plus loin.

Asiltürk et autres [28] ont présenté une nouvelle méthode d'optimisation multi-objective pour déterminer les conditions de coupe optimales et les modèles mathématiques pour la rugosité de surface (R_a et R_z) lors du tournage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 par un outil en carbure revêtu dans des conditions à sec. Les influences de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface sont examinées. Les modèles mathématiques de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe sont obtenus en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). Les résultats indiquent que la vitesse d'avance est le facteur dominant affectant la rugosité de surface, qui est réduite au minimum quand la vitesse d'avance et la profondeur de passe sont placées au niveau le plus bas, alors que la vitesse de coupe est placée au niveau le plus élevé. La méthode de Taguchi et l'analyse statistique de surface de réponse ont indiqué que la vitesse d'avance est un facteur significatif sur la rugosité de surface de la pièce (R_a et R_z) avec une contribution de 85,5%.

R. A. Mahdavejad et S. Saeedy [29] ont fait une recherche sur les paramètres les plus influençant sur l'usinage à sec et lubrifié de l'acier AISI 304 qui sont (vitesse de coupe et l'avance). Ils ont conclu que la vitesse de coupe est le paramètre principal qui influe sur l'usure. D'après les auteurs, l'usure en dépouille diminue quand la vitesse de coupe augmente jusqu'à la vitesse 175 m/min.

M. A. Xavier [30] a évalué l'usinabilité de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en termes de l'état de surface engendrée, l'usure de l'outil et la durée de vie de la plaquette de coupe à différents temps de coupe. Il a constaté que la durée de vie maximale obtenue pendant le tournage de cet acier est de 36.2 min à la vitesse de coupe de 100 m/min pour une usure admissible 0.3 mm.

S. K. Nayak et al [31] ont étudié l'effet de différents facteurs de coupe tels que (V_c , f et a_p) sur le taux de matière enlevé, les efforts de coupe et aussi l'états de surface pour choisir les paramètres optimaux durant le tournage à sec de l'acier AISI 304. Les auteurs ont abouti que la vitesse de coupe

de 45 m/min, l'avance de 0.1 mm/tr et la profondeur de passe égale à 1.25 mm sont les valeurs optimales. En plus des tests de confirmation ont été fait pour valider l'analyse par la méthode de (GRA) et cette dernière donne un coefficient de corrélation de 89 %.

Nithyanandhan et al. [32] ont utilisé l'analyse de la variance et aussi la méthode de Taguchi pour analyser l'influence de (V_c , f et a_p) sur R_a , F et VB durant l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en utilisant un carbure revêtu. Les résultats obtenus montrent que la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un effet significatif sur l'effort axial alors que l'avance et profondeur de passe sont des facteurs qui influent significativement sur l'effort tangentiel. En plus l'avance a un effet moins important sur l'usure de l'outil. Dans un autre travail de recherche Nithyanandhan et al. [33] ont cherché les paramètres de coupe optimaux qui influent sur l'usure de l'outil durant l'usinage du même acier AISI 304 par le même outil de coupe. Les valeurs de paramètres de régime de coupe ($V_c=450$ m/min, $f=0.07$ mm/tr et $a_p=1$ mm) ont été choisi comme configuration optimale.

Wagha et al. [34] ont étudié l'usinabilité de l'acier inoxydable AISI 304 par des outils en carbure revêtu. Ils ont observé que lorsque l'avance augmente, la rugosité de la surface augmente, et cette dernière diminue avec la hausse de la vitesse de coupe. Les auteurs ont souligné aussi qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la température dans l'interface outil-copeau augmente à cause de la conductivité thermique de l'acier AISI 304 qui est très faible. En plus, les outils de coupe à revêtements AlCrN / TiAlN ont donné des efforts de coupe plus faibles en raison de faible coefficient de frottement du revêtement.

Swapnagandha S. Wagh et al. [35] ont focalisé leur étude sur l'évolution des efforts de coupe, la température de coupe et la rugosité de la surface lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable AISI 304. Ils ont remarqué que l'effort de coupe radial augmente avec l'augmentation de l'avance par tour. La température dans l'interface outil-copeau augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et elle est plus élevée en raison de faible conductivité thermique du revêtement AlCrN/TiAlN ainsi que pour l'acier AISI 304. Les auteurs ont signalé que le revêtement TiAlN/AlCrN a une très bonne stabilité thermique donc il résiste bien l'usinage à une température élevée et donne de meilleures performances notamment en cas de tournage sec.

1.7. Conclusion

Ce premier chapitre consacré à l'étude bibliographique, a permis de passer en revue les points clés sur lesquels se sont fondés les travaux de ce mémoire. Une description de base du procédé de tournage, ainsi que les paramètres tels que : V_c , f et a_p intervenants dans ce dit procédé. Après cette description, il a été question de l'outil de coupe. Nous avons parlé de sa géométrie, à travers sa constitution (partie active), ses principaux types matériaux (carbure métallique, céramique, Nitrure de bore cubique (CBN), etc.). Ainsi que le système de plan principaux (P_r , P_s , etc. ...) et des angles caractéristiques de l'outil coupant (γ , α , β) ont été passé en revue.

Par la suite, l'on a eu des connaissances sur les paramètres technologiques tels que : les efforts de coupe, la rugosité de surface, la puissance de coupe, la pression spécifique de coupe et le taux d'enlèvement de matière.

De plus, une attention a été portée à l'usinabilité des aciers inoxydables qui s'avère être délicate en raison de leur faible conductivité thermique et le coefficient de frottement élevée.

Enfin une dernière partie portée sur les travaux de recherches récentes sur l'usinage des aciers inoxydables.

Chapitre : 2

Méthodologie

2.1. Introduction

Dans le domaine de la fabrication et l'usinage des matériaux, l'objectif principal c'est la recherche de la meilleure solution s'appliquant en ingénierie, La méthodologie des plans d'expériences (MPE) est une méthode qui a été initiée dans les années 20 par Sir R.A. Fisher (statisticien anglais - 1925). Les premiers utilisateurs de cette méthode furent les agronomes qui ont vite compris l'intérêt des plans d'expériences. Vers les années soixante, grâce aux travaux de Taguchi, les plans d'expériences sont utilisés au Japon dans l'industrie pour améliorer la variabilité des procédés. Ces expériences consistent en une série d'essais au cours desquels les variables d'entrée ou les facteurs sont intentionnellement modifiés et dont les données sont recueillies à la fin de chaque essai. Le concept de surface de réponse est né de la volonté de représenter les fluctuations d'une grandeur représentative d'un phénomène - appelée réponse - en fonction de variables aléatoires appelées stimuli. En mécanique, la méthode des surfaces de réponse (MSR) vise à proposer des formulations analytiques explicites des réponses d'un système mécanique [36].

2.2. Plans d'expériences

2.2.1. Définition

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [37]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt (réponse) et des variables (facteur).

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [38]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Nous aborderons le cas du plan de Taguchi uniquement.

2.2.2. Notion d'espace expérimentale

Lors d'une expérience, au lieu du terme « variable » on utilisera le mot facteur. La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut qui varie entre -1 et +1. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1. Un facteur est représenté par un axe gradué et orienté comme l'atteste la figure (2.1.).

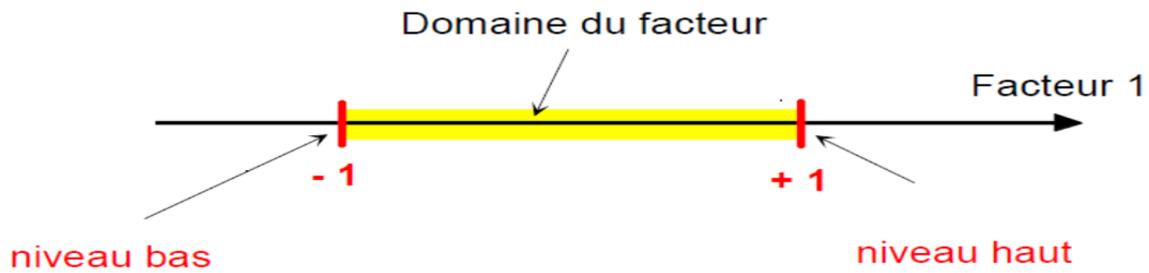


Figure 2.1. Le domaine du facteur.

S'il y'a un second facteur, celui-ci est représenté lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. L'espace créé est nommée l'espace expérimental qui est montré par la figure (2.2)

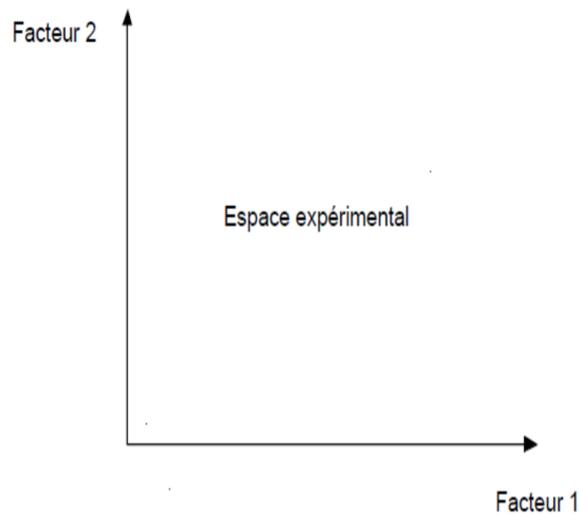


Figure 2.2. L'espace expérimental.

Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude, Figure (2.3).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique du plan d'expérience.

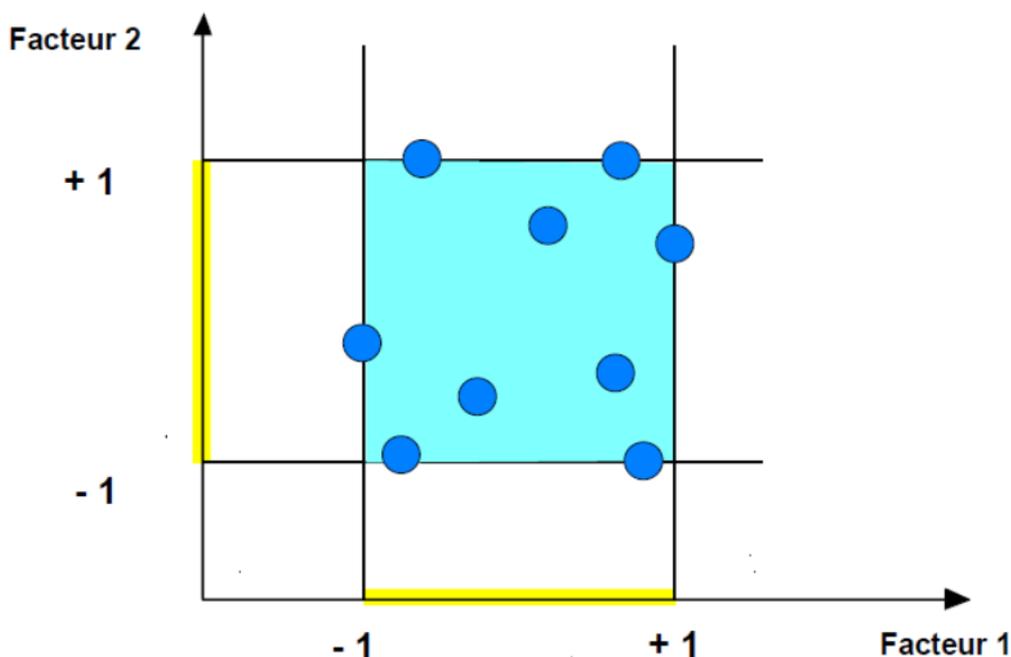


Figure 2.3. Le domaine d'étude.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

2.2.3. Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse Figure (2.4).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en

limitant le nombre d'expériences. Elle vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires.

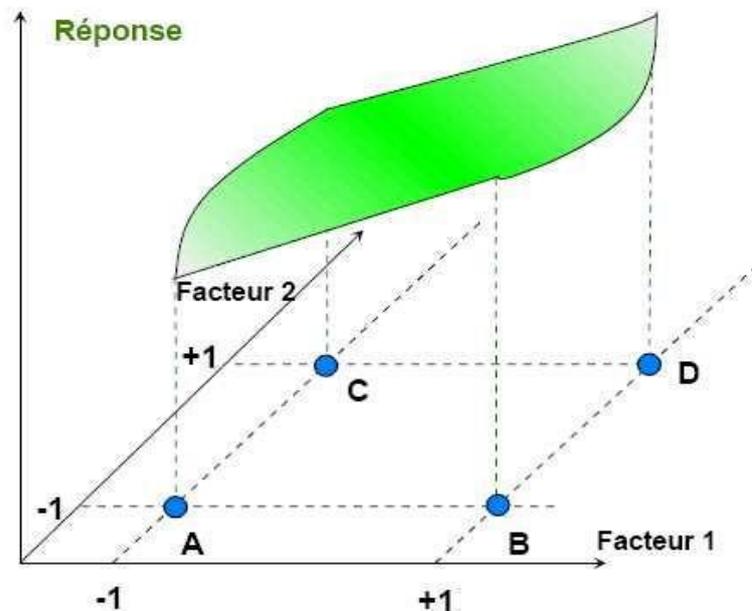


Figure 2.4. La surface de réponses.

2.3. Méthode des Surfaces de Réponse (MSR)

2.3.1. Définition

La Méthode des Surfaces de Réponse (MSR) est une approche de modélisation empirique pour déterminer la relation entre divers paramètres d'entrées du processus et la réponse considérée [39]. Dans cette méthode, Les paramètres d'entrées s'appellent parfois les variables indépendantes, et la mesure d'exécution ou la caractéristique de qualité est la variable dépendante [40]. Ainsi, la première étape dans la MSR est de trouver une approximation appropriée pour le véritable rapport fonctionnel entre les variables dépendantes Y et l'ensemble de variables indépendantes [41].

2.4. Analyse de variance (ANOVA)

La méthode statistique d'ANOVA est utile non seulement pour déterminer l'influence de n'importe quels paramètres qui apporte une contribution à une série de résultats expérimentaux par le plan d'expérience mais aussi pour interpréter des données expérimentales [42]. Le coefficient de détermination R^2 , définie comme le ratio de la variation rapportée à la variation totale, est un critère important pour mesurer le degré d'ajustement [43]. Le modèle de réponse s'adapte mieux aux données réelles, quand la valeur de R^2 s'approche de l'unité.

Cette analyse était effectuée pour des valeurs de la probabilité « P » inférieur à 0.05, ce qui correspond à un niveau de confiance de 95% [44].

- Si P-Value > 0.05, le paramètre est insignifiant.
- Si P-Value < 0.05, le paramètre est significatif.

Pour estimer la contribution de la conception des paramètres et de leurs interactions, la somme des écarts carrés totale (SS_f) est donnée par l'équation

$$SS_f = \frac{N}{Nnf} \sum_{i=1}^{Nnf} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.1)$$

$$\text{Ou } \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.2)$$

i la moyenne des réponses, y_i est la réponse moyenne observée pendant les expériences ou le facteur f prend son i^{eme} niveau de chaque facteur.

Le degré total de liberté (DF) a été compté en tenant compte de l'effet principale des facteurs et de leurs interactions à partir de l'analyse des données qui est exprimée par l'équation :

$$DF = (\text{nombre de niveau} - 1) * (\text{nombre de facteurs}) \quad (2.3)$$

Le carré moyen (MS) est le rapport du facteur épargné SS_f de DOF_i .

Il est mentionné par l'équation :

$$MS_i = \frac{SS_i}{DOF_i} \quad (2.4)$$

L'indice F_i est utilisé avec la base selon laquelle les valeurs F_i calculées seront supérieures à celles acquises par F_i dans le tableau ANOVA.

$$F_i = \frac{MS_i}{MS_e} \quad (2.5)$$

Avec (MS_i) est le carré moyen du modèle de régression et (MS_e) indique les erreurs quadratiques moyennes.

Dans le tableau ANOVA, le pourcentage de contribution est représenté par l'équation suivante :

$$Con(\%) = \frac{SS_f}{SS_t} * 100 \quad (2.6)$$

Le coefficient de détermination (R^2) est un critère important, qui est défini comme le rapport entre la variation expliquée et la variation totale. Ce dernier est une mesure de la qualité de l'ajustement. En outre, plus (R^2) approche l'unité, le modèle de réponse s'adapte mieux aux données réelles.

2.5. Analyse de régression

L'analyse de régression est utilisée pour la modélisation et l'analyse de plusieurs variables, où il y a une relation entre une variable dépendante et un ou plusieurs variables indépendantes. Dans notre

étude les variables dépendantes sont: l'effort de coupe (Fz), critère de rugosité (Ra), la puissance de coupe (Pc), la pression spécifique de coupe (Kc), Taux d'enlèvement de matière (MRR), alors que les variables indépendantes sont la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap).

Pour l'obtenant des modèles prédictifs de : l'effort de coupe (Fz), critère de rugosité (Ra), la puissance de coupe (Pc) et la pression spécifique de coupe (Kc), l'équation de régression linéaire a été utilisée.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.7)$$

$$(\varepsilon_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij}) \quad (2.8)$$

Où : b_0 est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ sont les termes linéaires. X_i représente les paramètres d'entrée (Vc, f, ap), ε_{ij} présente l'erreur d'ajustement pour le modèle de régression. y_{ij} est l'observation correspondante des essais, et \bar{y}_{ij} est la valeur ajustée.

Le coefficient de détermination R^2 qui est critère important, est défini par le rapport de la dispersion des résultats donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum(\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2.9)$$

Avec :

y_i : Valeur de la réponse calculée à la i^{eme} expérience.

\bar{y}_i : Valeur mesurée à la i^{eme} expérience.

\bar{y} : Valeur moyenne des réponses mesurées.

2.6. Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi est une technique puissante et efficace de plan d'expérience, elle peut améliorer l'exécution de processus avec un nombre minimum d'expériences [45]. De plus, elle réduit le coût de fabrication et le temps de cycle dans le processus de fabrication. Comparer aux plans d'expérience traditionnelles, la méthode de Taguchi se sert d'un plan spécial de table orthogonale (TO). Les résultats expérimentaux basés sur (TO) sont alors transformés en rapports de signal sur bruit pour évaluer les caractéristiques de fonctionnement. Par conséquent, La méthode de Taguchi se concentre sur les effets des variations sur des caractéristiques de qualité, plutôt que sur les moyennes. Cela est, la méthode de Taguchi fait l'exécution de processus peu sensible aux variations des facteurs de bruit incontrôlables [45]. Dans notre travail, l'étude a été réalisée à partir d'une table orthogonale (L9) de Taguchi pour quantifier l'influence des trois paramètres retenus (Vc, f et ap).

2.6.1. Définition

La méthode Taguchi, inventée par Genichi Taguchi (né au Japon le 1er Janvier 1924), est une méthode statistique pour réaliser des plans d'expériences appliquée dans l'industrie, cette méthode se concentre avant tout à minimiser les variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible. Cette méthode pragmatique a pu rendre les plans d'expériences accessibles pour des techniciens. La méthode Taguchi est une stratégie expérimentale dans lequel Taguchi a créé un certain nombre de tableaux orthogonaux spéciaux, l'idée principale est de se concentrer uniquement sur certaines expériences essentielles à l'analyse. Il a présenté l'utilisation du rapport signal sur bruit (S/N) pour mesurer la qualité des résultats. Le rapport (S/N) est défini comme le signal désiré par rapport à la valeur de bruit aléatoire indésirable aux caractéristiques de la qualité des données expérimentales.

2.6.2. Analyse de rapport signal/bruit (S/B)

Taguchi à employer le rapport S/B comme caractéristique de qualité de choix pour analyser les données [46,47] Dans ce rapport, il y a trois catégories de caractéristique de qualité.

1. Préférer plus grand.

$$\frac{S}{B} = -10 * \text{Log} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (2.10)$$

2. Préférer nominal.

$$\frac{S}{B} = -10 * \text{Log} (\sigma^2) \quad (2.11)$$

3. Préférer plus petit.

$$\frac{S}{B} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.12)$$

y_i : sont les résultats observés dans les expériences

n : est le nombre d'essais.

Dans notre cas, : l'effort de coupe (Fz), critère de rugosité (Ra), la puissance de coupe (Pc), la pression spécifique de coupe (Kc) doit être minimales, nous avons choisi la catégorie "préférer plus petit"(Eq. 2.12) d'une part. d'autre part, le taux d'enlèvement de matière doit être maximale, nous avons choisi la catégorie "préférer plus grand" (Eq. 2.10). Le rapport S/N en décibel.

2.6.3. Etapes de la méthode de Taguchi

L'utilisation de la méthode Taguchi pour optimiser un processus de coupe comprend les étapes suivantes :



Figure 2.5. les étapes de l'utilisation de la méthode de Taguchi.

1. Identifier les caractéristiques de performance et sélectionner les paramètres du processus à évaluer.
2. Déterminer le nombre de niveaux pour les paramètres du processus et les interactions possibles entre les paramètres du processus.
3. Sélectionnez le tableau orthogonal approprié et complétez les paramètres de cette table.
4. Effectuez les expériences en fonction de l'ordre du tableau orthogonal.
5. Calculer le rapport S/N.
6. Analyser les résultats expérimentaux en utilisant le rapport S/N et l'ANOVA.
7. Sélectionnez les niveaux optimaux de paramètres de processus.
8. Vérifiez les paramètres de processus optimaux grâce à l'expérience de confirmation.

Plan de Taguchi L9

N° ESSAI	Valeur codés		
	$V_c, (m/min)$	$f, (mm/tr)$	$ap, (mm)$
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Tableau 2.1. Matrice de planification pour un plan de Taguchi L9**2.7. Méthode d'Analyse Relationnelle Grise (Grey method)**

Dans le cas d'un problème à réponses multiples, l'influence et la relation entre les différents paramètres sont complexes et ce n'est pas clair. Ceci est appelé gris, ce qui signifie que l'information est pauvre et incertaine. Cette méthodologie proposée (analyse relationnelle grise) analyse cette incertitude complexe parmi les multi-réponses dans un système donné et l'optimiser à l'aide d'un grade relationnel gris. Par conséquent, une réponse multiple est réduit à un seul problème d'optimisation de réponse appelé grade relationnelle unique.

Les étapes Suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) basé sur la méthode de Taguchi.

2.7.1. Étape 1 : la normalisation

Les données expérimentales doivent d'abord être normalisées parce qu'on évite d'utiliser des unités différentes et qu'on réduit la variabilité. Il s'agit essentiellement nécessaire puisque la variation d'une donnée diffère d'une donnée à l'autre. Une valeur appropriée est dérivée à partir de la valeur originale pour obtenir un tableau compris entre 0 et 1 [48]. En général, il s'agit d'un de convertir les données originales en données comparables. Si la réponse doit être minimisée, alors les caractéristiques préférer plus petites sont destinées à être normalisées pour être mises à l'échelle dans une plage acceptable en la formule suivante :

Préférer plus petite (*The-smaller-the-better*)

$$x_i^*(K) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (2.13)$$

Si la réponse doit être maximisée, alors les caractéristiques préférer plus grands sont destinées à être normalisées pour être mises à l'échelle dans une plage acceptable en la formule suivante :

Préférer plus grands (*The-larger-the better*)

$$x_i^*(K) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (2.14)$$

Où :

$i = 1, \dots, m$; $k = 1, \dots, n$; m est le nombre de données expérimentales et n est le nombre de réponses.

$x_i^0(k)$ désigne la séquence originale, $x_i^*(K)$ désigne la séquence après le prétraitement des données, $\max x_i^0(k)$ représente la plus grande valeur de $x_i^0(k)$, $\min x_i^0(k)$ représente la plus petite valeur de $x_i^0(k)$, et x est la valeur souhaitée [49].

2.7.2. Étape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational) $\xi_i(K)$ peuvent être calculés à partir des valeurs normalisées de la manière suivante:

$$\xi_i(K) = \frac{\Delta_{min} + \Psi \Delta_{max}}{\Delta_{oi} + \Psi \Delta_{max}} \quad (2.15)$$

où, Δ_{oi} est la séquence de déviation de la séquence de référence et la séquence de comparabilité et

$$\Delta_{oi}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (2.16)$$

Où $x_i^0(k)$ implique la séquence de référence et $x_i^*(K)$ appelée séquence de comparabilité. Δ_{min} et Δ_{max} sont les valeurs minimales et maximales des différences absolues (Δ_{oi}) de toutes les séquences de comparaison. La valeur de Ψ est le coefficient de distinction ou d'identification et la plage est comprise entre 0 et 1 [50].

2.7.3. Étape 3 : Calcul du GRG (Grey relational grade)

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du relationnel gris (Grey Relational Coefficients), les Grey Relational Grade peuvent être obtenu comme suit :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} + \sum_{k=1}^n \xi_i(K) \quad (2.17)$$

Où :

α_i est le degré de relation gris requis pour la i ème expérience ; n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas $n=5$).

La plus grande valeur de (Grey Relational Grade) est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale $x_i^0(k)$ et la séquence donnée $x_i^*(K)$. La séquence idéale ($x_i^*(K)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale [51,52].

2.7.4. Étape 4 : Choix le niveau optimal des paramètres de coupe

Ensuite, un niveau optimal de paramètres de processus est déterminé à l'aide d'un degré de gris relationnel plus élevé qui indique la meilleure qualité du produit. Pour ce faire, les valeurs moyennes des notes pour chaque niveau de procédé sont les suivantes est de trouver quel paramètre peut être affiché sous forme de tableau de réponse moyenne. D'après le tableau des réponses moyennes, des valeurs plus élevées des valeurs moyennes des notes sont choisies comme combinaison paramétrique optimale pour les multi-réponses.

2.7.5. Étape 5 : ANOVA pour GRG

Après avoir découvert la combinaison optimale, l'étape suivante consiste à effectuer l'analyse de variance (ANOVA) pour juger les paramètres significatifs affectant les multi-réponses à un niveau de confiance de 95% et donc donner des informations importantes sur les données expérimentales. Comme l'effet de chaque paramètre sur la multi-réponse ne peut être évaluée par la méthode de Taguchi, l'analyse ANOVA sera donc utile pour découvrir le pourcentage de contribution pour identifier les effets.

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthodologie des plans d'expériences qui à l'objectif de minimiser le nombre d'essais. Une attention particulière portée sur deux méthodes d'optimisation mono et multi objectif.

Chapitre : 3

Procédure expérimentale

3.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de faire une étude expérimentale de certaines conditions de coupe lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable AISI 304L avec un outil de coupe en carbure revêtu multi couches. Ces conditions de coupe sont la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap).

3.2. Matériels utilisés

Les essais de tournage ont été réalisés au niveau de laboratoire Mécanique de structure (LMS) sous la direction de l'équipe coupe de métaux au sein de l'université de Guelma 08 mai 1945. Le procédé de tournage étudié fut le chariotage. Lors ces essais, le montage mixte a été utilisé afin d'éviter une flexion de la pièce usinée. Aussi, aucun lubrifiant n'a été utilisé durant tous les essais.

3.2.1. Machine utilisée

Les essais de tournage ont été exécutés sur une tour conventionnelle. C'est un tour parallèle fabriqué par la société tchèque « TOS TRENCIN », modèle SN40C, La puissance sur la broche égale à 6.6 KW figure (3.1). Les fréquences de rotation disponibles sur le tour entrent (22.5 à 2000) tr/min . Les avances disponibles pour ce tour (0.08 à 0.8) mm/tr .



Figure 3.1. Toure conventionnelle.

3.2.2. La pièce usinée

La matière usinée est l'acier inoxydable AISI 304L et se présente sous la forme de cylindre de diamètre 70 mm et de longueur 600 mm, figure (3.2). Concernant les aciers inoxydables, différentes recherches ont été effectuées dans le but d'étudier leurs usinabilités. Afin d'examiner cette dernière, nous avons en effet préféré l'acier 304L.



Figure 3.2. La pièce usinée.

Le 304L, c'est une nuance d'inox utilisée principalement dans les industries chimiques et pétrochimique, marine, hôpitaux, équipements pour la restauration. Le tableau 3.1 suivant montre leur composition chimique.

Elément	Composition chimique	Dimension de l'éprouvette	RM MPa	RP	RP	Z%	A %	A%	Dureté HB
				0,2%	1%		L=5Ø	L=4Ø	
C	0,0180	EN ISO 377	630	267	307	71	56	58	162
P	0,0320								
S	0,0270								
SI	0,3540								
MN	1,4850								
CR	18,2200								
NI	8,0500								
MO	0,2760								
TI	0,0040								
N	0,0920								
CU	0,3250								

Tableau 3.1. Composants chimique et physique de l'acier inoxydable 304 L.

3.2.3. Porte outil

Le porte outil utilisé de marque SANDVIK COROMANT et de référence PSBNR2525 M12.

Il est présenté sur la figure (3.3). Durant tous les essais de tournage le même porte outil a été utilisé afin de recherche de condition de coupe stable.



Figure 3.3. Le porte outil.

3.2.4. Outil de coupe

La plaquette de coupe utilisés est de marque SANDVIK et de référence ISO SNMG 12 04 08-MF (1125). Figure (3.4)

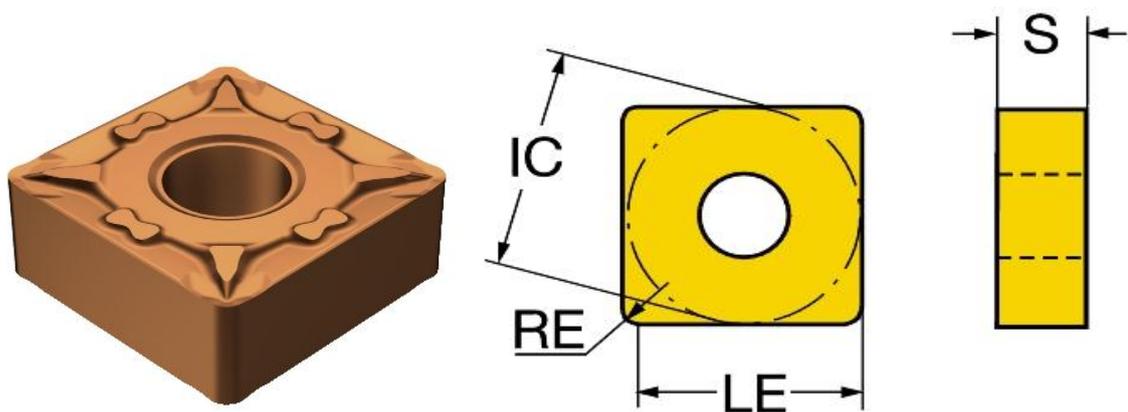


Figure 3.4. Géométrie de la plaquette de coupe carbure revêtu ($S=4,763$ mm $LE=11,9$ mm $IC=12,7$ mm $RE=0,794$ mm) [53].

3.3. Dispositif de Montage

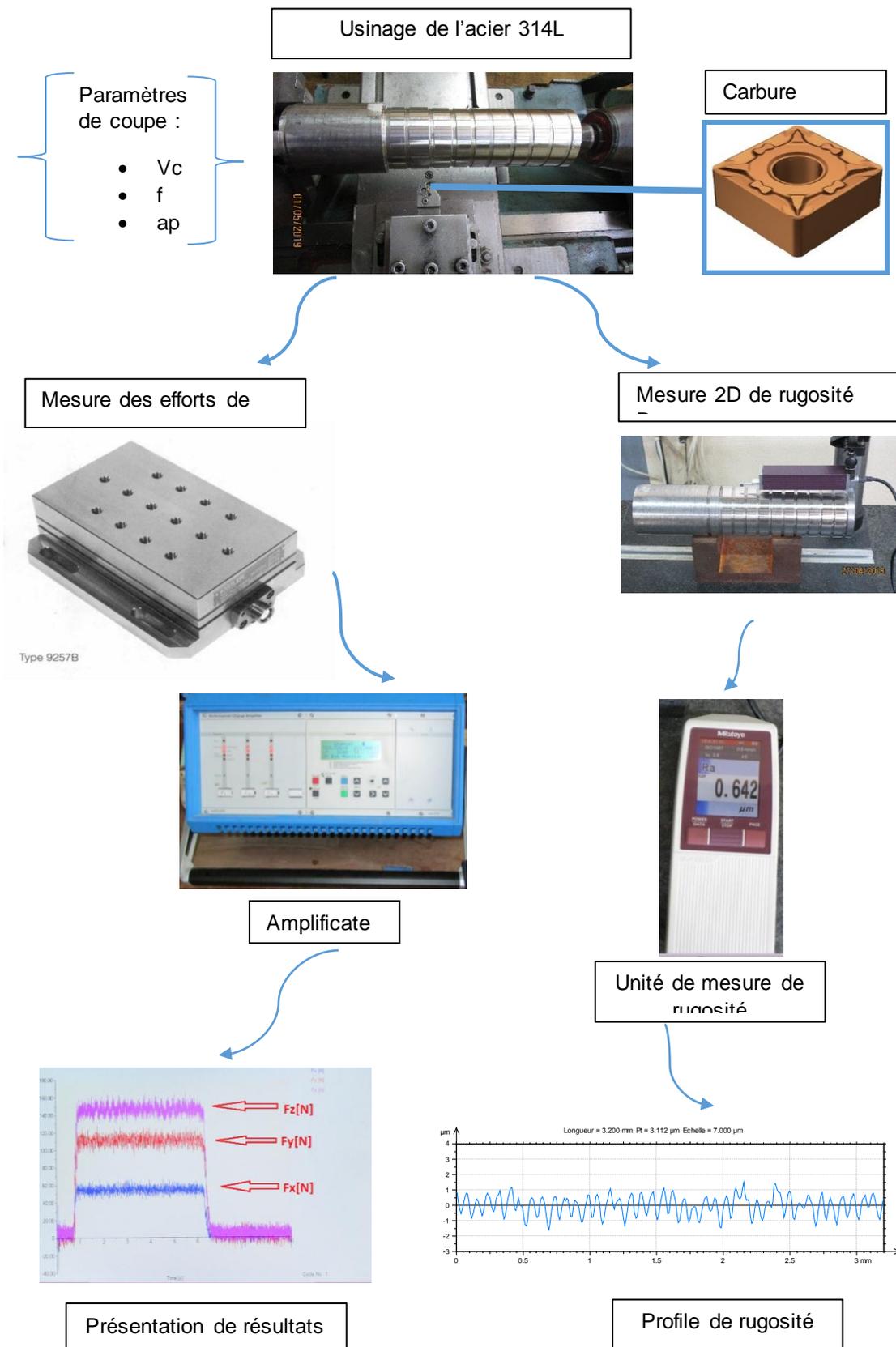


Figure 3.5. Chaîne de mesure des efforts de coupe et la rugosité de surface.

Le dispositif de montage correspondant les essais de tournage a été réalisés sur un Tour, figure (3.6).

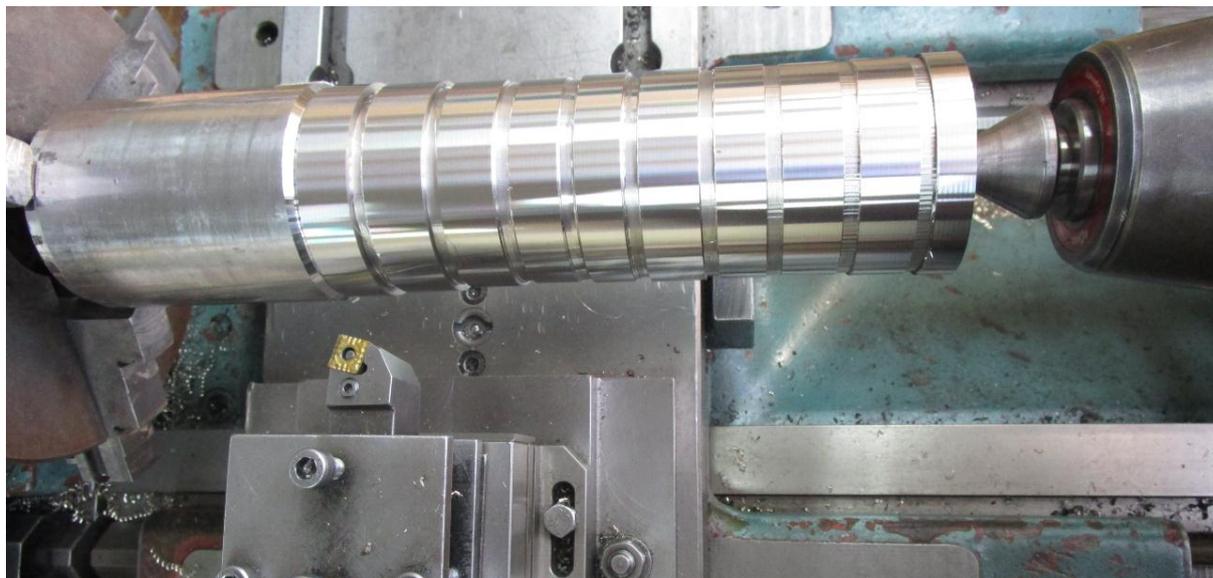


Figure 3.6. Dispositif de montage.

3.4. Les moyens de mesures

3.4.1. Rugosimètre

Un rugosimètre SurfTest 210 Mitutoyo a été utilisé pour mesure la rugosité (R_a), la figure (3.7) présente ci-dessous

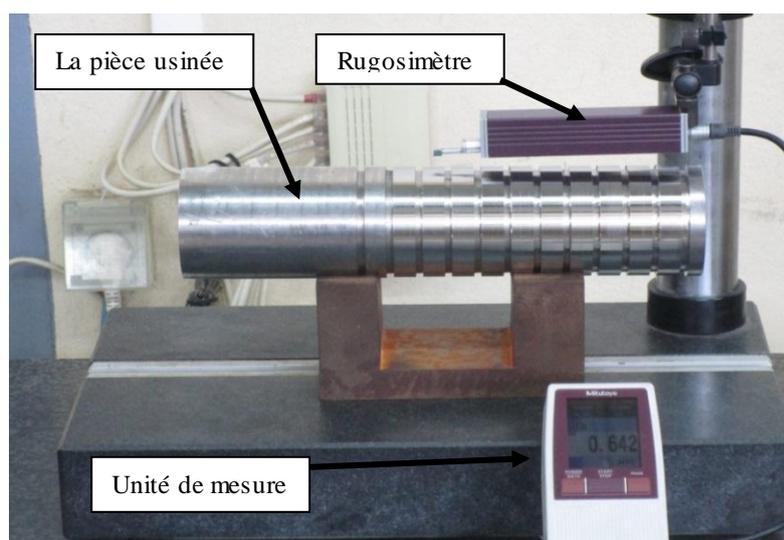


Figure 3.7. Rugosimètre.

3.4.2. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257 B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois Composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite : la Plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel, figure (3.8).

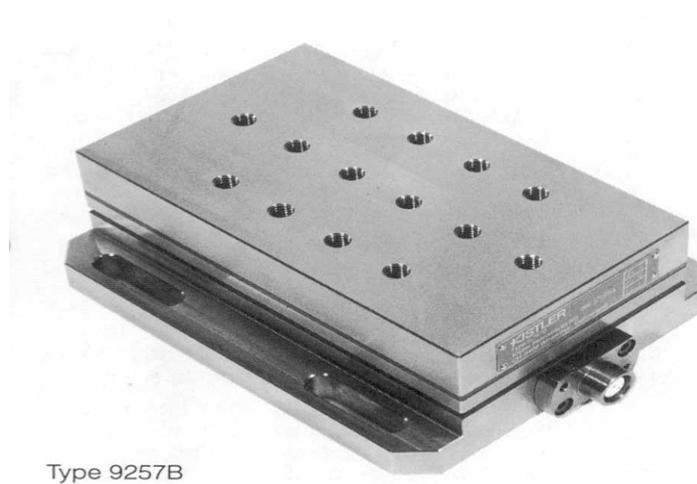


Figure 3.8. Dynamomètre *KISTLER*9257 B.

3.5. Principe de mesure

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide d'une plaque de fixation. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure [54].

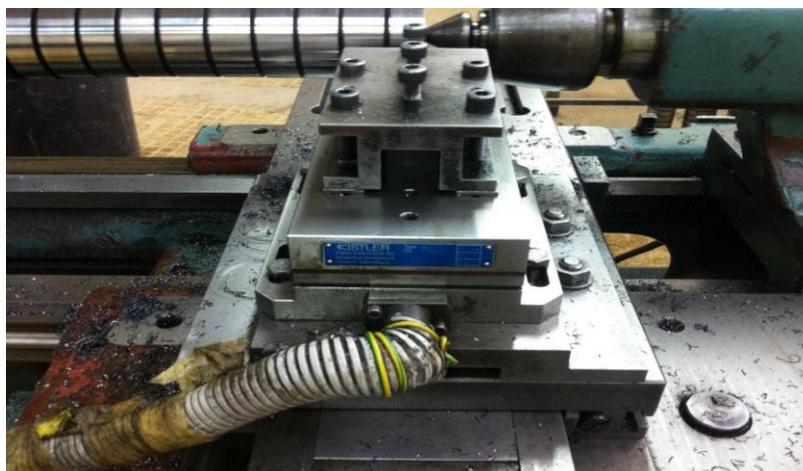


Figure 3.9. Plateforme d'effort de coupe (*KISTLER*).

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La figure (3.10) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (Force axiale : F_x , Force radiale : F_y et Force tangentielle : F_z).

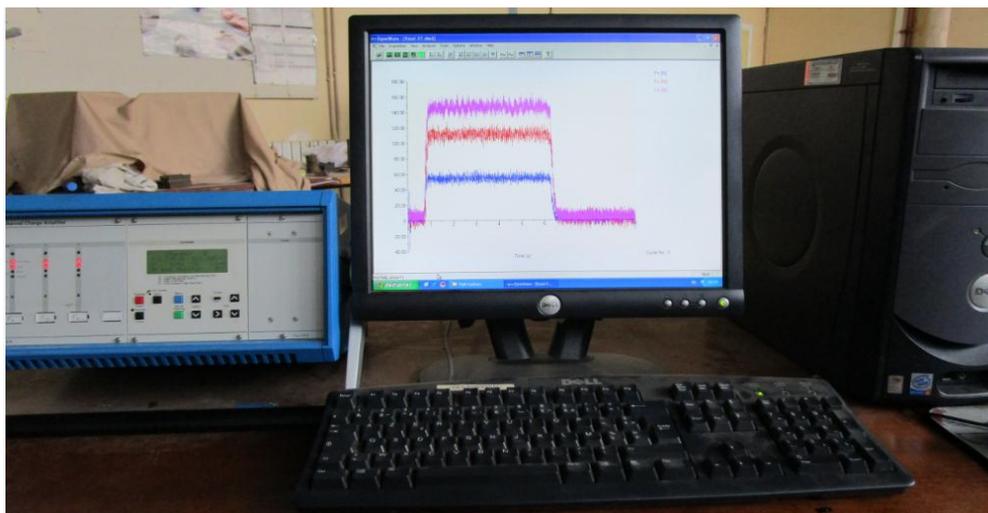


Figure 3.10. Acquisition de résultats l'effort tangentiel F_z .

3.6. Planification de plans des expériences

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe. Parmi ces derniers on peut citer : les éléments du régime de coupe (V_c, f, ap), la géométrie de la partie active de l'outil ($r, \alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$, etc...), ainsi que les conditions de coupe (rigidité de la machine, lubrification). On peut dire que tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre les efforts de coupe, la rugosité, la puissance de coupe, l'effort spécifique et taux d'enlèvement de matière représentent les paramètres de sortie. Il est sûr qu'en ce qui concerne notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution de paramètres suivants :

- L'effort de coupe en fonction des paramètres (V_c, f, ap).
- La rugosité en fonction des paramètres (V_c, f, ap).
- La puissance de coupe en fonction des paramètres (V_c, f, ap).
- La pression spécifique de coup en fonction des paramètres (V_c, f, ap).
- Taux d'enlèvement de matière en fonction des paramètres (V_c, f, ap).

Dans cette section, les essais sont effectués suivant un plan d'expérience Taguchi (L 9). La technique de la méthodologie surface réponse (RSM) et l'analyse de la variance ANOVA sont utilisées pour développer des modèles mathématiques. Cette analyse détermine le pourcentage de contribution des facteurs, des interactions et les termes carrés sur les paramètres étudiés.

Dans la présente étude, trois facteurs tels que, une vitesse de coupe, l'avance, et une profondeur de passe et de l'interaction entre les paramètres de coupe son compte en considérations.

Le tableau (3.2) montré les paramètres de coupes et leurs niveaux.

Paramètre de coupe	Unité	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Vitesse de coupe « V_c »	m/min	125	170	245
L'avance « f »	mm/tr	0,08	0,12	0,16
Profondeur de passe « ap »	mm	0,1	0,2	0,3

Tableau 3.2. Paramètres de coupe et leurs niveaux.

Les valeurs des vitesses de rotation de la broche (N) sont calculées par rapport aux valeurs de vitesse de coupe (V_c) associées à l'usinage de l'acier inox 304L avec plaquette de coupe (GC 1125) selon le catalogue Sandvik :

$$N_1 = \frac{1000 * V_c}{\pi * D} \Rightarrow N_1 = \frac{1000 * 125}{3,14 * 78} \Rightarrow \approx N_1 = 500 \text{ tr /min} \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow N_2 = \frac{1000 * 170}{3,14 * 78} \Rightarrow N_2 = 710 \text{ tr /min} \quad (3.2)$$

$$\Rightarrow N_3 = \frac{1000 * 245}{3,14 * 78} \Rightarrow N_3 = 1000 \text{ tr /min} \quad (3.3)$$

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les caractéristiques des matériaux de coup, la composition chimique du matériau usiné, la planification des expériences a été désignées.

Chapitre : 4

Résultats et interprétation

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu, l'effort de coupe (F_z), le critère de rugosité (R_a), la puissance de coupe (P_c), la pression spécifique de coupe (k_c) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) selon la méthode de mono-objective Taguchi, et en second lieu l'optimisation avec la multi-objective d'Analyse Relationnelle Grise (GRA) lors du tournage de l'acier AISI 304L avec un outil de coupe en carbure revêtu multi couches

4.2. Analyses des résultats expérimentaux

Le tableau (4.1) représente les valeurs expérimentales de réponses.

Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	Pc (W)	Kc (N/mm^2)	MRR (cm^3/min)
125	0,08	0,1	0,78	34,9	72,71	4362,50	1
125	0,12	0,2	0,53	67,8	141,25	2825,00	3
125	0,16	0,3	1,61	139,37	290,35	2903,54	6
170	0,08	0,2	0,31	51,47	145,83	3216,88	2,72
170	0,12	0,3	1,12	107,29	303,99	2980,28	6,12
170	0,16	0,1	1,62	52,2	147,90	3262,50	2,72
245	0,08	0,3	0,73	75,71	309,15	3154,58	5,88
245	0,12	0,1	0,78	39,5	161,29	3291,67	2,94
245	0,16	0,2	1,01	81,48	332,71	2546,25	7,84

Tableau 4.1. Résultats expérimentaux.

4.2.1. Analyse de variance ANOVA

4.2.1.1. ANOVA pour F_z

Les pourcentages de contributions des facteurs V_c , f et ap sur l'effort de coupe ont été trouvés à 3,45%, 22,43% et 69,80%. Cela a montré que le facteur le plus influant sur l'effort tangentiel de coupe F_z est la profondeur de passe 69,80% suivi par la vitesse de coupe 22,43% suivi l'avance par tour 3,45%

Source	DL	SC	SM	Valeur F	Contribution
Modèle	3	8755,8	8755,8	36,9	95,68%
Vc (m/min)	1	315,7	315,7	3,99	3,45%
f (mm/tr)	1	2052,4	2052,4	25,95	22,43%
ap (mm)	1	6387,6	6387,6	80,77	69,80%
Erreur	5	395,4	395,4		4,32%
Total	8	9151,2			100,00%

Tableau 4.2 ANOVA pour Fz .

4.2.1.2. ANOVA pour Ra

Selon le tableau (4.3), les pourcentages de contributions des facteurs Vc , f et ap sur la rugosité de surface Ra ont été trouvés respectivement 2,17%, 60,60% et 0,87%. Le facteur le plus Influent affectant Ra est l'avance par tour 60,60 %. La vitesse d'avance et la profondeur de passe ont une influence négligeable sur Ra avec 2,17% et 0,87%, respectivement.

Source	DL	SC	SM	Valeur F	Contribution
Modèle	3	1,01939	1,01939	2,92	63,64%
Vc (m/min)	1	0,03478	0,03478	0,3	2,17%
f (mm/tr)	1	0,9707	0,9707	8,33	60,60%
ap (mm)	1	0,01392	0,01392	0,12	0,87%
Erreur	5	0,5825	0,5825		36,36%
Total	8	1,60189			100,00%

Tableau 4.3 ANOVA pour Ra .

4.2.1.3. ANOVA pour Pc

Les pourcentages de contributions des facteurs Vc , f et ap sur la puissance de coupe pour Pc ont été trouvés à 20,93%, 13,32% et 61,21%. Cela a montré que le facteur le plus Influent sur la puissance de coupe est la profondeur de passe 61,21 % Suivi par la vitesse de coupe 20,93% suivi l'avance par tour 13,32%

Source	DL	SC	SM	Valeur F	Contribution
Modèle	3	70712	70712	35,04	95,46%
Vc (m/min)	1	15505	15505	23,05	20,93%
f (mm/tr)	1	9864	9864	14,66	13,32%
ap (mm)	1	45343	45343	67,41	61,21%
Erreur	5	3363	3363		4,54%
Total	8	74075			100,00%

Tableau 4.4. ANOVA pour Pc.

4.2.1.4. ANOVA pour Kc

Les pourcentages de contributions des facteurs Vc , f et ap sur la puissance de coupe pourront être trouvés à 9,31% 33,02% et 28,50%. Cela a montré que le facteur le plus influant sur l'effort spécifique Kc est l'avance par tour 33,02% suivi par la profondeur de passe 28,50% suivi la vitesse de coupe 9,31%.

Source	DL	SC	SM	Valeur F	Contribution
Modèle	3	1461317	1461317	4,05	70,84%
Vc (m/min)	1	192149	192149	1,6	9,31%
f (mm/tr)	1	681189	681189	5,66	33,02%
ap (mm)	1	587979	587979	4,89	28,50%
Erreur	5	601597	601597		29,16%
Total	8	2062915			100,00%

Tableau 4.5. ANOVA pour Kc.

4.2.1.5. Modèle mathématique de régression

Analyse de régression l'effort de coupe (Fz), la rugosité de surface (Ra), la puissance de coupe (Pc), la pression spécifique de coupe (Kc) en fonction de Vc , f , et ap . La modélisation par la régression linéaire Eq (2.7) de la rugosité de surface et l'effort de coupe montre l'influence des paramètres de coupe (Vc , f et ap) sur ces dernières

Les équations empiriques de (Ra), (Fz), (Pc), (Kc) obtenues :

$$Ra = -0.134 - 0.00126 * Vc + 10.06 * f + 0.48 * ap \quad (4.1)$$

$$Fz = -27.0 - 0.1197 * Vc + 462.4 * f + 326.3 * ap \quad (4.2)$$

$$Pc = -234.8 + 0.839 * Vc + 1014 * f + 869 * ap \quad (4.3)$$

$$Kc = 5340 - 2.95 * Vc - 8424 * f - 3130 * ap \quad (4.4)$$

Les valeurs de coefficients de détermination R^2 pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort de coupe (Fz) et la puissance de coupe (Pc) et l'effort spécifique (Kc) sont $R^2 = 63\%$, $R^2 = 95\%$, $R^2 = 95\%$, $R^2 = 70\%$ respectivement.

4.2.1.6. Comparaison

La comparaison entre les valeurs prévues et mesurées est montrée sur la figure (4.1). On le trouve dans ces figures que les divergences entre les valeurs expérimentales et prévues sont très petites. Cette comparaison confirme que les modèles de second ordre proposés conviennent pour représenter le domaine expérimental.

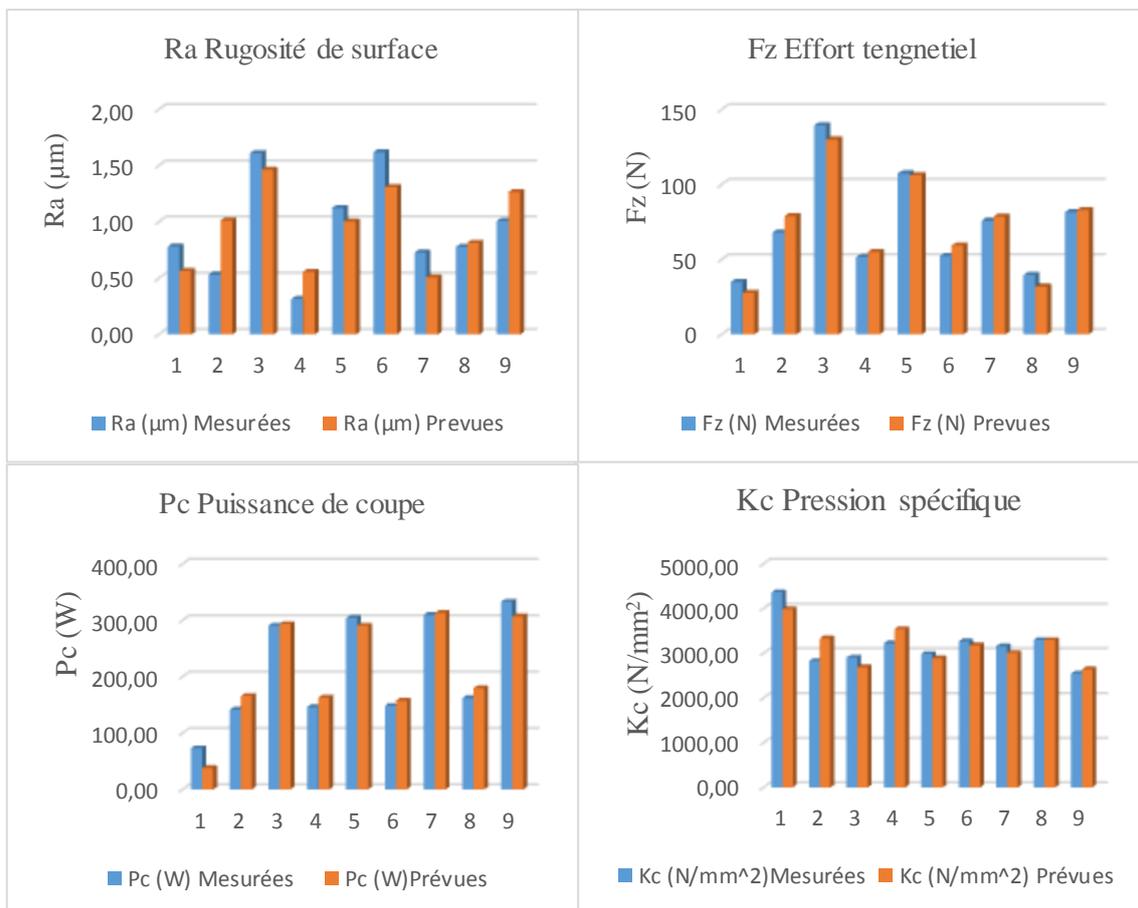


Figure 4.1. Comparaison entre les valeurs mesurées et prévues de Ra, Fz, Pc et Kc .

4.2.2. Effet des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques

4.2.2.1. Effet des paramètres de coupe sur Ra

La figure (4.2) montre l'effet des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) sur R_a , on observe que les valeurs de R_a augmente considérablement où l'avance augmente de 0.08 à 0.12 mm/tr avec le pourcentage de 80 %. En conséquence, cette augmentation du R_a peut être interprétée par la génération des cannelures hélicoïdales rapportées par le mouvement relatif entre la pièce et l'outil. Ces cannelures seront plus profondes et plus larges, dès que l'avance assume des valeurs plus élevées [55,56].

De plus, il est important de mentionner que le R_a augmente à un maximum d'environ 44% avec une augmentation de l'avance de 0,12 à 0,16 mm/tour. Ceci qu'il provoque une longue zone de contact de la plaquette sur la face frontale de l'outil. Par conséquent, l'augmentation de la surface de contact de la plaquette par rapport à l'augmentation de la vitesse d'avance génère une température plus élevée et augmente la contrainte de cisaillement [57,58]. Dans la zone de coupe, l'augmentation de la température et l'excès de contrainte de cisaillement augmentent la déformation plastique du matériau, ce qui entraîne une augmentation du volume de copeaux enlevés [58].

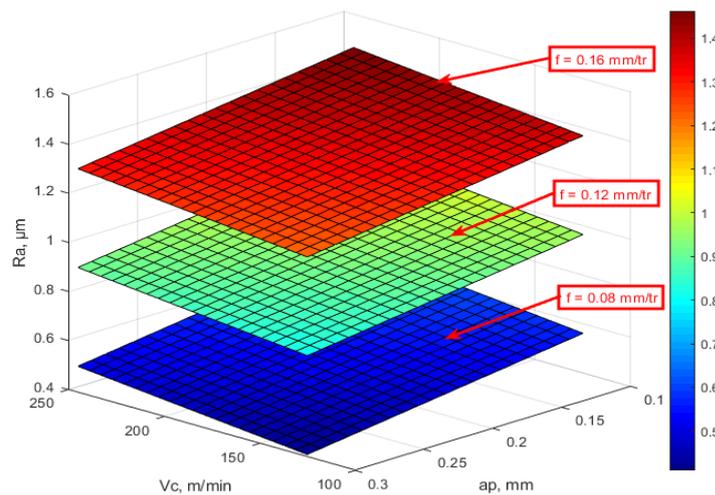


Figure 4.2. Influence des paramètres de coupe sur R_a .

4.2.2.2. Effet des paramètres de coupe sur F_z

La figure (4.3) montre l'effet des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) sur F_z on observe que les valeurs de F_z augmente considérablement où la profondeur de passe augmente de 0.1 à 0.2 mm avec le pourcentage de 50 %. De plus, il est important de mentionner que le F_z augmente à un maximum d'environ 66% avec une augmentation de la profondeur de passe de 0,2 à 0,3 mm. On remarque que F_z augmente rapidement avec l'augmentation de la profondeur de passe (a_p). Cependant la vitesse de coupe et l'avance par tour ont une faible influence. La variation de la profondeur de passe conduit à une croissance de l'effort tangentiel. On constate alors que l'effort tangentiel (F_z) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe, car la zone de l'interface outil/copeau augmente ce qui ramène à l'augmentation de la composante de l'effort de coupe tangentiel (F_z). Il convient de noter

que les valeurs minimales de l'effort de coupe tangentiel sont obtenus aux valeurs faibles de la combinaison de trois paramètres de coupe (V_c , f et a_p).

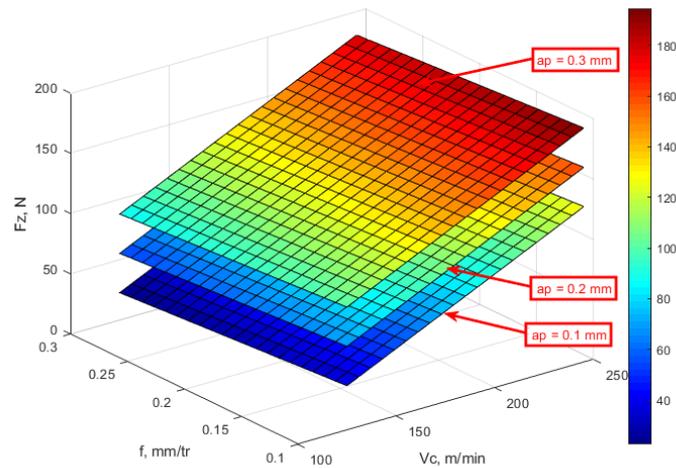


Figure 4.3. Influence des paramètres de coupe sur F_z .

4.2.2.3. Effet des paramètres de coupe sur P_c

Comme présenté dans le tableau ANOVA (4.3), la puissance de coupe (P_c) est fortement influencée par la profondeur de passe (a_p), la vitesse de coupe (V_c) et l'avance par tour (f). L'effet de la profondeur de passe sur P_c est illustré à la figure (4.4) révèle que, P_c est le plus bas à faible valeur de a_p , V_c et f . Ensuite, le P_c augmente lorsque la profondeur de coupe passe de 0,1 à 0,3 mm avec 85 % en raison d'une augmentation de l'épaisseur de copeaux non-déformés, ce qui entraîne une augmentation de la force tangentielle en raison de l'augmentation des valeurs de a_p , V_c et f .

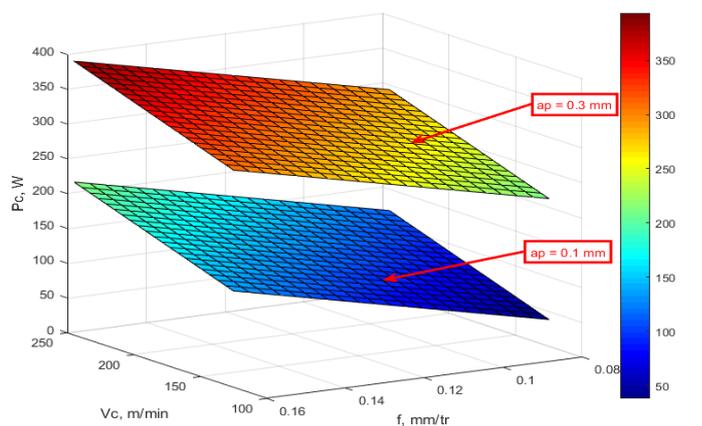


Figure 4.4. Influence des paramètres de coupe sur P_c .

4.2.2.4. Effet des paramètres de coupe sur K_c

La variation de la force de coupe spécifique (K_c) avec (V_c et f) pour deux valeurs de (a_p) est indiquée dans la figure (4.5). On observe que le K_c a des valeurs très élevées à de faible valeur de la profondeur de passe ($a_p = 0.1$ mm) avec 18 % par rapport ($a_p = 0.3$ mm). Cette diminue de manière significative avec l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) et l'avance (f), convient dans l'usinage parce qu'il nous permet d'éviter la fissuration des outils.

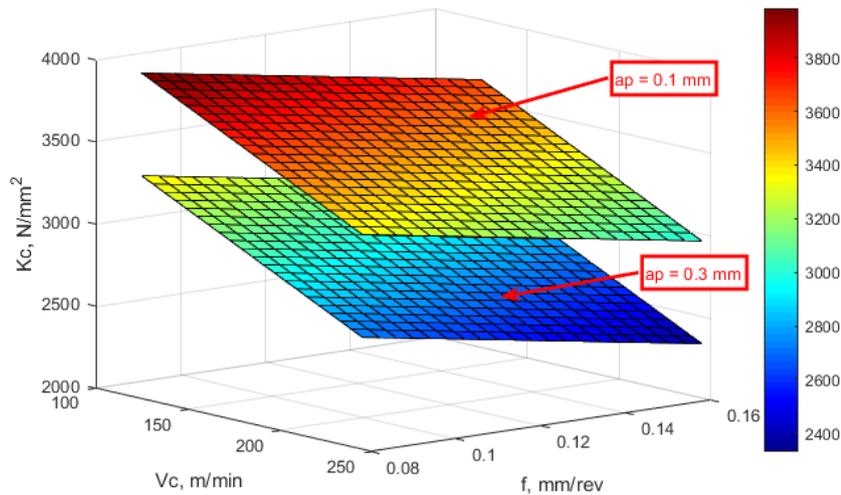


Figure 4.5. Influence des paramètres de coupe sur K_c .

4.2.2.5. Effet des paramètres de coupe sur MRR

La figure (4.6) illustre l'impact de la profondeur de coupe, de l'avance et de la vitesse de coupe sur le MRR . Cette figure montre que le MRR est faible à une faible valeur de la profondeur de passe. Ensuite, le MRR augmente à mesure que la profondeur de passe augmente de 0,1 à 0,3 mm avec 200 % en raison de la pénétration plus profonde de l'outil dans la pièce induite l'augmentation de la section des copeaux, ce qui entraîne une augmentation du volume des copeaux enlevés.

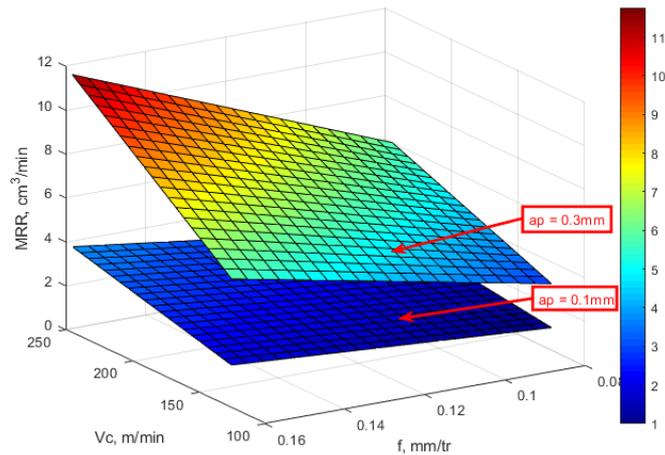


Figure 4.6. Influence des paramètres de coupe sur MRR.

4.2.3. Optimisation mono-objectif (méthode de Taguchi)

4.2.3.1. Rapport Signal sur Bruit (S/B) de paramètres technologiques

Le tableau (4.6) récapitulé les rapports S/B des paramètres technologiques tels que Ra, Fz, Pc, Kc et MRR. Dans notre travail, Ra, Fz, Pc, Kc doit être minimales, donc on a utilisé l'équation (2.11). Alors que, le MRR doit être maximale, donc on a utilisé l'équation (2.10).

Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Rapports S/B de Ra	Rapports S/B de Fz	Rapports S/B de Pc	Rapports S/B de Kc	Rapports S/B de MRR
125	0,08	0,1	2,17	-30,86	-37,23	-72,79	0,00
125	0,12	0,2	5,50	-36,62	-43,00	-69,02	9,54
125	0,16	0,3	-4,13	-42,88	-49,26	-69,26	15,56
170	0,08	0,2	10,05	-34,23	-43,28	-70,15	8,69
170	0,12	0,3	-1,02	-40,61	-49,66	-69,49	15,74
170	0,16	0,1	-4,18	-34,35	-43,40	-70,27	8,69
245	0,08	0,3	2,75	-37,58	-49,80	-69,98	15,39
245	0,12	0,1	2,20	-31,93	-44,15	-70,35	9,37
245	0,16	0,2	-0,08	-38,22	-50,44	-68,12	17,89

Tableau 4.6. Rapports signal/bruit (S/B) pour Ra, Fz, Pc, Kc et MRR

4.2.3.2. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur les paramètres technologiques

4.2.3.2.1. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur Ra

Le tableau (4.7) et la figure (4.7) montrant que les trois paramètres étudiés ont une sur Ra. Les paramètres de coupe optimaux pour minimiser la rugosité de surface (Ra) peuvent être facilement déterminés à partir de ce tableau et cette figure. Le meilleur niveau pour chaque paramètre a été trouvé en fonction de la valeur plus haute du rapport S/N [59]. D'après l'approche de Taguchi, le régime optimal pour minimiser de la rugosité de surface est donc $V_c = 245$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.2$ mm.

Niveau	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)
1	1,17873	4,98773	0,06226
2	1,61969	2,22909	5,15931
3	1,62222	-2,79617	-0,80093
Delta	0,44349	7,7839	5,96024

Tableau 4.7. Réponses pour les rapports signal /bruit de Ra.

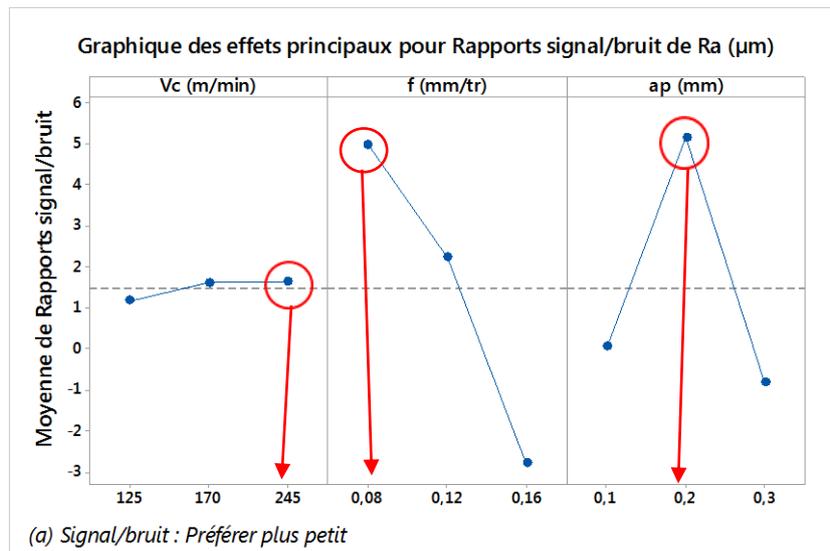


Figure 4.7 Graphique des effets principaux pour S/B de Ra.

4.2.3.2.2. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur Fz

Le tableau (4.8) et la figure (4.8) montrant que les trois paramètres étudiés ont une sur Fz. Les paramètres de coupe optimaux pour minimiser l'effort tangentiel (F_z) peuvent être facilement déterminés à partir de ce tableau et cette figure. Le meilleur niveau pour chaque paramètre a été trouvé en fonction de la valeur plus haute du rapport S/N [59]. D'après l'approche de Taguchi, le régime

optimal pour minimiser de l'effort tangentiel (F_z) est donc $V_c = 245$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.1$ mm.

Niveau	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)
1	-36,79	-34,22	-32,38
2	-36,4	-36,39	-36,36
3	-35,91	-38,49	-40,36
Delta	0,88	4,26	7,98

Tableau 4.8 des réponses pour les rapports signal /bruit de F_z .

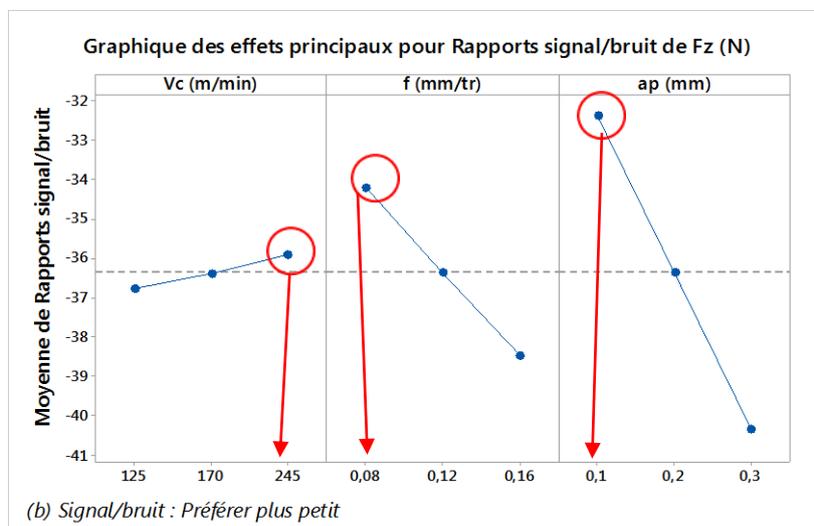


Figure 4.8 Graphique des effets principaux pour S/B de F_z .

4.2.3.2.3. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur P_c

Le tableau (4.9) et la figure (4.9) montrant que les trois paramètres étudiés ont une sur P_c . Les paramètres de coupe optimaux pour minimiser P_c peuvent être facilement déterminés à partir de ce tableau et cette figure. Le meilleur niveau pour chaque paramètre a été trouvé en fonction de la valeur plus haute du rapport S/N [59]. D'après l'approche de Taguchi, le régime optimal pour minimiser P_c est donc $V_c = 125$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.1$ mm.

Niveau	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)
1	-43,16	-43,44	-41,59
2	-45,44	-45,6	-45,57
3	-48,13	-47,7	-49,57
Delta	4,97	4,26	7,98

Tableau 4.9. Réponses pour les rapports signal /bruit de P_c .

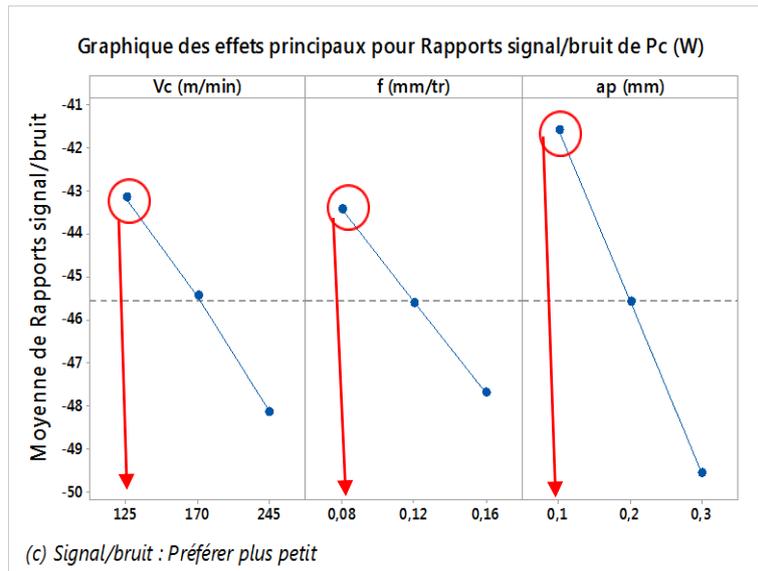


Figure 4.9. Graphique des effets principaux pour S/B de P_c .

4.2.3.2.4. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur K_c

Le tableau (4.10) et la figure (4.10) montrant que les trois paramètres étudiés ont une sur K_c . Les paramètres de coupe optimaux pour minimiser K_c peuvent être facilement déterminés à partir de ce tableau et cette figure. Le meilleur niveau pour chaque paramètre a été trouvé en fonction de la valeur plus haute du rapport S/N [59]. D'après l'approche de Taguchi, le régime optimal pour minimiser K_c est donc $V_c = 245$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr et $a_p = 0.2$ mm.

Niveau	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)
1	-70,36	-70,97	-71,14
2	-69,97	-69,62	-69,1
3	-69,48	-69,22	-69,57
Delta	0,88	1,76	2,04

Tableau 4.10. Réponses pour les rapports signal /bruit de K_c .

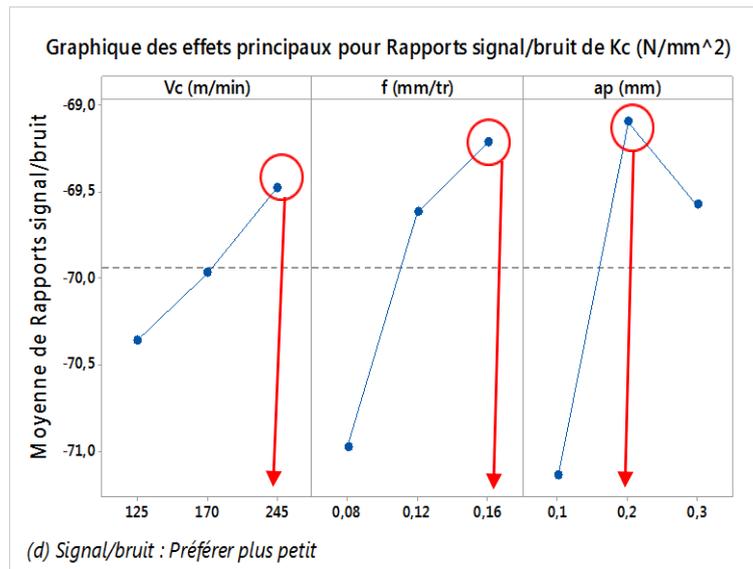


Figure 4.10. Graphique des effets principaux pour S/B de Kc.

4.2.3.2.5. Analyse des effets principaux du rapport S/B sur MRR

Le tableau (4.11) et la figure (4.11) montrant que les trois paramètres étudiés ont une sur Pc. Les paramètres de coupe optimaux pour maximiser MRR peuvent être facilement déterminés à partir de ce tableau et cette figure. Le meilleur niveau pour chaque paramètre a été trouvé en fonction de la valeur plus haute du rapport S/N [59]. D'après l'approche de Taguchi, le régime optimal pour maximiser MRR est donc $V_c = 245$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr et $a_p = 0,3$ mm.

Niveau	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	8,368	8,026	6,019
2	11,039	11,548	12,04
3	14,214	14,047	15,562
Delta	5,845	6,021	9,542

Tableau 4.11. Réponses pour les rapports signal /bruit de MRR.

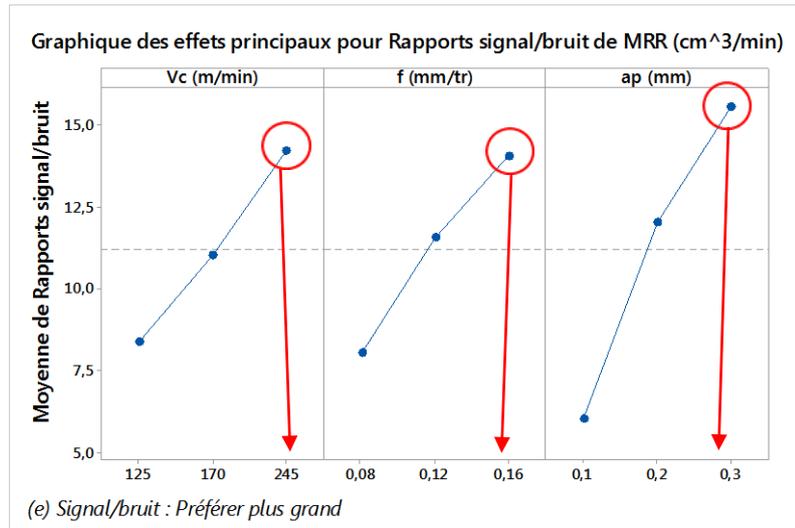


Figure 4.11 Graphique des effets principaux pour S/B de MRR.

4.2.4. Mise en œuvre de la méthode d'optimisation multi-objectif GRA

4.2.4.1. Étape 1 la normalisation

Les données expérimentales ont été normalisées pour Fz, Ra, Pc et Kc à l'aide de l'équation (2.1), tandis que le MRR à l'aide de l'équation (2.2) et présentées dans le tableau (4.12) appelé " générations relationnelles grises ". La normalisation sert à éliminer les unités et rendre toutes les réponses en même grandeur, le tableau (4.12) résume les données traitées après la normalisation. Les valeurs normalisées ont été arrangés entre zéro et un.

Essais	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
	Préférer plus petit				Préférer plus grand
Ordre idéal	1	1	1	1	1
	0,64	1,00	1,00	0,00	0,00
	0,83	0,69	0,74	0,85	0,29
	0,01	0,00	0,16	0,80	0,73
	1,00	0,84	0,72	0,63	0,25
	0,38	0,31	0,11	0,76	0,75
	0,00	0,83	0,71	0,61	0,25
	0,68	0,61	0,09	0,67	0,71
	0,64	0,96	0,66	0,59	0,28
	0,47	0,55	0,00	1,00	1,00

Tableau 4.12. Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$).

4.2.4.2. Étape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris

A partir de l'ensemble de données normalisées du tableau (4.12), les coefficients relationnels gris ont été calculés à l'aide de l'équation (2.15). La valeur du coefficient de distinction ψ est prise comme 0,2, car une pondération égale a été accordée aux cinq caractéristiques de qualité. Les résultats sont présentés au tableaux (4.13) et (4.14)

Essais	Evaluation de Delta Δ				
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
Ordre idéal	1	1	1	1	1
1	0,36	0,00	0,00	1,00	1,00
2	0,17	0,31	0,26	0,15	0,71
3	0,99	1,00	0,84	0,20	0,27
4	0,00	0,16	0,28	0,37	0,75
5	0,62	0,69	0,89	0,24	0,25
6	1,00	0,17	0,29	0,39	0,75
7	0,32	0,39	0,91	0,33	0,29
8	0,36	0,04	0,34	0,41	0,72
9	0,53	0,45	1,00	0,00	0,00

Tableau 4.13. Calcul de Delta.

Essais	Coefficients du GRA				
	Ra	Fz	Pc	Kc	MRR
Ordre idéal	1	1	1	1	1
1	0,36	1,00	1,00	0,17	0,17
2	0,54	0,39	0,43	0,57	0,22
3	0,17	0,17	0,19	0,50	0,43
4	1,00	0,56	0,42	0,35	0,21
5	0,24	0,22	0,18	0,46	0,44
6	0,17	0,55	0,41	0,34	0,21
7	0,38	0,34	0,18	0,37	0,41
8	0,36	0,82	0,37	0,33	0,22
9	0,27	0,31	0,17	1,00	1,00

Tableau 4.14. Calcul de coefficients du GRA.

4.2.4.3. Étape 3 : Calcul de GRG (Grey Relational Grade)

Ensuite, le degré de gris relationnel (GRG) a été découvert à l'aide de l'équation (2.17) à partir des résultats de l'équation de gris coefficients relationnels. Les résultats de la GRG sont présentés dans le tableau (4.15) Ce résultat est utilisé pour optimiser les multi-réponses pendant qu'il est converti en catégorie simple.

N° Essai	GRA	Ordre
1	0,538	2
2	0,430	4
3	0,292	9
4	0,507	3
5	0,310	8
6	0,334	7
7	0,338	6
8	0,419	5
9	0,550	1

Tableau 4.15. Qualité Grise GRG et son ordre.

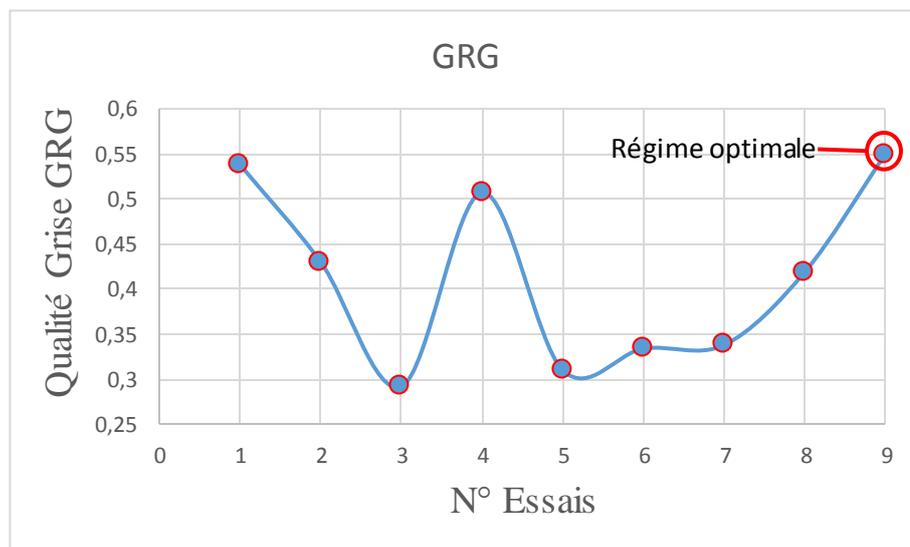


Figure 4.12. Qualité Relationnelle Grise (GRG).

Selon le tableau (4.15) et la figure (4.12) la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 9 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que l'expérience 9 est la combinaison des paramètres optimaux qui donne simultanément Ra, Fz, Pc et Kc minimale avec le MRR maximale.

4.2.4.4. Étape 4 : Choix le niveau optimal des paramètres de coupe

A partir de la valeur de GRG, les effets de chaque paramètre de processus à différents niveaux sont tracés et montrés à la figure (4.13) et les effets principaux de la qualité grise sont présentés au tableau (4.16) La combinaison paramétrique optimale est choisie en fonction des valeurs moyennes des effets principaux de la qualité grise les plus élevées du tableau (4.16). La valeur le plus élevée des effets principaux de la qualité grise implique une corrélation plus forte à l'ordre de référence et une meilleure performance. Ainsi, le réglage optimal pour les multi-réponses devient V3- f1- ap2, c'est-à-dire une vitesse de coupe de 245 m/min, une avance de 0,08 mm/tour et une profondeur de coupe de 0,2 mm, respectivement. Les valeurs les plus élevées des effets principaux de la qualité grise Figure (4.13) donne les valeurs minimales de Fz, Ra, Pc, et Kc et la valeur maximale de MRR. La différence entre les valeurs maximums et les valeurs minimales (Delta =Max- Min) de la GRG moyenne pour les paramètres de tournage étaient de 0.05 pour la vitesse de coupe, de 0.08 pour l'avance et de 0.18 pour la profondeur de passe, respectivement Tableau (4.16). Ce résultat indique que la profondeur de passe a l'effet le plus influent sur les multi-réponses par rapport à l'avance et à la vitesse de coupe en condition sec de tournage de l'acier AISI 304 L.

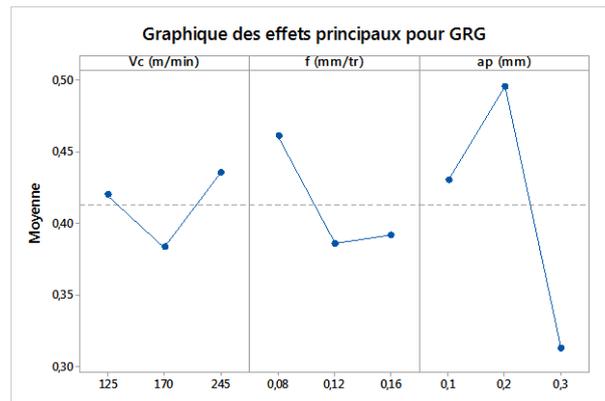


Figure 4.13. Graphique des effets principaux pour GRG.

Niveau	Vc	f	ap
1	0,42	0,46	0,43
2	0,38	0,38	0,49
3	0,43	0,39	0,31
Delta	0,05	0,08	0,18
Ordre	3	2	1

Tableau 4.16. Effets principaux de la qualité grise.

4.2.4.5. Étape 5 : ANOVA pour GRG

Ensuite, le tableau de l'analyse de variance (ANOVA) est formulé en tenant compte de la valeur de la qualité grise (GRG) qui a été présentée au tableau (4.17). Ce tableau donne l'importance des paramètres de processus sur les multi-réponses. Le tableau de l'analyse de variance indique que la profondeur de passe est le paramètre important qui influe sur les multi-réponses.

Source	DL	SC	SM	Valeur de F	Cont (%)
Modèle	3	0,028454	0,028454	0,91	35,27%
Vc (m/min)	1	0,000779	0,000779	0,07	0,97%
f (mm/tr)	1	0,007142	0,007141	0,68	8,85%
ap (mm)	1	0,020534	0,020534	1,97	25,45%
Erreur	5	0,052217	0,052217		64,73%
Total	8	0,080671			100,00%

Tableau 4.17. ANOVA pour GRG.

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale qui a permis l'étude de l'influence de différents paramètres de coupe sur les paramètres technologiques obtenus. Cette étude a permis d'établir des modèles mathématiques, les différents coefficients de détermination permettent de valider ces modèles. L'utilisation de deux méthodes d'optimisation a permis d'obtenir un régime de coupe optimal satisfaisant tous nos objectifs à la fois lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable 314 L permettant d'une part de minimiser les critères de rugosité, de la puissance de coupe et de la pression spécifique de coupe et d'autre part de maximiser le taux d'enlèvement de matière.

Conclusion Générale

Conclusion

Dans ce mémoire, l'effet de certains paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur les paramètres technologiques tels que l'effort tangentiel de coupe (F_z), la rugosité de surface (R_a), la puissance de coupe (P_c) et la pression spécifique de coupe (K_c) et le taux d'enlèvement de matière a été étudié lors du tournage à sec de l'acier inoxydable AISI 304 L. L'analyse de Variance ANOVA a été utilisée pour développer des modèles de regression linéaire de ces paramètres technologiques d'une part. D'autre part, deux méthodes d'optimisation ont été proposées : la méthode de Taguchi (rapport signal /bruit) et l'analyse relationnelle grise (GRA) afin de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs souhaités.

L'analyse de Variance ANOVA a montré que Les coefficients de détermination (R^2) pour les modèles de F_z , R_a , P_c et K_c sont plus élevés c-à-dire $R^2 = 95 \%$, $R^2 = 63 \%$, $R^2 = 95 \%$ et $R^2 = 70 \%$, respectivement. Ceci montre la bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs prévues. En ce qui concerne l'effet des paramètres, il a été conduit que l'avance était le paramètre le plus significatif sur R_a et K_c avec une contribution de 60,60 % et 33,02 % respectivement, tandis que la profondeur de passe était le paramètre dominant qui a affect F_z , P_c et K_c avec une contribution de 69,80 %, 61,21 % et 28,50 % respectivement.

L'optimisation par la méthode de mono-objectif Taguchi a été effectuée avec la prise en compte du rapport signal sur bruit (S/B). Ce rapport nous a permis de conclure que les valeurs optimales pour minimiser F_z , R_a , P_c et K_c sont donc respectivement :

- ✓ $V_c = 245 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,1 \text{ mm}$.
- ✓ $V_c = 245 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,2 \text{ mm}$.
- ✓ $V_c = 125 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,1 \text{ mm}$.
- ✓ $V_c = 245 \text{ m/min}$, $f = 0,16 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,2 \text{ mm}$.

Alors que les valeurs optimales pour maximiser MRR sont donc :

- ✓ $V_c = 245 \text{ m/min}$, $f = 0,16 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,3 \text{ mm}$.

L'optimisation des paramètres de coupe par l'application de la méthode multi-objectif (GRA) nous a permis l'obtention d'une combinaison optimale des paramètres de coupe qui est :

- ✓ $V_c = 245 \text{ m/min}$, $f = 0,16 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,2 \text{ mm}$.

Ce régime de coupe permet, dans notre cas d'étude, d'obtenir un meilleur état de surface, l'effort de coupe, une puissance de coupe et une pression spécifique de coupe minimales ainsi qu'un taux d'enlèvement de matière maximal.

Références

Référence Biographiques :

- [1] HIMED Lynda, « Modélisation et simulation de la coupe orthogonale en utilisant un code de calcul par la méthode des éléments finis », Mémoire de Magister, Université de Batna 2008 / 2009.
- [2] Rami, « Étude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette ». Thèse de doctorat, université de Paul Sabatier - Toulouse 2011.
- [3] SandvikCoromant, 2000
- [4] B. Fnides. Evaluation des performances des matériaux de coupe lors de l'usinage de l'acier X38CrMoV5-1, Mémoire de magistère de Mécanique Productive. Université 08 mai 1945 de Guelma (2008)
- [5] normalisation iso « NF EN ISO 4287-3274 ».
- [6] Bourebia Mounira, « Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique » université d'Annaba 2010.
- [7] D. Sullivan et M. Cotterell. Machinability of austenitic stainless steel ss303. Journal of Materials Processing Technology, 124(1-2):153 – 159, 2002.
- [8] Foussef Koné, « Étude expérimentale, modélisation et simulation numérique de l'usinage à sec des aciers inoxydables : Étude de l'effet des revêtements mono et multi couches » Thèse de doctorat, Université de Lorraine 2012.
- [9] Australian Stainless Steel Development Association (ASDA) (2006) 'A technical bulletin 200series stainless steel CRMN grades', Vol. 1, No. 10, pp.2–3.
- [10] Akasawa, T., Sakurai, H., Nakamura, M., Tanaka, T. and Takano, K. (2003) 'Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels', Journal of Material Processing Technology, December, Vols. 143/144, pp.66–71.
- [11] Kosa, T. (1989) 'Machining of stainless steel', 9th ASM International.
- [12] Gandarias, A., de Lacalle, L.N.L., Aizpitarte, X. and Lamikiz, A. (2008) 'Study of the performance of the turning and drilling of austenitic stainless steels using two coolant techniques', International Journal of Machining and Machinability of Materials, Vol. 3, Nos. 1–2, pp.1–17.
- [13] Specialty Steel Industry of North America (1995) Designer's Hand Book for Stainless Steel Machining, Washington, DC.
- [14] Endrino, J.L., Fox-Rabinovich, G.S. and Gey, C. (2006). 'Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel', Surface & Coatings Technology, Vol. 200, No. 24, pp.6840–6845.
- [15] Korkut, I., Kasap, M., Ciftci, I. and Seker, U. (2004). 'Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel', Materials

and Design, Vol. 25, No. 4, pp.303–305.

- [16] Ciftci, I. (2006) ‘Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools’, *Tribology International*, Vol. 39, No. 6, pp.565–569.
- [17] Nordin, M., Sundstroma, U.R., Selinder, T.I. and Hogmark, S. (2000). ‘Wear and failure mechanisms of multilayered PVD TiN/TaN coated tools when milling austenitic stainless steel’, *Surface and Coatings Technology*, Vols. 133/134, No. 1, pp.240–246.
- [18] Lin, W.S. (2008) ‘The study of high speed fine turning of austenitic stainless steel’, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing*, Vol. 27, No. 2, pp.191–194.
- [19] Rodriguez, P., Fernandez, A.I., Labarga, J.E. and Garcia, J. (2008). ‘Estimation of optimal cutting conditions for austenitic stainless steels machining’, *Proceedings of ECTC*, Miami, Florida, USA.
- [20] Maranhão, C. And Davim, P.J. (2010). ‘Finite element modeling of machining of AISI 316 steel: numerical simulation and experimental validation’, *Simulation Modeling Practice and Theory*, Vol. 18, No. 2, pp.2139–2156.
- [21] Kaladhar, M., Venkata Subbaiah, K., Srinivasa, Rao Ch. (2012). Determination of optimum Process Parameters during turning of AISI 304 Austenitic stainless steels using Taguchi method and ANOVA. *International Journal of lean thinking*, 3.
- [22] Acayaba, M.G.A., Muñoz de Escalona, P. (2015). Prediction of surface roughness in low speed turning of AISI316 austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 11, 62-67.
- [23] Zerti, O., Yallese, M.A., Khettabi, R., Chaoui, K., Mabrouki, T.(2017). Design optimization for minimum technological parameters when dry turning of AISI D3 steel using Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 1915-1934.
- [24] Zerti, A., Yallese, M.A., Meddour, I., Belhadi, S., Haddad, A., Mabrouki, T. (2019). Modeling and multi-objective optimization for minimizing surface roughness. cutting force. and power. and maximizing productivity for tempered stainless steel AISI 420 in turning operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 135-157.
- [25] Kaladhar, M.(2019). Evolution of hard coating materials performance on machinability issues and material removal rate during turning operations. *Mesurement*, 135,493-502.
- [26] Korkut I, Mustafa K, Ibrahim C, Ulvi S.(2004). Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel, *Materials and Design*, 25, pp.303–305.

- [27] Ciftci I.(2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multilayer coated cemented carbide tools, *Tribology International* 39, pp. 565–569.
- [28] Ilhan A, Süleyman N.(2012). Multi response optimisation of CNC turning parameters via taguchi method-based response surface analysis. *Measurement*, 45, pp. 785–794 .
- [29] Mahdavinjad, R. A., & Saeedy, S. (2011). Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. *Sadhana*, 36(6), 963-970.
- [30] Xavier, M. A. (2012). Evaluating the machinability of AISI 304 stainless steel using alumina inserts. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 841-847.
- [31] Nayak, S. K., Patro, J. K., Dewangan, S., & Gangopadhyay, S. (2014). Multiobjective Optimization of Machining Parameters During Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using Grey Relational Analysis. *Procedia Materials Science*, 6, 701-708.
- [32] Nithyanandhan, T., Manickaraj, K., & Kannakumar, R. (2014). Optimisation of Cutting Forces, Tool Wear and Surface finish in Machining of AISI 304 Stainless Steel Material Using Taguchi's Method. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 1(4), 488-493.
- [33] Nithyanandhan, T., Kannakumar, R., Suresh Kumar, P. & Vijayakumar, N.S. (2014). Optimizing The Process Parameters on Tool Wear of Tungsten Carbide Insert When Machining of AISI 304 Stainless Steel Material. *International Journal of Science Research & Education*, 2(11), 2463-2477.
- [34] Wagh, S. S., Kulkarni, A. P., & Sargade, V. G. (2013). Machinability Studies of Austenitic Stainless Steel (AISI 304) Using PVD Cathodic Arc Evaporation (CAE) System Deposited AlCrN/TiAlN Coated Carbide Inserts. *Procedia Engineering*, 64, 907-914.
- [35] Swapnagandha S. Wagh, Atul P. Kulkarnib, Vikas G. Sargade. (2013). Machinability studies of austenitic stainless steel (AISI 304) using PVD cathodic arc evaporation (CAE) system deposited AlCrN/TiAlN coated carbide inserts. *Procedia Engineering*, 64, 907-914.
- [36] Wolbert, Dominique Merabet, SmailBouzaza, Abdelkrim Bouhelassa, Mohamed. (2009). Modélisation et optimisation de la photo dégradation du 4-méthylphénol dans un réacteur à circulation en présence d'UV/ZnO, Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)
- [37] Romain Boulandet1, Hervé Lissek1. avril (2010).Optimisation d'un absorbeur électroacoustique par plans d'expériences: approche expérimentale et numérique1

- [38] Wolbert, Dominique Merabet, SmailBouzaza, Abdelkrim Bouhelassa, Mohamed.(2009). Modélisation et optimisation de la photo dégradation du 4-méthylphénol dans un réacteur à circulation en présence d'UV/ZnO, Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)
- [39] Montgomery D.C.(2001). Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, New York. 2001.
- [40] Asiltürk I, Neseli S. (2012). Multi réponse optimization of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis. *Measurement* 45 785–794.
- [41] Aouici H, Yallese M, Chaoui K, Mabrouki T, Rigal J.F.(2012).Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement*, Vol. 45, No. 3, pp.344–353
- [42] Saidi, R., Fathallah, B.B., Mabrouki, T., Belhadi, S., Yallese, M. (2018). Modeling and optimization of the turning parameters of cobalt alloy (Stellite 6) based on RSM and desirability function. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2816-x>.
- [43] Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G-L. (2012). some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. *Measurement*, Vol. 45, No. 7, pp.1872–1884.
- [44] Neseli S, Yaldiz S, Türkes E. (2011).Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. *Measurement*, Vol. 44, No. 3, pp.580–587.
- [45] Liu Y-T, Chang W-C, Yamagata Y.A.(2010).study on optimal compensation cutting for an aspheric surface using the Taguchi method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3 40–48.
- [46] Park S. Robust design and analysis for quality engineering. Chapman & Hall, London. 1996.
- [47] Phadke S. Quality engineering using robust design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
- [48] Haq, A. N., Marimuthu, P., & Jeyapaul, R. (2008). Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(3-4), 250-255.
- [49] Tosun, N., & Pihtili, H. (2010). Gray relational analysis of performance characteristics in MQL milling of 7075 Al alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(5-8), 509-515.

- [50] Amlana Panda, Ashok Kumar Sahoo*and Arun Kumar Rout(2016) Multi-attribute decision making parametric optimization and modeling in hard turning using ceramic insert through grey relational analysis: A case study Decision Science Letters 5 (2016) 581–592
- [51] Pal S, Sahoo K. (2007). Tribological performance optimization of electro less ni-p coatings using the Taguchi method and grey relational analysis. Tribol let, 28, pp. 191–201.
- [52] Lin C.L.(2004) Use of the Taguchi method and grey relational analysis turning operations with multiple performance characteristics, materials and manufacturing processes, 19, No. 2, pp. 209-220.
- [53] sandvik.coromant.com
- [54] Lakhdar 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- » L'université de 08 Mai 1945 Guelma
- [55] Montgomery, D.C. (2013) Design and Analysis of Experiments, 8nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- [56] Nouioua. M., Yallese. M., Khettabi. R., Belhadi. S., Bouhalais. M., Girardin. F. (2017). Investigation of the performance of the MQL, dry and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). Int J Adv Manuf Technol, Vol.93 Nos. 5-8, pp.2485-2504
- [57] Nur, R., Noordin. My., Izman, S., and Kurniawn, D. (2017). Machining parameters effect in dry turning of AISI 316L stainless steel using coated carbide tools. J Process Mechanical Engineering. Vol. 231 No.1 , pp.676-683.
- [58] Acayaba. M.G.A., Muñoz de Escalona P. (2015). Prediction of surface roughness in low speed turning of AISI316 austenitic stainless steel. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 11 No.1, pp.62-67.
- [59] Bouzid L, Boutabba S, Yallese M, Belhadi S, Girardin F. (2014). Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel. Int J Adv Manuf, Vol 74 Nos 5-8.