

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



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : BEKKOUCHE Mohammed taha

=====

**Modélisation prédictive et optimisation des paramètres de coupe
lors du tournage dur de l'acier AISI H 11**

=====

Sous la Direction de :

Dr. BOUCHELAGHEM Hadjira

Année universitaire : **2023/2024**

A decorative frame made of dark brown wooden planks. The top left corner is adorned with several large, vibrant flowers in shades of pink, red, and orange. The background is white, scattered with colorful confetti in shades of pink, blue, purple, and green. In the bottom right corner, there is a rolled-up diploma tied with a red ribbon and a black graduation cap with a yellow tassel. A white banner is positioned at the bottom of the frame.

DEDICACE

*Je voudrais dédier ce travail à mes
parents*

*Qui m'a encouragé à accomplir cet
exploit ;*

*A mes frères et sœurs, que Dieu
vous donne la santé*

*Du bonheur, du courage et surtout
de la réussite ;*

Tous mes amis ;

A decorative frame made of dark brown horizontal and vertical bars. The top-left corner is adorned with several large, vibrant flowers in shades of pink, red, and orange. The background is white, scattered with colorful confetti in shades of pink, blue, purple, and orange. At the bottom, there is a white banner with a dark green leaf-like shape on the left, and a black graduation cap with a yellow tassel and a rolled-up diploma tied with a red ribbon on the right.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadrant :

*Dr : **BOUCHELAGHEM Hadjira***

Je tiens également à lui exprimer ma gratitude pour la patience et le soutien qu'il m'a apporté.

Précieux pour mener à bien ce travail.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements au personnel du département d'ingénierie.

Mécanicien de l'Université de Guelma.

Résumé

La coupe des métaux procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication et l'utilisation de l'outil informatique pour l'optimisation. La recherche permanente d'une productivité meilleure de la coupe des métaux est une préoccupation majeure. En contrepartie l'augmentation de la productivité en termes de quantité a un impact direct sur la qualité des pièces obtenues, dont les tolérances géométriques et dimensionnelles doivent répondre à certains standards et respecter une limite admissible de rugosité pour permettre leur exploitation. Dans ce sens nous avons réalisé ce travail qui concerne d'une part la modélisation des paramètres technologiques tels que : rugosité de surface (R_a), l'effort tangentiel (F_z), la puissance de coupe (P_c) et l'effort spécifique (K_c) en utilisant la méthode de réponse de surface (RMS), lors du tournage dur de l'acier AISI H11 avec un outil en céramique non revêtue (CC650WG). La deuxième partie du travail concerne l'optimisation multi-objective des conditions de coupe par trois méthodes d'optimisation à savoir : (DF, MOORA et PIV).

Abstract

Metal cutting, a machining process whose origins are very old, has experienced great expansion with the increasingly advanced mechanization of manufacturing workshops and the use of computer tools for optimization. The constant search for better productivity in metal cutting is a major concern. In return, the increase in productivity in terms of quantity has a direct impact on the quality of the parts obtained, whose geometric and dimensional tolerances must meet certain standards and respect an admissible limit of roughness to allow their exploitation. In this sense we have carried out this work which concerns on the one hand the modeling of technological parameters such as: surface roughness (R_a), tangential force (F_z), cutting power (P_c) and specific force (K_c) using the response surface method (RMS), when hard turning steel AISI H11 with an uncoated ceramic insert (CC650WG). The second part of the work concerns multi-objective optimization cutting conditions with three optimization methods namely (DF, MOORA and PIV).

ملخص

لقد شهدت عملية قطع المعادن، وهي عملية تصنيع ذات أصول قديمة جدًا، توسعًا كبيرًا مع الميكنة المتقدمة بشكل متزايد في ورش التصنيع واستخدام أدوات الكمبيوتر لتحسين الأداء. يعد البحث المستمر عن إنتاجية أفضل في قطع المعادن مصدر قلق كبير. وفي المقابل، فإن زيادة الإنتاجية من حيث الكمية لها تأثير مباشر على جودة الأجزاء التي يتم الحصول عليها، والتي يجب أن تتوافق تفاوتاتها الهندسية والأبعادية مع معايير معينة وتحترم الحد المسموح به من الخشونة للسماح باستغلالها. وبهذا المعنى قمنا بتنفيذ هذا العمل الذي يتعلق من ناحية بنمذجة المعلمات التكنولوجية مثل : خشونة السطح (Ra_s) القوة العرضية (Fz)، قوة القطع (Pc) والقوة النوعية (Kc) باستخدام سطح الاستجابة طريقة (RMS)، عند الخراطة الصلبة للفولاذ AISI H11 باستخدام اداة سيراميك غير مطلية ($CC650WG$). الجزء الثاني من العمل يتعلق بطروف القطع الامثل متعددة الاهداف بواسطة استخدام ثلاث طرق للتحسين وهي ($DF, MOORA$ et PIV).

Nomenclatures

Vc	Vitesse de coupe [m/min]
f	Avance par tour [mm/tr]
ap	Profondeur de passe [mm]
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [μm]
Rt	Rugosité totale [μm]
Rq	Rugosité moyenne quadratique du profil [μm]
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]
Fz	Effort de coupe tangentiel [N]
MRR	Taux d'enlèvement de matière [cm^3/min].
Pc	Puissance de coupe [W].
Kc	Effort de coupe spécifique [N/mm^2].
HRC	Dureté Rockwell.
ANOVA	Analyse de la variance.
Cont %	Pourcentage de contribution.
R ²	Coefficient de détermination
MSR	Méthodologie de surface de réponse
DF	Fonction de désirabilité.
PIV	Valeurs indexées de proximité.
MOORA	Analyse du ratio d'optimisation multi-objectif

Index des figures

Chapitre I

Figure I.1 Causes d'usure	13
Figure I.2 Les différentes formes d'usure des outils	14
Figure I.3 Ecaillages	15
Figure I.4 Fissuration	15
Figure I.5 Entaille	16
Figure I.6 Arête rapportée	16
Figure I.7 Influence de l'usure sur le coût d'usinage	17
Figure I.8 Evolution de l'usure en fonction du temps	18
Figure I.9 Mesure de la profondeur de cratère	19
Figure I.10 enlèvement de matière	20
Figure I.11 composantes de l'effort de coupe	21
Figure I.12 effort de coupe spécifique	22
Figure I.13 Les critères de la rugosité R_t	24
Figure I.14 Les critères de la rugosité R_z	24
Figure I.15 Les critères de la rugosité R_a	25
Figure I.16 Les critères de la rugosité R_{max}	25
Figure I.17 Les critères de la rugosité R_p	25
Figure I.18 Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la tenue à l'usure de l'outil de coupe	28
Figure I.19 Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la qualité de la surface usinée (R_a)	28

Figure I.20	Diagramme de probabilités normales résiduelles pour la rugosité Ra	29
Figure I.21	Diagramme de normales résiduelles pour la tenue T	29
Figure I.22	Résultats de rugosité de surface pour toutes les analyses	32
Figure I.23	Distribution de la micro dureté pour l'exécution no. 19 sous la surface usinée dans UVAM et CM	33
Figure I.24	Probabilité normale des résidus pour les données a Rt, Kc et Pc	34
Figure I.25	Graphique à barres 3D de la désirabilité	35
Figure I.26	Notes relationnelles grises pour $W_1 = 0,8$ et $W_2 = 0,2$	37

Chapitre II

Figure II.1	tour à charioter et à fileter modèle SN 40	38
Figure II.2	Eprouvette utilisée pour les essais	39
Figure II.3	La plaquette de coupe	40
Figure II.4	Porte outil utilisé	41
Figure II.5	Rugosimètre Mitutoyo SJ-210 (2D)	42
Figure II.6	Plate-forme KISTLER (modèle 9257 B)	43
Figure II.7	Amplificateur de charge	44
Figure II.8	PC pour traiter les résultats	44
Figure II.9	Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE	44

Chapitre III

Figure III.1	Diagramme des effets principaux sur Ra	52
Figure III.2	Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour (Ra)	53
Figure III.3	Valeurs de l'erreur par rapport aux	53
Figure III.4	Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (Vc, f et ap)	53
Figure III.5	Graphes de contour de la rugosité Ra en fonction de (Vc, f ,ap)	54
Figure III.6	Diagramme des effets principaux sur Fz	55
Figure III.7	Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour Fz	55
Figure III.8	Valeurs de l'erreur par rapport aux	55
Figure III.9	Diagrammes de surface 3D de Fz en fonction de (Vc, f et ap)	56
Figure III.10	Graphes de contour de l'effort Fz en fonction de (Vc, f et ap)	56
Figure III.11	Diagramme des effets principaux sur (Pc)	58
Figure III.12	Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour (Pc).....	58
Figure III.13	Valeurs de l'erreur par rapport aux valeurs prévues pour (Pc)	58
Figure III.14	Diagrammes de surface 3D de Pc en fonction de (Vc, f et ap)	59
Figure III.15	Graphes de contour de Pc en fonction de (Vc, f et ap)	59
Figure III.16	Diagramme des effets principaux sur Kc (N/mm ²)	60
Figure III.17	Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour (Kc)	61
Figure III.18	Valeurs de l'erreur par rapport aux valeurs prévues pour (Kc)	61
Figure III.19	Diagrammes de surface 3D de Kc en fonction de (Vc, f et ap)	61
Figure III.20	Graphes de contour de Kc en fonction de (Vc, f et ap)	62

Chapitre IV

Figure IV.1 Graphes de contour de (Ra, Fz, Pc, MRR et Kc) en fonction de (Vc, f et ap)	69
Figure IV.2 Résultat optimaux des paramètres étudiés (1 ^{er} cas)	69
Figure IV.3 Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques (1 ^{er} cas)	70
Figure IV.4 Graphes de contour de (Ra, Fz, Pc, MRR et Kc) en fonction de (Vc, f et ap)	70
Figure IV.5 Résultat optimaux des paramètres étudiés (2 ^{ème} cas)	71
Figure IV.6 Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques (2 ^{ème} cas)	71
Figure IV.7 Graphes de contour de (Ra, Fz, Pc, MRR et Kc) en fonction de (Vc, f et ap)	72
Figure IV.8 Résultat optimaux des paramètres étudiés (3 ^{ème} cas)	72
Figure IV.9 Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques	73
Figure IV.10 Diagramme des effets principaux pour PIV	78

INDEX DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 Plan de conception complet et résultats expérimentaux (1)	30
Tableau I.2 Plan de conception complet et résultats expérimentaux (2)	32
Tableau I.3 GRG calculé pour la condition 2	37

Chapitre II

Tableau II.1 Composition chimique en %	39
Tableau II.2 Désignation de l'acier utilisé	39
Tableau II.3 Caractéristiques de l'outil de coupe utilisé	40
Tableau II.4 Informations relatives à la plaquette de coupe utilisée	43
Tableau II.5 Caractéristiques géométriques du porte- outil utilisé	45
Tableau II.6 Condition de coupe et leurs niveaux pour un plan de 9 essais	46

Chapitre III

Tableau III.1	Plan des essais expérimentaux L9	51
Tableau III.2	Analyse de l'ANOVA pour le critère de rugosité Ra	51
Tableau III.3	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel Fz	54
Tableau III.4	Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance Pc	57
Tableau III.5	Analyse de la variance (ANOVA) pour la force spécifique Kc	60

Chapitre IV

Tableau IV.1	But et gamme des paramètres pour le 1 ^{er} cas d'optimisation	67
Tableau IV.2	Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés pour le 1 ^{er} cas d'optimisation	67
Tableau IV.3	But et gamme des paramètres pour le 2 ^{ème} cas d'optimisation	67
Tableau IV.4	Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés pour le 2 ^{ème} cas	67
Tableau IV.5	But et gamme des paramètres pour le 3 ^{ème} cas d'optimisation	68
Tableau IV.6	Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés pour le 3 ^{ème} cas	68
Tableau IV.7	Matrice des valeurs normalisées	74
Tableau IV.8	Valeurs normalisées pondérées	74
Tableau IV.9	Résultats MOORA (distances, coefficient de proximité Q_i et le classement pour chaque alternative)	75
Tableau IV.10	Matrice des valeurs normalisées	76
Tableau IV.11	Valeurs normalisées pondérées	76
Tableau IV.12	Résultats des valeurs indexées de proximité (PIV)	77
Tableau IV.13	Résultats PIV (distances, coefficient de proximité d_i et le classement pour chaque alternative)	78
Tableau IV.14	Récapitulatif des combinaisons optimales	79

Sommaire

Chapitre I

I-1 Introduction	1
I-1-1 L'aptitude à l'usinage	1
I-1-2 Usinage des métaux durs	2
I-2 Tournage dur et leurs avantages	2
I-2-1 Définition	2
I-2-2 Avantages	3
I-3 Matériaux utilisés en tournage dur	3
I-3-1 Introduction	3
I-3-2 Acier rapides	3
I-3-3 Différentes familles des aciers rapides	4
a. Aciers rapides au tungstène	4
b. Aciers rapides au molybdène	4
c. Aciers rapides sur carburés	5
d. Aciers rapides resulfurés	5
e. Aciers rapides resulfurés	5
f. Aciers rapides resulfurés	5
I-3-4 Carbures métalliques	6
I-3-5 Procédés de revêtement	6
I-3-6 Cermets	7
I-3-7 Céramiques	7
I-3-8 Classification des céramiques pour outils de coupe	9
a. Oxydes	9
b. Carboxydes	9
c. Nitrures	9
d. Composites	9
I-3-9 Le Nitrure de bore cubique	9
I-3-10 Le Diamant	10
❖ Diamant Naturel	10
❖ Diamant Synthétique	11
1-4 phénomènes agissant sur le processus de coupe	11
I-4-1 Usure des outils de coupe	11

❖ Introduction	11
I.4.2 Généralités	11
I-4-3 Phénomènes provoquant l'usure	12
A. Phénomènes mécaniques	12
B. Phénomènes physico-chimiques	13
I-4-4 Les différentes formes d'usure des outils	13
- Usure en dépouille ou usure frontale	13
- Usure en cratère	14
- Déformation plastique	14
- Ecaillage (Ebréchures)	14
- Fissuration d'arête	15
- Entaille	15
- Usure par arête rapportée au copeau adhérent	16
I-4-5 Etude des différents paramètres influant sur l'usure	16
• Influence de la vitesse de coupe	16
• Influence de la section du copeau	16
• Influence du matériau usiné	17
• Influence du matériau de l'outil	17
• Influence de la lubrification	17
I-4-6 Influence de l'usure sur le coût d'usinage	17
I-4-7 Relation entre l'usure et le temps	18
I-4-8 Critères d'usure	18
I-4-9 Mesure de l'usure	19
❖ Usure en dépouille	19
❖ Usure en cratère	19
I-5 Efforts de coupe	19
I-5-1 Illustration schématique	20
I-5-2 éléments de réduction sur toute la surface	20
I-5-3 Formules empiriques	21
I-5-4 Effort de coupe spécifique	21
I-5-5 Mesure des efforts de coupe	22
I-5-6 Efforts spécifique, puissance de coupe et MRR	23
❖ Efforts spécifiques de coupe K_c	23
❖ Puissance nécessaire à la coupe	23
❖ Taux d'enlèvement de la matière	24
I-6 Critères de la rugosité	24
• Rugosité total R_t	24
• Rugosité R_z	24

• Rugosité Ra	25
• Rugosité maximum	25
• Rmax Rugosité Rp	25
I-6-1 Evaluation de la rugosité	26
I-6-2 Défauts de l'état de surface	26
I-7 Etat de l'art	27
I-8 Conclusion	38

Chapitre II

II-1 Introduction	40
II-2 Matériels utilisés	40
II-2-1 Machine-outil	40
II-2-2 Matériau utilisé pour les essais d'usinage	40
❖ Domaines d'application	41
II-3 Plaquette et porte outil	41
II-3-1 Plaquette de coupe utilisé	41
II-3-2 Porte outil	43
II-4 Appareillages de mesures utilisées	44
II-4-1 Mesure de la rugosité	44
II-4-2 Mesure de l'effort de coupe	44
II-5 Démarche et plan d'expérience adopté	46
II-6 Planification des expériences	47
II-7 Conditions de coupe	48
II-8 Conclusion	48

Chapitre III

III- Modélisation des paramètres technologique en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS)	47
III-1 Introduction	47
III-2 Modélisation et analyse de variance (ANOVA)	47
III-2-1 Résultats des expériences	47
III-2-2 Analyse de la rugosité Ra	48
❖ Analyse du modèle mathématique	49
III-2-2-1 Graphiques des effets principaux	49
III-2-2-2 Digrammes de surface en (3D) et graphes de contour	50
III-2-3 Analyse de l'effort tangentiel Fz	51
❖ Analyse du modèle mathématique	51
III-2-6 Graphiques des effets principaux	52
III-2-7 Digrammes de surface en (3D) et graphes de contour	53
III-2-4 Analyse de la puissance de coupe Pc	54
❖ Analyse du modèle mathématique	54
III-2-4-1 Graphiques des effets principaux	54
III-2-4-2 Digrammes de surface en (3D) et graphes de contour	55
III-2-5 Analyse de l'effort spécifique Kc	56
❖ Analyse du modèle mathématique	57
III-2-5-1 Graphiques des effets principaux	57
III-2-5-2 Digrammes de surface en (3D) et graphes de contour	58
III-3 Conclusion	59

Chapitre IV

IV.1. Introduction	60
IV.2 Optimisation des résultats par la fonction désirabilité (DF)	60
IV.2.1 Méthode de fonction de désirabilité (DF)	60
IV.2.1 Cas d'optimisations étudiées	61
1) Premier cas d'optimisation	62
2) Deuxième cas d'optimisation	62
3) Troisième cas d'optimisation	62
IV.3 Méthode MOORA	69
IV.4 Méthode PIV	71
IV.5 Comparaison des résultats d'optimisation	74
Conclusion générale	77
Perspectives	78

Introduction générale

Les aciers pour travail à froid tels que L'AISI H11 sont largement utilisés dans différents domaines en raison de sa résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle très important dans l'industrie des poinçons et matrices, l'industrie aérospatiale et la fabrication de pièces médicales et dans l'industrie alimentaire, il présente une excellente résistance à la corrosion, usure et a une bonne stabilité dimensionnelle et une bonne résistance à la compression haute.

D'autre part, afin d'assurer une qualité satisfaisante des produits finis, une attention particulière doit également être accordée à la modélisation des paramètres technologiques, optimiser les conditions de coupe pour améliorer la qualité et la productivité et utiliser des méthodes statistiques pour modéliser et améliorer les processus absolument.

Le mémoire est organisé comme suit :

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

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, le matériel et les équipements nécessaires à la réalisation des expériences.

Le troisième chapitre concerne une étude statistique, analyse de la variance ANOVA des résultats expérimentaux à l'aide d'un logiciel Design-Expert. Le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface (**Ra**), l'effort tangentiel de coupe (**Fz**), la puissance de coupe (**Pc**), le débit de copeaux (**MRR**) et l'effort spécifique de coupe (**Kc**), puis déduire des modèles mathématiques qui permettent la prédiction de ces paramètres et pourront être exploités pour une éventuelle étude d'optimisation.

Le quatrième chapitre est réservé à l'optimisation qui est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées. Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de trois méthodes d'optimisation multi-objectifs, afin de réaliser un compromis entre divers objectifs contradictoires. En effet, les méthodes (MORRA, PIV) ainsi que la méthode de désirabilité DF ont été exploitées pour rechercher une combinaison des éléments du régime de coupe permettant à la fois d'obtenir une rugosité, un effort de coupe tangentiel, une puissance de coupe et un effort spécifique minimal d'autre part d'augmenter la productivité en maximisant le taux d'enlèvement de la matière, il paraît qu'il n'est pas évident de choisir ou de déterminer un régime de coupe satisfaisant tous ces objectifs à la fois.

En fin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus, pour clôturer cette étude.

Chapitre I
Etude
Bibliographique

I- Généralité sur la coupe des métaux

I-1 Introduction

La coupe des métaux est un procédé d'usinage d'origine ancienne, a connu une expansion considérable grâce à la mécanisation croissante des ateliers de fabrication.

Il est crucial de distinguer clairement la coupe des métaux de l'étude de l'usinabilité, deux domaines étroitement liés. La coupe des métaux vise à analyser l'impact de divers facteurs sur le comportement des matériaux lors du processus de coupe, tels que: la vitesse de coupe, la profondeur de passe, l'avance et l'arrosage, en utilisant une gamme variée d'outils composés de matériaux tels que l'acier fondu, l'acier rapide, le carbure, la céramique et le nitrure de bore cubique (CBN), avec différentes géométries.

En revanche, l'étude de l'usinabilité se concentre sur la comparaison du comportement de différentes matières, toutes usinées selon une méthode d'usinage similaire, avec des conditions de coupe constantes, utilisant les mêmes outils en termes de composition chimique, de traitement thermique, de forme et d'affûtage.

I-1-1 L'aptitude à l'usinage

L'usinage est exclusivement une opération de mise en forme par outil coupant avec formation de copeaux. Il a pour but de fabriquer des pièces avec une précision macro-géométrique et micro-géométrique imposée.

Lorsque le prix de revient augmente, cela met en évidence deux critères initiaux qui caractérisent l'aptitude à l'usinage, à savoir :

- La précision des côtes macro et micro-géométrique
- Le prix de revient ;
- L'état de surface ;
- Les efforts de coupe ;
- La durée de vie du copeau ;
- La morphologie des copeaux ;

Le paramètre d'usinabilité est souvent considéré comme un accessoire. mais, il s'est avéré lors de leur apparition étaient difficilement usinés que les aciers inoxydables, en particulier les nuances austénitiques, le développement de l'industrie du décolage apporte un éclairage particulier sur cette notion d'usinabilité. Les progrès technologiques dans le

domaine de l'industrie mécanique (tour à commande numérique, centre d'usinage, outil de coupe en carbure revêtu, céramique) permettant le lancement en fabrication de pièces usinées à la moyenne et grande série.

Pour ce faire, les professionnels de l'usinage ont à cœur de choisir les machines adoptées à leur fabrication, les outils les plus performants, les matériaux les moins difficiles à l'usinage apparaissent bien comme facture essentiel [1].

I-1-2 Usinage des métaux durs

Lors de l'usinage des métaux une fine couche de métal, le copeau est arraché à la pièce à usiner par le biais d'un outil. L'opération d'usinage impose des exigences très élevées au matériau constituant l'outil de coupe. Il s'agit en particulier, de la capacité à résister à des contraintes mécaniques élevées. La durée de vie des outils dépend de la capacité du matériau de coupe à résister aux différentes charges mécaniques et thermiques auxquelles est soumis.

Le développement général des technologies en conception de produit, contraint à utiliser des matériaux de plus en plus performants (aciers à haute résistance, titane ou alliages réfractaires base nickel). Les matériaux à hautes caractéristiques mécaniques ont un point commun. Ils sont difficiles à usiner.

En tournage, des solutions à ces difficultés sont recherchées par l'exploitation du développement des outils en céramique et en nitrure de bore cubique (CBN) [2].

I-2 Tournage dur et leurs avantages

I-2-1 Définition

Le tournage dur, c'est-à-dire le tournage des métaux durs se définit comme une opération de tournage sur des aciers traités et durcis thermiquement, d'une dureté de 40HRC à 60HRC.

Le tournage dur est un procédé récent dans son utilisation, il se présente comme une alternative à rectification conventionnelle souvent longue et coûteuse lors de l'usinage de pièce de précision [3].

I-2-2 Avantages

Le principal avantage démontré et ou attendu du tournage dur réside dans le fait qu'il est possible de réaliser sur la même machine et donc avec une seule prise de pièce, des usinages dont la tolérance dimensionnelle atteint 0,01 mm, de ce fait, tout en améliorant la qualité de la géométrie et en éliminant les imprécisions engendrées par le montage et démontage des pièces, il est possible de réaliser des gains de productivité importants. D'autre part, du point de vue énergétique le tournage dur présente un meilleur rendement, il engendre 5 fois moins d'énergie qu'en rectification, donc moins de calories de plus, en tournage dur, les calories sont évacuées par les copeaux. Les matériaux durs sont caractérisés par un pouvoir abrasif élevé, une grande dureté, une faible ductilité. Pour usiner les matériaux, on fait appel à des outils coupants de qualité, les plaquettes utilisées en tournage dur sont des plaquettes, carbures, des céramiques.

I-3 Matériaux utilisés en tournage dur

I-3-1 Introduction

Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe, en plus des conditions d'utilisation de l'outil. Celles-ci sont fonction des propriétés du matériau qui constitue l'arête de coupe, il s'agit également de la ténacité et de la résistance à l'abrasion.

D'une manière générale, on dit qu'un matériau est tenace, si les contraintes admissibles (contraintes statiques et dynamique) qui provoquent la rupture sont élevées, on parle également de la ténacité du matériau et leur contrainte de rupture en flexion et leur résilience [4].

I-3-2 Acier rapides

On les nomme aussi (aciers à coupe rapides). En effet, ces aciers comportent généralement une quantité importante de tungstène (w), de cobalt (k) et de chrome (Cr), additionnée à l'alliage de base (aciers comportant 0.8 à 1% de chrome), ils sont trempés entre 1250 et 1300°C en subissant un revenu à une température de l'ordre de 600°C. Par suite, il peut travailler à une température de 500°C sans que l'arête tranchante soit

détériorée, ce qui à permis leur utilisation à des vitesses de coupe impossibles à pratiquer auparavant.

La métallurgie des poudres permet d'obtenir, grâce à un changement du processus de solidification et une vitesse de refroidissement élevée, des particules exemptes de ségrégation avec des réseaux de carbures très fins. Ces nouvelles améliorations de fabrication on permet d'obtenir des performances de coupe plus meilleures.

Pour diminuer le prix de revient de l'outil, seule la partie active est en acier rapide qui est rapportée sur le corps en acier ordinaire, par soudage par résistance ou sous forme de plaquette soudé-brasée [5].

I-3-3 Différentes familles des aciers rapides

Le mérite de l'invention des aciers rapides revient aux américains Taylor et White 1903. Il est important de souligner que chaque nuance d'acier rapide, il existe une limite à la qua chaque nuance d'acier rapide, il existe une limite à la qualification à la matière (par exemple, un outil de fraisage en nuance HS6- 5-2 ne pourra pas usiner dans des condition d'usinage industriellement viables un acier de dureté supérieure à 350 HB).

Malheureusement, il est très difficile d'établir des règles par défaut car ces valeurs dépendent du type d'outil (foret, fraise, alésoir, etc.), entre autres; seuls les essais couple outil/matière peuvent mettre en évidence ces limites.

a. Aciers rapides au tungstène

Le tungstène est le premier élément d'addition principal utilisé, l'acier de base HS18-0-1 a été longtemps le plus employé. C'est en 1912 que l'allemand Becker proposa - l'addition de 5% de cobalt et créa la nuance HS18-1-1-5. Le cobalt est également utilisé pour stabiliser les carbures à chaud. La dureté à chaud s'entrouvre donc améliorée et par conséquent la capacité à supporter les vitesses de coupe plus élevées.

b. Aciers rapides au molybdène

Bien que découverts vers 1910, les aciers rapides au molybdène n'ont connu leur développement qu'à partir de 1945, en raison de la pénurie de tungstène durant la Seconde Guerre Mondiale, aussi l'acier rapide au molybdène présente plusieurs avantages, ce qui nous permet de les prendre en considération.

- Le molybdène est plus abondant que le tungstène dans la nature que le tungstène;
- Le molybdène permet de doubler la capacité de coupe de l'acier (1% de molybdène remplace 2% de tungstène).
- Le molybdène permet de diminuer le prix de revient.

c. Aciers rapides sur carburés

Sont des aciers dont la teneur en carbone est supérieure à 1%, permettent d'obtenir des duretés allant jusqu'à 70HRC soit environ 1035HV. La dureté des matériaux usinables a par suite été reculée. C'est ainsi que l'on peut usiner des aciers dont la dureté maximale 550HV ou 52HRC.

d. Aciers rapides resulfurés

Le soufre contenu dans les aciers de base est également considéré comme impureté au tant que sa teneur ne dépasse jamais 0.03%. Ce dernier par fois ajouté dans certaines nuances d'aciers rapides pour en améliorer l'aptitude à l'usinage et au meulage. Il s'agit en général d'une addition comprise entre 0.10 et 0.20%. Cette resulfuration permet d'améliorer considérablement l'état de surface après l'usinage, des outils. On utilise ces aciers pour la fabrication d'outils à profil constant, pour les quels un bon état de surface est exigé sans rectification (molettes de tournage, fraises mères à denture rectifiée, etc.).

e. Aciers rapides élaborés par métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres représente également un choix essentiel pour la fabrication des petites pièces. En général, on utilise cette technologie pour obtenir des compositions chimiques et des finesses de structure non réalisable par les méthodes d'élaboration conventionnelles (il s'agit des différents procédés d'usinage par enlèvement de copeau).

f. Aciers rapides revêtus

Il s'agit également de recouvrir l'acier rapide d'une fine couche de TIN ou TICN en utilisant l'un des deux procédés suivant :

1. Procédé **CVD** (chemical vapor deposition)
2. Procédé **PVD** (physical vapor deposition)
3. Procédé **MTVD** (medium température vapor deposition) [4].

I-3-4 Carbures métalliques

Carbures métalliques sont des exigences de l'industrie mécanique, de plus en plus attachées à l'augmentation de la productivité des machines-outils et à la réduction du coût de la main d'œuvre, qui ont contribué le plus aux progrès des métaux durs.

Ces alliages sont fabriqués selon les techniques de métallurgie des poudres << Frittage >>, ce procédé est traitement à chaud se situant au-dessus du point de fusion de la phase liquide du liant, mais en dessous du point de fusion des carbures.

Les carbures sont fabriqués sous forme de plaquettes de différentes géométries et de différentes nuances P, K et M.

Les premiers alliages frittés qui sont des carbures de tungstène et du cobalt (WC - CO) étaient efficaces pour l'usinage de la fonte et des métaux non ferreux, mais sa durée en souffrait lors de l'usinage de l'acier à cause du frottement relevé entre le copeau et le carbure.

Plusieurs années plus tard, ils ont trouvé qu'on pourrait diminuer le frottement en ajoutant du TANTAL - (Ta) ou du TITANE (Ti) à la composition (WC - CO) cette nuance a résolu le problème de l'usinage des aciers et des métaux à copeau long et peut travailler à des vitesses de coupe allant jusqu'à 150 m/min.

Le récent développement est sans doute d'utilisation des revêtements d'une ou plusieurs couches sur un substrat dur, cela a fait preuve d'une augmentation de la durée de vie des outils coupants et par conséquent une diminution du coût de production par pièce.

Divers procédés de revêtement ont été utilisés, il s'agit également de l'apparition. D'un nouveau type de matériau de coupe, c'est le carbure revêtu constitué par une plaquette en carbure métallique revêtue par un film mince (3 à 10 μm) d'un matériau plus dur [4].

I-3-5 Procédés de revêtement

Le traitement thermique est un ensemble de procédés industriels qui consistent à modifier les propriétés physiques, mécaniques et/ou chimiques de matériaux, principalement des aciers et des alliages métalliques.

PVD: dépôt physique en phase vapeur (physical vapor deposition). On vaporise, sous vide, le matériau de revêtement entre 150 et 500 °C (en utilisant un courant à haute

tension). La vapeur produite se condense en un film de 2 à 5 μ m sur les surfaces à revêtir (substrat). Procédé surtout utilisé pour les aciers rapides (HSS).

CVD: dépôt chimique en phase vapeur (chemical vapor deposition). C'est un procédé de revêtement par réaction chimique à température élevée de 900 à 1100 °C sous une atmosphère inerte, réductrice ou recarburante, un gaz transporteur amène une vapeur réactive appropriée dans un réacteur où se trouvent les pièces, l'épaisseur de 2 à 12 μ m dépend du matériau de revêtement, de la pression, du temps et de la température [6].

I-3-6 Cermets

Cermet est un terme formé de deux syllabes: cer vient de céramique et met de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures et carbonitrures) liés par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, TiCN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et CO.

La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains améliorent la ténacité et résistance aux chocs thermiques, aussi les cermets présentent en outre une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bon état de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Aussi les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige [4].

I-3-7 Céramiques

On entend par << céramique >> des matériaux de coupe non métalliques, inorganiques qui, contrairement aux carbures, n'ont pas de phase liante. Au début elles étaient très pures à base d'oxyde d'alumine (Al₂O₃), cette matière présente une très haute résistance et une excellente stabilité chimique jusqu'aux températures avoisinant son point de fusion (2050). Il se trouve que ces caractéristiques étaient déjà supérieures à celle des aciers rapides et des carbures métalliques, surtout quant à la dureté à chaud, la

résistance à l'usure et la stabilité chimique, cette nuance de céramique rendait possible l'usinage des métaux ferreux à des vitesses qui, pour la première fois, excèdent la limite de 1000 m/min.

Pour améliorer le caractère cassant de la céramique, d'autres composants tels que le carbure de titane (TiC), le carbure de tungstène (WC) ou des carbures associés avec des nitrures ont été ajoutés. Ces céramiques dites "mixtes" se distinguent par une haute densité et une stabilité des arêtes de coupe, leur application principale est dans le tournage fin des aciers trempés et des fontes blanches.

Autres céramiques sont apparus récemment dites "céramiques non oxydées a base de nitrure de silicium (Si₃N₄), en comparaison avec la céramiques oxydée et mixte, se distinguent par leur forte résistance aux chocs thermiques ainsi qu'à la flexion, la dureté et la résistance à la flexion sont toutefois inférieures.

Le (Si₃N₄) est destiné essentiellement au tournage ébauche des fontes grises et des alliages à haute teneur en Nickel et en silicium. Cependant, cette nuance est inappropriée pour usiner des fontes fortement alliées ou des aciers et aussi pour des travaux de finition à cause de son usure rapide sur la surface de dépouille. Les développements dans ce domaine ne sont pas encore terminés, il est possible de revêtir le (Si₃N₄) d'une couche en alumine (Al₂O₃), en carbure de titane (TiC) et/ou en nitrure de titane (TiN), cette technique améliore la résistance à l'usure surtout par diffusion, permettent ainsi des vitesses élevées se situant entre (800 et 1200) m/min.

Les céramique de coupe sont fabriquées selon les techniques de la métallurgie des poudres par pressage a froid et frittage, par pressage a chaud et frittage simultanés ou par procédé HIP (pressage isostatique à chaud), actuellement l'usinage avec les céramiques de coupe sont limité aux aciers cémentés et trempés à une dureté égale à 65HRC, permettent ainsi une rugosité de 0.4µm (Ra=0.4µm).

Pour diminuer le prix dévient de l'outil, seule la plaquette en céramique est rapportée mécaniquement sur le corps de l'outil [5].

I-3-8 Classification des céramiques pour outils de coupe

a. Oxydes

Principalement Al_2O_3 , éventuellement allié à d'autres oxydes comme ZrO_2 . Céramique à grain extrêmement fin, pressée froid. Une très haute résistance à l'usure, à la rupture, aussi aux hautes températures. Utilisation universelle pour l'usinage des fontes grises, pour les aciers de cémentation, aciers alliés, non alliés, aciers traités et aciers rapides.

b. Carboxydes

Généralement Al_2O_3 allié à des carbures métalliques comme TiC . Céramique mixte pressée à chaud, haute résistance à l'usure et à la rupture, usinage des aciers traités, des fontes grises. Opération de finition en tournage, également finition des fontes en fraisage, aciers traités et cémentés.

c. Nitrures

Principalement Si_3N_4 éventuellement allié à Al_2O_3 , TiC . Grande résistance à la rupture, excellente résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Tournage et fraisage ébauches des fontes grises. Vitesse de coupe haute et moyenne, accepte les coupes interrompues avec arrosage.

d. Composites

Actuellement Al_2O_3 avec whiskers de SiC plus éventuellement du ZrO_2 , ou bien Si_3N_4 avec whiskers de SiC . Le renforcement des matériaux de coupe en céramique à base d'oxyde d'Aluminium au moyen d'une dispersion de fibres en carbure de silicium (SiC) permet d'augmenter considérablement la ténacité du matériau final [6].

I-3-9 Le Nitrure de bore cubique

Le nitrure de bore cubique (CBN) est certainement le matériau le plus résistant après le diamant, sa dureté est de l'ordre de 6000HV10, et sa résistance à la flexion est égale à 570Mpa. Ce matériau dispose d'une haute dureté à chaud, une résistance accrue à l'usure et une stabilité chimique aux températures élevées, il résiste à l'oxydation jusqu'à 1000°C et ne réagit pas avec le fer. En conséquence, il peut être utilisé dans l'usinage de l'acier trempé, des fontes dures et des alliages de nickel et de cobalt très grande vitesse

coupe, de plus il est pratiquement insensible aux chocs tout en maintenant une ténacité favorable.

Pour diminuer le prix de revient de l'outil, le nitrure de bore cubique est serti sur le corps de l'outil, aussi le CBN nous donne également deux formes:

- **Nitrure de bore a structure cubique (CBN)** qui la forme la plus dure, a une même structure que le diamant;
- **Le (CBN) a une structure cubique** est très difficile à obtenir les techniques sont voisines a celles utilisées pour la synthèse du diamant. Et les cristaux obtenus sont très petits (< 0.05 mm, plutôt vers $50\mu\text{m}$), utilisables pour la réalisation des meules.
- **Nitrure de bore à structure hexagonale** de faible dureté à une même structure que le graphite.

I-3-10 Le Diamant

❖ Diamant Naturel

Le diamant naturel est issu de la transformation, il y a 100 millions d'années, du carbone sous très haute pression (environ 2000°C). Sa haute dureté et sa faible réactivité chimique expliquent qu'il ait pu se conserver à travers les siècles. On le trouve dans les zones géographiques d'Afrique du sud, Russie, etc.

Les propriétés remarquables du diamant naturel en tant qu'outil de coupe sont les suivantes :

- c'est le plus dur des matériaux connus;
- sa résistance a la compression est très supérieure a celles des autres matériaux;
- son coefficient de dilatation thermique ($3.1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$), plus faible que celui des autres matériaux d'outils, lui donne une excellente résistance aux chocs thermiques;
- sa conductivité thermique, la plus élevée de tous les matériaux 600 à $2000 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ facilite le dégagement de la chaleur de la zone de coupe si bien qu'un diamant qui vient d'usiner paraît froid au toucher;

- mais comme contraire le d miant naturel présente une faible résilience, ce qui le rend très sensible aux chocs mécaniques, il s'agit également d'une haute dureté liée a une structure atomique particulière, cette dernière n'est pas la même dans tous les plans, il se clive suivant quatre direction, ce qui rend le matériau fragile

❖ **Diamant Synthétique**

Le diamant synthétique est également fabriqué à partir du graphite à des températures et pression très élevées. Les cristaux obtenus étaient petits (<0.5mm) et servaient à la fabrication des meules en diamant synthétique.

Pour obtenir des cristaux plus grands, les durées de production sont excessives (>50h de synthèse pour créer un mono cristal de 1 carat), le diamant naturel est alors plus rentable. Aussi préfère-t-on réaliser des compacts poly cristallins (PCD) en effectuant un frittage a haute pression et 1400 C pour agglomérer, sous forme de plaque, les gains de diamant, la partie diamantée est parfois liée, lors du frittage, a un support a base de carbure de tungstène. Contrairement au diamant naturel, le PCD une structure isotrope, il ne présente ni plan de clivage ni variation de dureté. Celle-ci est un peu inférieure à la valeur maximale de celle du diamant naturel [4].

1-4 phénomènes agissant sur le processus de coupe

I-4-1 Usure des outils de coupe

- **Introduction**

Dans la concurrence du marché, la production industrielle doit perfectionner ses méthodes d'usinage en travaillant soit avec production maximale ou avec un coût minimal, il arrive parfois que ce dernier passe au second plan et que seule la production maximale importe, on choisira alors une vitesse de coupe V_c supérieure plus la V_c croît plus les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent le frottement et les pressions élevées qui s'exercent à l'interface copeau outil provoquent l'usure de l'outil [7].

I-4-2 Généralités

La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure l'importance de cette usure a une influence directe sur:

- La qualité de la surface obtenue:
- La tenue de l'outil dans le temps;
- La puissance nécessaire à la coupe.

C'est en fonction de ce degré d'usure que l'on conditionnera la tenue d'un outil. Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage.

I-4-3 Phénomènes provoquant l'usure

D'une façon générale, l'usure de deux matériaux en contact est due à des phénomènes d'ordre mécanique et physico-chimique, ces phénomènes dépendent essentiellement de la température de coupe et selon King (Professeur à l'Université Technique d'Aix la Chapelle) ils se répartissent comme suit:

A. Phénomènes mécaniques

* **Usure par abrasion mécanique** L'usure par abrasion est essentiellement due au frottement copeau-outil et au frottement outil-pièce.

* **Usure par adhésion** Cette usure est aussi une usure par arrachement mécanique de particules d'outils mais après formation d'une microsoudure entre le copeau et l'outil. Les microsoudures sont favorisés par les pressions locales importantes entre les aspérités du copeau et de l'outil entraînant des déformations importantes et une élévation de chaleur provoquant la soudure, l'usure par adhésion diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'à une vitesse critique au-delà de laquelle se poursuit une usure par diffusion.

* **Usure par déformation plastique** L'usure par déformation est due en fait à l'affaissement de l'arête de coupe sous l'action des efforts de coupe et ceci d'autant plus rapidement que la température à proximité du bec de l'outil augmente.

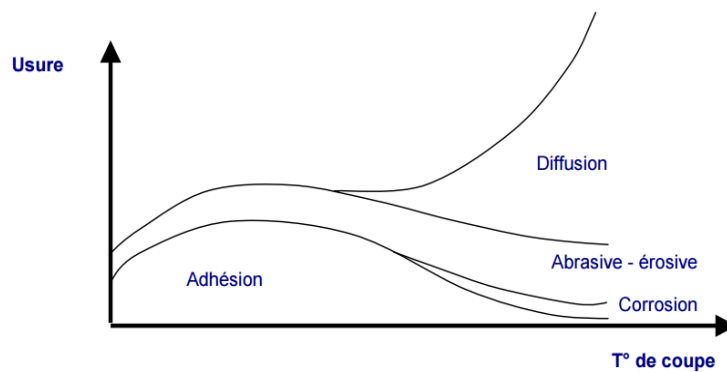


Figure I.1: Causes d'usure.

B. Phénomènes physico-chimiques

* Usure par diffusion

Ce type d'usure essentiellement due à la température apparaît lors de l'emploi de vitesse de coupe trop élevées. Des éléments de l'outil sont extraits par le copeau par quantités très petites et aussi de la diffusion des constituants de la matière usinée dans l'outil. Cette usure dépend de la solubilité du matériau de l'outil dans le métal usiné et de la température d'interface atteinte en cours d'usinage.

***Usure par corrosion:** Ce type d'usure est due à la corrosion provoquée par le contact des deux matériaux constituant la pièce et l'outil et particulièrement sous l'effet des lubrifiants.

I-4-4 Les différentes formes d'usure des outils

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent essentiellement de la nature de l'outil du matériau usiné des conditions de coupe et du type d'usinage. Nous pouvons rencontrer les formes suivantes :

- **Usure en dépouille ou usure frontale**

Elle est due au frottement de la pièce sur la face en dépouille de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête de largeur moyenne VB du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce et la précision dimensionnelle.

- **Usure en cratère**

Elle est caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil par frottement du copeau. Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante, la forme du cratère est définie par sa profondeur KT , le rapport de caractérisation KT/KM ou l'angle de caractérisation γ_c , KT ne provoque pas de détérioration de la surface usinée, mais affaiblit la résistance mécanique de l'outil.

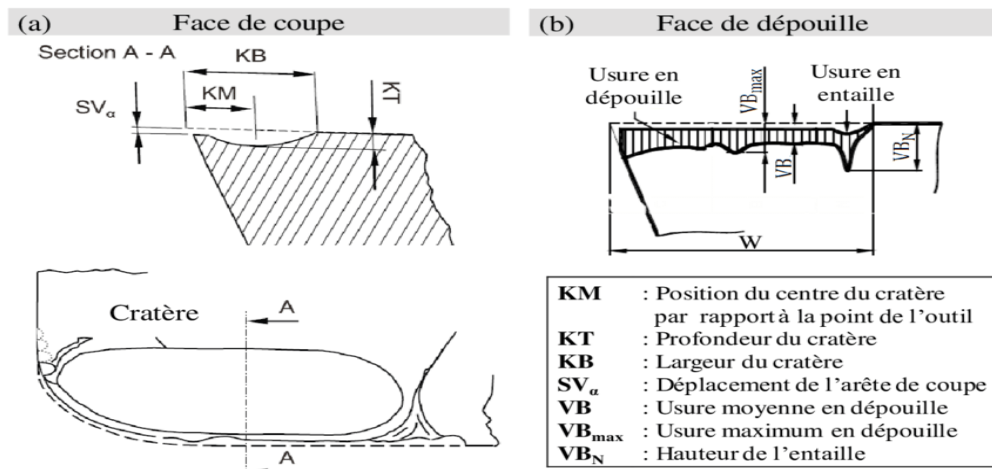


Figure I.2: Différentes formes d'usure des outils.

- **Déformation plastique**

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe. Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface.

- **Ecaillage (Ebréchures)**

Des arrachements peuvent se produire sur l'arête de l'outil, surtout dans le cas de chocs à des discontinuités de la pièce ou par des vibrations figure (I.3).

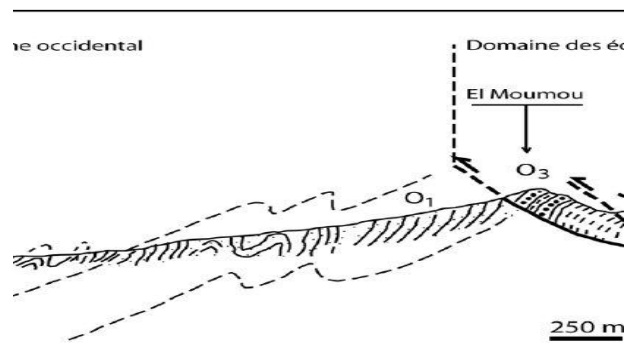


Figure I.3: Ecaillages.

- **Fissuration d'arête**

Sous des conditions de coupe sévère avec des températures de coupe élevées, on observe l'apparition des fissures à l'arête de coupe. Les chocs mécaniques et thermiques provoquent des contraintes qui entraînent la fissuration figure (I.4).

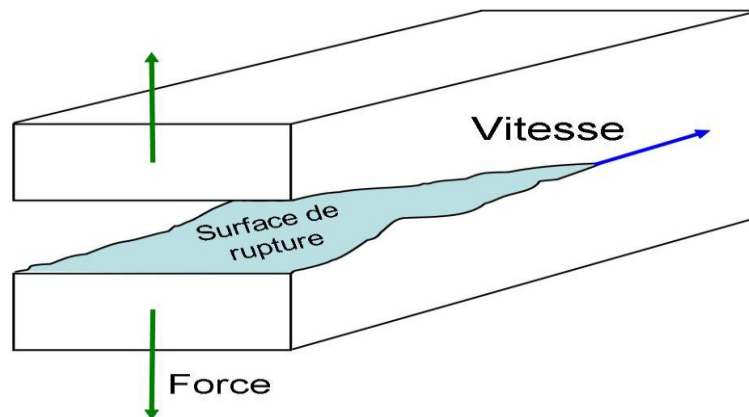


Figure I.4: Fissuration.

- **Entaille**

Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use, provoque un effondrement à cet endroit. L'entaille est caractérisée par la valeur (VN) sur la surface en dépouille. Elle est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure figure (I.5).

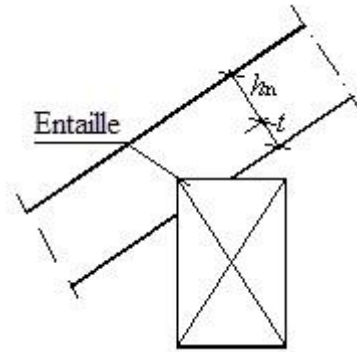


Figure I.5: Entaille.

- **Usure par arête rapportée au copeau adhérent**

Ce type d'usure est dû à une température trop basse dans la zone de coupe, ce qui provoque un mauvais écoulement du copeau et celui-ci se soude à l'arête. Ce copeau adhérent entraîne un accroissement de la puissance nécessaire à la coupe et une détérioration rapide de l'état de surface de la pièce figure (I.6).

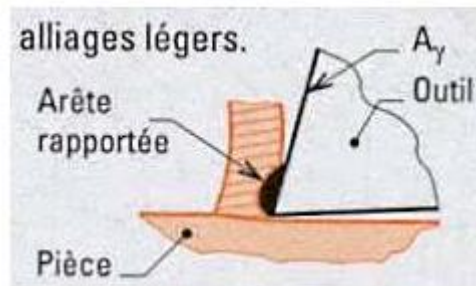


Figure I.6: Arête rapportée.

I-4-5 Etude des différents paramètres influant sur l'usure

- **Influence de la vitesse de coupe**

La vitesse de coupe a une grande influence sur l'usure, c'est le paramètre le plus important car la température à l'interface pièce / outil augmente avec la vitesse, du fait que plusieurs phénomènes sont liés à la température.

- **Influence de la section du copeau**

Plus la section du copeau est grande, plus les efforts nécessaires à la coupe sont élevés et plus la température au voisinage de l'arête tranchant augmente. Des essais de

coupe ont montré que l'avance avait une action prépondérante par rapport à la profondeur de passe.

- **Influence du matériau usiné**

Son influence sur l'usure dépend de: ses propriétés physiques (conductibilité thermique); ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe); ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition).

- **Influence du matériau de l'outil**

Son influence sur l'usure dépend principalement de ses propriétés physico-chimiques et de la tenue des caractéristiques mécaniques en fonction de la température.

- **Influence de la lubrification**

Son influence qui est assez nette sur la diminution de la température et le frottement du copeau sur l'outil, l'est aussi sur l'usure.

I-4-6 Influence de l'usure sur le coût d'usinage

Le coût de l'usinage comprend:

- Le coût d'utilisation de la machine (salaire, amortissement)
- Le coût de l'outillage (réaffûtages, amortissement)
- Les frais fixes (matière manutention, réparation machine-outil) Quand la vitesse de coupe augmente, la durée de l'usinage diminue mais la durée de coupe de l'outil diminue (usure plus rapide). En conclusion le coût d'utilisation de la machine diminue tandis que le coût de l'outillage par pièce augmente.

En fonction de la vitesse de coupe (V_c) le coût de l'usinage suit une courbe dont l'allure générale prend la forme de la figure (I.7).

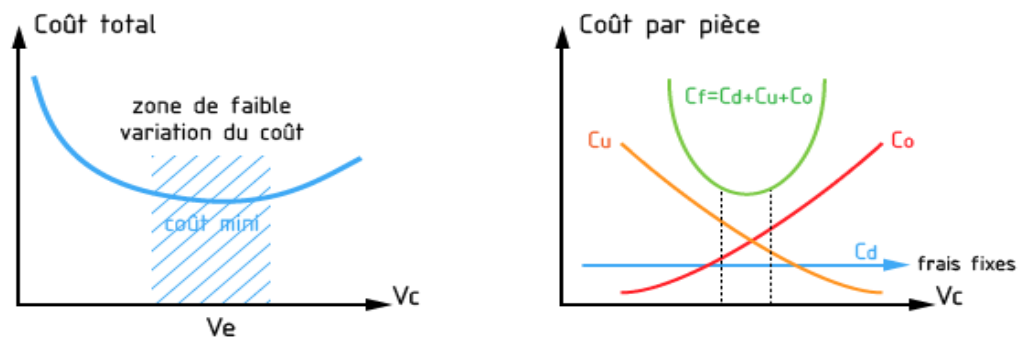


Figure I.7: Influence de l'usure sur le coût d'usinage.

Cette courbe montre qu'il existe une vitesse de coupe correspondant au coût minimal de l'usinage. La recherche de la vitesse de coupe optimale doit tenir compte simultanément de deux impératifs :

- Diminuer la durée de l'usinage;
- Réduire des frais d'outillage.

I-4-7 Relation entre l'usure et le temps

L'usure en dépouille et en cratère des outils présente une évolution caractéristique en fonction du temps de coupe. Cette usure se développe en trois phases:

- Zone n°1: Usure rapide, phase d'adaptation de la plaquette;
- Zone n°2: Evolution lente et régulière, phase de stabilisation;
- Zone n°3: Usure accéléré conduisant à l'effondrement de l'outil figure (I-8).

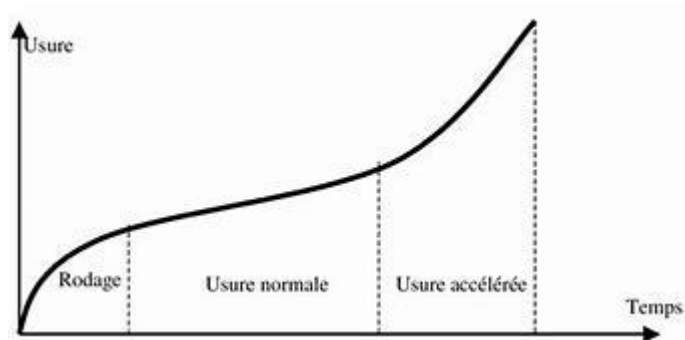


Figure I-8: Evolution de l'usure en fonction du temps.

I-4-8 Critères d'usure

Les critères actuellement utilisés pour les outils carbures, céramiques et notamment ceux, recommandés par les normes ISO, sont basés sur l'évolution de l'usure frontale ou de caractérisation. Ces critères sont pour toutes conditions de coupe, en usinage d'acier ou fonte.

- Usure frontale $VB = 0,3$ mm si elle est régulière, sinon prendre $VB = 0,6$ mm.
- Profondeur de cratère $KT = 0,15$ mm

Critères complémentaires: si on désire dans certains cas avoir recours à des critères complémentaires, il est recommandé d'employer:

$$KT = (0,06 + 0,3f) \text{ mm (f: avance mm/tr)}$$

I-4-9 Mesure de l'usure

*Usure en dépouille

On mesure V_B à l'aide d'un microscope d'atelier à faible grossissement cette opération s'effectue dans des bonnes conditions d'éclairage. Quand V_B n'est pas constant, on détermine une valeur moyenne.

* Usure en cratère

Sa mesure s'effectue dans le cas courant à l'aide d'un palpeur conique fin sur comparateur ou par relevé profil métrique à l'aide d'appareils comparables à ceux utilisés pour la rugosité figure (I-9).

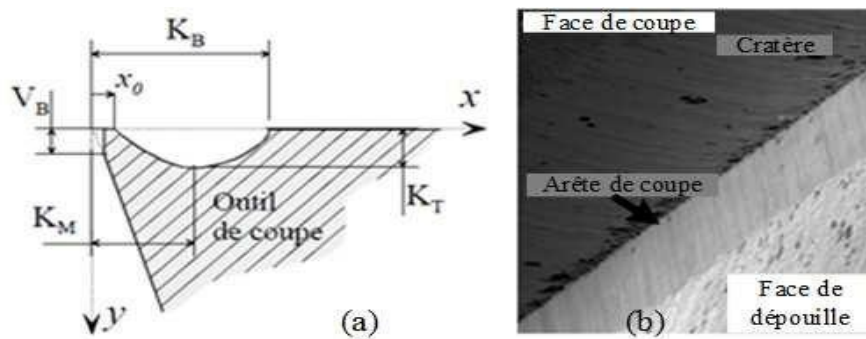


Figure I-9: Mesure de la profondeur de cratère.

I-5 Efforts de coupe

La connaissance des valeurs des efforts de coupe acceptable par la pointe de l'outil lors de l'usinage d'aciers durcis et précieuse. Des forces de coupe trop élevées à l'interaction entre l'outil et la pièce peuvent engendrer des effondrements brutaux d'arête et (ou) des flexions néfastes des deux parties qui sont à l'origine de variation sur la pièce.

C'est notamment le cas pendant l'usinage de pièces déformables telles que des pièces longues. Le suivi de l'évolution des forces de coupe pendant l'usinage permet également d'observer indirectement toutes les autres contraintes rencontrées, il s'agit de l'état de surface, la précision dimensionnelle et l'usure,... etc.

L'effort de coupe caractérise l'action exercée par l'outil sur la pièce; sa valeur, souvent élevée pour permettre la formation du copeau, nécessite un dimensionnement correct du montage porte - pièce et de l'outil

I-5-2 Illustration schématique

On considère également un élément de longueur de l'arête tranchante dl (outil élémentaire de longueur dl), qui provoque l'enlèvement de copeau à partir d'une surface de contact dS . Au point M la résultante du torseur d'action mécanique de l'outil sur la pièce sera:

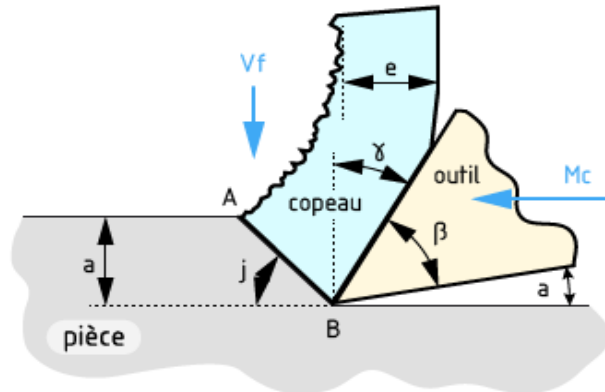


Figure I-10: Enlèvement de matière.

Dans un repère cartésien, la résultante \vec{dF} se compose de trois forces élémentaires: dF_{ap} , dF_f , dF_{Vc} .

I-5-3 éléments de réduction sur toute la surface

A partir de tout ce qui est donné dans le paragraphe précédent, on parle également de l'élément : $dF = dF_{ap} + dF_f + dF_{Vc}$. Où

- F_{ap} : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe
- F_f : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial (en tournage), cette dernière composante joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- F_{Vc} : c'est une composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de pénétration ou de refoulement, elle a la plus grande valeur en tournage dur [8].

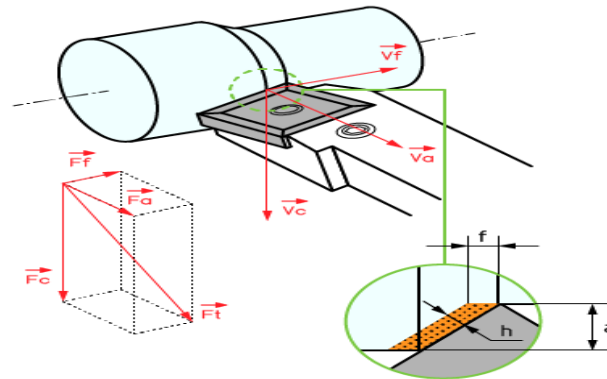


Figure I-11: Composantes de l'effort de coupe.

I-5-4 Formules empiriques

La détermination des trois composantes illustrées précédemment se fait expérimentalement en utilisant les trois formules empiriques suivantes:

$$\left. \begin{aligned}
 F_{v_c} &= C_1 \cdot a_p^{x_1} \cdot f^{y_1} \cdot V_c^{n_1} \cdot K_{v_c} \\
 F_{a_p} &= C_2 \cdot a_p^{x_2} \cdot f^{y_2} \cdot V_c^{n_2} \cdot K_f \\
 F_f &= C_3 \cdot a_p^{x_3} \cdot f^{y_3} \cdot V_c^{n_3} \cdot K_{a_p} \quad [9].
 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (I-1)$$

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

Les coefficients K_{v_c} , K_f , K_{a_p} se sont des coefficients correctifs relatifs aux conditions d'usinage concrète.

Les coefficients $X_{1, 2, 3}$, $Y_{1, 2, 3}$, $n_{1, 2, 3}$ se sont des exposants qui caractérisent le degré d'influence des paramètres V_c , f , a_p

I-5-5 Effort de coupe spécifique

Au cours de l'usinage l'outil exerce des forces de pression réparties sur toute la surface du copeau en contact avec l'outil, la pression moyenne (effort par unité de surface) est alors obtenue en divisant la valeur de l'effort résultant par la valeur de l'aire

de l'interface outil copeau. Si la mesure de la résultante se fait facilement à l'aide d'appareils de mesure dynamométriques, il n'en est pas de même pour la détermination de l'aire de l'interface outil - copeau; aussi la pression du contact en un point ne peut être obtenue avec précision. Pour remédier à cette difficulté, on admet que la composante (F_c) exerce une pression également répartie sur toute la surface S du métal découpé. Cette pression conventionnelle est appelée effort de coupe spécifique

$$F_{cs} = F_v / S \dots\dots\dots(I-2)$$

où : $S = a_p \cdot f$

L'effort de coupe spécifique est l'un des facteurs important qui caractérise l'usinabilité du matériau usiné, et sa connaissance permet d'évaluer la valeur de la force de coupe nécessaire en fonction de la section du copeau choisi

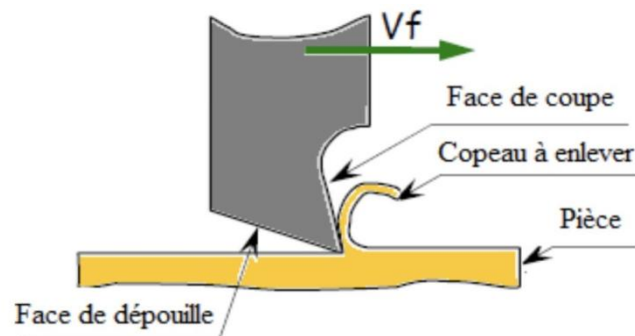


Figure I-12: Effort de coupe spécifique.

I-5-6 Mesure des efforts de coupe

De nombreux dynamomètres de coupe ont été construits depuis le début des études sur la coupe sur la base de principe: piézoélectrique, pneumatique, inductance mutuelle, extenso métriques. Dans ces appareils, ou recherche systématiquement à augmenter au maximum la sensibilité de mesure tout en limitant le plus possible la flexibilité qui perturbe les conditions de coupe, peut être une cause de variation et fausse donc les résultats de mesure.

Depuis quelques temps on se sert surtout de la technique des jauges extenso métriques qui fournissent un signal électrique permettant une lecture directe ou un enregistrement si on désire des valeurs instantanées des efforts [10].

I-5-7 Efforts spécifique, puissance de coupe et MRR

❖ Efforts spécifiques de coupe K_c

L'effort spécifique de coupe est la force de coupe par unité de surface de coupe, ce coefficient varie en fonction de :

- matériau usiné;
- l'épaisseur de coupe,
- l'angle de coupe (diminution de 1,5% environ pour augmentation de 1°).
- L'usure de l'outil (30 à 50%, outil frottement usé)

$$F_c = K_c \cdot S \dots\dots\dots (I-3)$$

F_c : Effort tangentiel de coupe en Newton (N)

K_c : Pression spécifique de coupe en N/mm²

S : Section du copeau en mm²

$$S = f \cdot a_p$$

f : Avance en millimètre par tour (mm/tr)

a_p : profondeur de passe en mm

$$F_c = K_c \cdot f \cdot a_p; \quad K_a \Rightarrow K_c = F_c / f \quad [11]. \dots\dots\dots (I-4)$$

❖ Puissance nécessaire à la coupe

Elle est dominée par la relation:

$$P_c = F_c \cdot V_c \dots\dots\dots (I-5)$$

V_c : Vitesse de coupe (m/s)

F_c : Force de coupe (N)

où

Mais d'après l'expression de la force de coupe, on peut utiliser la formule suivante:

$$P_c = \frac{V_c \times K_c \times S}{60 \times 10^3} \dots\dots\dots (I-6)$$

Où:

P_c : Puissance de coupe exprimée en (KW)

K_c : Effort spécifique de coupe (N/mm²)

S : Section du copeau enlevée (m²)

La puissance absorbée par la machine se déduit de la puissance de coupe en fonction du rendement n :

$$P = P_c / n \quad [12] \dots\dots\dots (I-7)$$

❖ **Taux d'enlèvement de la matière**

$$MRR = V_c \times a_p \times f \quad (cm^3/min) \dots\dots\dots (I-8)$$

I-6 Critères de la rugosité

La création d'une surface usinée dépend à la fois de la forme désirée et des marques laissées par l'outil au contact de la pièce pendant leur mouvement relatif. Imaginons une coupe locale de la surface usinée, effectuée perpendiculairement aux traces d'usinage

• **Rugosité total R_t**

R_t représente l'écart total entre le point le plus haute et le pointe le plus bas de profile.

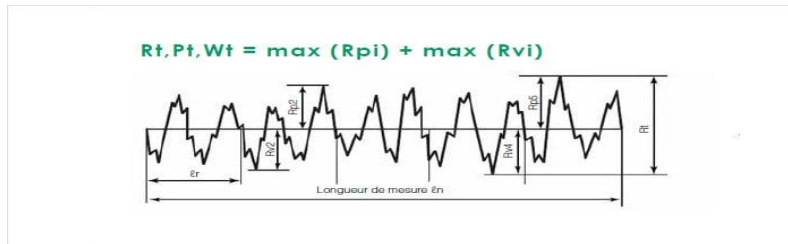


Figure I.13: Critère de la rugosité R_t .

• **Rugosité R_z**

R_z représente la distance moyenne entre les sommets les plus élevés et le cinq creux les plus bas

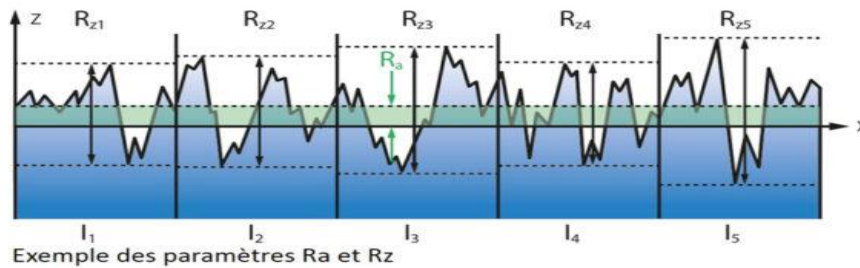


Figure I.14: Critère de la rugosité R_z .

- **Rugosité Ra**

Ra représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) Par rapport à OX.

Ra : est calculée sur une longueur d'évaluation.

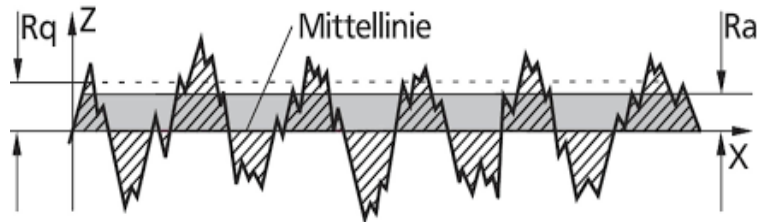


Figure I.15: Critère de la rugosité Ra.

- **Rugosité maximum Rmax**

- Rmax est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité
- Rmax étant prise sur une saillie et un creux consécutif.

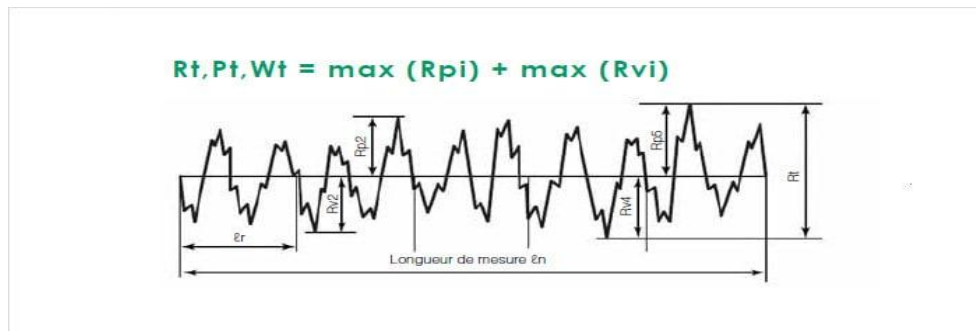


Figure I.16: Critère de la rugosité Rmax.

- **Rugosité Rp :**

Rp est la hauteur maximum de saillie de rugosité. Rp est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

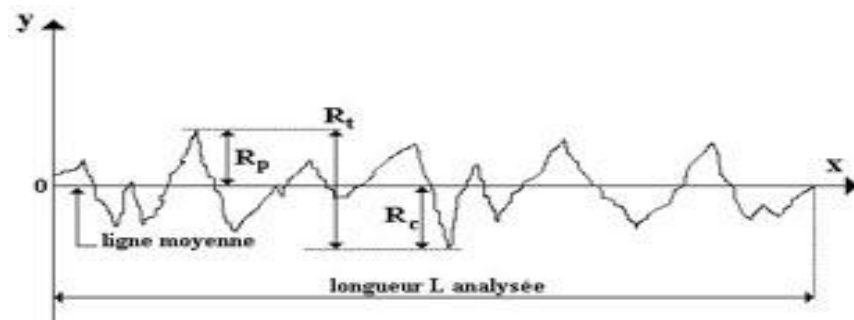


Figure I.17: Critère de la rugosité Rp.

I-6-1 Evaluation de la rugosité

En théorie, la connaissance de l'avance (f) et de la géométrie de l'outil permet de calculer la profondeur maximale des sillons laissés sur la surface usinée. Par exemple, en tournage, la rugosité totale (Rt) de la surface obtenue peut être déterminée à partir d'un profil géométrique idéal [11], [13].

$$Rt_{(théorique)} \approx \frac{f^2}{8r_\epsilon} \dots\dots\dots(I-9)$$

Lorsque l'avance est faible, le phénomène de copeau minimum se produit, entraînant un rejet de la coupe de l'outil et la formation d'un copeau de faible épaisseur. Dans ce cas, la rugosité totale réelle (Rt) est généralement supérieure à la valeur théorique (Rt théorique). En revanche, pour des avances élevées, les irrégularités résultant de la coupe deviennent moins significatives par rapport aux sillons théoriques, conduisant à une rugosité totale réelle (Rt) qui se rapproche de la valeur théorique (Rt théorique). Une approximation largement utilisée pour évaluer la rugosité moyenne arithmétique (Ra) est présentée sous forme d'équation (I.9) [14].

$$Ra_{(théorique)} \approx \frac{f^2}{32r_\epsilon} \dots\dots\dots(I-10)$$

En réalisant diverses expériences, il est envisageable d'établir empiriquement des relations mathématiques entre la rugosité résultant de l'usinage et les paramètres classiques de coupe [11].

Ces relations prennent généralement la forme suivante :

$$Ra = K1.r_\epsilon HB .ap^{K4} f^{K5} f^{K6} \dots\dots\dots(I-11)$$

Avec

Les Ki des coefficients déterminés pour les conditions expérimentales choisies. En général, $K_4 \approx 0$ et pour un matériau et un outil bien spécifié, il vient que:

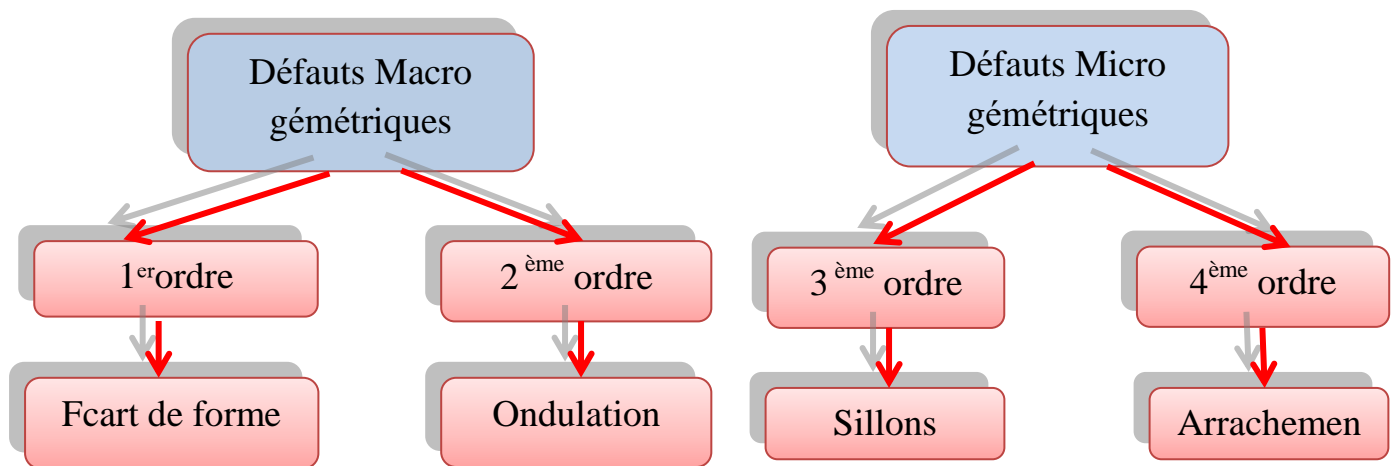
$$Ra = C f^{k5} \dots\dots\dots(I-12)$$

Où: C et une constante et $K_g > 0$ et $K_6 < 0$.

I-6-2 Défauts de l'état de surface

La capacité d'une surface à remplir une fonction spécifique dépend de diverses conditions, notamment des caractéristiques de son état de surface. Les défauts de surface jouent un rôle crucial dans la capacité d'une pièce mécanique à assurer sa fonction prévue. Ces défauts peuvent être de nature géométrique ou physico-chimique, mais nous

nous concentrerons ici uniquement sur les défauts géométriques, qui sont généralement classés selon quatre paramètres conventionnels.



I-7 Etat de l'art

O. KEBLOUTI¹, L. BOULANOUARI¹ et R. BOUZIANE¹ M. W. AZIZI¹ [15].

Ils ont réalisé une étude sur l'influence des revêtements d'outils, des conditions de coupe sur l'usure des outils et la rugosité de surface lors du tournage à sec de l'acier AISI 1030. Les expériences ont été réalisées en utilisant un plan d'expérience de Taguchi L16, utilisant deux types de plaquette en carbure revêtus : un revêtement PVD à deux couches (TiAlN/TiN) et un revêtement CVD à trois couches (Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN).

L'étude a révélé que :

- Les outils à triple revêtement (Ti (C,N)+Al₂O₃+TiN) présente une résistance à l'usure considérablement plus élevée (plus de 5 fois) que les outils à double revêtement (TiAlN/TiN). Ceci est attribué à la couche d'Al₂O₃ agissant comme une barrière de diffusion thermique protégeant le substrat.
- Le principal mécanisme d'usure était l'usure de flanc.
- La vitesse de coupe est le paramètre le plus significatif sur la durée de vie de l'outil, suivie par l'avance figure (I-18 et I-19).

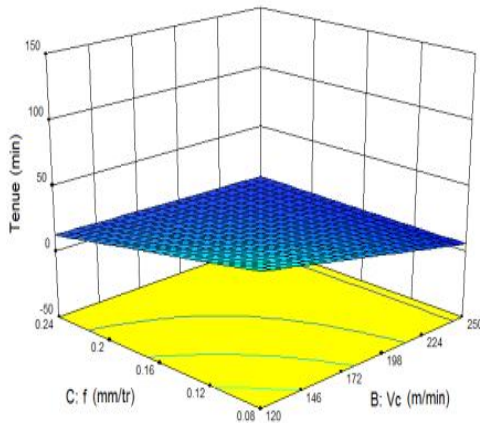


Figure I.18: Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la tenue à l'usure de l'outil de coupe.

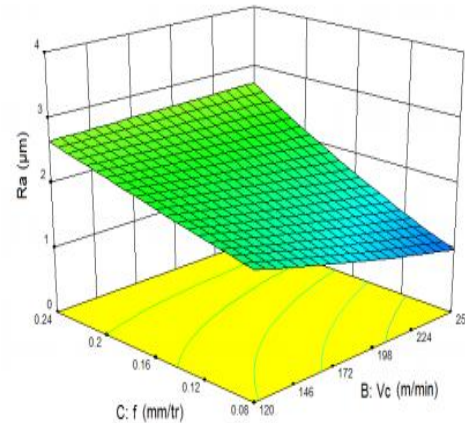


Figure I.19: Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la qualité de la surface usinée (Ra).

- les vitesses de coupe plus élevées entraînent des surfaces plus lisses.
- Une augmentation de l'avance a conduit à une augmentation de la rugosité de surface.
- L'étude a utilisé l'ANOVA pour analyser l'influence de chaque facteur et de leurs interactions sur la durée de vie de l'outil et la rugosité de surface. Les résultats mettent en évidence l'importance d'optimiser le choix des revêtements et les paramètres de coupe pour obtenir à la fois une durée de vie de l'outil plus longue et une meilleure qualité de surface.

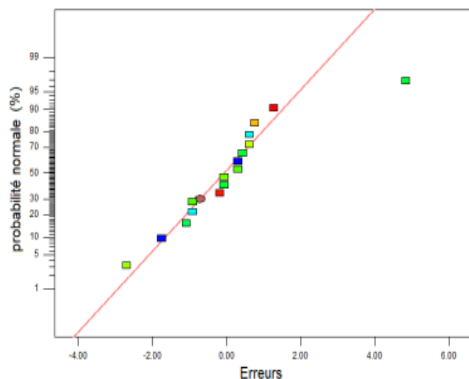


Figure I.20: Diagramme de probabilités normales résiduelles pour la rugosité Ra.

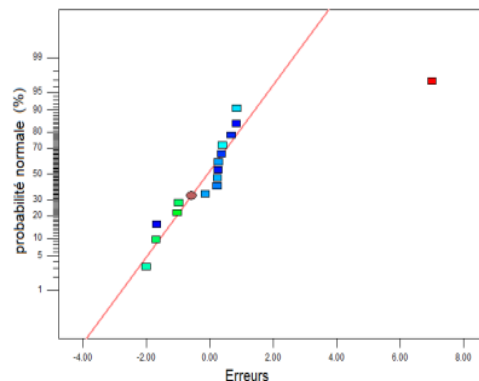


Figure I.21: Diagramme de normales résiduelles pour la tenue T.

Pradeep K Singh, Pardeep Saini et Kanish Kumar [16].

Ils ont mené une étude sur l'optimisation des paramètres d'usinage lors du fraisage en bout de l'acier AISI H11 sur une machine CNC. Les auteurs se concentrent sur l'influence de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur deux réponses tels que: la rugosité de surface (SR) et le taux d'enlèvement de matière (MRR).

Méthodologie:

Ils ont utilisé une approche d'analyse relationnelle grise de Taguchi (TGRA) suivant un plan orthogonal d'expériences L27 à trois paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) selon trois niveaux, tableau (I.1).

Tableau I.1: Plan de conception complet et résultats expérimentaux (1).

Expt. No.	A: Cutting speed (m/min)	B: Feed rate (mm/ tooth)	C: Depth of cut (mm)	Surface roughness (μm)	Metal removal rate (mm^3/sec)
1	15	0.12	0.2	4.83	03.12
2	15	0.12	0.4	4.11	06.24
3	15	0.12	0.6	4.84	09.36
4	15	0.20	0.2	5.70	05.20
5	15	0.20	0.4	4.94	10.40
6	15	0.20	0.6	6.58	15.60
7	15	0.30	0.2	6.84	07.80
8	15	0.30	0.4	6.89	15.60
9	15	0.30	0.6	5.61	23.40
10	35	0.12	0.2	2.29	07.28
11	35	0.12	0.4	1.97	14.56
12	35	0.12	0.6	1.88	21.84
13	35	0.20	0.2	1.75	12.13
14	35	0.20	0.4	2.22	24.26
15	35	0.20	0.6	2.61	36.40
16	35	0.30	0.2	2.58	18.20
17	35	0.30	0.4	3.16	36.40
18	35	0.30	0.6	3.17	54.60
19	55	0.12	0.2	2.36	11.44
20	55	0.12	0.4	2.36	22.88
21	55	0.12	0.6	2.33	34.32
22	55	0.20	0.2	2.48	19.06
23	55	0.20	0.4	2.47	38.13
24	55	0.20	0.6	2.20	57.20
25	55	0.30	0.2	2.90	28.60
26	55	0.30	0.4	2.22	57.20
27	55	0.30	0.6	2.28	85.80

Les résultats expérimentales sont ensuite analysées pour déterminer les effets principaux et les interactions des paramètres de contrôle sur les réponses.

Résultats:

L'analyse montre que l'avance est le paramètre le plus significatif suivi par la vitesse de coupe et en dernier lieu par de la profondeur de passe sur la rugosité de surface. Les auteurs déterminent la combinaison optimale de paramètres pour minimiser la SR et maximiser le MRR. Ils ont fait un test de confirmation pour valide l'efficacité de la méthode TGRA pour optimiser les réponses multiples.

Conclusion et perspectives:

L'étude démontre l'utilité de la méthode TGRA pour optimiser les paramètres d'usinage dans le fraisage en bout de l'acier AISI H11. Les auteurs suggèrent d'étendre l'étude à d'autres variables de réponse (durée de vie de l'outil, force de coupe), ainsi qu'à l'influence d'autres paramètres d'usinage tels que l'application de liquide de refroidissement et la géométrie de l'outil.

Mohanad Kadhim Mejbil, Mohanad Muzahem Khalaf, Ayad Mahmood Kwad [17].

Ils ont effectué une étude comparative de deux procédés d'usinage : le fraisage assisté par ultrasons (UVAM) et le fraisage conventionnel (CM) de l'acier à outils trempé AISI H11 pour obtenir un meilleur état de surface. Les auteurs ont mené des expériences en faisant varier la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe tout en appliquant une vibration ultrasonore axiale à l'outil de coupe, tableau (I-2) et figure (I-22).

Tableau I.2: Plan de conception complet et résultats expérimentaux (2).

Run No.	Speed (rpm)	Feed (mm/min.)	Depth of Cut (μm)	Conventional Milling	Milling with Axial Ultrasonic Vibrations		Ra (μm)
				Ra (μm)	Frequency (kHz)	Amplitude (μm)	
1	450	20	15	4.35	20	1	2.54
2	450	20	30	5.44	20	1	2.96
3	450	20	45	5.96	20	1	3.34
4	450	40	15	4.68	20	1	2.94
5	450	40	30	5.67	20	1	3.44
6	450	40	45	6.24	20	1	3.84
7	450	60	15	4.87	20	1	3.42
8	450	60	30	5.83	20	1	3.84
9	450	60	45	6.54	20	1	4.34
10	850	20	15	3.11	20	1	1.54
11	850	20	30	4.22	20	1	1.87
12	850	20	45	5.13	20	1	2.13
13	850	40	15	3.25	20	1	1.94
14	850	40	30	4.54	20	1	2.21
15	850	40	45	5.44	20	1	2.57
16	850	60	15	3.66	20	1	2.13
17	850	60	30	4.68	20	1	2.58
18	850	60	45	5.67	20	1	2.93
19	1450	20	15	1.32	20	1	0.14
20	1450	20	30	1.98	20	1	0.42
21	1450	20	45	2.75	20	1	1.12
22	1450	40	15	1.45	20	1	0.36
23	1450	40	30	2.12	20	1	0.68
24	1450	40	45	2.98	20	1	1.54
25	1450	60	15	1.56	20	1	0.65
26	1450	60	30	2.32	20	1	0.95
27	1450	60	45	3.15	20	1	1.97

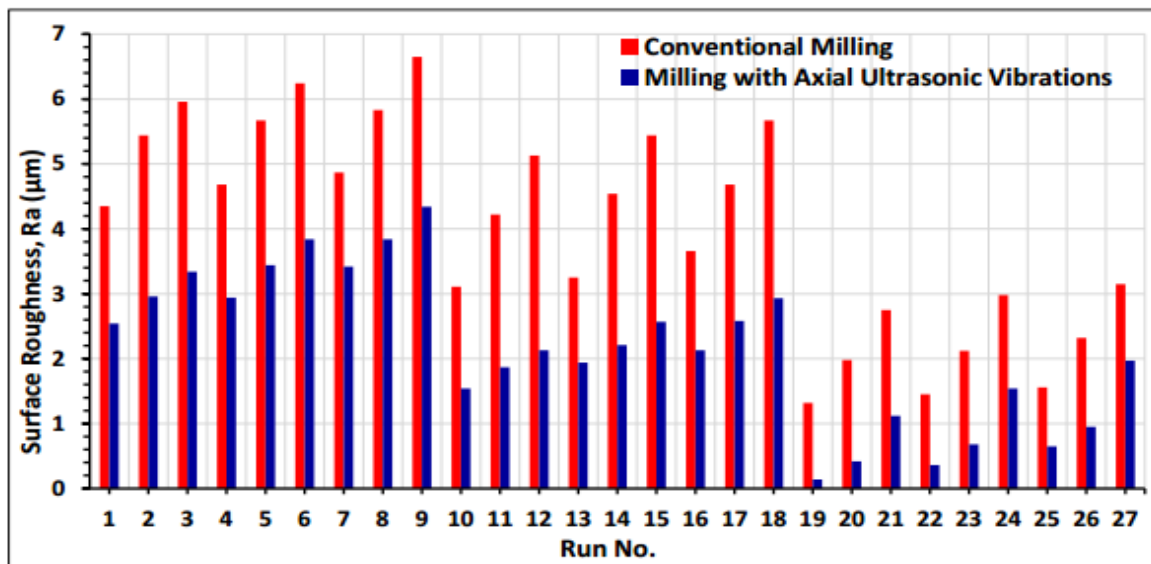


Figure I.22: Résultats de rugosité de surface pour les deux procédés d'usinage.

Les résultats ont montré une amélioration significative de la rugosité de surface (Ra) avec l'UVAM, atteignant une réduction allant jusqu'à 89,7% par rapport au CM dans les mêmes conditions. Cette amélioration est attribuée à l'action de martelage créée par la vibration ultrasonore, qui réduit la hauteur des pics sur la surface usinée.

De plus, l'analyse microscopique a révélé une texture de surface plus uniforme et plus homogène obtenue avec l'UVAM. L'étude a également confirmé une dureté sous la surface accrue dans les échantillons UVAM, indiquant un potentiel d'amélioration de la résistance à l'usure.

Les auteurs concluent que l'UVAM représente une alternative prometteuse au CM pour l'usinage de l'acier à outils trempé AISI H11, en particulier pour les applications exigeant une qualité de surface supérieure comme la fabrication de moules et de matrices.

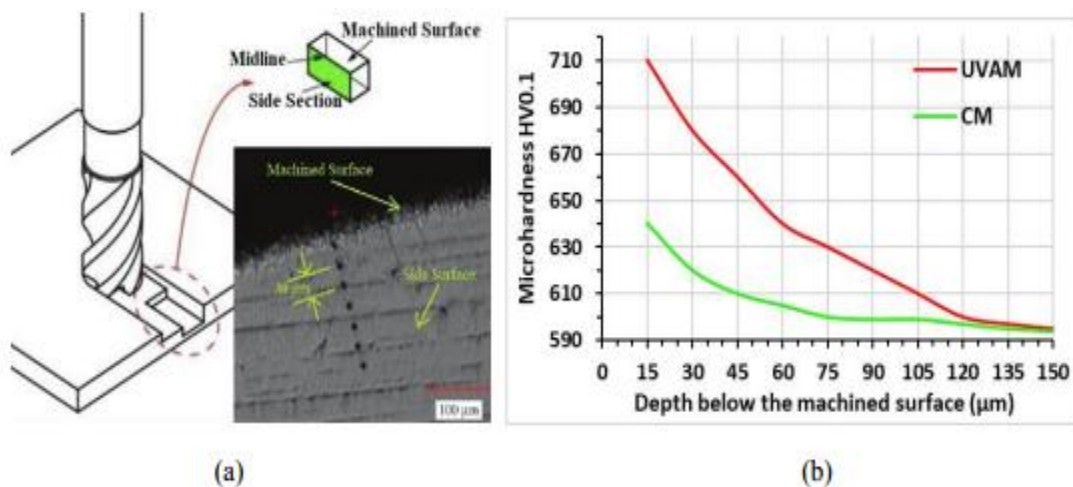


Figure I.23: Distribution de la micro-dureté pour l'exécution N° 19 sous la surface usinée dans UVAM et CM.

S. Benlahmidi¹ & H. Aouici^{1,2} & F. Boutaghane⁴ & A. Khellaf² & B. Fnides^{2,3} & MA. Yallese² [18].

Ils ont concentrés sur l'optimisation des paramètres de coupe lors du tournage d'acier AISI H11 trempé à l'aide d'un outil en CBN7020, suivant un plan de Box-Behnken. L'objectif est évaluer par méthodologie des surfaces de réponse (RSM) l'impact de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe et la dureté de la pièce sur la

rugosité de surface, la pression de coupe, la puissance de coupe et la durée de vie de l'outil. Ils ont trouvé que la rugosité de surface est principalement affectée par l'avance et la dureté de la pièce, tandis que la pression de coupe est significativement influencée par la dureté de la pièce, la profondeur de coupe et l'interaction entre la vitesse de coupe et la profondeur de coupe. La puissance de coupe est le plus fortement corrélée à la vitesse de coupe. La durée de vie de l'outil est principalement déterminée par la vitesse de coupe, suivie par l'avance.

Les chercheurs ont identifié un régime optimal qui minimise la rugosité de surface, la pression de coupe et la puissance de coupe tout en maximisant la durée de vie de l'outil (I-24).

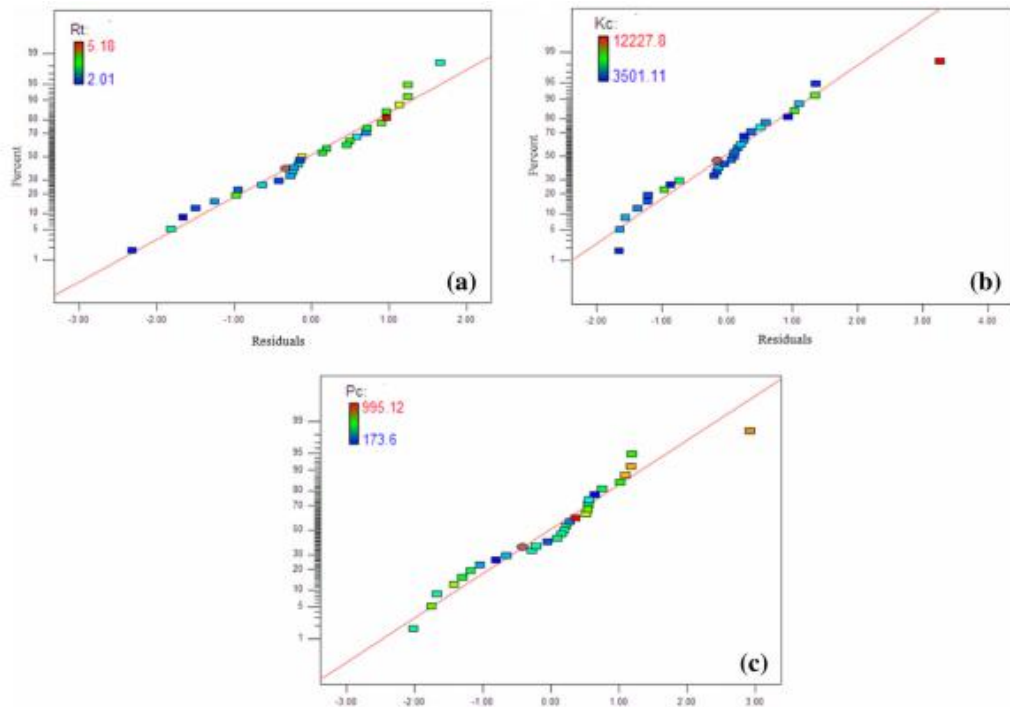


Figure I.24: Probabilité normale des résidus pour les données a R_t , K_c et P_c .

De plus, une équation de durée de vie de l'outil de Taylor a été développée pour prédire la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

L'étude conclut que l'optimisation des paramètres de coupe peut améliorer considérablement l'efficacité du tournage, réduire les coûts et améliorer la qualité de surface lors du tournage d'acier AISI H11 trempé à l'aide d'un outil en CBN7020.

Le choix de ce régime optimal correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.920). Il est à noter que la désirabilité globale est calculée en fonction des désirabilités de chacun des paramètres, présentés dans la figure (I.25).

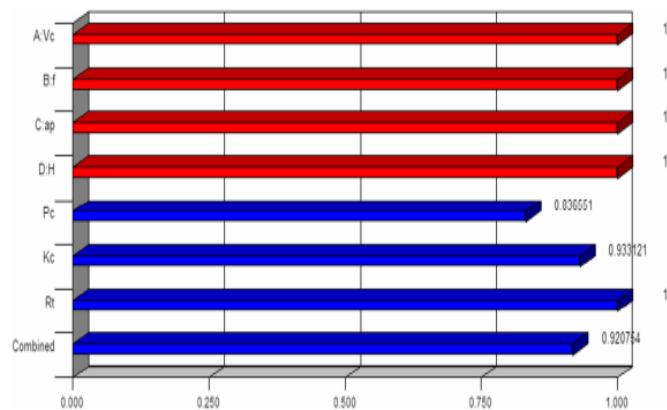


Figure I.25: Graphique à barres 3D de la désirabilité

R Suresh Kumar1, S Dharani Kumar2 and S Rajkumar3 [19].

Une étude a été menée pour améliorer la réponse multiple de l'acier AISI H11 lors du fraisage à CNC. L'objectif est de trouver la meilleure combinaison de paramètres d'usinage (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) afin de minimiser la rugosité de surface (R_a) et de maximiser le taux d'enlèvement de matière (MRR). Les auteurs utilisent la méthodologie de conception robuste de Taguchi et l'analyse des relations grises (GRA) pour analyser les données expérimentales.

La recherche a révélé que la vitesse de coupe est le paramètre le plus significatif affectant la rugosité de surface, l'augmentation de la vitesse de coupe conduisant des surfaces plus lisses. Cependant, la vitesse de coupe et l'avance sont les paramètres les plus significatifs sur le taux d'enlèvement de la matière. Les paramètres optimaux pour les conditions d'usinage ont été déterminés, en mettant l'accent sur l'équilibre souhaité entre

la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière. Les résultats ont été validés par des essais de confirmation, démontrant l'efficacité du processus d'optimisation.

L'étude conclut que la combinaison de Taguchi et de GRA fournit une approche robuste pour l'optimisation multi-réponse pour les opérations d'usinage. Les conclusions sont précieuses pour améliorer l'efficacité et la qualité des procédés industriels impliquant l'usinage de l'acier AISI H11.

L'analyse des résultats de l'optimisation multi-objectif montre que les deux facteurs sont pris en compte avec des poids différents : Ra (rugosité de surface) et MRR (taux de enlèvement de matière).

Principales conclusions:

- Un MRR plus élevé nécessite un GRG plus élevé (probablement une mesure de performance).
- La combinaison des paramètres Cs1 Fr3 Dc3 permet d'atteindre le MRR le plus élevé.
- Cs (vitesse de coupe) est le facteur le plus influent sur le GRG, suivi par Fr (avance par dent) et en dernier lieu la (profondeur de coupe) Dc.
- Le GRG pour Cs diminue du niveau 1 au niveau 2 puis augmente à un nouveau niveau 3.

Cela suggère que Cs joue un rôle plus complexe que les autres facteurs et domine probablement le résultat pour obtenir des performances d'usinage optimales, tableau (I.15) et figure (I.26).

Tablea I.15: GRG calculé pour la condition 2.

Exp	L27			Grey relational coefficient		Grade for condition 2	Grade order
	C _s	F _r	D _c	Ra	MRR		
	1	1	1	1	0.65858		
2	1	1	2	0.57013	0.38734	0.53357	9
3	1	1	3	0.65989	0.42790	0.61350	7
4	1	2	1	0.78326	0.37151	0.70092	5
5	1	2	2	0.67315	0.43986	0.62650	6
6	1	2	3	0.93704	0.49291	0.84822	3
7	1	3	1	0.98948	0.40866	0.87332	2
8	1	3	2	1	0.49291	0.89859	1
9	1	3	3	0.76927	0.56051	0.72753	4
10	2	1	1	0.38350	0.40182	0.38717	24
11	2	1	2	0.35371	0.48301	0.37958	26
12	2	1	3	0.34537	0.54773	0.38584	25
13	2	2	1	0.33333	0.45860	0.35839	27
14	2	2	2	0.37695	0.56745	0.41505	22
15	2	2	3	0.41379	0.65901	0.46284	14
16	2	3	1	0.41092	0.51663	0.43206	19
17	2	3	2	0.46781	0.65902	0.50606	11
18	2	3	3	0.46883	0.78570	0.53220	10
19	3	1	1	0.39008	0.45129	0.40232	23
20	3	1	2	0.39008	0.55623	0.42332	21
21	3	1	3	0.38726	0.64394	0.43860	18
22	3	2	1	0.40141	0.52414	0.42596	20
23	3	2	2	0.40046	0.67140	0.45465	17
24	3	2	3	0.37509	0.80342	0.46075	16
25	3	3	1	0.44191	0.60133	0.47380	13
26	3	3	2	0.37696	0.80342	0.46225	15
27	3	3	3	0.38257	1	0.50605	12

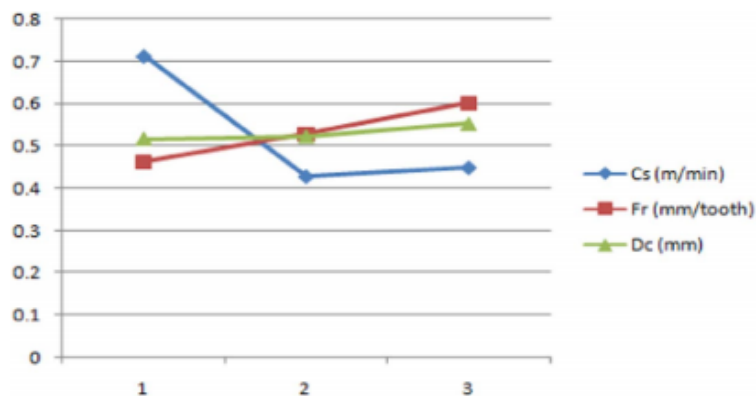


Figure I.26: Notes relationnelles grises pour $W_1 = 0,8$ et $W_2 = 0,2$.

I-8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases scientifiques nécessaires à la compréhension de cette étude. Il comporte une partie de rappel sur la théorie de coupe, les métaux de coupe et les paramètres intervenant dans le processus de coupe. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée à l'état de l'art sur l'usinage de l'acier AISI H11.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mise en œuvre pour une approche expérimentale méthodique afin de caractériser le comportement du couple (outil- matière).

Ce chapitre va consister en une présentation du matériel qui sert à l'étude des évolutions de la rugosité de surfaces obtenue, de l'effort de coupe, la pression spécifique, la puissance de coupe et le taux d'enlèvement de la matière.

Les expériences ont été effectuées au laboratoire de Mécanique et Structure (LMS), département de Génie Mécanique (Université 8 mai 1945 Guelma).

II-2 Matériels utilisés

II-2-1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle fabriqué par la société Tchèque «TOS-TERENCIE»; modèle **SN 40** de puissance sur la broche égale à 6,6 KW (Figure.II.1) les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suite (45;63;90;125;180;250 ;355;500 ;710;1000;1400 ;2000) tr/min. Les avances disponibles sont: 0.08; 0.11; 0.14 ; 0,16; 0.2; 0.24; 0.28 ; ; 6.4(mm/tr).



Figure II.1: tour à charioter et à fileter modèle SN 40.

II-2-2 Matériau utilisé pour les essais d'usinage

L'acier AISI H11 (selon la norme AFNOR) Z38CDV5 c'est un acier à outils fortement allié au chrome molybdène et vanadium traité à 53 HRC, pour travail à

chaud, trempant à l'air, bonne résistance à l'usure à chaud et aux chocs thermiques. Très bonne pénétration de trempe, apte à la nitruration sous vide.

- **Domaines d'application**

Outils de presse, matrices d'estampage, poinçons de frappe à froid, lames de cisailles à chaud, frettes, empreintes, vis et fourreaux d'extrusion pour les matières plastiques.

Tableau II.1: Composition chimique en %.

AFNOR	NF EN 10027-1/11-92	AISI	CNOMO E 01.17.221.N/10-02		
Z38 CDV 5	X 38 Cr Mo V 5	H11	X 38 Cr Mo V 5		
C	Cr	Mo	Mn	Si	V
0,34 – 0,42	4,80 - 5,50	1,20 – 1,50	0,20 – 0,50	0,80 – 1,20	0,30 - 0,50

Tableau II.2: Désignation de l'acier utilisé

Rm N/mm ²	Re N/mm ²	A %	Dureté HB Recuit
440 / 700	410	22 min	229 max

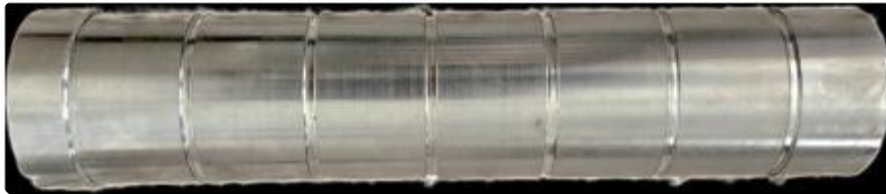


Figure II.2: Eprouvette utilisée pour les essais.

Pour les essais réalisés, nous avons utilisé l'éprouvette de diamètre $\varnothing = 50$ mm et de longueur $L = 300$ mm comporte des paliers de 40 mm de longueur figure (II.2).

II-3 Plaquette et porte outil

II-3-1 Plaquette de coupe utilisé

L'outil de coupe utilisé est une plaquette en céramique Wiper non revêtue amovible CC650WG de la marque (Sandvik coromant) de forme rhombique figure (II.3) avec une fixation par trou central et comporte les caractéristiques suivantes :

Tableau II.3: Caractéristiques de l'outil de coupe utilisé.

Caractéristiques	valeurs
Diamètre du cercle inscrit	4.76 mm
Matière	Céramique
Modèle brise-copeaux	WG
Longueur arête	12 mm
Nombre d'arêtes de coupe	4
Angle de dégagement majeur	0 degré
Rayon de coin	1.2 mm
Epaisseur plaquette	3.97 mm
Poids	10g

Géométrie Wiper : les plaquettes céramiques s'utilisent notamment pour la finition des surfaces selon des spécifications très élevées. Sandvik Corament a adapté sa technologie Wiper mondialement réputé aux plaquettes en matériaux de haute technologie afin d'améliorer considérablement la productivité de ce type d'opération.

- **WG :** géométrie Wiper pour usinage générale convient bien pour la finition des fontes grise autorise des avances élevées.



Figure II.3: Plaquette de coupe.

Tableau II.4: Informations relatives à la plaquette de coupe utilisée.

Matériau de coupe	Désignation	Marque	Géométrie	Composition
Céramique Wiper	CC650WG	Sandvik	CNGA 12 04 12 T01020	70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC) (Al ₂ O ₃ +TiC)

Descriptif des plaquettes CNGA 12 04 12 T01020 :

➤ **C :** Indique la forme de la plaquette (ici rhombique) ;

- **N** : Valeur de l'angle de dépouille ;
- **G**: Tolérances dimensionnelles;
- **A**: Type de fixation de la plaquette sur le corps d'outil;
- **12**: Indication de la longueur d'arête de coupe;
- **04**: Indication de l'épaisseur de la plaquette;
- **12**: Rayon du bec de l'outil ici égal à 1.2 mm;
- **010**: la largeur du chanfrein;
- **20**: l'angle du chanfrein;

II-3-2 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil sur lequel est fixée la plaquette mécaniquement par un trou central figure (II.4). La géométrie du porte-outil est donnée sur le tableau (II.5). Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

Tableau II.5: Caractéristiques géométriques du porte- outil utilisé.

Désignation	χ_r°	α	γ°	λ°	Section (mm) ²
CSBNR25x25M12	75	6	-6	-6	25x25



Figure II.4: Porte outil utilisé.

II-4 Appareillages de mesures utilisées

II-4-1 Mesure de la rugosité

Une surface, quel que soit son procédé de fabrication, n'est pas une surface parfaitement lisse selon la méthode d'usinage et les outils utilisés, mais aussi selon le matériau, elle présente de nombreuses irrégularités, micro-géométriques ou macro-géométriques.

- ❖ La rugosité d'une surface donnée peut être déterminée par la mesure d'un certain nombre de paramètres. On peut citer notamment, parmi les plus utilisés: Ra, Rz et Rt.
- ❖ Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne pas sont suffisantes pour distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un rugosimètre.

Pour la mesure de critère de la rugosité (Ra) nous avons utilisé un rugosimètre Mitutoyo SJ-201 2D, Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur) avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de la plage est de 4mm avec une longueur de base de 0.8mm (0.8×5). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à $40\mu\text{m}$) pour (Ra) figure (II.5) .



Figure II.5: Rugosimètre Mitutoyo SJ-210 (2D).

II-4-2 Mesure de l'effort de coupe

On a utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257 B) figure (II.6) pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, il est parmi les équipements les plus fiables pour la

mesure des trois composantes de l'effort de coupe, il comporte plusieurs éléments auxquels on cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel DYNOWARE et enfin une imprimante pour tracer les courbes.



Figure II.6: Plate-forme KISTLER (modèle 9257 B).

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

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes (effort axial F_x , effort radial F_y et effort tangentiel F_z) figure (II.7, II.8).



Figure II.7: Amplificateur de charge.

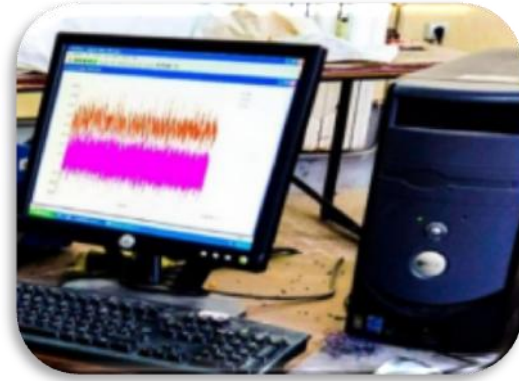


Figure II.8: PC pour traiter les

La figure (II.9) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composants de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z).

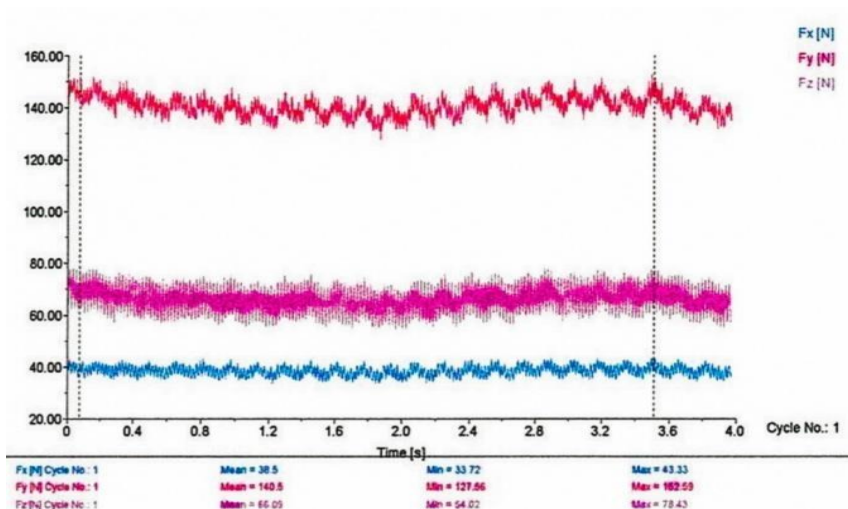


Figure II.9: Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

II-5 Démarche et plan d'expérience adopté

Les éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p) sont considérés comme paramètres d'entrée. La rugosité de surface, l'effort de coupe, puissance de coupe, pression spécifique et le taux d'enlèvement de la matière représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences. Nous nous servons des plans d'expériences pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel MINITAB

(version 17), c'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse statistique des expériences. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- Etablissement du but et des objectifs des essais;
- Sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses);
- Choix du type de plan d'expérience;
- Conduite des essais;
- Détermination des facteurs influents;
- Modélisation rapide des réponses;
- Recherche des paramètres optimaux;
- Validation des résultats.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre cas, le plan d'expériences a été adopté : le Plan de Taguchi (L9).

II-7 Planification des expériences

La méthode de planification des expériences a été utilisée pour mener les essais, ce qui a permis d'organiser et de conduire les expériences de manière optimale afin de créer des modèles mathématiques permettant de simuler le processus de coupe.

Le plan Taguchi a été sélectionné pour sa capacité à simplifier le protocole expérimental tout en permettant d'identifier les effets des facteurs sur la réponse. Cette méthode est caractérisée par une réduction considérable du nombre d'essais requis, tout en assurant une précision satisfaisante des résultats.

La stratégie de recherche expérimentale implique de déterminer initialement le nombre d'essais requis, qui dépend des facteurs de base (entrées) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Pour cette étude, le plan expérimental utilisé est la table orthogonale standard (L9) de Taguchi. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company). Les paramètres étudiés ainsi que les niveaux respectifs qui leur ont été attribués sont présentés dans le tableau (II.7).

II-6 Conditions de coupe

Dans notre travail, nous avons étudié l'influence de plusieurs facteurs sur le système d'usinage, à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p), pour évaluer les performances de chaque facteur.

Tableau II.6: Condition de coupe et leurs niveaux pour un plan de 9 essais.

Niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de passe a_p (mm)
1	150	0.08	0.15
2	230	0.12	0.30
3	310	0.16	0.45

II-8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais, la composition chimique des éprouvettes, les caractéristiques du matériau de coupe et définie les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

Chapitre III

Modélisation des paramètres de coupe

III- Modélisation des paramètres technologique en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS)

III-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématique des différents phénomènes étudiés : la rugosité de surface, l'effort de coupe, la puissance de coupe, la pression spécifique et le taux d'enlèvement de la matière). Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les paramètres étudiés en utilisant une plaquette de coupe en céramique Wiper non revêtue (CC650WG). Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RMS), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB 17 ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les termes quadratiques qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres de sortie.

III-2 Modélisation et analyse de variance (ANOVA)

III-2-1 Résultats des expériences

Les valeurs des facteurs de réponse, à savoir la rugosité de la surface usinée (**Ra**), la composante de l'effort tangentielle (**Fz**), la puissance de coupe (**Pc**), le taux d'enlèvement de la matière (**MRR**) et l'effort spécifique (**Kc**) sont présentés dans le tableau (III.1). Il est à noter que (**Ra**) et (**Fz**) sont mesurés directement pendant les expérimentations, alors que (**Kc**), (**Pc**) et (**MRR**) sont calculés respectivement d'après les équations (I-4, I-6 et I-8) mentionnées au chapitre (I). Les essais ont été planifiés suivant un plan d'expériences de Taguchi L9 essais avec 3 facteurs à 3 niveaux. L'analyse des résultats expérimentaux portés au Tableau (III.1) montre que la rugosité de surface (**Ra**) est enregistrée dans l'intervalle [0,72 et 1,98] μm ; l'effort tangentiel (**Fz**) varie entre [40,47 et 60,18] N, la puissance (**Pc**) prend les valeurs de [123,625 à 280,1883] W, nous remarquons aussi que les valeurs du taux d'enlèvement de la matière (**MRR**) varient dans l'intervalle [1,8 et 14,88] cm^3/min et enfin les valeurs de (**Kc**) sont comprises entre [835,8333 à 4120,833] N/mm^2 .

Tableau III.1: Plan des essais expérimentaux L9.

Essais	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	Pc (W)	MRR (cm^3/min)	Kc (N/mm^2)
1	150	0,08	0,15	1,28	49,45	123,625	1,8	4120,833
2	150	0,12	0,30	1,40	56,04	140,1	5,4	1556,667
3	150	0,16	0,45	2,19	60,18	150,45	10,8	835,8333
4	230	0,08	0,30	1,44	50,92	195,1933	5,52	2121,667
5	230	0,12	0,45	1,63	56,33	215,9317	12,42	1043,148
6	230	0,16	0,15	1,88	43,45	166,5583	5,52	1810,417
7	310	0,08	0,45	0,77	54,23	280,1883	11,16	1506,389
8	310	0,12	0,15	0,8	40,47	209,095	5,58	2248,333
9	310	0,16	0,30	1,1	45,33	234,205	14,88	944,375

III-2-2 Analyse de la rugosité Ra

Les résultats présentés dans le tableau (III.2) sont analysés à l'aide du logiciel MINITAB, en appliquant l'analyse de la variance ANOVA, cette analyse est réalisée pour une signification ajustée de 5%, c.-à-d pour un niveau de confiance de 95%. D'après l'analyse des résultats de la rugosité (Ra) montre clairement que la vitesse de coupe (Vc) est le facteur le plus influent car sa contribution est de **45,64%**, suivi par la vitesse d'avance (f) est de **29,88%** et en dernier lieu l'effet de la profondeur de passe (ap) est presque négligeable puisque sa valeur de probabilité (p-value) est supérieure à 0,05.

Tableau III.2: Analyse de l'ANOVA pour le critère de rugosité Ra.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob> F	cont%	Observations
Modèle	1,74713	6	0,29119	0,034	0,034	98,85	signifiant
Vc	0,80667	1	0,80667	0,012	0,012	45,64	signifiant
f	0,52807	1	0,52807	0,019	0,019	29,88	signifiant
ap	0,06615	1	0,06615	0,125	0,125	3,74	Non signifiant
Vc* Vc	0,25920	1	0,25920	0,082	0,037	14,67	signifiant
ap*ap	0,04500	1	0,04500	0,037	0,170	2,55	Non signifiant
f*f	0,04205	1	0,04205	0,170	0,179	2,38	Non signifiant
Erreur	0,02027	2	0,01013	0,179			
Total	1,76740	8					

❖ **Analyse du modèle mathématique**

L'équation (III.1) exprime le modèle mathématique de la rugosité moyenne arithmétique (Ra) avec tous les facteurs principaux et leurs carrées, avec $R^2 = 98,85\%$.

$$Ra = 0,329 + 0,02129 Vc - 15,1 f - 3,17 ap - 0,000056 Vc*Vc + 93,8 f*f + 6,44 ap*ap \dots\dots \textbf{(III.1)}$$

La vérification du modèle a été effectuée en se basant sur l'analyse des valeurs de l'erreur du modèle développé, Figure (III.2 et III.3). Sur la figure (III.2) on constate que les points de Ra-prévue s'applique presque à la ligne 45° donc des valeurs expérimentales de Ra, en plus la figure (III.3) montre que les points représentant l'erreur du modèle sont tous à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

III-2-2-1 Graphiques des effets principaux

La figure (III.1) présente les droites des effets principaux des éléments du régime de coupe sur le critère de rugosité Ra. Cette figure permet de constater que l'augmentation de (f) conduit à une détérioration de l'état de surface usinée (Ra augmente considérablement). Tandis que l'augmentation de la vitesse de coupe permet une amélioration de l'état de surface. Enfin, la profondeur de passe n'a pas une influence claire sur (Ra).

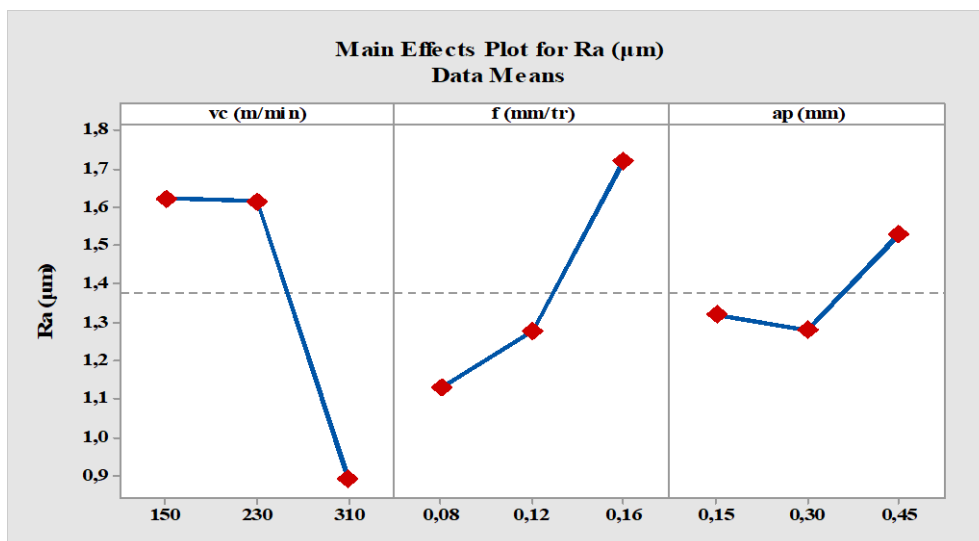


Figure III.1: Diagramme des effets principaux sur Ra.

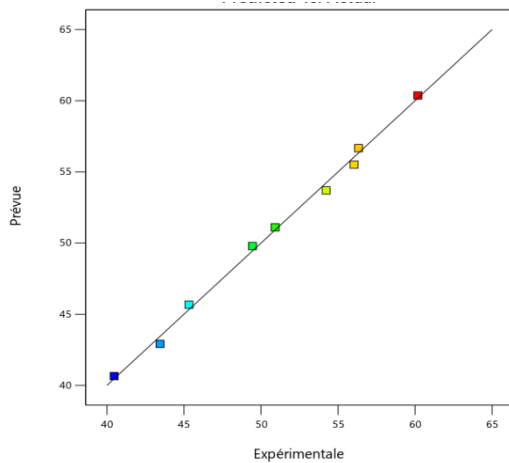


Figure III.2: Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour (Ra).

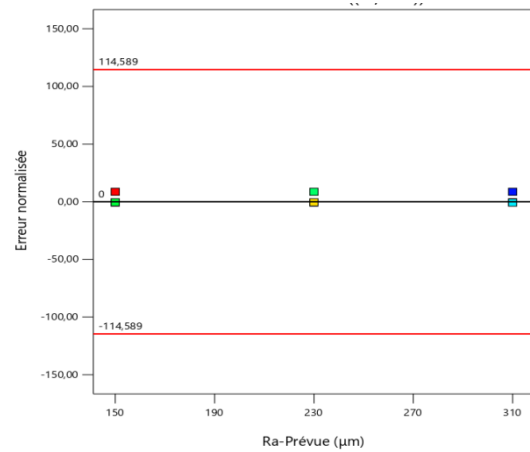


Figure III.3: Valeurs de l'erreur par rapport aux valeurs prévues pour (Ra).

III-2-2-2 Digrammes de surface en (3D) et graphes de contour

Les figures (III.4) et (III.5) présentent les surfaces de réponse ainsi que les graphes de contours de Ra en fonction de (Vc, f et ap), ces figures montrent d'une part, que l'augmentation de (f) conduit à une augmentation remarquable de la rugosité Ra, l'augmentation de (Vc) permet de diminuer le critère (Ra), par contre l'augmentation de la profondeur de passe (ap) provoque une légère augmentation de Ra.

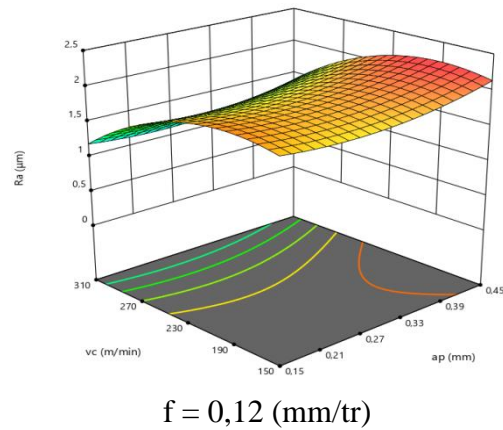
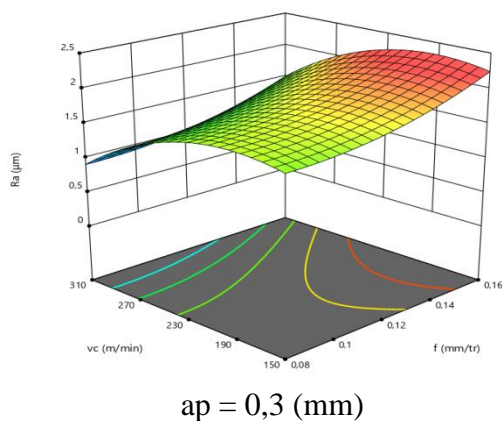


Figure III.4: Diagrammes de surface 3D de Ra en fonction de (Vc, f et ap).

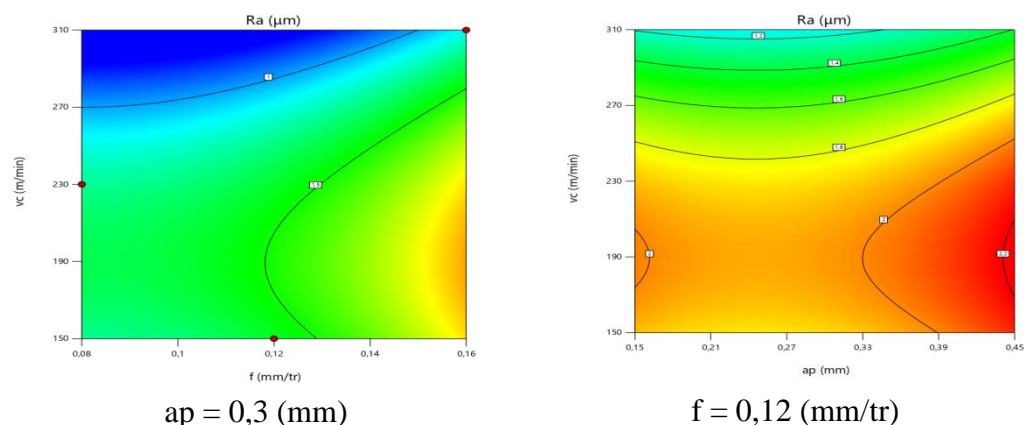


Figure III.5: Graphes de contour de la rugosité Ra en fonction de (Vc, f et ap).

III-2-3 Analyse de l'effort tangentiel Fz

L'analyse de variance ANOVA pour la composante de l'effort tangentiel (Fz) présentée dans le tableau (III.3) montre que la profondeur de passe vient en première position d'influence sur l'effort tangentiel (Fz) avec des contributions de **66,46%**, suivie par la vitesse de coupe et vitesse d'avance avec des contributions de **31,29%** et **1,51%** respectivement, par contre les termes quadratiques (Vc*Vc), (ap*ap), (f*f) n'ont pas un effet significatif sur la variation de l'effort tangentiel à cause de ($p > 0,05$).

Tableau III.3: Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel Fz.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F Value	p-value Prob> F	cont%	Observations
Model	348,912	6	58,152	89,88	0,011	99,63	Significant
Vc	109,568	1	109,568	179,09	0,006	31,29	Significant
f	5,302	1	5,302	169,35	0,103	1,51	Non significant
ap	232,753	1	232,753	8,19	0,003	66,46	Significant
Vc* Vc	1,027	1	0,430	359,74	0,335	0,29	Non significant
ap*ap	0,250	1	1,027	0,66	0,598	0,07	Non significant
f *f	0,012	1	0,250	1,59	0,903	0,00	Non significant
Erreur	1,294	2	0,012	0,39			
Total	350,206	8	0,647	0,02			

❖ Analyse du modèle mathématique

L'équation (III.2) exprime le modèle mathématique de l'effort de coupe (Fz) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions avec $R^2 = 99,63\%$

$$F_z = 55,60 - 0,1049 V_c + 29,5 f + 43,6 a_p + 0,000112 V_c * V_c - 221 f * f - 3,5 a_p * a_p \dots \text{(III.2)}$$

III-2-3-1 Graphiques des effets principaux

La figure (III.6) présente les droites des effets principaux des paramètres du régime de coupe sur l'effort tangentiel (F_z). On constate que la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (a_p) ont une influence significative sur l'effort tangentiel (F_z), tandis que la vitesse d'avance a une légère influence.

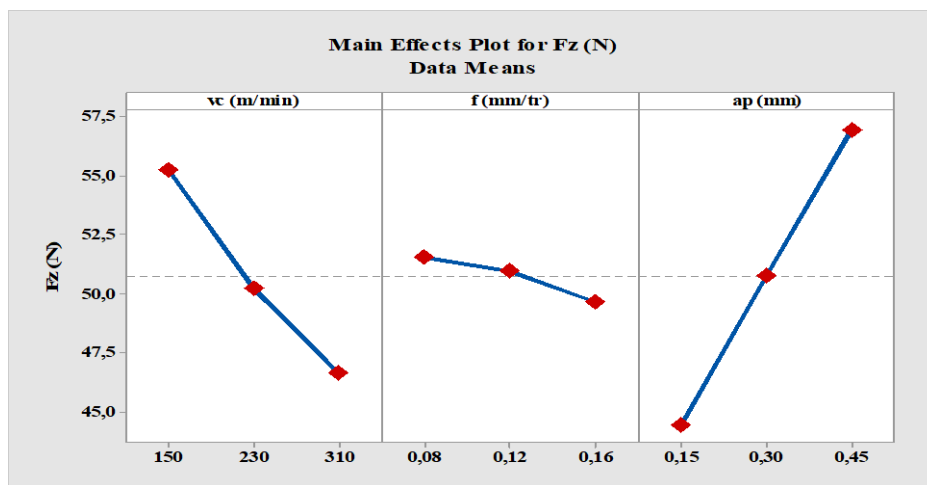


Figure III.6: Diagramme des effets principaux sur F_z .

La figure (III.7) montre que les différents points expérimentaux ont un très bon rapprochement avec la droite à 45° représentant les valeurs prédites par le modèle mathématique. Dans la figure (III.8) les valeurs de l'erreur du modèle sont toujours comprises dans la zone de confiance.

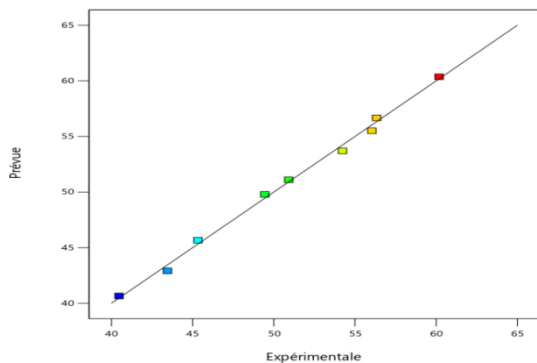


Figure III.7: Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour F_z .

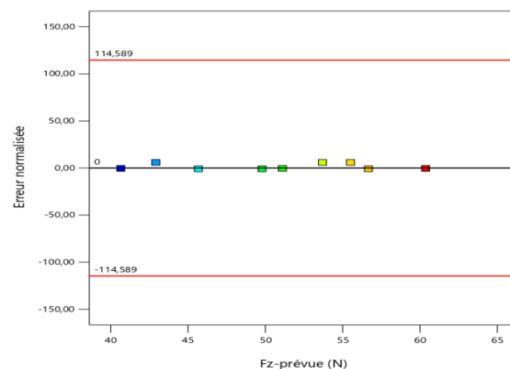


Figure III.8: Valeurs de l'erreur par rapport aux valeurs prévues pour F_z .

III-2-3-2 Digrammes de surface en (3D) et graphes de contour

Les figures (III.9) et (III.10) confirment l'importance de l'influence de (a_p) sur l'évolution de F_z , elle permet d'évaluer l'influence simultanée de (V_c , a_p) et (f , a_p) sur la composante de l'effort de coupe F_z . La figure (III.9) indique que la pente de la profondeur de passe (a_p) est la plus grande et donc la plus importante, suivie de la vitesse de coupe (V_c) et enfin de l'avance (f).

La figure (III.10) présente les graphes des contours qui nous permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, ils nous permettent aussi d'établir les valeurs de réponse ainsi que les conditions d'exploitation désirables.

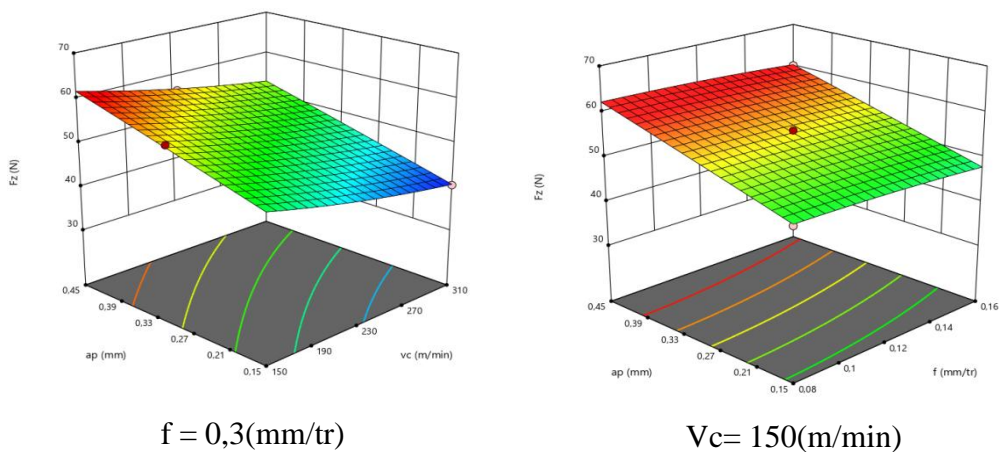


Figure III.9: Diagrammes de surface 3D de F_z en fonction de (V_c , f et a_p).

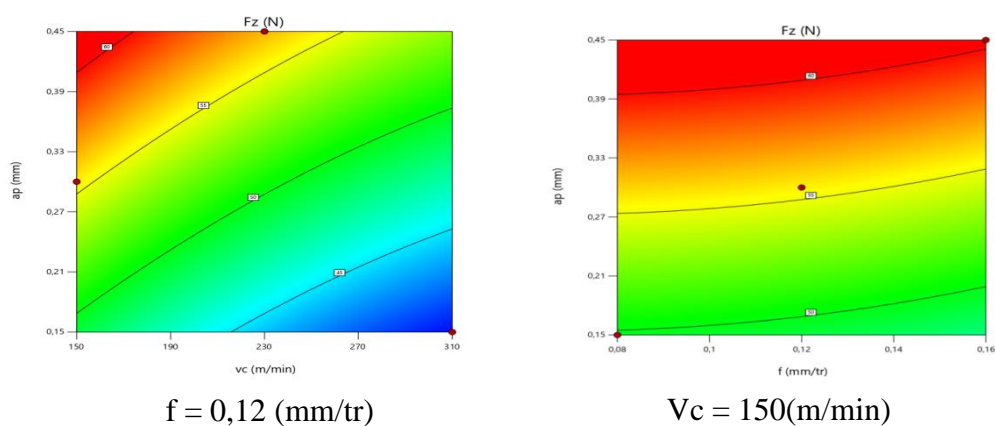


Figure III.10: Graphes de contour de l'effort F_z en fonction de (V_c , f et a_p).

III-2-4 Analyse de la puissance de coupe P_c

L'analyse de la variance ANOVA au tableau (III.4) montre l'influence des paramètres de coupe sur la puissance (P_c). On remarque que les deux facteurs (V_c , ap) sont les deux paramètres les plus significatifs, notamment le facteur (V_c) avec **79,10%** de contribution, (ap) avec **17,94%** et (f) avec **1,89%**. Les quadratiques ($V_c * V_c$), ($ap * ap$), ($f * f$) ne présentent aucune valeur significative.

Tableau III.4: Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance P_c .

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob> F	cont%	Observations
Model	19984,5	6	3330,7	0,026	0,026	99,14	significant
Vc	15945,8	1	15945,8	0,005	0,005	79,10	significant
f	380,7	1	380,7	0,171	0,171	1,89	Non significant
ap	3615,8	1	3615,8	0,023	0,023	17,94	significant
Vc* Vc	17,4	1	17,4	0,698	0,698	0,09	Non significant
ap*ap	22,1	1	22,1	0,664	0,664	0,11	Non significant
f *f	2,6	1	2,6	0,878	0,878	0,01	Non significant
Erreur	173,8	2	86,9				
Total	20158,2	8					

❖ Analyse du modèle mathématique

L'équation (III.3) expose le modèle mathématique de la puissance (P_c) exprimé par les facteurs principaux et leurs interactions, avec $R^2 = 99,14\%$.

$$P_c = 26,3 + 0,856 V_c - 698 f + 133 ap - 0,00046 V_c * V_c + 2080 f * f + 51 ap * ap \dots \text{(III.3)}$$

III-2-4-1 Graphiques des effets principaux

Dans la figure (III-11) sont présentées les droites des effets principaux des paramètres de coupe sur la puissance P_c . Cette figure montre l'influence considérable des deux facteurs (V_c , ap). Nous constatons que l'augmentation de ces derniers provoque une augmentation de la puissance consommée.

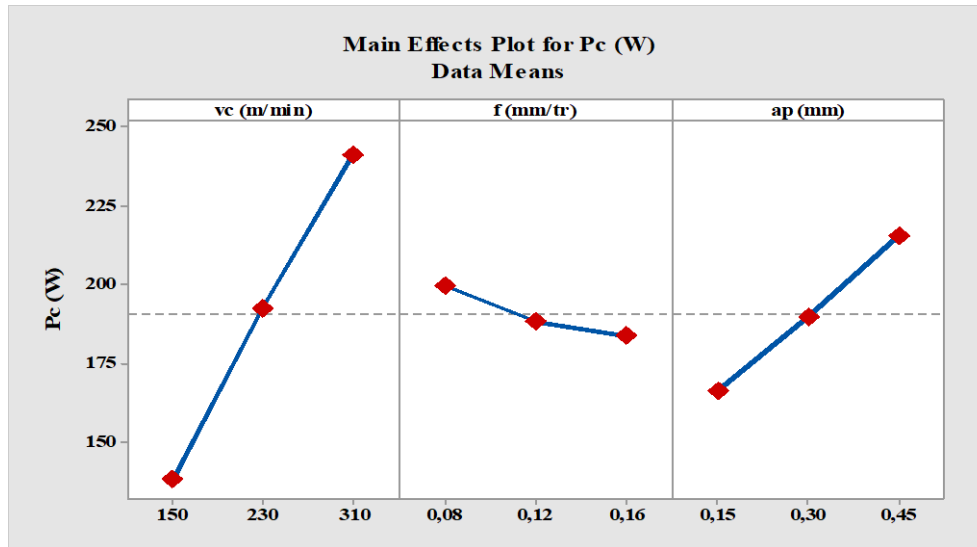


Figure III.11: Diagramme des effets principaux sur (Pc).

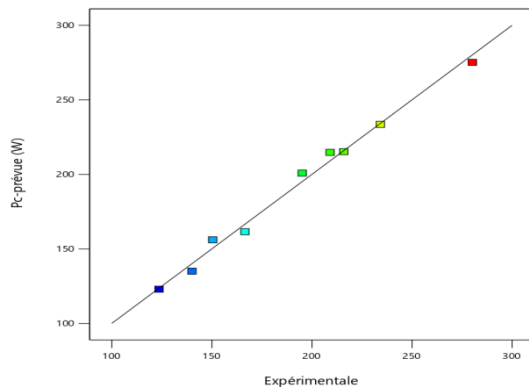


Figure III.12: Valeurs prévues par rapport Aux valeurs expérimentales pour (Pc).

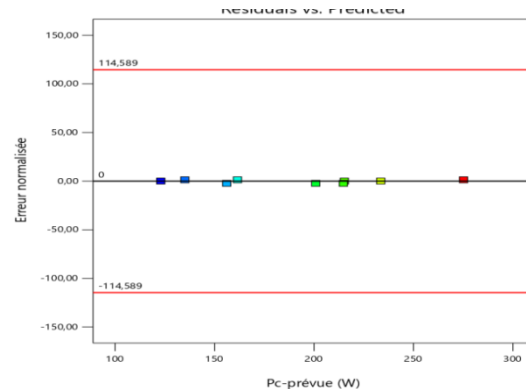


Figure III.13: Valeurs de l'erreur par rapport Aux valeurs prévues pour (Pc).

La figure (III.12) montre un très bon rapprochement des différents points expérimentaux avec la droite à 45°, représentant les valeurs estimées par le modèle mathématique. La figure (III.13) nous confirme l'adéquation du modèle par la présence de toutes les erreurs dans l'intervalle de confiance.

III-2-4-2 Digrammes de surface en (3D) et graphes de contour

Les figures (III.14 et III.15) illustrent l'évolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe, elle permet d'évaluer l'influence simultanée de (Vc, ap) et (Vc, f) sur la puissance de coupe (Pc). La figure (III.14) indique que la pente de la vitesse de coupe (Vc) est la plus importante donc la plus significative suivie par la profondeur de passe (ap) et en dernier lieu par la vitesse d'avance (f). La figure

(III.15) présente les graphes de contour qui nous permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, ils nous permettent aussi d'établir les valeurs de réponse ainsi que les conditions d'exploitation désirables

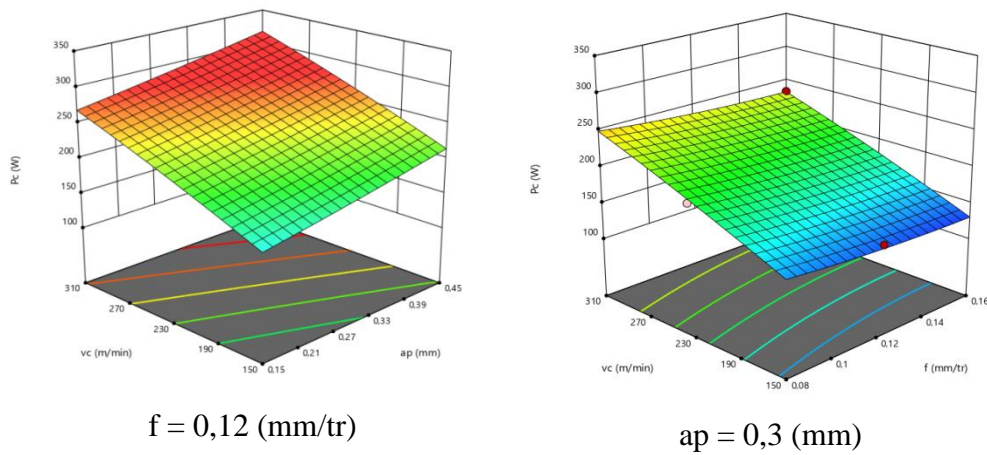


Figure III.14: Diagrammes de surface 3D de Pc en fonction de (Vc, f et ap).

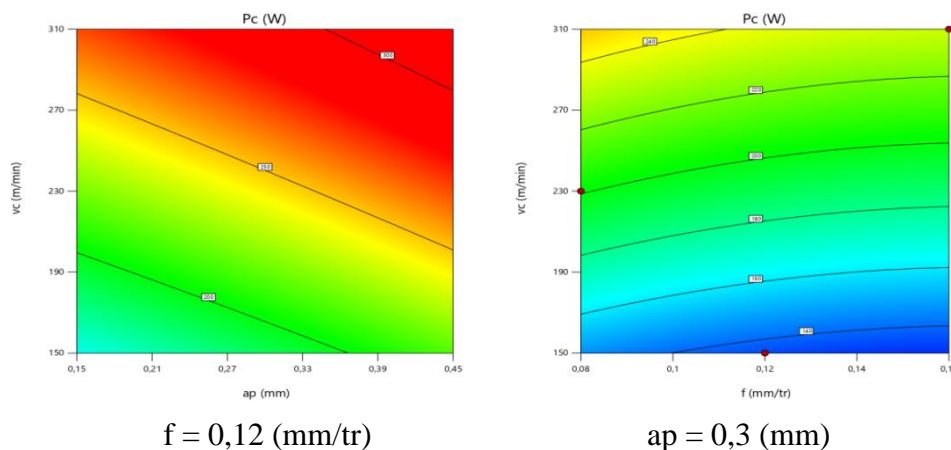


Figure III.15: Graphes de contour de Pc en fonction de (Vc, f et ap).

III-2-5 Analyse de l'effort spécifique Kc

Le tableau (III.5) de l'analyse de la variance (ANOVA) pour la force spécifique Kc, d'après cette analyse on remarque que la pression Kc est fortement influencée par la profondeur de passe (ap) dont la contribution est de **47,46%**, suivi par la vitesse d'avance (f) avec une contribution **35,71%**, ce qui prouve que le résultat est en concordance avec la définition de ce facteur technologique (Eq: I.4) qui stipule qu'elle représente une force de coupe par unité de surface.

Tableau III.5: Analyse de la variance (ANOVA) pour la force spécifique K_c .

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob>F	cont%	Observations
Model	7798568	6	1299761	9,55	0,098	96,63	Non significant
Vc	548576	1	548576	4,03	0,182	6,80	Non significant
f	2881859	1	2881859	21,17	0,044	35,71	significant
ap	3830746	1	3830746	28,14	0,034	47,46	significant
Vc* Vc	88475	1	88475	0,65	0,505	1,10	Non significant
ap*ap	150009	1	150009	1,10	0,404	1,86	Non significant
f *f	298902	1	298902	2,20	0,277	3,70	Non signifiant
Erreur	272216	2	136108				
Total	8070784	8					

❖ **Analyse du modèle mathématique**

L'équation (III.4) exprime le modèle mathématique de la force spécifique de coupe (K_c) avec tous les facteurs principaux et leurs quadratiques, avec $R^2 = 96,63\%$.

$$K_c = 11514 - 18,9 V_c - 58407 f - 15636 ap + 0,0329 V_c * V_c + 171169 f * f + 17182 ap * ap \dots \text{(III.4)}$$

III-2-5-1 Graphiques des effets principaux

La figure (III.16) présente les droites des effets principaux des paramètres du régime de coupe sur la force spécifique (K_c). Cette figure montre l'influence considérable des trois facteurs considérés. Nous constatons que l'augmentation de (V_c , f et ap) provoque une diminution de l'effort spécifique (K_c).

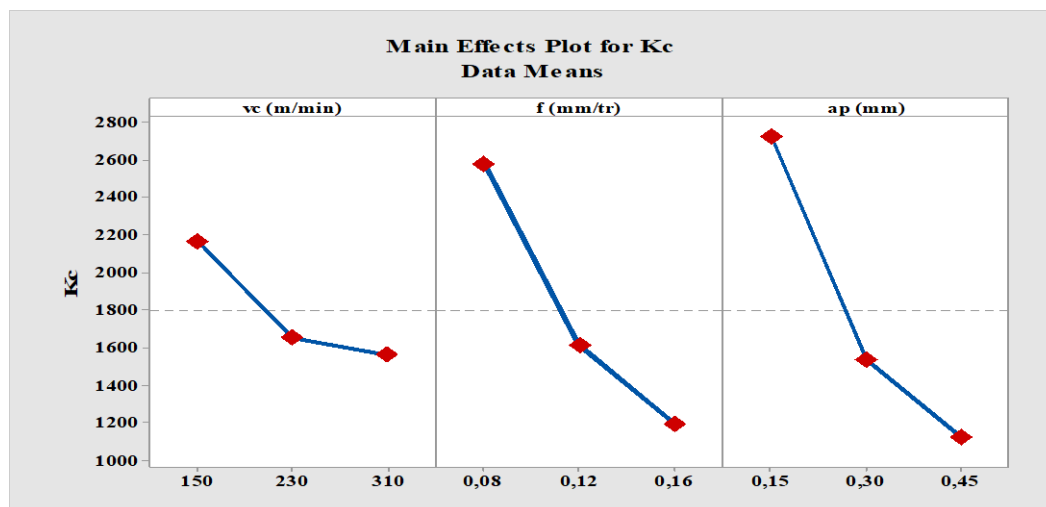


Figure III.16: Diagramme des effets principaux sur K_c (N/mm²).

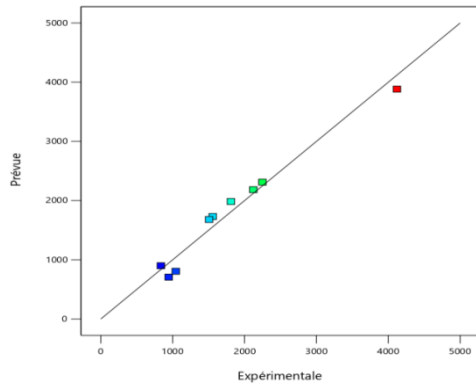


Figure III.17: Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour (K_c).

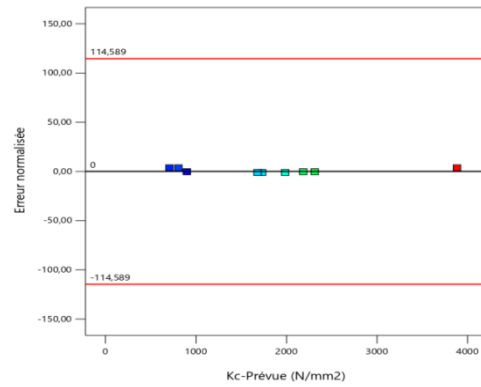


Figure III.18: Valeurs de l'erreur par rapport aux valeurs prévues pour (K_c).

III-2-5-2 Digrammes de surface en (3D) et graphes de contour

Les figures (III.19 et III.20) confirment l'importance de l'influence de (a_p) sur l'évolution de (K_c), elle permet d'évaluer l'influence simultanée de (V_c , a_p) et (f , a_p) sur la force spécifique. La figure (III.19) indique que la pente de la profondeur de passe (a_p) est la plus importante donc la plus significative suivie par l'avance par tour (f) et en dernier lieu par la vitesse de coupe (V_c). La figure (III.20) présente les graphes de contour qui nous permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, ils nous permettent aussi d'établir les valeurs de réponse ainsi que les conditions d'exploitation désirables.

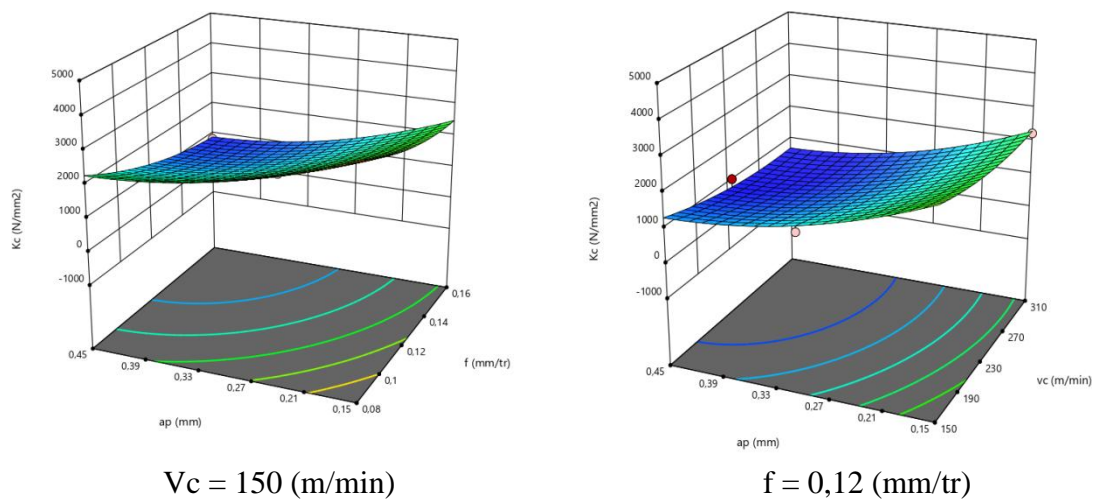


Figure III.19: Diagrammes de surface 3D de K_c en fonction de (V_c , f et a_p).

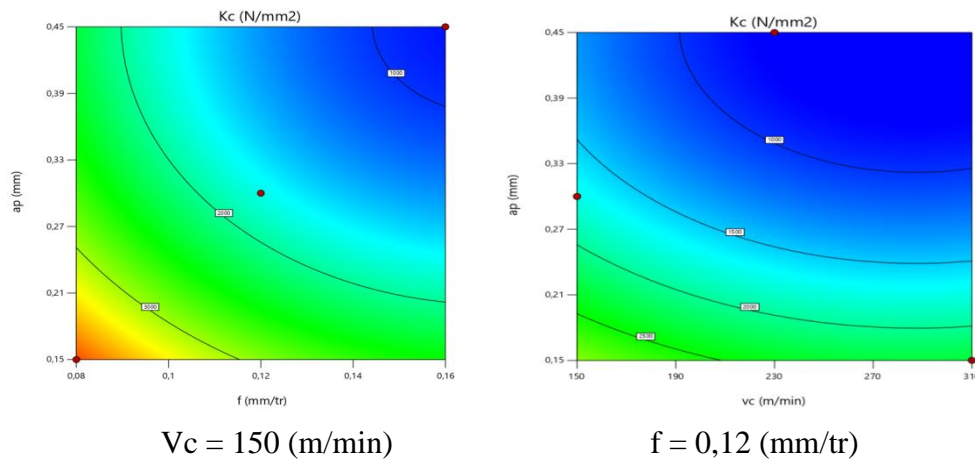


Figure III.20: Graphes de contour de K_c en fonction de (V_c , f et a_p).

III-3 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la détermination du degré d'influence des paramètres de coupe vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p) sur la rugosité (R_a) et l'effort de coupe (F_z), la puissance de coupe (P_c), le taux d'enlèvement de la matière (MRR) et la pression spécifique (K_c) en se basant sur une étude expérimentale qui nous a permis de déterminer les modèles mathématiques de prédiction et le coefficients de détermination de chacun des paramètres. L'analyse de la variance ANOVA à l'aide du logiciel MINITAB a montré que : pour la rugosité (R_a), la vitesse de coupe est le facteur le plus influençant. Concernant les résultats de l'effort de coupe tangentiel (F_z) montrent que les deux facteurs de régime de coupe (V_c et a_p) ont une influence significative sauf que la vitesse d'avance a un effet négligeable. La profondeur de passe (a_p) est la plus importante donc la plus significative. L'ANOVA nous a montré que la vitesse de coupe est le paramètre le plus significatif sur la puissance de coupe (P_c). Et en fin la pression spécifique (K_c) est influencée en premier lieu par la profondeur de passe (a_p).

Chapitre IV

Optimisation Par DF et Les Méthodes MCDM

IV.1. Introduction

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage à fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques, tels que les méthodes, Taguchi, GRA, GA, PSO, DF, etc. Elle permet le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus. Ce qui a généralement un impact économique direct sur la production tel que : le temps technologique d'usinage ou le coût global d'opération. L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe par trois méthodes d'optimisation multi-objective à savoir : DF (Approche de la fonction de désirabilité), PIV (Vélocimétrie par image de particules) et MOORA (l'analyse du ratio d'optimisation multi-objectif) ont été utilisées afin de sélectionner un régime de coupe optimal qui satisfait les cinq paramètres de sortie simultanément.

IV.2 Optimisation des résultats par la fonction désirabilité (DF)

3.3.1. Méthode de fonction de désirabilité (DF)

La méthode d'analyse de la fonction de désirabilité (DFA) est une méthode statistique utilisée en usinage pour optimiser simultanément plusieurs réponses tel que la rugosité de surface et les efforts de coupe ainsi que le taux d'enlèvement de la matière [20]. La méthode opère sur les conditions qui donnent les valeurs de réponse les plus souhaitables. La méthode implique l'attribution de poids à chaque réponse et le calcul d'un score de désirabilité pour chaque combinaison de paramètres d'usinage. La combinaison optimale de paramètres est ensuite sélectionnée en fonction du l'index de désirabilité le plus élevé. Le DFA est un outil utile pour optimiser les processus d'usinage et améliorer la qualité des pièces usinées. Les étapes d'utilisation cette méthode sont les suivantes:

- 1) Détermination de la désirabilité individuelle pour chaque paramètre de coupe selon les objectifs suivants :

➤ Objectif à maximiser :

$$\begin{cases} 0 & \text{Si } Y_i \leq \min_i \\ di = \left[\frac{Y_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right] & \text{Si } \min_i \leq Y_i \leq \max_i \dots \dots \dots \text{(IV-1)} \\ 1 & \text{Si } Y_i \geq \max_i \end{cases}$$

➤ Objectif à minimiser :

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{Si } Y_i \leq \min_i \\ \left[\frac{\max_i - Y_i}{\max_i - \min_i} \right] & \text{Si } \min_i \leq Y_i \leq \max_i \\ 0 & \text{Si } Y_i \geq \max_i \end{cases} \dots\dots\dots(\text{IV-2})$$

2) Détermination de la désirabilité combinée :

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \dots\dots\dots(\text{IV-3})$$

où

d_i : Désirabilité individuelle, comprise entre 0 et 1, est définie par la sortie cible.

n : Nombre de réponses dans la mesure;

w_i : Poids correspondants pour chaque paramètre de coupe.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (**Ra**), l'effort tangentiel de coupe (**Fz**), la puissance de coupe (**Pc**), l'effort spécifique de coupe (**Kc**) et le taux d'enlèvement de matière (**MRR**) souhaités avec une combinaison optimale des paramètres de coupe.

Pour atteindre ce but, l'exploitation de la fonction de désirabilité pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (**Ra**), l'effort tangentiel de coupe (**Fz**), la puissance de coupe (**Pc**) et l'effort spécifique de coupe (**Kc**) et de maximiser le (**MRR**) d'autre part. En d'autres termes, il s'agit d'améliorer la qualité de la pièce et d'augmenter la productivité en terme (**MRR**) tout en protégeant la pièce d'éventuelles déformations (**Fz**), éviter la rupture de la plaquette (**Kc**) et faire des économies d'énergie (**Pc**).

IV.2.1 Cas d'optimisations étudiées

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à trois cas d'optimisation : (1) minimisation de la rugosité de surface, (2) maximisation du taux d'enlèvement de matière (MRR), et (3) un compromis entre la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière

(MRR). Les tableaux (IV.1, IV.3 et IV.5) présentent les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, l'importance affectés à chaque paramètre pour les trois cas d'optimisation. Les tableaux (IV.2, IV.4 et IV.6), illustrent les solutions correspondantes aux trois cas cités.

1) Premier cas d'optimisation

On a donné l'importance maximale à la rugosité de surface (R_a) (**5+**); tout en préservant l'effort de coupe (F_z), la puissance (P_c), la pression spécifique (K_c) et le MRR à leur faible niveau (**1+**) à celui qui est moins significatif. Le régime optimal trouvé est ($V_c=310\text{m/min}$, $f=0,131\text{ mm/tr}$ et $a_p=0,268\text{ mm}$). La rugosité prend une valeur minimale de ($R_a=0,770\mu\text{m}$), l'effort tangentiel ($F_z=45,339\text{N}$), la puissance de coupe ($P_c=231,03\text{W}$), ($K_c=1146,217\text{N/mm}^2$), ($\text{MRR}=10,871\text{cm}^3/\text{min}$) et la désirabilité est égale à ($\text{Des}=0,809$). Ce cas est pertinent pour un tournage de finition exigeant une finition de qualité (rugosité minimale).

2) Deuxième cas d'optimisation

L'optimisation du taux d'enlèvement de matière est devenue le mieux considéré avec une importance (**5+**), tandis que la rugosité (R_a), l'effort la puissance et la pression ont pris un niveau minimal avec une importance (**1+**). Le régime optimal trouvé est de ($V_c=310\text{m/min}$, $f=0,160\text{mm/tr}$ et $a_p=0,3\text{mm}$) avec une rugosité de ($R_a=1,14\mu\text{m}$), l'effort tangentiel (F_z) prend une valeur minimale ($45,671\text{N}$), la puissance de coupe ($P_c=233,545\text{W}$), et ($K_c=706,885\text{N/mm}^2$), par contre le MRR atteint la valeur maximale de ($14,880\text{cm}^3/\text{min}$) et la désirabilité est égale à ($\text{Des}=0,817$). Ce cas d'optimisation est spécifiquement conçu pour une production où l'on cherche à minimiser les efforts et à atteindre une productivité maximale.

3) Troisième cas d'optimisation

Nous nous sommes intéressés à une optimisation où la rugosité et le taux d'enlèvement du copeaux ont été considérés comme la priorité principale, avec une importance de (**5+**), tandis que l'effort (F_z), (P_c et K_c) ont pris un niveau minimal avec une importance (**1+**). Le régime optimale des conditions de coupe trouvé est de ($V_c=310\text{m/min}$, $f=0,137\text{ mm/tr}$ et $a_p=0,351\text{ mm}$). L'effort de coupe prend une valeur minimale ($F_z=48,612\text{N}$), la rugosité ($R_a=0,897\mu\text{m}$), la puissance ($P_c=243,886\text{N}$), ($K_c=656,768\text{N/mm}^2$), ($\text{MRR}=14,88\text{cm}^3/\text{min}$) et

Chapitre IV: Optimisation par DF et Les Méthodes MCDM

la désirabilité ($Des=0,827$). Ce cas est intéressant lorsqu'on cherche une rugosité de surface minimale et un taux d'enlèvement de matière des outils de coupe maximale.

Tableau IV.1: But et gamme des paramètres pour le 1^{er} cas d'optimisation.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Vc	is in range	150	310	1	1	3
f	is in range	0,08	0,16	1	1	3
ap	is in range	0,15	0,45	1	1	3
Ra	minimize	0,77	2,19	1	1	5
Pc	minimize	123,625	280,188	1	1	1
Fz	minimize	40,47	60,18	1	1	1
Kc	minimize	835,833	4120,83	1	1	1
MRR	maximize	1,8	14,88	1	1	1

Tableau IV.2: Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés pour le 1^{er} cas.

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Pc (W)	Fz (N)	Kc (N/mm^2)	MRR (cm^3/min)	Dés	
1	310	0,131	0,268	0,77	230,992	45,329	1147,633	10,862	0,809	Selected
2	310	0,131	0,269	0,77	231,182	45,378	1140,708	10,906	0,809	
3	310	0,131	0,27	0,77	231,461	45,450	1130,709	10,970	0,809	
4	310	0,131	0,265	0,77	230,546	45,214	1164,215	10,758	0,809	

Tableau IV.3: But et gamme des paramètres pour le 2^{ème} cas d'optimisation.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Vc	is in range	150	310	1	1	3
F	is in range	0,08	0,16	1	1	3
ap	is in range	0,15	0,45	1	1	3
Ra	minimize	0,77	2,19	1	1	1
Pc	minimize	123,625	280,188	1	1	1
Fz	minimize	40,47	60,18	1	1	1
Kc	minimize	835,833	4120,83	1	1	1
MRR	maximize	1,8	14,88	1	1	5

Tableau IV.4: Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés pour le 2^{ème} cas.

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Pc (W)	Fz (N)	Kc (N/mm^2)	MRR (cm^3/min)	Dés	
1	310	0,16	0,30	1,140	233,545	45,671	706,885	14,88	0,817	Selected
2	310	0,159	0,301	1,133	233,729	45,735	703,505	14,88	0,817	
3	310	0,159	0,302	1,124	233,951	45,812	699,622	14,88	0,817	
4	310	0,16	0,301	1,151	233,231	45,731	701,74	14,88	0,816	

Tableau IV.5: But et gamme des paramètres pour le 3^{ème} cas d'optimisation.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Vc	is in range	150	310	1	1	3
f	is in range	0,08	0,16	1	1	3
ap	is in range	0,15	0,45	1	1	3
Ra	minimize	0,77	2,19	1	1	5
Pc	minimize	123,625	280,188	1	1	1
Fz	minimize	40,47	60,18	1	1	1
Kc	minimize	835,833	4120,83	1	1	1
MRR	maximize	1,8	14,88	1	1	5

Tableau IV.6: Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés pour le 3^{ème} cas.

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Pc (W)	Fz (N)	Kc (N/mm ²)	MRR (cm ³ /min)	Dés	
1	310	0,137	0,351	0,896	243,923	48,621	656,925	14,88	0,827	Selected
2	310	0,137	0,351	0,896	243,934	48,623	656,978	14,88	0,827	
3	310	0,137	0,351	0,896	243,920	48,620	656,915	14,88	0,827	
4	310	0,136	0,352	0,894	244,135	48,672	657,896	14,88	0,827	

➤ **1^{er} Cas**

La figure (IV.1) montre le domaine de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (Vc, f et ap) pour obtenir une rugosité de surface minimale (meilleur qualité de surface). Aussi la figure (IV.2) expose les valeurs optimales exacte des paramètres (Vc, f et ap), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (Ra, Fz, MRR, Pc et Kc) et la désirabilité pour ce cas. L'effet de la vitesse de coupe sur la rugosité présenté sur la figure (IV.3).

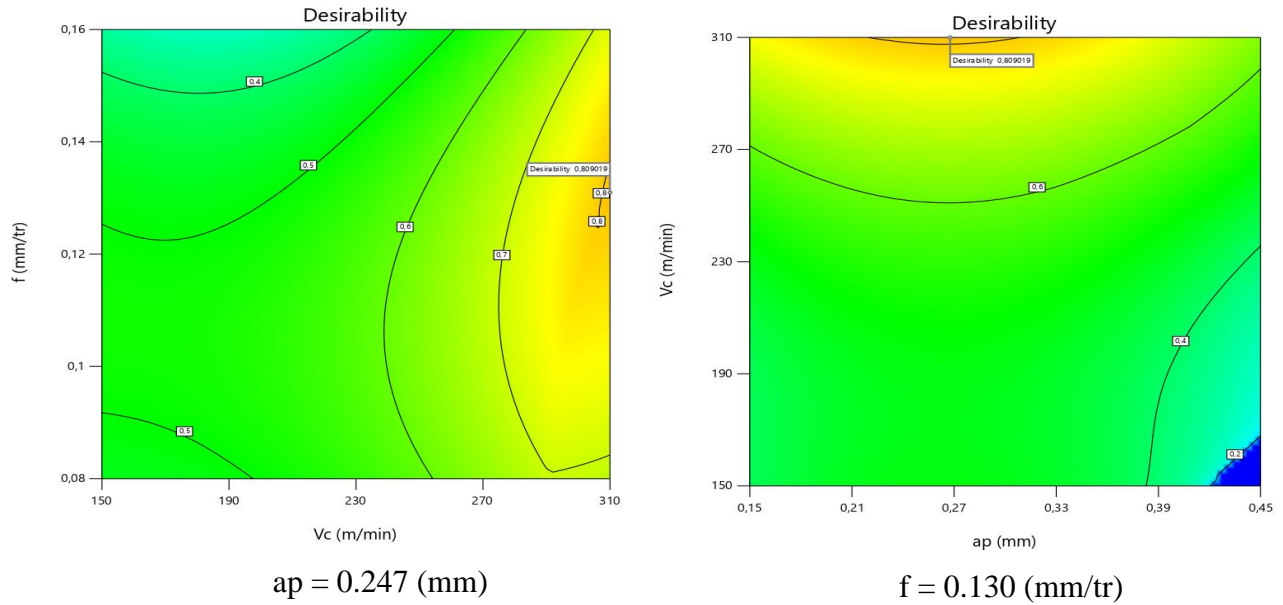


Figure IV.1: Graphes de contour de (Ra, Fz, Pc, MRR et Kc) en fonction de (Vc, f et ap).

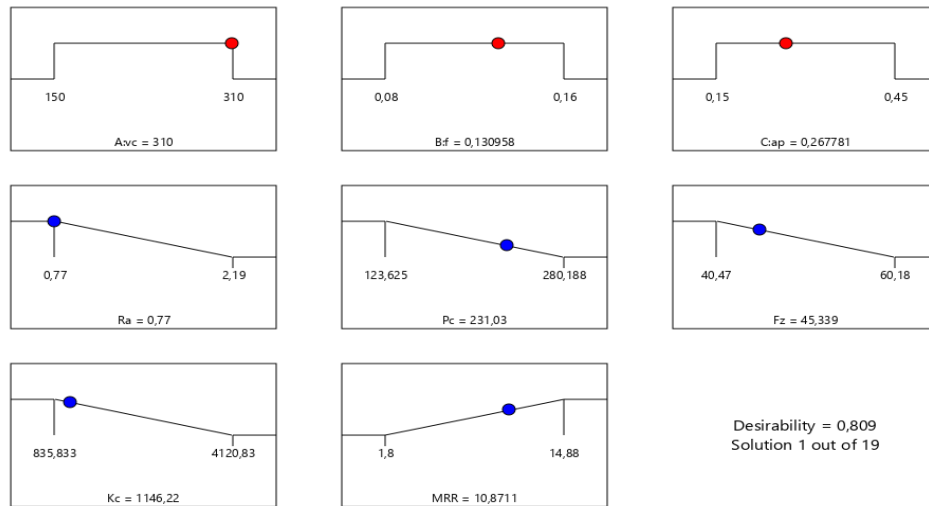


Figure IV.2: Résultat optimales des paramètres étudiés (1^{er} cas).

Le choix de ce régime optimal correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.809). Il est à noter que la désirabilité globale est calculée en fonction des désirabilités de chacun des paramètres, présentés dans la figure (IV.3), par l'équation (IV.3).

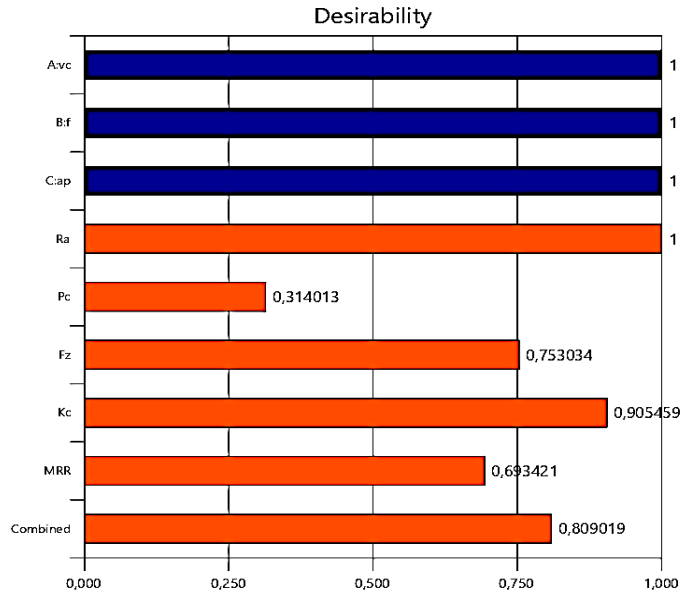


Figure IV.3: Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques (1^{er} cas).

➤ 2^{ème} Cas

La figure (IV.4) présente l'espace de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres du régime de coupe (V_c , f et a_p) pour obtenir une valeur maximale du taux d'enlèvement de matière (MRR). D'autres parts la figure (IV.5) expose, les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrés (V_c , f et a_p), de même celles des paramètres technologiques (R_a , F_z , MRR, P_c et K_c) et la désirabilité pour ce deuxième cas.

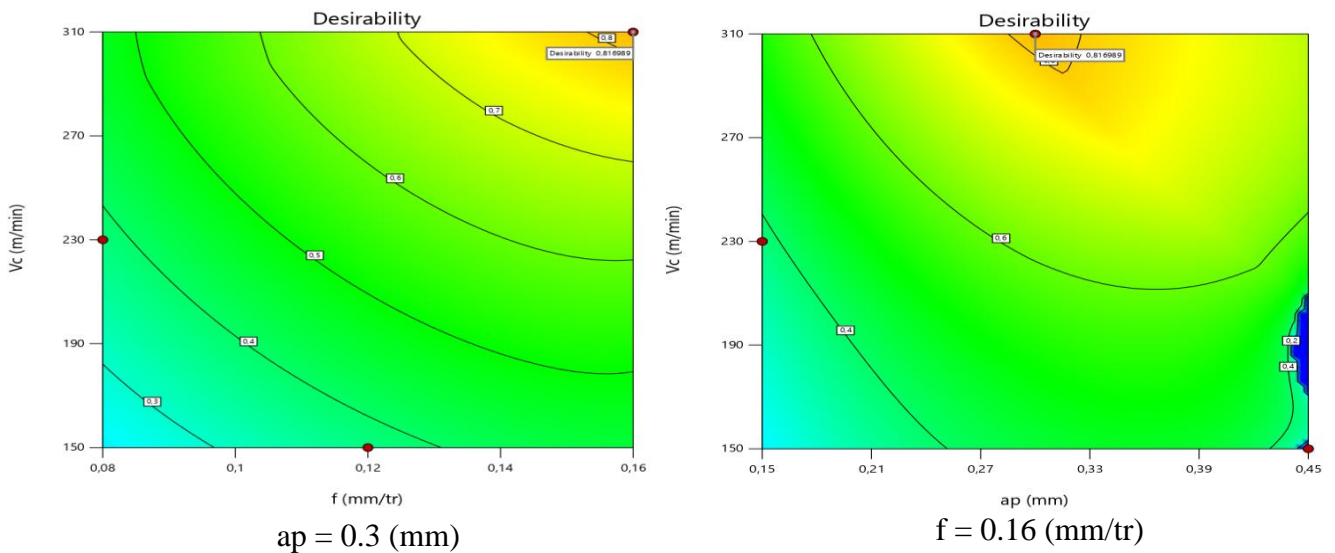


Figure IV.4 : Graphes de contour de (R_a , F_z , P_c , MRR et K_c) en fonction de (V_c , f et a_p).

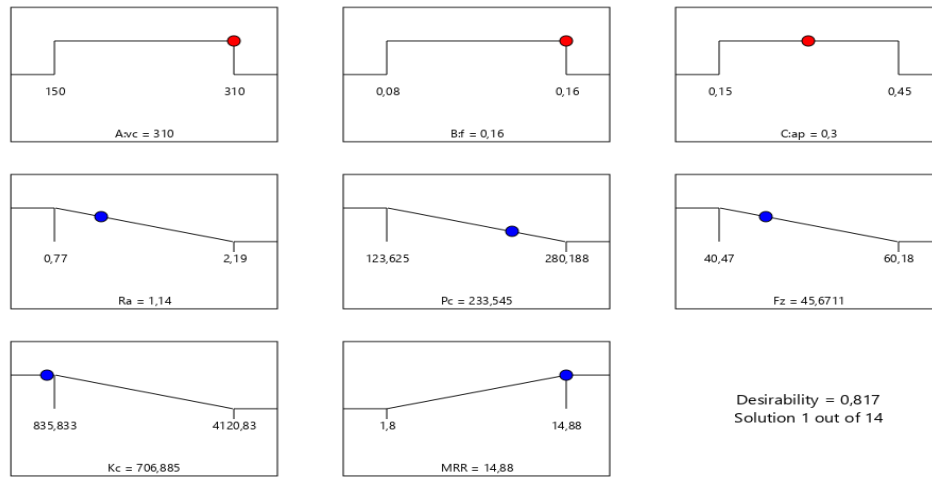


Figure IV.5: Résultat optimaux des paramètres étudiés (2^{ème} cas).

Le choix de ce régime optimal correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0,816). Il est à noter que la désirabilité globale est calculée en fonction des désirabilités de chacun des paramètres, présentés dans la figure (IV.6).

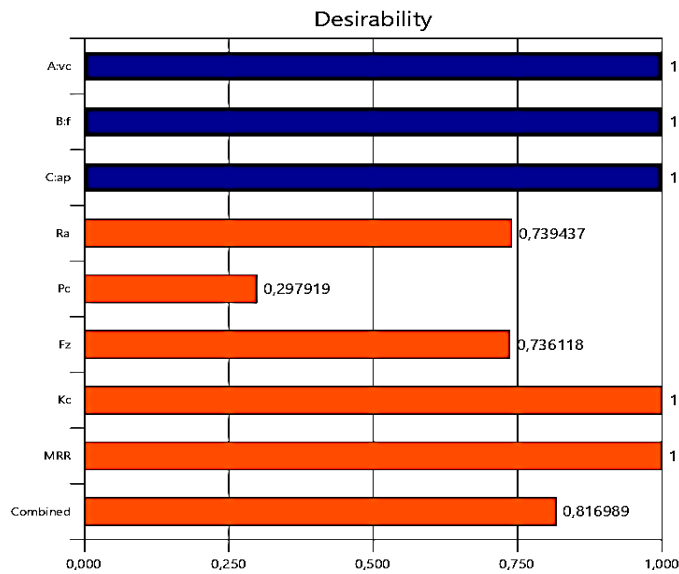


Figure IV.6: Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques (2^{ème} cas).

➤ 3^{ème} Cas

La figure (IV.7) montre le domaine de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) pour obtenir un compromis entre la rugosité de surface (R_a) et le (MRR). D'autres parts, la figure (IV.8) expose les valeurs optimales exacte des paramètres (V_c , f et a_p), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (R_a , F_z , MRR, P_c et K_c) et la désirabilité pour le dernier cas étudié.

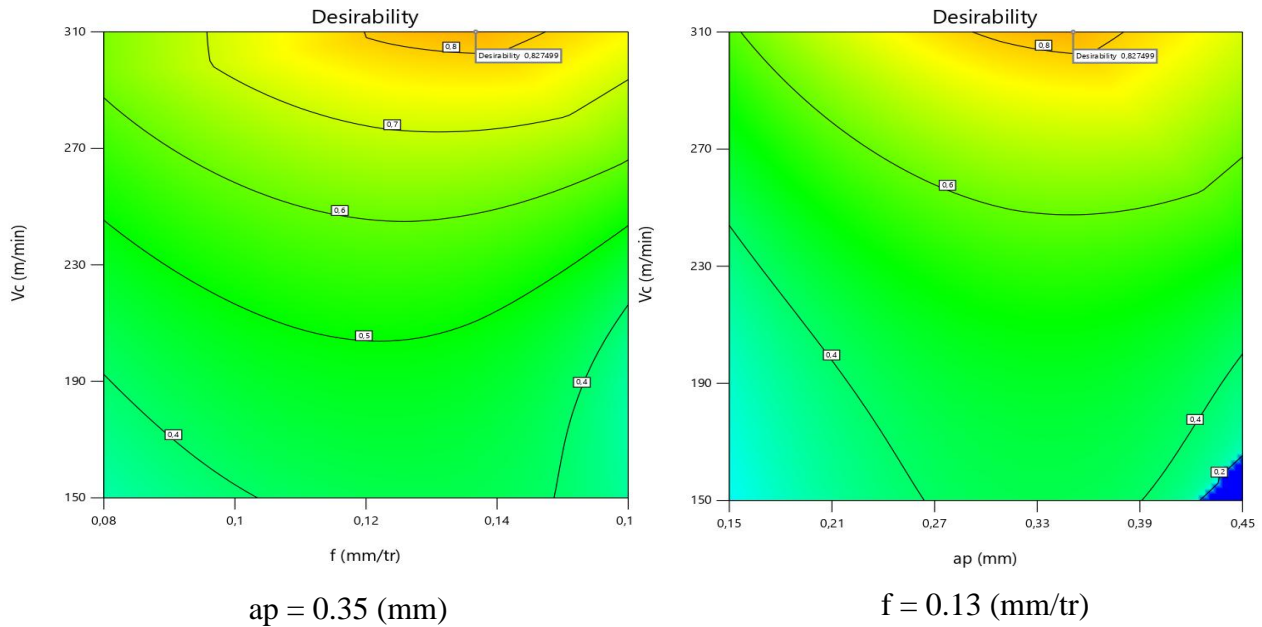


Figure IV.7: Graphes de contour de (R_a , F_z , P_c , MRR et K_c) en fonction de (V_c , f et a_p).

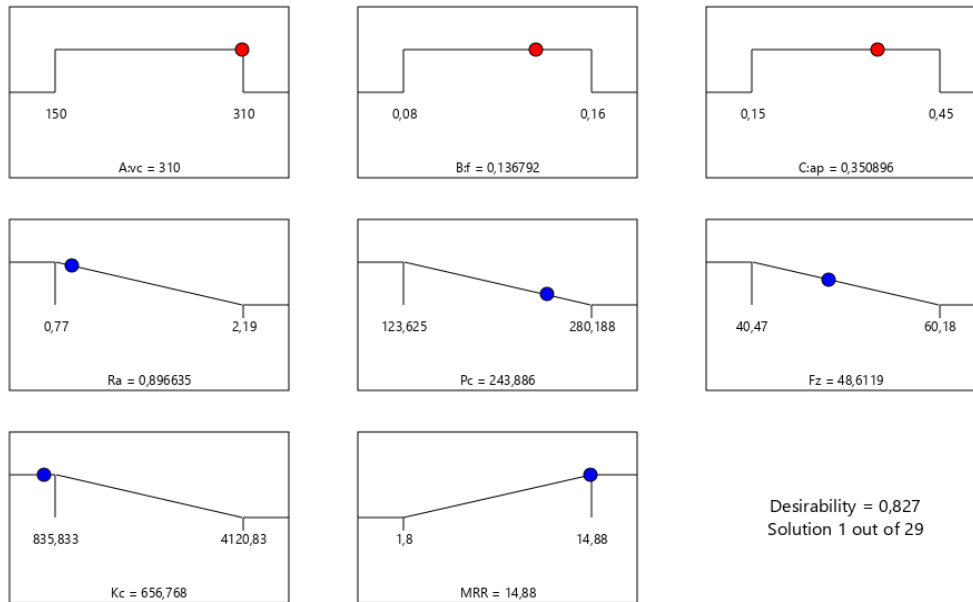


Figure IV.8: Résultat optimales des paramètres étudiés (3^{ème} cas).

Le choix de ce régime optimal correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.827). Il est à noter que la désirabilité globale est calculée en fonction des désirabilités de chacun des paramètres, présentés dans la figure (IV.9).

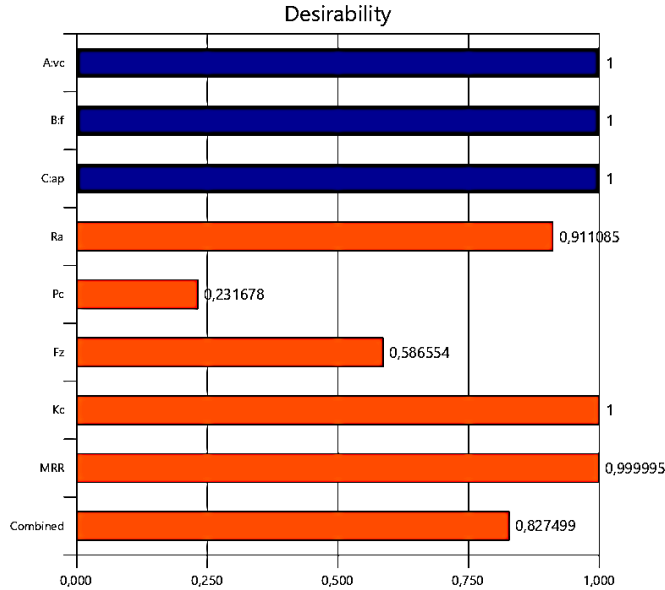


Figure IV.9: Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.

IV.3.2 Méthode MOORA

La méthode MOORA (Multi-Objective Optimization Ratio Analysis) a été introduite par Brauers [21] comme une méthode multi-objective pour résoudre des problèmes complexes. En outre, les critères souhaitables et indésirables sont utilisés simultanément pour le classement afin de sélectionner une alternative supérieure ou plus élevée parmi différentes alternatives. Cette technique a un grand nombre d'applications telles que la sélection d'un fournisseur, l'optimisation des paramètres de processus des machines et la sélection des fabricants. Les étapes de mise en œuvre de la prise de décision multicritère selon la méthode MOORA sont les suivantes:

Étape 1: Construire une matrice de décision basée sur la formule suivante :

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x_{mn} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV.4)$$

Où : m est le nombre d'options, n est le nombre de critères, xy est la valeur du critère j à l'option i tableau (IV.5).

Étape 2: Calcul de la matrice de décision normalisée $[X_i]$ basée sur la formule ;

$$K = [X_{ij}]_{m \times x} \dots\dots\dots(IV.5)$$

$$K_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \dots\dots\dots(IV.6)$$

Tableau IV.7: Matrice des valeurs normalisées.

Essai N°	Réponses				
	Ra* (µm)	Fz* (N)	Pc* (W)	MRR* (cm ³ /min)	Kc* (N/mm ²)
1	0,103	0,108	0,072	0,025	0,254566
2	0,113	0,123	0,082	0,074	0,096164
3	0,177	0,132	0,088	0,148	0,051634
4	0,108	0,112	0,114	0,076	0,131067
5	0,132	0,123	0,126	0,170	0,064441
6	0,152	0,095	0,097	0,076	0,111839
7	0,062	0,119	0,163	0,153	0,093058
8	0,065	0,089	0,122	0,076	0,138892
9	0,089	0,099	0,137	0,204	0,058339

Étape 3: Calcul des matrices de décision après normalisation des poids selon la formule

$$W_{ij} = w_j \times k_{ij} \dots\dots\dots(IV.7)$$

Tableau IV.8: Valeurs normalisées pondérées.

Essai N°	Valeurs normalisées pondérées $W_{ij} = w_j * K_{ij}$				
	W _{Ra} (µm)	W _{Fz} (N)	W _{Pc} (W)	W _{MRR} (cm ³ /min)	W _{Kc} (N/mm ²)
1	0,020662	0,021669	0,014414	0,004926	0,000985
2	0,022599	0,024557	0,0163349	0,014778	0,002956
3	0,035351	0,026374	0,0175417	0,029557	0,005911
4	0,02163	0,022314	0,0227584	0,015107	0,003021
5	0,026312	0,024684	0,0251765	0,03399	0,006798
6	0,030347	0,01904	0,0194198	0,015107	0,003021
7	0,012429	0,023764	0,0326684	0,030542	0,006108
8	0,012914	0,017734	0,0243793	0,015271	0,003054
9	0,017756	0,019864	0,027307	0,040722	0,008144

Étape 4: Définissez P_i et R_i en fonction par les formules suivantes:

$$P_i = \frac{1}{|B|} \sum_{j \in B} W_{ij} \dots\dots\dots(IV.8)$$

$$R_i = \frac{1}{|NB|} \sum_{j \in NB} W_{ij} \dots\dots\dots(IV.9)$$

où B : représente le critère dont la valeur est la plus élevée possible. et NB représente le critère dont la valeur est la plus basse possible.

Étape 5 : Identifiez Q_i sur la base de la formule suivante :

$$Q_i = P_i - R_i \dots\dots\dots(IV.10)$$

Tableau IV.9: Résultats MOORA (distances, coefficient de proximité Q_i et le classement pour chaque alternative).

Essai N°	Q_i	Rang
1	-0,052804	6
2	-0,051668	5
3	-0,055621	8
4	-0,054617	7
5	-0,048980	4
6	-0,056722	9
7	-0,044428	3
8	-0,042810	2
9	-0,032349	1

Le tableau (IV.9) présente les résultats de MOORA, les distances, le coefficient de proximité Q_i et le classement pour chaque alternative.

Le test de coupe (N° 9) présente le coefficient de proximité le plus élevé. Q_i de **-0,032349**. Par conséquent, ce régime est considéré comme la meilleure alternative.

IV.3.3 Méthode PIV

La PIV (vélocimétrie par images de particules), est une technique optique dédiée à la mesure de champs de vectrice vitesse. Les étapes de mise en œuvre d'une prise de décision multicritère selon la méthode PIV sont les suivantes [22]:

Étape 1 : Similaire de l'étape 1 de la méthode MOORA.

Étape 2 : Identifier les valeurs de conversion.

$$y'_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2}} \dots\dots\dots (IV.11)$$

Tableau IV.10: Matrice des valeurs normalisées.

Essai N°	Reponses				
	Ra* (µm)	Fz* (N)	Pc* (W)	MRR* (cm ³ /min)	Kc* (N/mm ²)
1	0,295019	0,322608	0,209838	0,06611	0,675754
2	0,322677	0,365601	0,237802	0,198329	0,25527
3	0,50476	0,392642	0,25537	0,396659	0,137064
4	0,308848	0,332198	0,331315	0,202737	0,347921
5	0,375689	0,367493	0,366517	0,456157	0,17106
6	0,43331	0,283465	0,282711	0,202737	0,296881
7	0,177473	0,353792	0,475583	0,409881	0,247025
8	0,184387	0,264023	0,354912	0,20494	0,368693
9	0,253532	0,29573	0,397533	0,546507	0,154863

Étape 3: Définir les valeurs normalisées

$$Y = w_j \cdot y'_{ij} \dots\dots\dots (IV.12)$$

ou, w ;et le poids du critère j,

Tableau IV.11: Valeurs normalisées pondérées.

Essai N°	Valeurs normalisées pondérées Y = w _j · y'_{ij}				
	Y _{Ra} (µm)	Y _{Fz} (N)	Y _{Pc} (W)	Y _{MRR} (cm ³ /min)	Y _{Kc} (N/mm ²)
1	0,059004	0,064522	0,041968	0,013222	0,135151
2	0,064535	0,07312	0,05945	0,049582	0,051054
3	0,100952	0,078528	0,063842	0,099165	0,027413
4	0,06177	0,06644	0,082829	0,050684	0,069584
5	0,075138	0,073499	0,091629	0,114039	0,034212
6	0,086662	0,056693	0,070678	0,050684	0,059376
7	0,035495	0,070758	0,118896	0,10247	0,049405
8	0,036877	0,052805	0,088728	0,051235	0,073739
9	0,050706	0,059146	0,099383	0,136627	0,030973

Étape 4 : identifier la valeur de proximité pondérée de chaque alternative

$$u_i = \begin{cases} Y_{\max} - Y_i & , \quad \text{for } C_1, C_2, \dots, C_N \in B \\ Y_i - Y_{\min} & , \quad \text{for } C_1, C_2, \dots, C_N \in C' \end{cases} \dots\dots\dots(\text{IV.13})$$

Où :

B : représente le critère max et **C** : représente le critère min.

Tableau IV.12: Résultats des valeurs indexées de proximité (PIV)

Essai N°	U _i (Ra)	U _i (Fz)	U _i (Pc)	U _i (MRR)	U _i (kc)
1	0,023509	0,011717	0	0,123405	0,107738
2	0,029041	0,020316	0,017483	0,087045	0,023641
3	0,065457	0,025724	0,021875	0,037462	0
4	0,026275	0,013635	0,040861	0,085943	0,042171
5	0,039643	0,020694	0,049662	0,022588	0,006799
6	0,051167	0,003888	0,02871	0,085943	0,031963
7	0	0,017954	0,076928	0,034157	0,021992
8	0,001383	0	0,04676	0,085392	0,046326
9	0,015212	0,006341	0,057416	0	0,00356

Étape 5: Déterminer la valeur globale de proximité.

$$d_i = \sum_{j=1}^n u_i \dots\dots\dots(\text{IV.14})$$

Étape 6 : Classement des options selon la règle laquelle l'alternative avec le d_i, le plus court est considéré comme la meilleure.

Tableau IV.13: Résultats PIV (distances, coefficient de proximité d_i et le classement pour chaque alternative).

Essai N°	d_i	Rang
1	0,266369	9
2	0,177525	5
3	0,150518	3
4	0,208886	8
5	0,139386	2
6	0,201672	7
7	0,151031	4
8	0,179861	6
9	0,082529	1

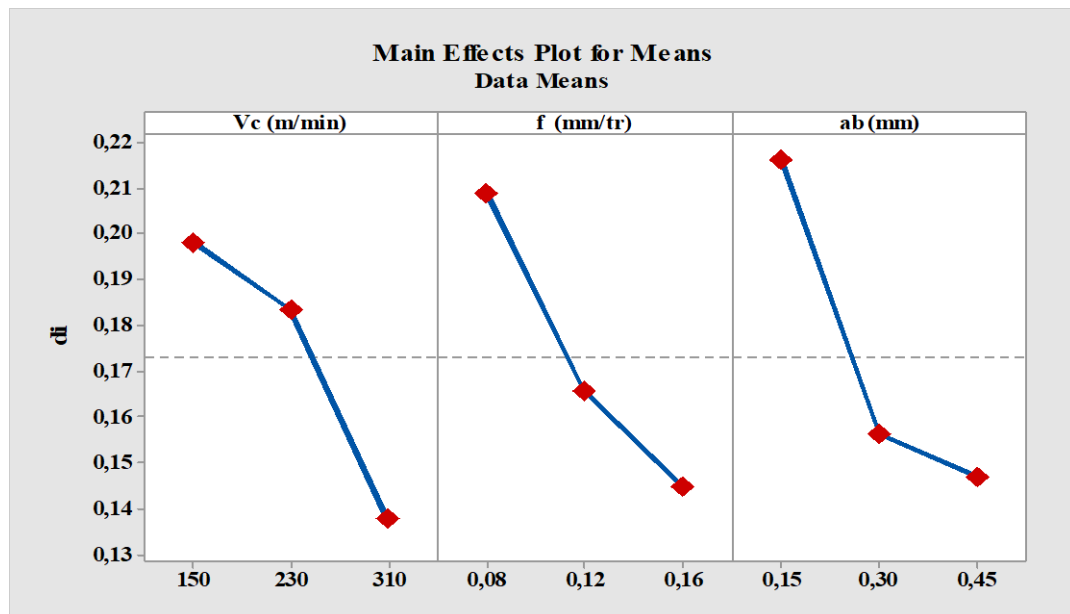


Figure IV.10: Diagramme des effets principaux pour PIV.

IV.5 Comparaison des résultats d'optimisation

L'application des différentes méthodes d'optimisations multi-objective a permis l'obtention des résultats résumés dans le tableau (IV.14).

Tableau IV.14: Récapitulatif des combinaisons optimales.

Methode	Regimes optimaux			Reponses				
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	Pc (W)	MRR (cm^3/min)	Kc (N/mm^2)
DF	310	0,137	0,351	0,896 (Optimal)	48,621	243,923	14,88 (Optimal)	656,925 (Optimal)
PIV Rang	310	0.16	0.3	1,1	45,33 (Optimal)	234,20 (Optimal)	14,88 (Optimal)	944,37
MOORA Rang	310	0.16	0.3	1,1	45,33 (Optimal)	234,20 (Optimal)	14,88 (Optimal)	944,37
Différence en (%)				↗ 18,54%	↘ -07,26%	↘ -04,15%	0 %	↗ 30,43%

Le tableau (IV.14) récapitule les régimes optimaux ainsi que les sorties optimisées trouvés par les trois méthodes d'optimisation (DF, MOORA et PIV). L'analyse de ces résultats trouvée montre que les deux méthodes d'optimisation (MOORA et PIV) donnent le même régime de coupe ($V_c = 310$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr et $a_p = 0.3$ mm) et les sorties sont similaires. La méthode (DF) a donné des meilleurs résultats par rapport aux deux méthodes (PIV et MOORA) en termes de qualité de l'état de surface et l'effort de coupe spécifique (Kc).

Nous constatons également une diminution de l'effort tangentiel (Fz) de (-07,26%), la puissance de coupe (Pc) a une diminution considérablement légère de (-04,15%). Les résultats montrent aussi une stabilité concernant le (MRR) lors de l'utilisation de ses trois méthodes utilisées.

Conclusion générale

Cette étude vise à étudier l'usinage à sec de l'acier AISI H11 en utilisant une plaquette en céramique Wiper (CC650WG), le but est de réaliser une étude statistique suivie par une modélisation et une optimisation multi-objective des conditions de coupe. Les résultats obtenus ont abouti aux conditions suivantes:

1) L'analyse de la variance l'ANOVA de la rugosité montre que le modèle trouvé est significatif et que la vitesse de coupe (V_c) est le facteur qui a le plus grand effet sur (R_a), il possède une contribution de 45.64%, suivie par l'avance (f) de 29.48%.

2) L'analyse ANOVA des résultats de l'effort tangentiel (F_z) indique que le paramètre le plus significatif est la profondeur de passe (a_p) avec une contribution de 66,46%, suivie par la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) avec des contributions respectives de 31,29% et 1,51%.

3) L'analyse ANOVA des résultats de la puissance de coupe (P_c) indique que les paramètres significatifs sont la vitesse de coupe (V_c) avec la contribution de 79,10%, suivi par profondeur de passe (a_p) et l'avance (f) avec 17,94% et 1,89% de contributions respectivement. Les quadratiques ($V_c * V_c$, $a_p * a_p$ et $f * f$) ne présentent aucune valeur significative.

4) L'ANOVA montre que le paramètre le plus important affectant (K_c) est la profondeur de passe (a_p) avec une contribution de 47,46%. Il est suivi par l'avance (f) qui est le deuxième facteur le plus influant sur (K_c) avec une contribution de 25.08%.

5) L'utilisation d'un plan réduit de Taguchi L9 pour réduire le nombre des expériences afin de déterminer les paramètres de coupe optimaux est réalisée avec succès.

6) L'optimisation avec la fonction de désirabilité a donné les régimes de coupe optimaux suivants :

1^{er} Cas : $V_c = 310$ m/min, $f = 0.131$ mm/t, $a_p = 0.268$ mm, $R_a = 0.770$ μ m, $F_z = 45.339$ N,

$P_c = 231.03$ W, $MRR = 10.871$ cm³/min, $K_c = 1146.217$ N/mm², $DF = 0.809$.

2^{ème} Cas : $V_c = 310$ m/min, $f = 0.160$ mm/t, $a_p = 0.3$ mm, $R_a = 1.14$ μ m, $F_z = 45,671$ N, $P_c = 233,545$ W, $MRR = 14,880$ cm³/min, $K_c = 706,885$ N/mm², $DF = 0,81$.

3^{ème} Cas : $V_c = 310$ m/min, $f = 0.137$ mm/tr, $a_p = 0.351$ mm, $R_a = 0.897$ μ m, $F_z = 48,612$ N, $P_c = 243,886$ N, $MRR = 12.188$ cm³/min, $K_c = 656,768$ N/mm², $DF = 0.827$.

7) L'utilisation des trois méthodes d'optimisation multicritères à savoir ; DF, MOORA et PIV pour minimiser (R_a , F_z , P_c et K_c) et maximiser le (MRR) simultanément nous a permis d'obtenir les régimes de coupe optimaux suivants :

8) L'optimisation avec la Méthode (MOORA) a abouti au régime de coupe suivant :

❖ $V_c = 310$ m/min, $f = 0.16$ mm/t, $a_p = 0.3$ mm, $R_a = 1.1$ μ m, $F_z = 45,33$ N.

$MRR = 14.88$ cm³/min, $P_c = 234,20$ W, $K_c = 944,37$ N/mm².

9) L'optimisation avec la Méthode (PIV) a abouti au régime de coupe suivant :

❖ $V_c = 310$ m/min, $f = 0.16$ mm/t, $a_p = 0.3$ mm, $R_a = 1.1$ μ m, $F_z = 45,33$ N.

$MRR = 14.88$ cm³/min, $P_c = 234,20$ W, $K_c = 944,37$ N/mm².

10) La comparaison entre les différentes méthodes d'optimisation utilisées a montré que les deux méthodes d'optimisation (PIV et MOORA) donnent le même régime de coupe et les mêmes valeurs de réponses de sortie. La méthode (DF) donne des meilleurs résultats en termes de qualité de surface (R_a) et de l'effort spécifique (K_c), en conclusion la méthode d'optimisation par (DF) est la meilleure par rapport aux (PIV et MOORA).

11) L'application des trois méthodes d'optimisation à savoir ; DF, MOORA et PIV ont été réalisées avec succès pour résoudre les problèmes d'optimisation multi réponse du processus d'usinage en tournage de l'acier X38 CVD 5. La méthode (DF) propose un régime différent par rapport aux (MOORA et PIV). Ce régime semble être meilleur, vu qu'il se situe entre les deux, donc faisant un meilleur compromis entre les paramètres de performances considérés. C'est à l'utilisateur de faire le choix selon les objectifs souhaités.

Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- L'utilisation de la méthode de lubrification MQL.
- La simulation numérique de la coupe orthogonale de l'acier X38 CVD 5 par autre méthodes d'optimisation.
- L'application des autres méthodes de modélisation et autres méthodes d'optimisation (PSO et NSGAI).

Références bibliographique

- [1] Olivier Oullié, *Éléments d'usinage et métrologie dimensionnelle*, cours-TEC 040, 2009, ESTML Québec.
- [2] C. Koepfer, "Production Machining," *Production Machining*, 22 01 2010. [Online]. Available: <https://www.productionmachining.com/articles/hardturning-as-an-alternative-to-grinding>. [Accessed 05 06 2021].
- [3] Berro A, *Optimisation multi-objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2001.
- [4] Bouzid, L. (2015). *Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13*. Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma.
- [5] Bouzid, L. (2015). *Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13*. Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma.
- [6] M.A. Yaltese, *Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur*, Thèse de doctorat, 2005, Université de Annaba.
- [7] Tilbi, H. (2020). *Influence de l'usure des outils de coupe sur la qualité d'usinage discontinue* (Master's thesis). Université Badji Mokhtar - Annaba, Annaba, Algeria.
- [8] ELECOEUR .J. PILARD, *usinage sur machine outils de la grave 1979-paris*.
- [9] Bedrin.C; Roumesy.B., *Usinage par outil coupant Fascicule 1-2*, INSA Lyon 1989.
- [10] Enache, S., & Chambon, M. (1972). *La qualité des surfaces usinées*. Dunod.
- [11] Keblouti, O., L. Boulanouar, and R. BOUZIANE1 MW AZIZI. "Impact du revêtement et des conditions de coupe sur le comportement à l'usure des outils et sur la rugosité de la surface usinée." (2017).
- [12] Singh, P. K., Saini, P., & Kumar, A. K. (2019, July). Multi-response optimization using TGRA for end milling of AISI H11 steel alloy using carbide end mill. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1240, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.

- [13] Mejbel, AMKMK, Khalaf, MM et Kwad, AM (2021). Amélioration de la surface usinée de l'acier à outils AISI H11 lors du processus de fraisage. *J. Mech. Ing. Rés. Dev*, 44(4), 58-68.
- [14] Benlahmidi, S., Aouici, H., Boutaghane, F., Khellaf, A., Fnides, B. et Yallese, MA (2017). Optimisation de la conception des paramètres de coupe lors du tournage de l'acier trempé AISI H11 (50 HRC) avec les outils CBN7020. *Le Journal international des technologies de fabrication avancées*, 89, 803-820.
- [15] Kumar, R. S., Kumar, S. D., & Rajkumar, S. (2022). Multi-response optimization of AISI H11 using Taguchi and Grey relational analysis. *Materials Research Express*, 9(10), 106508.
- [16] NIST/SEMATECH "5.5.3.2.2. (2012). Réponses multiples : L'approche de la désirabilité", Dans : *E-Handbook of Statistical Methods*, [e-book] National Institute of Standards and Technology (NIST).
- [17] Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). *New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM)* (Vol. 277, pp. 103-08). Cham: Springer.
- [18] S. Mufazzal, S.M. Muzakkir, Une nouvelle méthode de prise de décision multicritère (MCDM) basée sur une valeur indexée de proximité pour minimiser les inversions de rang, *Comput. Ind. Ing.* 119, 427-438 (2018).