

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE 08 MAI 1945 –GEULMA-



Projet de fin d'étude
Master 2
Option : construction mécanique

**Application des méthodes statistiques pour
l'optimisation des paramètres de coupe en tournage dur**

Présenté par :
Hamana Anas

Sous la direction de :
Dr. Bouchelaghem Hadjira

Juin 2025

DEDICACE

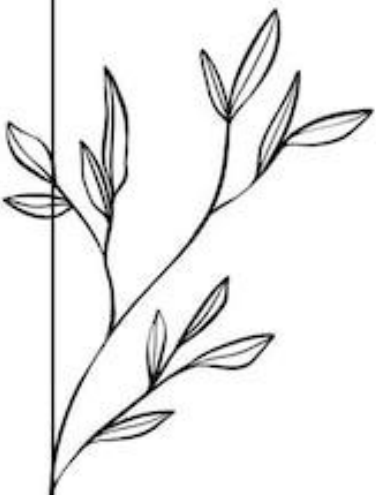
Louange à Dieu, en premier et en dernier, Louange à Celui qui m'a guidé et soutenu, Celui qui a éclairé mon chemin et exaucé mes prières dans les nuits les plus sombres, Par Sa grâce seule, j'ai atteint ce moment tant espéré. Gloire à Dieu, qui n'a jamais éteint ma lumière, mais l'a nourrie et multipliée.

À mon cher père « ABD ELKARIM », l'homme des principes solides, le pilier de patience, la voix de la sagesse et le bouclier de ma vie, Tu es l'honneur dans mon cœur, Ma gratitude et mon amour éternel te sont dédiés.

À ma douce mère « MABROUKA », celle dont les prières m'ont protégé, dont la tendresse m'a réconforté, Celle qui m'a entouré d'amour quand tout s'écroulait, Tu es la lumière de ma vie, mon havre et mon paradis sur terre.

À mon frère « KHOUBAIB » bien-aimé, mon premier ami, mon allié fidèle, mon refuge dans l'adversité, Merci pour ta présence, ton soutien inébranlable, ton amour constant. à ton épouse, cette femme admirable « RIMA », Merci pour ton affection sincère, ta bonté naturelle et l'équilibre que tu apportes à notre famille. Et à votre petite princesse « SAJIDA », joyau de votre foyer, La petite étoile qui illumine nos journées de ses rires et de son innocence, Celle qui sème la joie autour d'elle d'un simple regard ou d'un mot doux.

À mes quatre sœurs « MARIA » « NOUSSAIBA » « OUMAIMA » « ANFEL », vos bras furent mon abri, vos cœurs ma paix, vos mots mon encouragement, Merci d'avoir été l'exemple de noblesse et de loyauté, Vous avez fait de mes principes une fierté vivante. Merci pour votre soutien constant, pour votre présence rassurante dans chaque étape. C'est grâce à vous, à votre amour et à votre foi en moi, que j'ai pu atteindre ces sommets. Vous êtes les racines de ma réussite et la douceur de mon chemin.



À mon grand-père défunt « AHMED EL ARBI », Qu'Allah lui fasse miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis. Tu étais un symbole de sagesse et de dignité, et ton souvenir restera gravé dans mon cœur pour toujours.

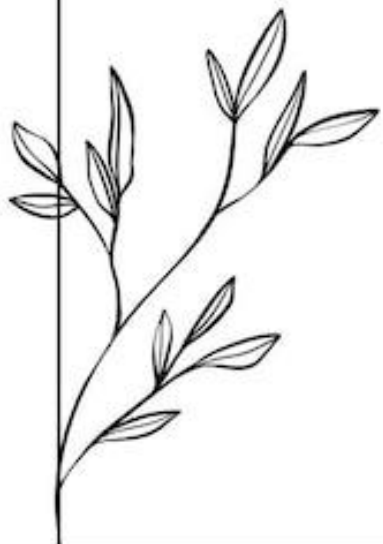
Et à mes deux oncles maternels disparus, « KAMEL » et « LAZHAR », Vous avez quitté ce monde trop tôt, mais jamais nos cœurs. Vos sourires, votre bonté et la chaleur de votre présence demeurent vivants dans ma mémoire. Que Dieu vous couvre de Sa miséricorde et vous accorde la paix éternelle. Vous vivez en moi à travers chaque prière, chaque réussite, chaque instant de gratitude.

À mon autre grand-père « ABD ELMAJID », Puisse Allah te prolonger la vie et te guérir d'un rétablissement complet. Ta présence parmi nous est une bénédiction, et nos prières t'accompagnent chaque jour.

À mes chères grands-mères « ARJOUNA ET RYM », Qu'Allah vous protège et vous préserve. Vous êtes la source de tendresse et le refuge de mon enfance, Et vos bras restent le plus doux des foyers quand le monde devient trop lourd.

À tous mes oncles et tantes, ainsi qu'à mon oncle maternel et mes tantes maternelles, merci pour vos prières sincères, vos paroles encourageantes et vos regards emplis de fierté.

À tous mes chers amis de la résidence universitaire HABACH AHMED CHERIF, À ceux avec qui j'ai partagé des moments inoubliables... dans leur douceur comme dans leur amertume, dans la joie comme dans les épreuves. Nous avons vécu ensemble des années riches, non pas en nombre, mais en émotions, en souvenirs gravés dans nos esprits. Entre les murs de cette résidence, de petites chambres ont abrité de grandes amitiés, et dans les couloirs, nos éclats de rire résonnent encore. Nous avons ri jusqu'aux larmes, nous avons affronté les silences et les jours gris, mais toujours ensemble, toujours soudés. Vous avez été pour moi plus que de simples compagnons de route... vous avez été une famille.



Merci pour chaque moment partagé, chaque soutien silencieux, chaque chaleur humaine dans l'éloignement. Vous resterez à jamais dans mon cœur. Que vive notre belle amitié.

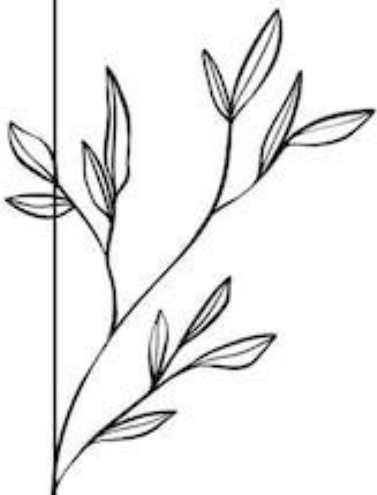
A Monsieur « Jellal Hussein » Merci d'avoir été pour nous un frère en exil, un soutien sur le chemin. Vous nous avez épargné les difficultés du voyage, toujours présent avec bienveillance.

Que Dieu vous récompense et vous garde dans Sa protection.

À moi-même, Je te dédie ce travail, à toi qui n'as jamais abandonné, à toi qui as cru en ton rêve quand d'autres doutaient, à toi qui as fait de l'effort, de la patience et de la persévérance une arme invincible.

À ceux qui ont parié sur mon échec, rabaissé ma valeur et douté de mon chemin...Merci, car vous avez alimenté ma volonté d'aller plus loin, Grâce à Dieu d'abord, puis à ma détermination, je suis là aujourd'hui. Louange à Dieu, qui ne m'a pas laissé devenir ce que vous pensiez, mais m'a permis de devenir ce que je voulais.

Et enfin, à la Palestine, blessure vive de notre nation, terre de martyrs et de courage, À toi, ô Palestine, mes prières, mon cœur et mon encre, Tu resteras l'emblème de la dignité, Ta liberté viendra, c'est une promesse divine. Et nous espérons que ce savoir appris servira la Palestine et la résistance, qu'il devienne une lumière sur le chemin de sa victoire proche.



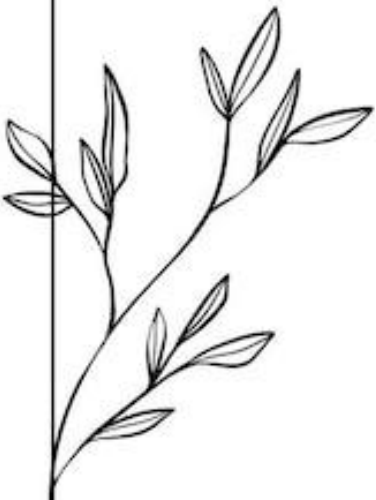
Remerciement

Ce mot de remerciement n'est pas simplement une formalité imposée par la tradition universitaire, mais une reconnaissance sincère envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

J'exprime tout d'abord ma profonde gratitude à mon encadreure, **Dr. BOUCHELAGHEM HADJIRA**, pour m'avoir accordé l'honneur de superviser ce travail. Ses conseils avisés, ses remarques constructives et sa disponibilité constante ont été d'une aide précieuse tout au long de cette période.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants et au personnel administratif du département de Génie Mécanique, pour la qualité de l'enseignement dispensé et pour leur soutien tout au long de mon parcours académique.

Enfin, j'adresse ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur aide, leur encouragement et leur bienveillance tout au long de ce travail



Résumé

La coupe des métaux, bien qu'étant un procédé d'usinage ancestral, a connu une évolution considérable avec la mécanisation accrue des ateliers de fabrication et l'intégration des outils informatiques pour l'optimisation des processus. L'amélioration continue de la productivité dans ce domaine constitue un enjeu majeur. Toutefois, cette quête de performance quantitative s'accompagne souvent d'un impact sur la qualité des pièces usinées, lesquelles doivent respecter des tolérances géométriques et dimensionnelles précises, ainsi qu'un seuil admissible de rugosité de surface pour garantir leur conformité fonctionnelle.

Dans ce contexte, le présent travail s'articule autour de deux axes principaux. Le premier porte sur la modélisation des paramètres technologiques de sorties tels que : la rugosité de surface (R_a), l'effort radial (F_y) et le taux d'enlèvement de matière (MRR), à l'aide de la méthode de réponse de surface (RSM), dans le cadre du tournage dur de l'acier AISI D3 à l'aide d'un outil en céramique revêtue (CC6050). Le second axe concerne l'optimisation multi-objective des conditions de coupe, en s'appuyant sur deux approches : la fonction de désirabilité (DF) et la méthode MOORA.

Mots clés : Tournage dur ; AISI D3 ; Rugosité ; Effort de coupe ; RSM.

Abstract

Metal cutting, although an age-old machining process, has undergone significant development with the increasing mechanization of manufacturing workshops and the integration of computer-based tools for process optimization. The continuous improvement of productivity in this field remains a major challenge. However, this pursuit of quantitative performance often has an impact on the quality of machined parts, which must comply with precise geometric and dimensional tolerances, as well as an acceptable level of surface roughness to ensure their functional conformity.

In this context, the present work is structured around two main axes. The first focuses on the modeling of key technological parameters such as surface roughness (R_a), radial force (F_y), and material removal rate (MRR), using the response surface methodology (RSM), in the context of hard turning of AISI D3 steel with an uncoated ceramic tool (CC6050). The second axis addresses the multi-objective optimization of cutting conditions, based on two approaches: the desirability function (DF) and the MOORA method.

Key words: Hard turning; AISI D3; Surface roughness; Cutting force; RSM.

ملخص

يُعد قطع المعادن من أقدم عمليات التشغيل، غير أنه شهد تطورًا كبيرًا بفضل المكينزمات المتزايدة لورشات التصنيع واعتماد أدوات الحوسبة في تحسين العمليات. وتُعتبر الزيادة المستمرة في الإنتاجية ضمن هذا المجال هدفًا رئيسيًا، إلا أن هذا السعي نحو تحسين الأداء الكمي قد يؤثر سلبيًا على جودة القطع الناتجة، والتي يجب أن تفي بمعايير هندسية وأبعاد دقيقة، بالإضافة إلى احترام حدود مقبولة للخشونة السطحية لضمان صلاحيتها للاستخدام.

و في هذا الإطار يتناول هذا العمل محورين أساسيين. يتمثل المحور الأول في نمذجة بعض المعلومات التكنولوجية الهامة مثل خشونة السطح، القوة الشعاعية، ومعدل إزالة المادة، وذلك باستخدام طريقة الإستجابة السطحية، خلال عملية الخراطة الصلبة للفولاذ المدروس و أداة القطع المستخدمة. أما في المحور الثاني، فيتمثل في التحسين متعدد الأهداف لظروف القطع، وذل بالإعتماد على طريقتين : دالة الرغبة وطريقة مورا.

Nomenclature

V_c : Vitesse de coupe (m/min).

f : Avance par tour (mm/tr).

a_p : Profondeur de passe (mm).

TD : Tournage dur.

HRC : Dureté Rockwel.

HB : Dureté Brinell.

F_x : Effort axial [N].

F_y : Effort radial [N].

F_z : Effort tangentiel [N].

R_a : rugosité arithmétique (μm).

R_t : Rugosité totale [μm].

MRR : Taux d'enlèvement de matière [cm^3/min].

ANOVA : Analyse de la variance.

RMS : Méthodologie de surface de réponse.

Cont % : Pourcentage de contribution.

R^2 : Coefficient de détermination.

DF : Fonction de désirabilité.

MOORA : Analyse du ratio d'optimisation multi-objectif.

α : Angle de dépouille principal (degré).

γ : Angle d'attaque (degré).

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

χ_r : Angle de direction principal (degré).

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1: Operation d'usinage en tournage classique.....	1
Figure I.2 : Operation d'usinage en tournage dur.....	2
Figure I.3 : Matériau de coupe.....	7
Figure I.4 : Caractéristique de matériau de coupe.....	7
Figure I.5 : Vitesse de coupe (V_c).....	9
Figure I.6 : La vitesse d'avance.....	10
Figure I.7 : Effort de coupe.....	11
Figure. I.8 : Influence de l'avance et du rayon du bec de l'outil	13
Figure I.9 : Rugosité moyenne arithmétique R_a	14
Figure I.10 : Graphiques des effets principaux de (R_a)	15
Figure I.11 : Test de normalité (R_a)	15
Figure I.12 : Diagrammes de contour de (R_a)	16
Figure I.13 : Puissance en fonction paramètre de coupe.....	18
Figure I.14 : Force de coupe spécifique (K_s) en fonction de paramètre de coupe	18
Figure I.15 : Rugosité de surface (R_a) en fonction de paramètre de coupe	18
Figure I.16 : Comparaison entre les plaquettes CC6050 et CC650	19
Figure I.17 : Effet du temps de coupe sur l'usure de l'outil pour (CC6050 et CC650)	20
Figure I.18 : Effet du temps de coupe sur la rugosité de surface pour (CC650 et CC6050) ..	20
Figure I.19 : Topographie 3D du tournage avec plaquette CC6050.....	20
Figure I.20 : Topographie 3D du tournage avec plaquette CC650	21
Figure I.21 : Valeurs du rapport signal/bruit (S/B) pour la vitesse de coupe.....	22
Figure I.22 : Valeurs du rapport signal/bruit (S/B) pour l'avance.....	22
Figure I.23 : R_a de l'AISI D3	23

Figure I.24 : Rugosité moyenne (Ra) de l'AISI H13.....	23
--	----

Chapiter II

Figure II.1: Tour parallèle modèle SN 40C.....	24
--	----

Figure II.2: Barres laminées à chaud en acier AISI D3.....	25
--	----

Figure II.3: Photos des éprouvettes utilisées.....	25
--	----

Figure II.4: Diagramme du revenu	26
--	----

Figure II.5: Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvettes.....	27
--	----

Figure II.6: Plaquette de coupe.....	28
--------------------------------------	----

Figure II.7: Porte outil utilisé.....	28
---------------------------------------	----

Figure II.8: Dynamomètre (KISTLER9257 B).....	29
---	----

Figure II.9: Amplificateur de charge.....	29
---	----

Figure II.10: PC.....	29
-----------------------	----

Figure II.11: Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE	30
--	----

Figure II.12: Rugosimètre Surftest 301	30
--	----

Figure II.13: Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce	30
--	----

Figure II. 14: Schéma de la configuration expérimentale.....	31
--	----

Chapitre III

Figure III.1 : Diagrammes de surface 3D de (Ra).....	38
--	----

Figure III.2 : Diagrammes de contour de (Ra).....	39
---	----

Figure III.3 : Graphique des effets principaux pour (Ra).....	39
---	----

Figure III.4 : Diagramme des interactions pour (Ra).....	40
--	----

Figure III.5 : Test de normalité de (Ra).....	40
---	----

Figure III.6: Diagrammes de surface 3D de (F_y).....	42
Figure III.7 : Diagrammes de contour de (R_a).....	43
Figure III.8 : Graphique des effets principaux pour (F_y).....	43
Figure III.9 : Diagramme des interactions pour (F_y).....	44
Figure III.10 : Test de normalité de (F_y).....	44

Chapitre IV

Figure IV.1 : Diagramme des rampes pour le 1er cas d'optimisation.....	48
Figure IV.2 : Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 1er cas.....	49
Figure IV.3 : Diagramme des rampes pour le 2 eme cas d'optimisation	50
Figure IV.4 : Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 2 eme cas.....	52
Figure IV.5 : Diagramme des rampes pour le 3eme cas d'optimisation.....	53
Figure IV.6 : Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 3eme cas.....	55
Figure IV.7 : Diagramme des rampes pour le 4eme cas d'optimisation.....	56
Figure IV.8 : Graphes de désirabilité 3 D et les contours (2D) pour 4eme cas.....	58
Figure IV.9 : Comparaison des paramètres d'usinage optimisés.....	63

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Comparaison entre tournage dur et rectification.....	3
Tableau I.2 : Analyse de la variance des rapports S/B de (Ra) pour : CC6050 et CC650.....	19

Chapitr II

Tableau II.1 : Composition chimique de l'AISI D3, (en% en poids).....	25
Tableau II.2: Caractéristiques du four électrique.....	27
Tableau II.3 : Informations relatives à la plaquette utilisée.....	27
Tableau II.4: Caractéristiques géométriques du porte- outil utilisé.....	28
Tableau II.5 : Matrice de planification pour un plan 3 ³	33

Chapitre III

Tableau III.1: Plan expérimental 3 ³	36
Tableau III.2: Résultats de l'analyse de variance pour (Ra).....	37
Tableau III.3: Résultats de l'analyse de variance pour (Fy).....	41

Chapitre IV

Tableau IV.1 : But et gamme de paramètres pour le 1 ^{er} cas d'optimisation.....	47
Tableau IV.2 : Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 1 ^{er} cas d'optimisation	47
Tableau IV.3 : But et gamme de paramètres pour le 2 ^{eme} cas d'optimisation.....	50
Tableau IV.4 : Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 2 ^{eme} cas d'optimisation	50
Tableau IV.5 : But et gamme de paramètres pour le 3 ^{eme} cas d'optimisation.....	53
Tableau IV.6 : Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 3 ^{eme} cas d'optimisation	53

Tableau IV.7 : But et gamme de paramètres pour le 4^{eme} cas d'optimisation.....	56
Tableau IV.8 : Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 4^{eme} cas d'optimisation	56
Tableau IV.8 : Résultats de l'optimisation par la fonction désirabilité.....	58
Tableau IV.9 : Matrice des valeurs normalisées.....	59
Tableau IV.10 : Valeurs normalisées pondérées.....	60
Tableau IV.11 : Résultats MOORA (distances, coefficient de proximité Qi et le classement pour chaque alternative).....	62

TABLE DES MATIÈRES

Introduction Générale.....	I
----------------------------	---

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1.Introduction	1
I.2.l'usinage	1
I.3.Tournage	1
I.3.1.Définition	1
I.4.Tournage dur	2
I.4.1.Définition	2
I.4.2.Avantages du tournage dur	2
I.4.3.Comparaison entre tournage dur et rectification	3
I.4.4.Désavantages du tournage dur par rapport à la rectification.....	3
I.4.5.Matériaux usinés en tournage dur	3
I.5.Matériaux de coupe	6
I.5.1.Introduction.....	6
I.5.2.Caractéristiques d'un matériau de coupe	7
I.5.3.Outils de coupe impliqués en tournage dur	7
I.6.Principaux paramètres de coupe:.....	8
I.7.Efforts de coupe en tournage dur	10
I.7.1.Généralité	10
I.7.2.Définition	10
I.7.3.Définition et intérêt de leur mesure.....	11
I.8.Etat de surface des pièces mécanique.....	12

I.8.1.Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques.....	12
• Rugosité.....	12
• Surface géométrique	12
• Surface spécifiée	12
• Surface mesurée.....	12
• Surface réelle.....	12
I.8.2.État de surface en tournage.....	12
I.8.3.Rugosité moyenne arithmétique Ra.....	14
I.9.Travaux de recherche (état de l'art).....	14
I.9.1.Modèle statistique de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI D3.....	15
I.9.2.Étude des efforts de coupe, la rugosité de surface et la puissance de coupe lors du tournage dur avec un outil en céramique mixte.....	16
I.9.3.Performance des outils céramiques mixtes revêtus et non revêtus lors du tournage dur.....	18
I.9.4. Optimisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI D3 à l'aide des méthodes Taguchi et RSM.....	21
I.9.5.Comparaison de l'effet du travail à froid et du travail à chaud sur la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier à outils.....	22

Chapitre II : Procédure expérimentale

II.1.Introduction.....	24
II.2.Matériels utilisés.....	24
II.2.1.Machine-outil.....	24
II.2.2.Matériau utilisé.....	25
II.2.2.2. Traitement thermique appliqué.....	26

II.2.2.2. Outils de coupe utilisée.....	27
II.2.4 Porte outil.....	28
II.2.4. Matériels de mesure.....	28
II.2.4.1. Dynamomètre (Plateforme KISTLER)	28
II.2.4.2. Mesure de la rugosité.....	30
II.3. conditions de coupe.....	32
II.4. planification des expériences.....	32
II-4.1 Méthode de planification des expériences.....	32
II.5.Conclusion	33

Chapitre III : Modélisation des paramètres de coupe

III. Modélisation des paramètres technologique en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS).....	35
III.1 Introduction.....	35
III.2. Analyse de la rugosité (Ra).....	36
III.2.1.Diagramme de surface en (3D) et graphiques de contour de (Ra).....	38
III.2.2.Graphique des effets principaux et d'interaction de (Ra).....	39
III.2.3.Test de normalité de (Ra).....	40
III.3. Analyse de la composante de l'effort de coupe (Fy).....	41
III.3.1.Diagramme de surface en (3D) et graphiques de contour de (Fy).....	42
III.3.2Graphique des effets principaux et d'interaction de (Fy).....	43
III.3.3.Test de normalité de (Fy).....	44

Chapitre IV : Optimisation des paramètres de coupe

IV.1.Introduction.....	45
IV.2.Optimisation des résultats par la fonction désirabilité (DF).....	45
IV.2.1.Introduction.....	45
IV.2.2. Cas d'optimisation étudiés.....	46
1^{er} cas : Qualité maximale.....	47
2^{eme} cas : Minimisation de l'effort.....	49
3^{eme} cas : Productivité maximale.....	52
4^{eme} cas : Optimisation combiné.....	55
IV.2.3.Résumé des paramètres optimaux selon la fonction désirabilité.....	58
IV.3.Méthode MOORA.....	58
IV.4.Comparaison des résultats d'optimisation.....	62

Introduction générale

Les aciers pour le travail à froid, tels que l'AISI D3, sont largement employés dans divers secteurs en raison de leur excellente résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle essentiel dans la fabrication des poinçons et matrices, dans l'industrie aéronautique, la production de dispositifs médicaux ainsi que dans le domaine agroalimentaire. Ce matériau se distingue par une remarquable résistance à l'usure, une bonne stabilité dimensionnelle et une grande capacité à supporter les pressions élevées.

Par ailleurs, afin de garantir une qualité optimale des pièces usinées, il est impératif de prêter une attention particulière à la modélisation des paramètres technologiques, à l'optimisation des conditions de coupe, ainsi qu'à l'exploitation d'outils statistiques pour l'analyse et l'amélioration des procédés.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre présente une revue bibliographique portant sur le tournage dur, les définitions des principaux paramètres technologiques, ainsi qu'un état de l'art des travaux de recherche relatifs à notre thématique.

Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie expérimentale. Il détaille le plan d'expériences adopté, les plages de variation des paramètres de coupe, ainsi que les équipements et matériels utilisés pour mener à bien les essais.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude statistique des résultats expérimentaux à travers une analyse de la variance (ANOVA), réalisée à l'aide du logiciel Design-Expert. Cette analyse vise à évaluer l'impact des paramètres de coupe sur la rugosité de surface (R_a), l'effort radial (F_y) et le taux d'enlèvement de matière (MRR), tout en élaborant des modèles mathématiques permettant de prédire ces grandeurs et de les exploiter dans un objectif d'optimisation.

Le quatrième chapitre, quant à lui, porte sur l'optimisation, étape clé dans le processus d'usinage. L'objectif est de déterminer les conditions de coupe les plus adaptées afin d'atteindre des performances optimales. Dans ce cadre, deux approches d'optimisation multi-objectifs ont été étudiées, à savoir les méthodes **MOORA** (Multi-Objective Optimization Ratio Analysis) et **DF** (fonction de désirabilité). Ces méthodes permettent de rechercher une configuration du régime de coupe conciliant plusieurs critères : minimisation de la rugosité, de l'effort de coupe radiale, tout en maximisant le taux d'enlèvement de matière. Toutefois, parvenir à un compromis satisfaisant entre tous ces objectifs demeure un défi.

Enfin, une conclusion générale vient clore ce travail en récapitulant les principaux résultats obtenus.



Chapitre I

Etude bibliographique



I.1.Introduction

L'obtention d'un système fiable nécessite la contribution de plusieurs organes ou pièces dont la bonne finition et la haute précision sont très demandées, c'est pour quoi que le processus d'usinage attire beaucoup d'attention et que nous insistons dans notre travail sur l'importance de connaître tout d'abord les définitions, les concepts de base ainsi que les paramètres technologiques influents. Le tournage est une opération d'usinage importante qui est utilisée pour diminuer le diamètre externe d'une pièce cylindrique tournante, le processus a été considéré comme tout à fait avantageux par rapport à d'autres processus de fabrication tels que le moulage, le forgeage et laminage dans la production de surface finie. [1]

I.2.L'usinage

L'usinage est une famille de procédés de fabrication de pièces par enlèvement de copeaux. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision.

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance). Il existe deux manières de générer la surface recherchée : par travail de forme ou par travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme c'est la forme de l'arête tranchante de l'outil qui conditionne la surface obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la conjonction des mouvements de coupe et d'avance qui définit la surface finale.[1]

I.3.Tournage

I.3.1.Définition

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes). [2]



Figure I.1: Operation d'usinage en tournage classique.[3]

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

I.4.Tournage dur

I.4.1.Définition

Le tournage des aciers d'une dureté supérieure à 45 HRC, de manière typique dans la plage 55 à 68 HRC, s'appelle le tournage dur (**figure I.2**). C'est une alternative économique à la rectification. Le tournage dur s'est avéré capable de réduire les temps d'usinage et les coûts de plus de 70 % tout en apportant plus de flexibilité, une qualité plus élevée et des temps de production moins longs. L'arrivée sur le marché de matériaux de coupe super durs tels que le nitrure de bore cubique (CBN) et les céramiques à base d'oxyde d'aluminium, ainsi que de nouvelles machines plus performantes, font du tournage dur un processus de fabrication fiable pour la production en grandes séries. Aujourd'hui, le tournage dur est bien accepté et tout à fait en mesure de répondre aux objectifs de productivité de l'industrie visant à une meilleure qualité de pièces finies et une réduction des temps de cycle.[5]



Figure I.2 : Operation d'usinage en tournage dur.[6]

I.4.2.Avantages du tournage dur

Parmi les avantages de tournage dur de l'expérience des utilisateurs de ce processus sont :
[7] [8] [9]

- ✓ Usinage facile des pièces à contour complexe.
- ✓ Gamme d'usinage plus courte car la phase de rectification est éliminée.
- ✓ L'aptitude à réaliser des opérations différentes avec une seule prise.
- ✓ Le taux d'enlèvement de matière est plus élevé que celui de la rectification.
- ✓ Le tournage dur peut être réalisé sur un tour de tournage conventionnel.
- ✓ L'investissement n'est pas lourd.

- ✓ Grace à l'élimination de la lubrification, Les déchets sont recyclables tels que les copeaux.
- ✓ L'élimination des boues de rectification chargées d'hydrocarbures qui sont nocive à la nature.

I.4.3.Comparaison entre tournage dur et rectification

Tableau I.1: Comparaison entre tournage dur et rectification [10].

	Tournage dur	Rectification
Gamme d'usinage	Plus courte : suppression de la phase rectification	Plus complexe car changement de prises des pièces
Temps d'usinage	Faible si $L < 40\text{mm}$	Important sauf si l'est grand ou si la pièce peut passer en centerless
Etats de surface (Ra)	$0.15\text{ }\mu\text{m}$	$0.15\text{ }\mu\text{m}$
Défaut de forme	Facilite l'opération de polissage	Evite les problèmes dus aux stries en hélice pour les pièces avec des fonctions d'étanchéité
Précision	Jusqu'à IT-5	Jusqu'à IT-3
Environnement	Retraitement des copeaux : dépollution (huile de coupe)	Les boues de rectifications sont difficiles et chères à retraiter

I.4.4.Désavantages du tournage dur par rapport à la rectification

Dans certains cas, il ne sera pas possible, d'un point de vue technique ou économique, de remplacer la rectification cylindrique par le tournage dur. Il se peut, par exemple, que la courbure de la pièce soit si importante que les tolérances dimensionnelles ne puissent être atteintes. Ceci peut se produire dans le cas d'une pièce mince. En effet, dans le cas du tournage dur, la force de coupe ($F_r > F_v$), contrairement au tournage de pièces à l'état non durci. Le diamètre des pièces à tourner ne doit pas être trop réduit de sorte que les vitesses de coupe requises puissent continuer à être atteintes. Prenons par exemple une pièce d'un diamètre de 8 mm et une vitesse requise de 200 m/min. Pour cela le nombre de tours doit être de 7961,7 tours par minute. Il va de soi que ce nombre de tours ne peut être fourni dans n'importe quelle condition. Pour certaines applications, la surface ne peut présenter un relief fileté. C'est notamment le cas des composants hydrauliques qui nécessitent des garnitures d'étanchéité. La surface des pièces tournées présentera toujours une structure fileté, contrairement à celle des pièces rectifiées. (Il n'est cependant pas exclu d'obtenir une pièce tournée qui puisse servir à réaliser une parfaite étanchéité aux gaz).[11]

I.4.5.Matériaux usinés en tournage dur

Les matériaux ferreux considérés ici comprennent les aciers rapides, les aciers d'outillages à chaud et à froid, les aciers alliés, les aciers de cémentation, les aciers de nitruration, les fontes blanches, les fontes alliées... [12].

- **Aciers de construction pour TTh**

Pendant l'usinage d'aciers durs, même à de faibles vitesses de coupe, les outils en aciers rapides et en carbure cémenté sont peu efficaces à cause de leur faiblesse à supporter des contraintes élevées à des températures élevées. Par conséquent, l'usinage des alliages ferreux traités (45 HRC à 70 HRC) constitue le principal domaine d'application des outils céramiques et CBN. La prudence invite à dire qu'un des matériaux devient difficile à usiner lorsque sa dureté dépasse 30HRC ou 1020MPa.

- **Aciers d'outillages à froid (X200Cr12, X160CrMoV12,...)**

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelle. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65 HRC. Ils sont principalement utilisés pour tous travaux à froid tels que: poinçons d'estampage, outils de découpe, outils d'extrusion,...

- **Aciers d'outillages à chaud (X40CrMoV5-1, X38CrMoV 40NiCrMo16, 35CrNiMo4...)**

Ces aciers possèdent une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Leur résistance à haute température, leur ténacité et leur aptitude au polissage leur permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants: matriçage à chaud, moules à couler sous pression, filage à chaud, vis d'extrudeuse, lame de cisaille à chaud. La dureté après revenu peut varier de 30 HRC à 55 HRC.

- **Aciers à moules (XC48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16...)**

L'acier XC48, livré à l'état normalisé, permet après trempe d'obtenir une dureté de surface appréciable (50 HRC). Le 40CrMnMo8 spécialement conçu pour l'élaboration des moules, pour matrice plastique est livré à l'état trempé et revenu a une résistance de 1000 à 1100 MPa. Il est caractérisé par la grande facilité d'usinage que lui donne la resulfuration. Ces aciers à moules sont utilisés pour la réalisation des carcasses de moules pour matières plastiques, semelles d'outillages, outils pour moulage sous pression, plaques porte empreintes...

- **Aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100)**

Ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60 HRC) et constitue un domaine où les outils CBN sont employés avec succès. Lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à

faible concentration de CBN est préférable par rapport à un outil à forte concentration de CBN ou à une céramique mixte ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$).

- **Aciers rapides (HS 6-5-2, HS 2-9-1-8)**

Cette famille d'acier comprend, en majorité, les matériaux utilisés pour la fabrication des lames de découpe et des poinçons. La représentation de cette catégorie de matériaux regroupe les aciers rapides, les aciers de travail à chaud et les aciers de travail à froid.

- **Aciers de cémentation (16MnCr5, 10 CrNi6, C10, 18CrMo4...)**

L'usinage de finition et la coupe continue d'aciers de cémentation de dureté de 65 HRC peuvent être effectués avec des CBN à haute vitesse de coupe. En général le liant céramique TiC est plus performant qu'un métal liant CBN, en raison de sa capacité à garder une plus grande dureté aux températures élevées. L'usinage en coupe interrompue peut également être pratiqué avec satisfaction à l'aide de Pc-BN. Les outils à base de céramique peuvent être utilisés à de plus faibles conditions de coupe, mais les risques de rupture augmentent beaucoup.

- **Aciers de nitruration (30CrMo4, 30CrAlMo6-12, 40CrAlV6-10)**

Le but de la nitruration est de former une couche très dure sans trempe ultérieure. La nitruration peut être solide, gazeuse, liquide ionique, la dureté des couches peut varier 850 HV à 1400 HV. Suivant le procédé de nitruration et selon les matériaux traités. L'épaisseur des couches durcies n'excède pas 0,4 mm. Pendant ce procédé, l'accroissement de dureté est produit par insertion des atomes de carbone et d'azote dans le réseau cristallin du matériau. L'usinage de ses couches fines est très dur.

- **Fontes**

Les fontes grises, blanches en et nickel/chrome représentent un marché important de l'utilisation des CBN et des outils céramiques.

Les fontes grises (fontes moulées) sont utilisées en grandes quantités pour des applications générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les fontes grises ont une plage de dureté typiquement comprise entre 180 et 320 HB. Dans ce cas, les Pc-BN dépassent de loin les performances des outils en carbures et en céramique. Cependant d'autres auteurs ont affirmé que les céramiques à base de nitrure de silicium ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$) présentaient une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de la fonte grise. Les fontes blanches ou trempées sont beaucoup plus dures, plus fragiles et plus résistantes à l'usure que les fontes grises à cause de la

présence de carbure de fer (cémentite), au lieu de graphite. Leur dureté varie typiquement de 45 à 65 HRC. Des additions de nickel et de Chrome produisent un type de fonte blanche martensitique qui est habituellement connue sous le nom de Ni-Hard. Elle est caractérisée par une dureté de 50 à 65 HRC et qui est largement employée comme pièces d'usure. Les fontes Ni-Hard chrome sont dures, fragiles et difficiles à usiner. La haute dureté de ces fontes limite l'utilisation des outils carbure à des conditions de coupe non économiques.

- **Alliages réfractaires à base de nickel (Inconel 718) ou cobalt (stellite)**

Les alliages à base de nickel ou de cobalt sont très utilisés dans l'industrie aéronautique et sont plus difficiles à usiner que la plus part des aciers par ce qu'ils sont réfractaires. Ils maintiennent donc une grande partie de leur résistance pendant l'usinage mais s'écrouissent également. L'usure en entaille sur la face de dépouille et le principal problème. Les alliages à base de nickel et de cobalt sont habituellement usinés avec des outils en carbure avec des vitesses de coupe inférieures à 30 m/min.

I.5. Matériaux de coupe

I.5.1. Introduction

Les matériaux de coupe contemporains sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement, les opérations d'usinage qui demandent une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre actuellement moins d'une minute. L'importance des matériaux à outil de coupe ne peut pas être sous-estimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe, (**figure I.3**). Pour choisir un outil de coupe convenable, il faut prendre en compte plusieurs facteurs comme : la nature de l'opération de coupe (ébauche ou finition, précision demandée, coupe continue ou intermittente), la forme et la matière de la pièce (structure, dureté, résistance, état de couche superficielle, affinité chimique, inclusions), le type de machine-outil (puissance, rigidité, capacité), les conditions de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe), l'état de surface demandé (rugosité, contraintes résiduelles) et les coûts associés à cette opération. Étant donné le nombre de facteurs à considérer et la difficulté de les définir précisément, le choix d'un outil de coupe devient un problème très complexe [13] [14].



Figure I.3 : Matériau de coupe.[15]

I.5.2.Caractéristiques d'un matériau de coupe

Les caractéristiques recherchées dans un matériau de coupe peuvent être résumées comme suit [13]:

- Posséder une dureté permettant de résister à l'usure et à la déformation, même à une température élevée, (**figure I.4**).
- Posséder une ténacité élevée pour résister à la rupture.
- Être chimiquement inerte vis à vis du matériau usiné.
- Être chimiquement stable pour résister à l'oxydation et à la dissolution.
- Offrir une bonne conductibilité thermique et une bonne résistance aux chocs thermiques.

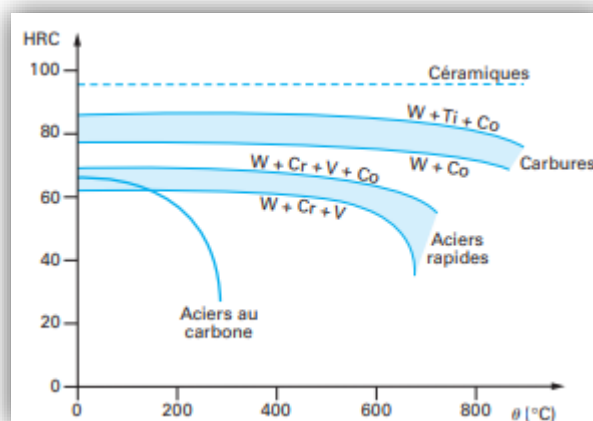


Figure I.4 : Caractéristique de matériau de coupe.[16]

I.5.3.Outils de coupe impliqués en tournage dur

Les outils de coupe impliqués dans l'usinage des matériaux durs ou difficiles à usiner sont soumis d'une part à des grandes charges mécaniques et à des températures élevées, dans certains cas la température à l'interface outil-copeau dépasse les 700°C. Et d'autre part, ces outils sont soumis au frottement avec la matière enlevée et la surface usinée. Il est donc primordial que les

outils de coupe doivent acquérir certaines caractéristiques mécaniques et chimiques telles que [17]:

- Une stabilité chimique et physique à des températures élevées.
- Une grande résistance à l'usure sous ses différentes formes (abrasion, adhésion...).
- Une ténacité élevée pour résister la rupture, particulièrement lors de la coupe interrompue.
- La dureté de l'outil de coupe ne doit pas être affectée par élévation de la température.

Les principaux matériaux employés en tournage dur sont les carbures cémentés, les céramiques (Al_2O_3 , Si_3N_4 ...etc.) et les matériaux extra-durs (PCD, PCBN) [18].

Parmi les matériaux les plus importants utilisés dans le tournage dur sont :

- Les carbures cémentés.
- Les cermets.
- Le PCD.
- Les CBN.
- Les revêtements
- Les céramiques : Les outils en céramique sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevé. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage [19].

I.6.Principaux paramètres de coupe :

Les deux mouvements fondamentaux qui contribuent à l'enlèvement de la matière pour former le copeau sont : Le mouvement de coupe (**MC**) et le mouvement d'avance (**MA**).

En tournage, le mouvement de coupe est donné par la rotation de la pièce usinée autour de son axe (N , tr/min), qui donne naissance à la vitesse de coupe **Vc** (m/min) au niveau du bec de l'outil, le mouvement d'avance **f** (mm/tr) est donné par le déplacement de l'outil parallèlement à l'axe de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements produit une hélice à la pointe de l'outil, si cette pointe possède un rayant suffisamment grand par rapport au pas de l'hélice, elle engendre un cylindre. Pour enlever le copeau il faut ajouter aux deux mouvements précédents un troisième mouvement qui consiste à faire entrer l'outil à chaque passe d'usinage d'une certaine profondeur dans la matière. C'est La profondeur de passe **ap** (mm).[20]

Pour le réglage de ces paramètres sur la machine on agit que sur 3 paramètres : [21]

- **N** : fréquence de rotation de la pièce en tournage.
- **Vf** : vitesse d'avance suivant la trajectoire d'usinage, en fait on détermine d'abord **f**.
- **ap** : profondeur de passe. `

Il est donc nécessaire de déterminer les relations entre **Vc**, **Vf** et **N**.

La valeur de la profondeur de passe maximale : **ap** maxi et donnée à titre indicatif.

La formule devient :

$$N = \frac{1000.Vc}{\pi.D} \dots\dots\dots (I.1)$$

Le diamètre correspond à la position de la pointe de l'outil :

- On usine parallèlement à l'axe de broche. La surface générée est un cylindre.

D = diamètre du cylindre.

➤ **Vitesse de coupe [m/min]**

Elle correspond généralement au mouvement le plus rapide (**figure I.5**), unité : Vc en m/min Sa valeur est déterminée expérimentalement et résulte d'un compromis lié notamment au coût de l'outil, au coût du changement d'outil, et au coût d'utilisation de la machine-outil. [21]

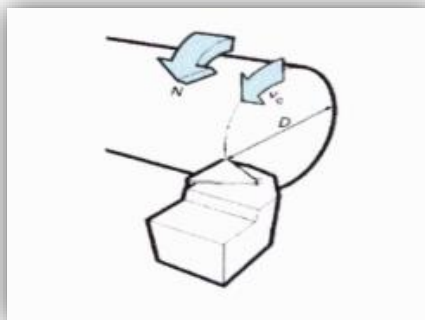


Figure I.5 : Vitesse de coupe (Vc).

➤ **Vitesse d'avance : Vf [mm/tr]**

Elle correspond à la vitesse de déplacement la plus lente (**figure I.6**). La trajectoire du mouvement d'avance associé au mouvement de coupe usine la forme souhaitée Unité : **Vf** en mm/tr Sa valeur sera déterminante pour la rugosité de la surface usinée. [21]

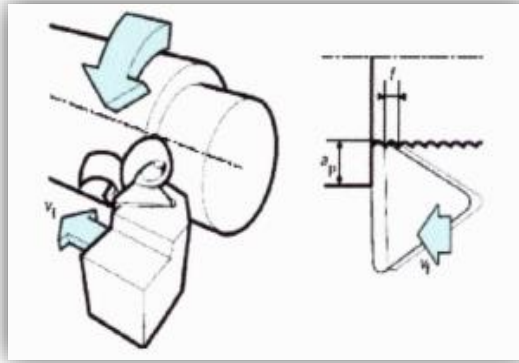


Figure I.6 : La vitesse d'avance.

➤ Profondeur de passe

La combinaison de V_f permet de déterminer le volume du copeau. La profondeur de passe est nécessaire afin de déterminer la quantité de matière qui va être séparée de la pièce sous forme de copeau (Unité : a_p en mm). [21]

I.7.Efforts de coupe en tournage dur

I.7.1.Généralité

L'effort de coupe est une technique prometteuse de détection de l'usure et de la rupture de l'outil L'effort de coupe est de la plus haute importance dans la conception de divers composants de la machine et l'évaluation du moteur électrique [22].

Les efforts de coupe en tournage dur sont toujours supérieurs qu'en tournage conventionnel à cause de l'augmentation de la dureté. Ceci a été confirmé par différents travaux de recherche telle que l'étude expérimentale réalisée par [23].

I.7.2.Définition

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire: l'effort double environ quand la vitesse d'avance double),(figure I.16) [24].

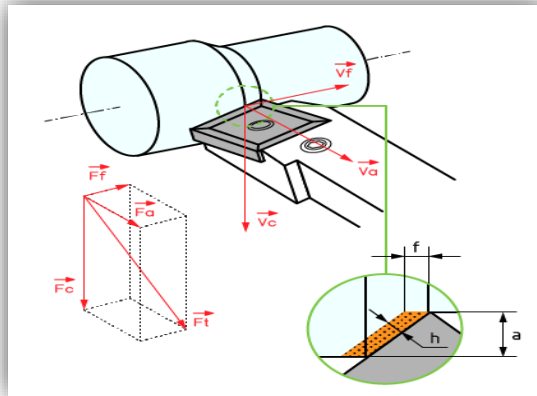


Figure I.7 : Effort de coupe.

I.7.3.Définition et intérêt de leur mesure

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

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

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

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

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions de l'apparitions des vibrations auto excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface [25]. En fin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques de métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur l'usinabilité du matériau coupé.

I.8. Etat de surface des pièces mécanique

I.8.1. Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques [26]

- **Rugosité**

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière ... etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement ... etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication.

- **Surface géométrique**

Surface parfaite ; Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

- **Surface spécifiée**

Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

- **Surface mesurée**

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

- **Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication.

I.8.2. État de surface en tournage

L'état de surface obtenu en usinage est principalement conditionné par la valeur de l'avance et le rayon de bec de l'outil. Par conséquent, ces facteurs doivent impérativement être pris en compte lors de la sélection de l'outil ainsi que des paramètres de coupe. La rugosité

théorique peut être calculée à partir du profil géométrique idéal représenté dans la figure ci-dessous [27].

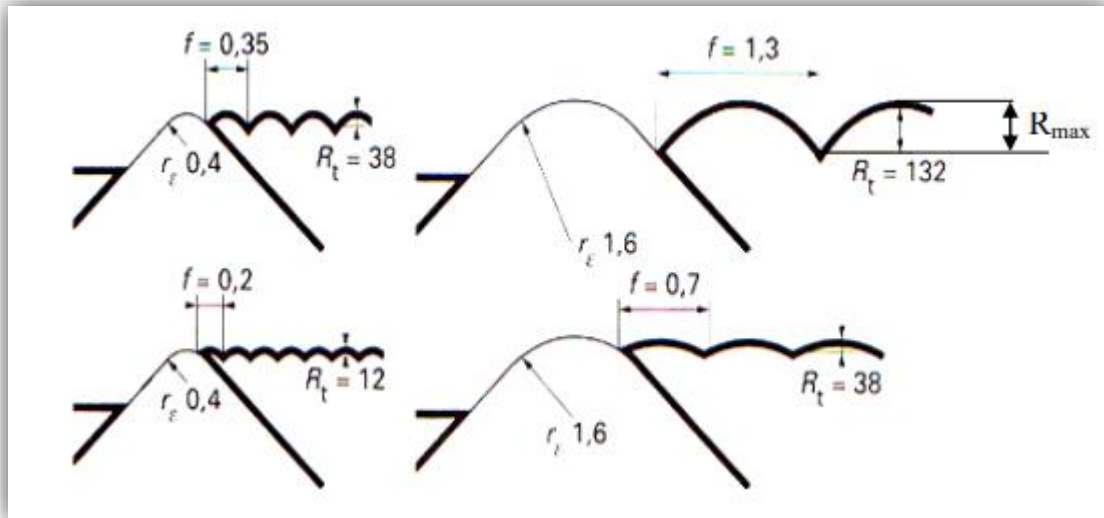


Figure. I.8 : Influence de l'avance et du rayon du bec de l'outil.

Lors de l'usinage d'un composant, l'obtention d'une finition de surface fine est primordiale pour garantir une longue durée de vie de la pièce, en raison de sa résistance à l'usure, à la fatigue, ainsi que sa fonctionnalité, son interchangeabilité, et ce, tout en assurant une efficacité maximale à un coût réduit.

La surface obtenue au cours d'une opération d'usinage est généralement considérée comme la combinaison de deux composantes :

- une rugosité idéale, qui dépend principalement de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe telles que l'avance.
- et une rugosité naturelle, générée par les irrégularités inhérentes au procédé d'usinage (vibrations, usure de l'outil, défauts mécaniques, etc.).

La rugosité idéale correspond donc à la meilleure qualité de surface théorique atteignable pour une configuration géométrique et une avance données, à condition d'éliminer toute perturbation naturelle liée au processus.

Plusieurs chercheurs soulignent que l'état de surface est un facteur déterminant qui peut fortement influencer les performances fonctionnelles des pièces usinées ainsi que les coûts de production.

Par conséquent, une meilleure finition de surface peut être obtenue grâce à un contrôle optimal des paramètres de coupe. En d'autres termes, la mesure et l'analyse de la rugosité de surface sont essentielles pour évaluer l'efficacité et la stabilité du procédé d'usinage [28, 29, 30].

I.8.3. Rugosité moyenne arithmétique Ra

Elle correspond à la moyenne arithmétique des écarts, pris en valeur absolue, par rapport à l'axe ox qui définit la ligne moyenne m :

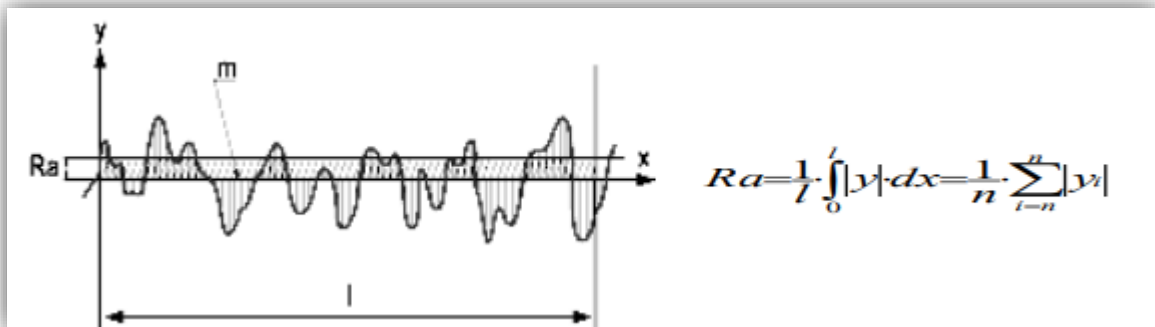


Figure I.9 : Rugosité moyenne arithmétique (Ra).

I.9. Travaux de recherche (état de l'art)

Dans cette section, nous présentons plusieurs travaux théoriques et expérimentaux portant sur l'acier X200Cr12, afin de dégager les aspects encore inexplorés et d'orienter notre étude vers une contribution scientifique significative. L'objectif est d'apporter une valeur ajoutée en nous inscrivant dans le domaine du tournage dur, tout en nous appuyant sur les résultats publiés par des chercheurs reconnus. De nombreux travaux de recherche ont mis en avant l'utilisation de la planification expérimentale comme un outil efficace pour modéliser et optimiser les paramètres technologiques du processus d'usinage.

I.9.1. Modèle statistique de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI D3 [31]

Dans cet article, Varaprasad Bhemuni et al sont intéressés à l'étude de l'influence des paramètres de coupe à savoir la vitesse de coupe (**Vc**), l'avance (f) et la profondeur de passe (**ap**) sur la rugosité de surface (**Ra**) lors du tournage dur de l'acier AISI D3, à l'aide d'un outil en céramique mixte de nuance CC6050.

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle mathématique prédictif de la rugosité de surface, en s'appuyant sur la méthodologie de surface de réponse (**RSM**). Ce modèle permettrait non seulement de mieux comprendre le comportement de (**Ra**) en fonction des paramètres d'usinage, mais également de déterminer des conditions de coupe optimales pour minimiser cette rugosité.

Pour atteindre cet objectif, les auteurs ont mené une série d'essais expérimentaux sur l'acier AISI D3 trempé à 62 HRC. Les expériences ont été planifiées selon un design composite central (**CCD**), et des analyses statistiques ont été effectuées avec un logiciel Design Expert.

Les résultats ont conduit à l'élaboration d'un modèle statistique satisfaisant, avec un coefficient de détermination $R^2 = 80,07 \%$, indiquant ainsi une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et celles prédites par le modèle. L'analyse de variance a révélé que l'avance (**f**) est le facteur ayant un impact plus significatif sur (**Ra**), suivie par la profondeur de passe et de la vitesse de coupe. Ainsi, ils ont conclu qu'une avance faible combinée à une vitesse de coupe élevée permettait d'obtenir une meilleure qualité de surface.

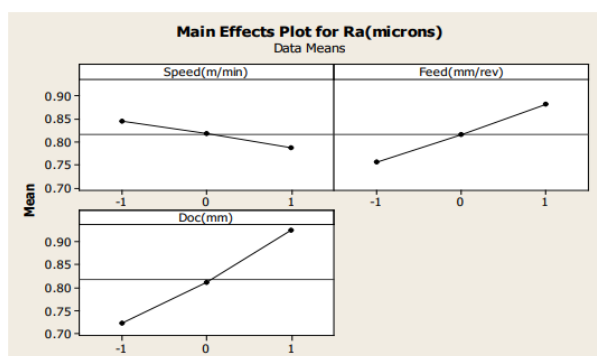


Figure I.10 : Graphiques des effets principaux de (**Ra**).

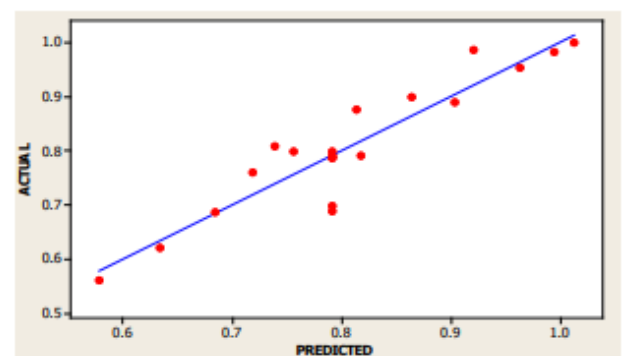


Figure I.11 : Test de normalité (**Ra**).

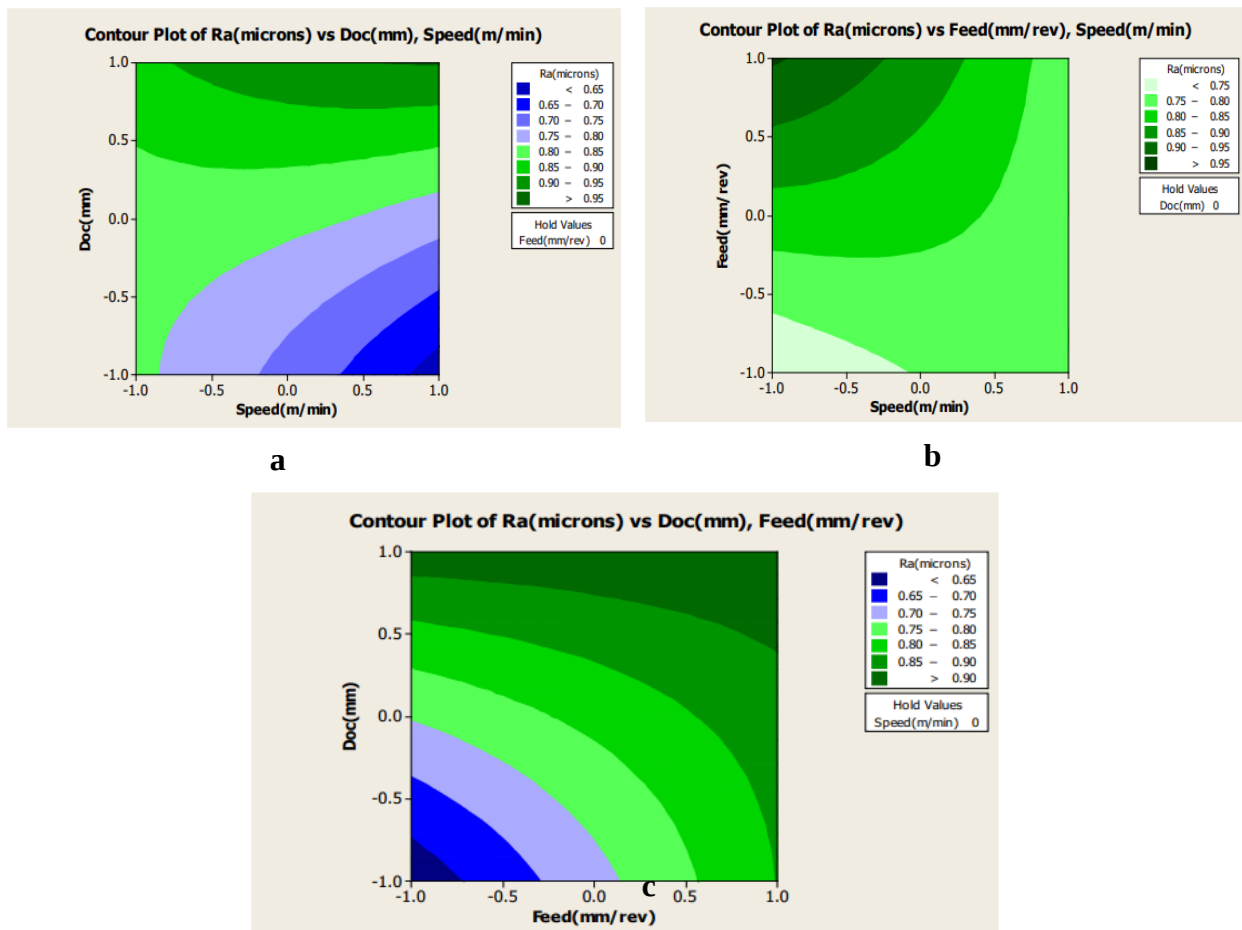


Figure I.12 : Diagrammes de contour de (R_a).

D'après les résultats ils ont aboutie a un régime optimal : Vitesse de coupe (V_c) : 165 m/min

Avance (f) : 0.05 mm/rev, Profondeur de passe (Doc) : 0.3 mm.

I.9.2.Étude des efforts de coupe, la rugosité de surface et la puissance de coupe lors du tournage dur avec un outil en céramique mixte [32]

Dans cet article, les auteurs Varaprasad Bhemuni et al ont étudié l'influence des paramètres de coupe la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) sur les efforts de coupe spécifique, la rugosité de surface (R_a) et la puissance de coupe lors du tournage dur de l'acier AISI D3 à l'aide d'un outil en céramique mixte CC6050.

Dans ce cadre, l'objectif de l'étude est d'évaluer expérimentalement l'impact de ces paramètres d'usinage sur la rugosité de surface, les efforts de coupe ainsi que la puissance consommée, et de développer des modèles mathématiques prédictifs via la méthode RSM (Response Surface Methodology).

Pour ce faire, les essais ont été effectués sur des éprouvettes en acier AISI D3 trempées à 62 HRC. L'usinage a été réalisé à sec sur un tour Kirloskar, en utilisant un outil en céramique mixte ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) de nuance CC6050. Les efforts de coupe ont été mesurés à l'aide d'un dynamomètre piézoélectrique Kistler, tandis que la rugosité de surface a été mesurée avec un Rugosimètre Mitutoyo **SJ 210**.

Un plan d'expériences de type **CCD** (Central Composite Design) a été adopté afin de planifier 20 essais, chacun correspondant à une combinaison de trois niveaux pour chaque facteur étudié, à savoir :

- Vitesse de coupe : 145, 155, 165 m/min
- Avance : 0,05 ; 0,075 ; 0,1 mm/tr
- Profondeur de passe : 0,3 ; 0,6 ; 0,9 mm

Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que :

- La rugosité de surface (**Ra**) varie de 0,71 à 2,27 μm .
- La puissance de coupe mesurée varie de 0,273 à 0,951 kW.
- l'effort de coupe spécifique varie de 3,12 à 9,53 kN/mm^2 .

En complément, l'analyse de variance (ANOVA) a permis d'identifier les facteurs les plus influents sur chaque réponse :

- La profondeur de passe (72%) est le facteur qui a un impact significatif sur la puissance.
- L'avance (50%) est le facteur dominant pour l'effort de coupe spécifique.
- La rugosité de surface est principalement influencée par l'avance (50%) et son carré (26%).

Enfin, les modèles mathématiques développés permettent de prédire chaque réponse en fonction des paramètres de coupe :

- Puissance (**P**) = $0.612 + 0.0636 \times V_c + 0.200 \times a_p - 0.0981 \times a_p^2$
- Force de coupe spécifique (**Ks**) = $5.223 + 0.453 \times V_c - 1.4704 \times f - 0.9573 \times a_p + 1.1504 \times f^2$

$$\text{- Rugosité (Ra)} = 0.85164 - 0.499 \times f + 0.06459 \times f^2$$

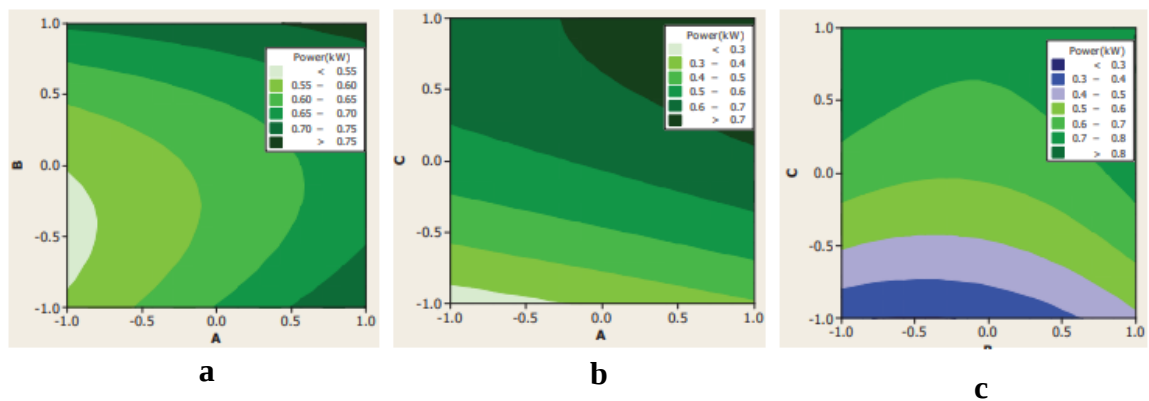


Figure I.13 : Puissance en fonction paramètre de coupe.

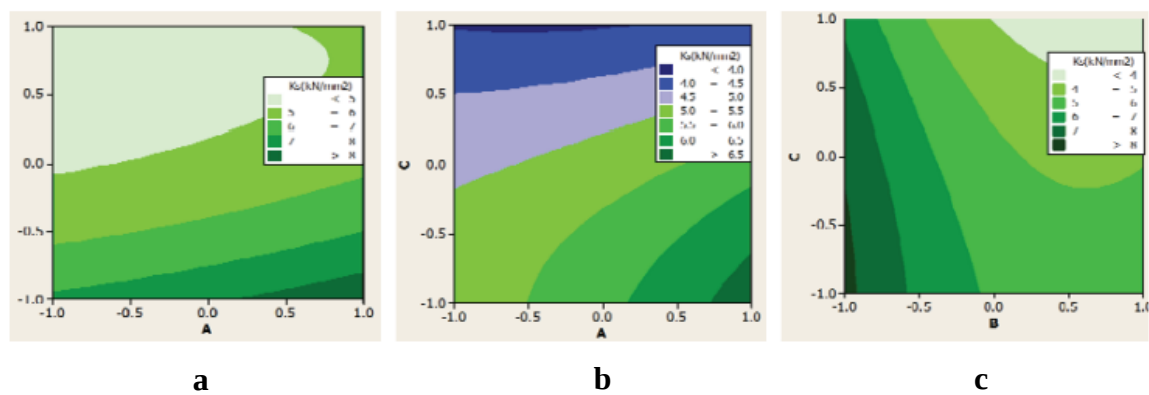


Figure I.14 : Force de coupe spécifique (Ks) en fonction de paramètre de coupe.

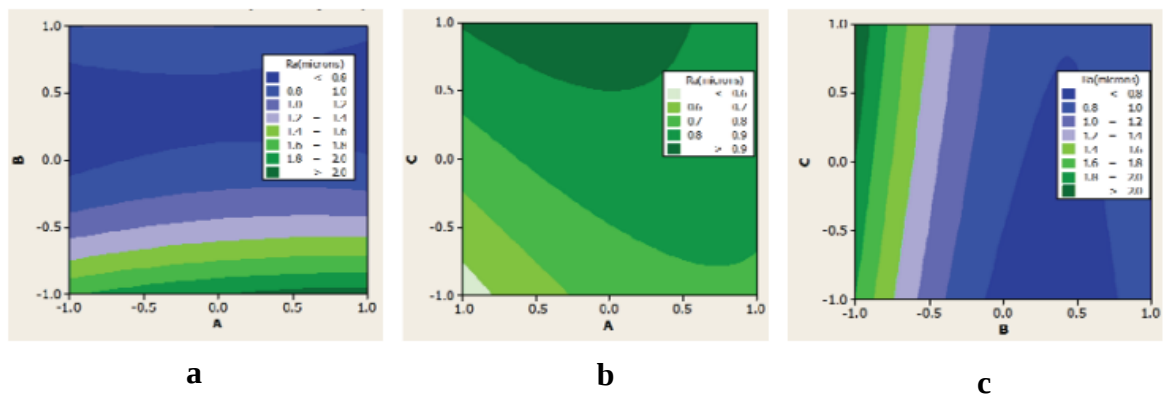


Figure I.15 : Rugosité de surface (Ra) en fonction de paramètre de coupe.

I.9.3. Performance des outils céramiques mixtes revêtus et non revêtus lors du tournage dur [33]

L'article traité par Hamza Bensouilah et al explore la performance des plaquettes céramiques mixtes revêtues (CC6050) et non revêtues (CC650) dans le tournage dur de l'acier AISI D3. Les auteurs sont concentrés sur l'effet de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface, les composantes de l'effort de coupe et l'usure de l'outil. Les

méthodes statistiques utilisées incluent le plan d'expérience Taguchi, l'analyse de variance (ANOVA), le rapport signal/bruit (S/N) et la méthodologie de surface de réponse (RSM).

Les résultats montrent que :

1. La plaquette revêtue CC6050 offre une meilleure qualité de surface, tandis que la plaquette non revêtue CC650 permet de réduire l'effort de coupe (**Figure I.16**).

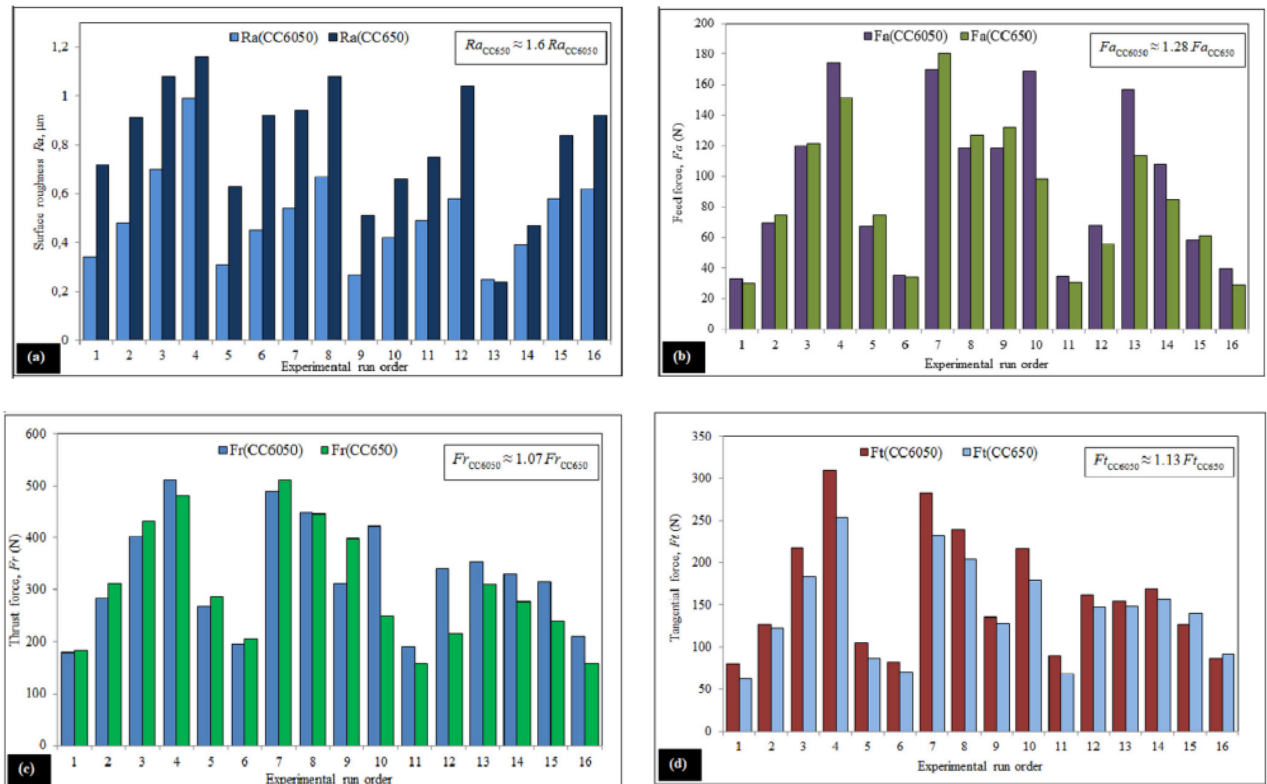


Figure I.16 : Comparaison entre les plaquettes CC6050 et CC650.

2. Le facteur le plus influent sur la rugosité de surface est l'avance (84,39 % pour CC6050 et 54,19 % pour CC650) (**Tableau I.2**).

Tableau I.2 : Analyse de la variance des rapports S/B de (**Ra**) pour : CC6050 et CC650.

Term	DF	SS	MS	F-value	P-value	Cont. %	Remarks
(a) CC6050							
Vc	3	18.577	6.1920	7.0	0.022	11.96	Significant
f	3	131.039	43.6800	49.40	0.000	84.39	Significant
ap	3	0.351	0.1170	0.130	0.937	0.23	Not significant
Residual	6	5.306	0.884			3.42	
Total	15	155.273				100	
(b) CC650							
Vc	3	56.357	18.7860	7.510	0.019	30.35	Significant
f	3	100.616	33.5390	13.410	0.005	54.19	Significant
ap	3	13.684	4.5610	1.820	0.243	7.37	Not significant
Residual	6	15.008	2.5010			8.08	
Total	15	185.665				100	

- La profondeur de passe est le paramètre le plus significatif sur l'effort de coupe, avec une contribution dépassant 90 % pour **(Fa)**, **(Fr)** et **(Ft)**.
- Les courbes d'usure (**Figure I.17**) montrent une durée de vie plus longue pour l'outil CC6050 24 min par contre une durée de 18,9 min pour CC650.

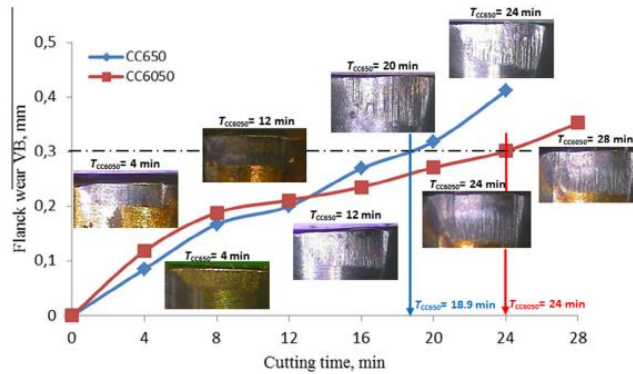


Figure I.17 : Effet du temps de coupe sur l'usure de l'outil pour (CC6050 et CC650).

- L'évolution de la rugosité de surface en fonction du temps de coupe (**Figure I.18**) montre une corrélation claire avec l'usure de l'outil.

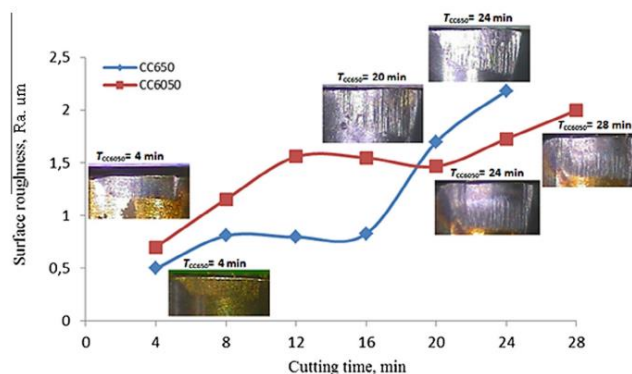


Figure I.18 : Effet du temps de coupe sur la rugosité de surface pour (CC650 et CC6050).

- Les topographies 3D (**Figure I.19** et **I.20**) confirment que des avances plus élevées entraînent des profils de surface plus irréguliers.

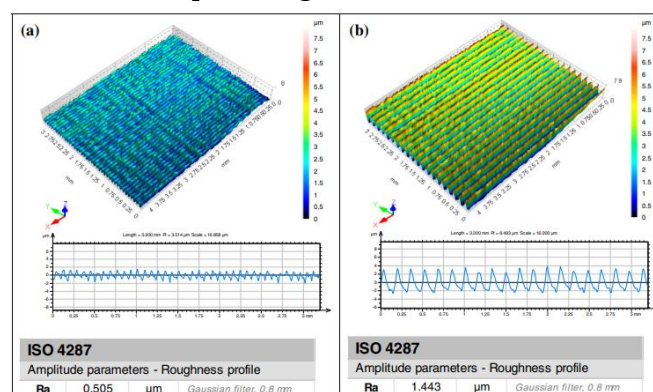


Figure I.19 : Topographie 3D du tournage avec plaquette CC6050.

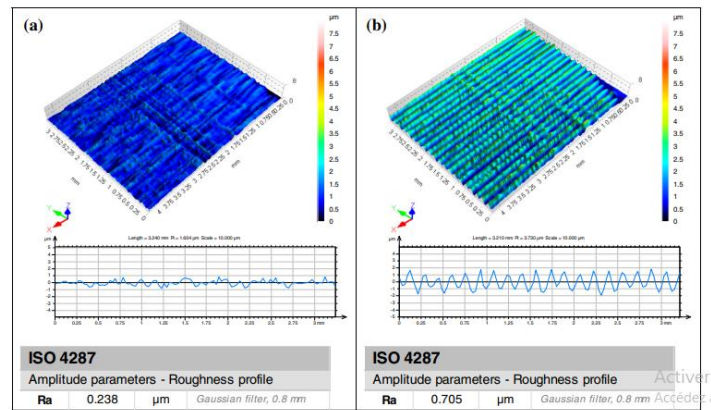


Figure I.20 : Topographie 3D du tournage avec plaquette CC650.

En conclusion, les auteurs montrent que l'utilisation des plaquettes céramiques revêtues offre une amélioration de la qualité de surface, tandis que les plaquettes non revêtues sont plus efficaces pour réduire les forces de coupe, offrant ainsi un compromis utile selon les priorités industrielles.

I.9.4. Optimisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI D3 à l'aide des méthodes Taguchi et RSM [34]

Dans cet article, l'auteur J.S. Dureja, et al, ont penché sur l'optimisation de l'usure en dépouille (**VB**) et de la rugosité de surface (**Ra**) lors du tournage dur à sec de l'acier AISI D3. Ils ont utilisé des outils de coupe en carbure revêtu (TH1000, revêtement PVD TiSiN-TiAlN). Ils sont appuyés sur les méthodes statistiques de Taguchi et **RSM** (Response Surface Methodology) pour concevoir les expériences et modéliser les réponses.

Le plan expérimental basé sur la matrice orthogonale Taguchi L9 a permis d'analyser l'influence de trois paramètres : la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. L'objectif était de minimiser simultanément l'usure en dépouille et la rugosité de surface. Des modèles mathématiques ont été établis par régression et validés par des essais de confirmation. L'optimisation par la fonction de désirabilité (**RSM**) a permis d'identifier une combinaison optimale satisfaisant les deux critères de performance.

Le facteur le plus influent sur l'usure en dépouille (**VB**) est la vitesse de coupe avec 73.65% de contribution (**Figure I.21**).

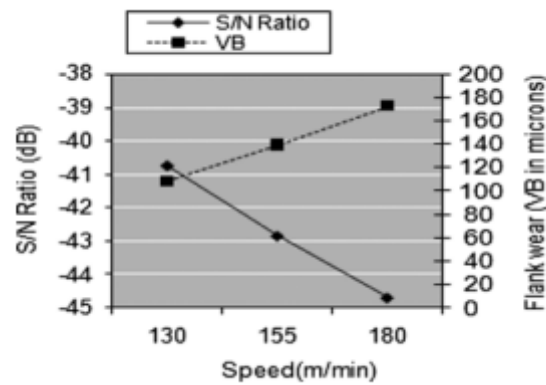


Figure I.21 : Valeurs du rapport signal/bruit (S/B) pour la vitesse de coupe.

Pour la rugosité de surface (**Ra**), l'avance est le facteur dominant avec 52.98% de contribution (**Figure I.22**).

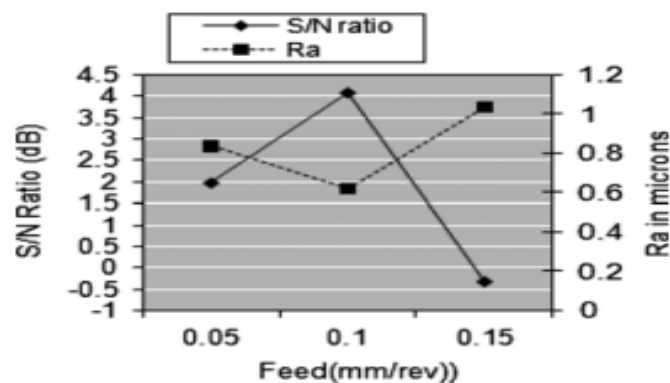


Figure I.22 : Valeurs du rapport signal/bruit (S/B) pour l'avance.

Les conditions optimales selon l'analyse Taguchi sont les suivantes :

- Pour minimiser (**VB**) : **Vc** = 130 m/min, **f** = 0.10 mm/tr, **ap** = 0.40 mm → **VB** ≈ 96 μm.
- Pour minimiser (**Ra**) : **Vc** = 155 m/min, **f** = 0.10 mm/tr, **ap** = 0.25 mm → **Ra** ≈ 0.57 μm.

L'optimisation multi-objective par **RSM** (fonction de désirabilité) a donné le régime suivant:

- **Vc** = 130 m/min, **f** = 0.13 mm/tr, **ap** = 0.21 mm, **VB** = 93.35 μm, **Ra** = 1.18 μm.

I.9.5.Comparaison de l'effet du travail à froid et du travail à chaud sur la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier à outils [35]

Dans cet article, O. David Adidi et al ont étudié le tournage dur de deux aciers à outils, l'AISI D3 (travail à froid) et l'AISI H13 (travail à chaud), afin de comparer les effets des paramètres de coupe sur la rugosité de surface. L'étude repose sur la modélisation et l'analyse

expérimentale utilisant la Méthodologie de Surface de Réponse (**RSM**) et l'Analyse de la Variance (**ANOVA**). L'étude vise à modéliser et prédire la rugosité de surface (**Ra**) lors du tournage dur à sec des aciers à outil AISI D3 et AISI H13 trempés à 62 HRC, à l'aide d'un outil en céramique mixte (Al₂O₃/TiC). Trois paramètres de coupe sont considérés tels que: la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Un plan d'expérience basé sur un Design Central Composite (**CCD**) a été appliqué. L'analyse statistique ANOVA a été utilisée pour valider les modèles de prédiction. Les résultats sont illustrés par des graphes de surface et des contours pour déterminer les interactions entre les paramètres.

Les résultats obtenus montrent clairement que le paramètre le plus influent sur la rugosité de surface de l'AISI D3 est l'avance (indice de confiance, $p = 0.049$) (**Figure I.23**).

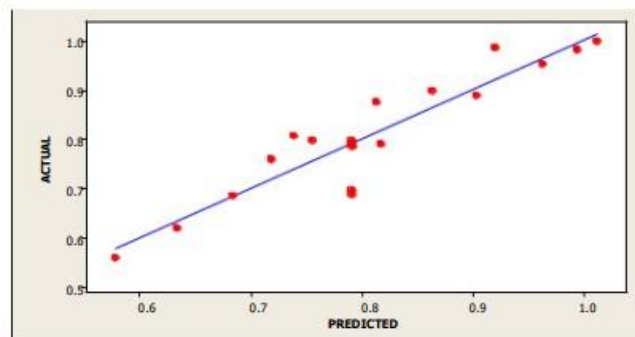


Figure I.23 : Ra de l'AISI D3.

En revanche, pour l'AISI H13, la vitesse de coupe est le paramètre le plus significatif sur Ra ($p = 0.034$) (**Figure I.24**).

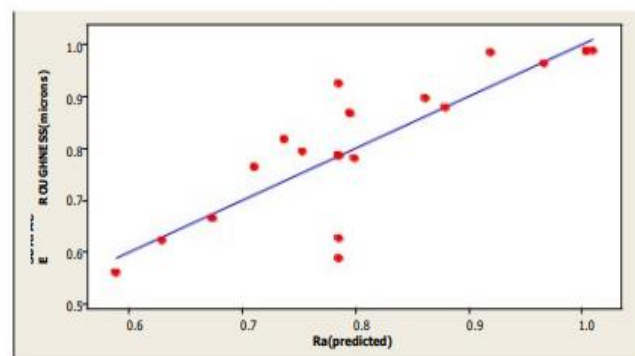


Figure I.24 : Rugosité moyenne (**Ra**) de l'AISI H13.

De plus, le modèle mathématique élaboré pour l'AISI D3 présente un excellent coefficient de détermination $R^2 = 92.80\%$, tandis que celui de l'AISI H13 affiche un R^2 de 75.87% , ce qui reste acceptable. Il est également à noter que les valeurs de (**Ra**) obtenues pour l'AISI D3 sont plus élevées que celles de l'AISI H13 pour les mêmes conditions de coupe, ce qui souligne la différence de comportement entre les deux aciers face aux paramètres d'usinage.



Chapitre II

Procédure expérimentale



II.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux équipements utilisés pour la réalisation des essais. Le banc d'essai est composé notamment d'un tour, d'un rugosimètre pour mesurer la rugosité de la pièce usinée et d'une plateforme dédiée à l'acquisition des efforts de coupe. Nous exposons également la méthodologie adoptée pour la planification des expériences ainsi que les conditions dans lesquelles elles ont été réalisées. Les essais de tournage effectués sur l'acier X200Cr12, nécessaires à l'élaboration de notre mémoire, ont été réalisés au sein du Laboratoire de Mécanique et de Structure (**LMS**) du département de Génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945 – Guelma.

II.2.Matériels utilisés

II.2.1.Machine-outil

Le tour utilisé pour la réalisation des essais est un tour parallèle de la marque tchèque « TOS TRENCIN », modèle SN 40C (**Figure II.1**). Il se caractérise par les spécifications techniques suivantes :

- Une puissance de moteur est de **6,6 kW**.
- Nombres de tours par minute : **45 à 2000 tr/min**.
- Une avance par tour variant de **0,08 à 6,4 mm/tr**.



Figure II.1: Tour parallèle modèle SN 40C.

II.2.2. Matériau utilisé

L'acier fortement allié AISI D3, (DIN 1.2080, JIS SKD1, GB Cr12, afnor Z200Cr12) est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitements thermiques. Il a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à l'usure). Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit : - Densité : 7.7g/cm^3 . - Module d'élasticité : 21.10 MPA. - Conductibilité thermique: 20 W/m.C° . L'acier fortement allié AISI D3 est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filières d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois, peignes à rouler des filets, etc.... [36].

❖ Composition

La composition chimique de l'acier AISI D3 est présentée dans le **tableau (II.1)**.

Tableau II.1 : Composition chimique de l'AISI D3, (en% en poids).

Carbone (C)	Silicium (Si)	Manganèse (Mn)	Chrome (Cr)	Tungstène
2,00	0,25	0,30	11,50	0,70

L'éprouvette utilisée pour les essais de rugosité et de mesure des efforts de coupe a été découpée à partir d'une barre pleine en acier AISI D3, laminée à chaud, d'un diamètre de 80 mm et d'une longueur de 400 mm (voir **figures II.2 et II.3**).



Figure II.2: Barres laminées à chaud en acier AISI D3.



Figure II.3: Eprouvette utilisée pour les essais.

II.2.2.1. Traitement thermique appliqué

Avant d'effectuer les différents essais, l'éprouvette a été soumise à un traitement thermique visant à atteindre une dureté supérieure à **45 HRC**, condition nécessaire pour le tournage dur. Ce traitement comprend une trempe réalisée à une température comprise entre 930 et 980 °C, suivie immédiatement d'un revenu, ce qui a permis d'augmenter la dureté de **27 HRC** à environ **60 HRC**.

La figure (II.4) illustre le diagramme de revenu de l'acier AISI D3, tel qu'il est fourni par le fabricant.

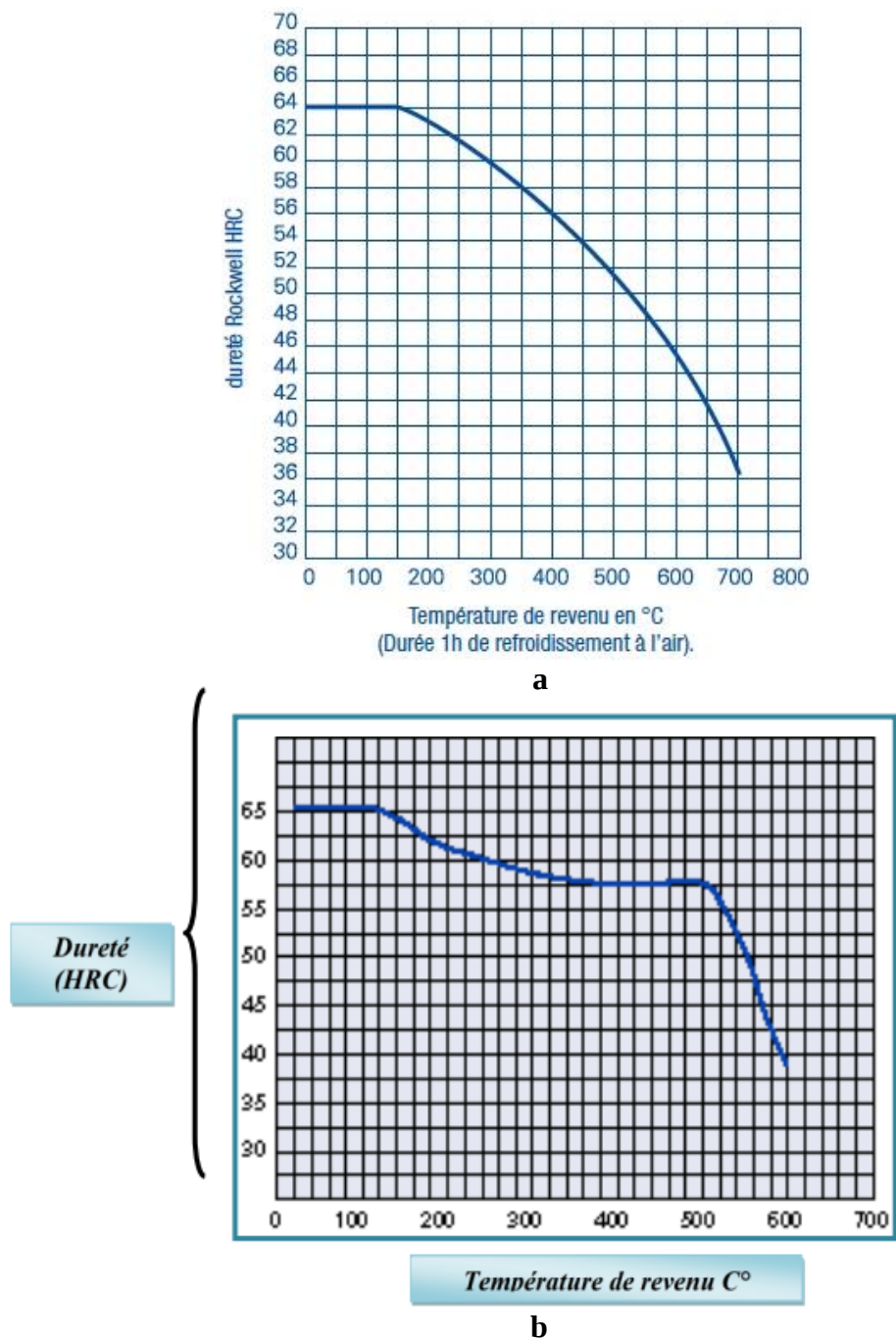


Figure II.4: Diagramme du revenu.

Les traitements thermiques de l'éprouvette ont été effectués à l'aide d'un four électrique de type industriel, destiné aux ateliers de production (**figure II.5**). Les caractéristiques techniques de ce four sont présentées dans le (**tableau II.2**).

Tableau II.2: Caractéristiques du four électrique.

Marque	Dimensions (mm)			Puissance (KW)	T°max
	Largeur (b)	Longueur (L)	Hauteur (h)		
C100S	400	600	430	14	1200°C



Figure II.5: Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvette.

II.2.3. Plaquette de coupe utilisée

La plaquette de coupe utilisé dans cette étude est une plaquette en Céramique mixte revêtue de marque Sandvik coromant (de désignation: SNGN 12-04-08), comportant 8 arêtes de coupe et avec une fixation par trou central et comporte les caractéristiques suivantes :

Tableau II.3 : Informations relatives à la plaquette utilisée.

Céramique mixte revêtue	CC6050	SNGA 12.04.08	Sandvik	70 % AL₂O₃ + 30 % TiC + revêtement en TiN
--------------------------------	---------------	----------------------	----------------	--

La céramique CC6050 est une alternative économique au **CBN** quand les exigences de surface sont moins élevées, ou pour l'usinage dur (**65 HRC**) au plus tendre (jusqu'à **50 HRC**)

de matière de dureté variable, dans lesquelles **CC6050** offre des performances plus constante qu'un CBN.



Figure II.6: Plaquette de coupe utilisée.

II.2.4 Porte outil

Dans le cadre de la réalisation des essais, un porte-outil a été utilisé, sur lequel la plaquette de coupe est fixée mécaniquement à l'aide d'un trou central, comme illustré à la **figure (II.7)**.

Les caractéristiques géométriques du porte-outil sont répertoriées dans **le tableau (II.4)**.



Figure II.7: Porte outil utilisé.

Tableau II.4: Caractéristiques géométriques du porte- outil utilisé.

Désignation	Marque	Xr	α	γ	λ
PSBNR25x25M12	SANDVIK coromant	75°	6°	-6°	-6°

II.2.5. Matériels de mesure

II.2.5.1. Dynamomètre (Plateforme KISTLER)

On a utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257 B) (**Figure II.8**) 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.8: Dynamomètre (KISTLER9257 B)

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

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes (effort axial (F_x), effort radial (F_y) et effort tangentiel (F_z), (Figure II.9 et figure II.10).



Figure II.9: Amplificateur de charge.

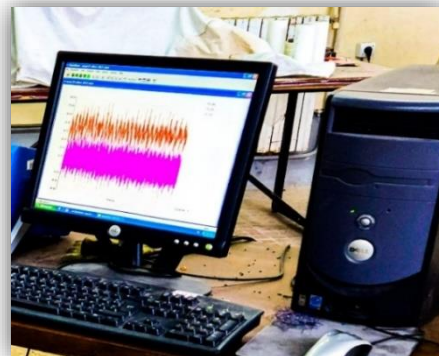


Figure II.10: PC.

La Figure (II.11) 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).

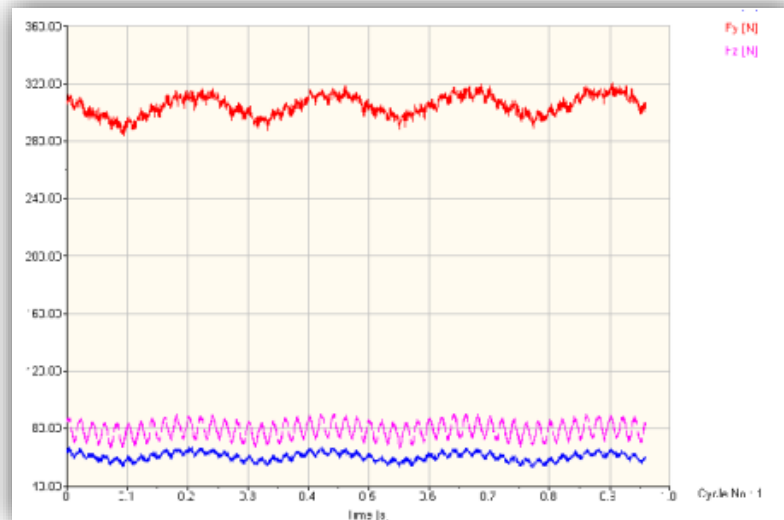


Figure II.11: Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

II.2.5.2. Mesure de la rugosité

Pour évaluer les différents paramètres de rugosité (R_a , R_z , R_t), un rugosimètre 2D de type *Surftest 301* (Mitutoyo), doté d'une résolution de $0,1 \mu\text{m}$ et équipé d'une imprimante de profil, a été utilisé (figure II.12). Cet appareil est muni d'un palpeur en diamant avec un rayon de pointe de $5 \mu\text{m}$, se déplaçant linéairement sur la surface analysée. La longueur de mesure (palpage) est de 4 mm , répartie sur une longueur de base de $0,8 \text{ mm}$ (soit 5 unités de base).

Les plages de mesure disponibles vont de $0,05$ à $40 \mu\text{m}$ pour le paramètre (R_a), et de $0,3$ à $160 \mu\text{m}$ pour (R_t) et (R_z). Afin de minimiser les erreurs liées à la manipulation des pièces et d'améliorer la précision des mesures, les relevés de rugosité ont été effectués directement sur la machine-outil, sans démontage de la pièce (figure II.13). Le rugosimètre a été systématiquement étalonné avant chaque campagne d'essais à l'aide d'un étalon de rugosité présentant une valeur (R_a) de $3,2 \mu\text{m}$.



Figure II.12: Rugosimètre Surftest 301.

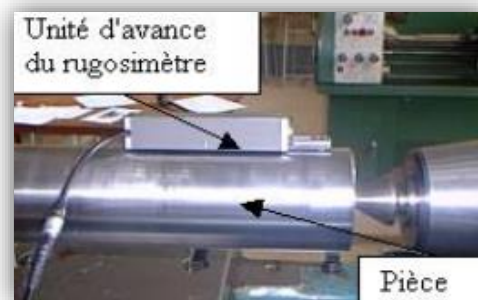


Figure II.13: Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce.

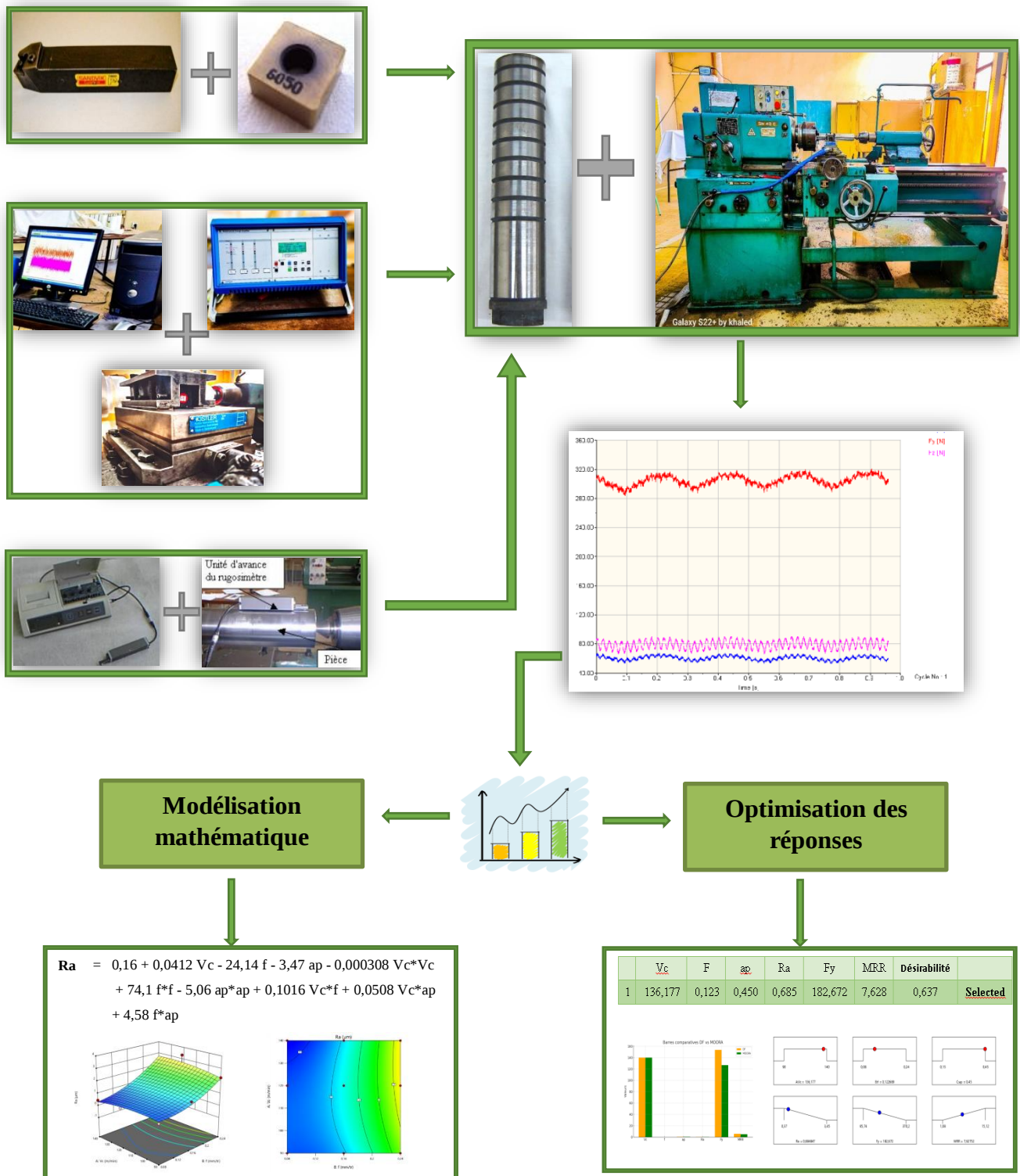


Figure II. 14: Schéma de la configuration expérimentale.

II.3. 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 (**Vc**), l'avance par tour (**f**), la profondeur de passe (**ap**), la rugosité de surface (**Ra**, **Rz**, **Rt**) et la température pour évaluer les performances de chaque facteur.

II.4. Planification des expériences

Les paramètres de coupe (**Vc**, **f**, **ap**), sont considérés comme paramètres d'entrée. L'effort de coupe (**Fy**), la rugosité (**Ra**), le taux d'enlèvement de copeaux (**MRR**),... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

II-4.1. Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé d'usinage. La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Ce dernier est en fonction des facteurs de base (fonction d'entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (**Vc**, **f**, **ap**) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots (II.1)$$

Où:

N: nombre d'essais.

q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base.

k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base (**k=3**) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur **(+1)**, niveau moyenne **(0)** et un niveau inférieur **(-1)**).

Nous avons alors: $N=3^3=27$.

Les essais ont été numérotés de **1** à **27**. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans **le tableau (II-5)**.

Tableau II.5 : Matrice de planification pour un plan 3^3 .

N° d'essai	Facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

II.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les équipements qui ont été utilisés pour nos travaux. Nous avons présenté les caractéristiques du matériau de coupe et de la pièce utilisée, les instruments de mesure employés, les conditions de coupe ainsi que la planification des

expériences. Le chapitre III qui suit présentera les résultats obtenus lors des essais, ainsi que la modélisation des paramètres de sortie (**Ra**, **Fy** et **MRR**).



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 cherchons à établir des modèles mathématiques représentant les différents phénomènes étudiés. Ces modèles ont pour but de décrire les relations entre les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe) et les paramètres technologiques analysés, à savoir l'effort de coupe, la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3, avec un outil en céramique mixte CC6050. 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 ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés.

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe (**V_c**, **f** et **a_p**) sur la rugosité de la surface, l'effort de coupe et le taux d'enlèvement de copeau, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur varie à trois niveaux (3^3), ce qui nous donne un total de 27 essais. Le traitement des résultats expérimentaux obtenus au (**tableau III.1**) nous permet de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre (les différents critères de la rugosité, la composante de l'effort de coupe et le taux d'enlèvement de copeau) et les paramètres du régime de coupe (**V_c**, **f** et **a_p**).

Tableau III.1: Plan expérimental 3³.

N° essais	Vc (m/min)	F (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Fy (N)	MRR (cm ³ /min)
1	90	0,08	0,15	0,50	138,23	1,08
2	90	0,08	0,30	0,48	169,36	2,16
3	90	0,08	0,45	0,50	106,28	3,24
4	90	0,16	0,15	1,17	159,77	2,16
5	90	0,16	0,30	1,19	243,75	4,32
6	90	0,16	0,45	1,01	180,91	6,48
7	90	0,24	0,15	2,23	186,20	3,24
8	90	0,24	0,30	2,28	295,99	6,48
9	120	0,24	0,45	1,48	241,74	9,72
10	120	0,08	0,15	0,47	83,92	1,44
11	120	0,08	0,30	0,52	129,06	2,88
12	120	0,08	0,45	0,37	135,34	4,32
13	120	0,16	0,15	1,05	109,23	2,88
14	120	0,16	0,30	1,12	170,79	5,76
15	120	0,16	0,45	0,95	207,11	8,64
16	120	0,24	0,15	2,56	121,77	4,32
17	120	0,24	0,30	3,33	178,06	8,64
18	120	0,24	0,45	2,62	209,27	12,96
19	140	0,08	0,15	0,38	65,74	1,68
20	140	0,08	0,30	0,44	116,99	3,36
21	140	0,08	0,45	0,37	126,82	5,04
22	140	0,16	0,15	0,71	90,32	3,36
23	140	0,16	0,30	0,84	161,90	6,72
24	140	0,16	0,45	0,94	215,50	10,08
25	140	0,24	0,15	2,21	97,45	5,04
26	140	0,24	0,30	2,31	179,19	10,08
27	140	0,24	0,45	3,45	370,20	15,12

III.2. Analyse de la rugosité (Ra)

Le tableau (III.2) présente les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) appliquée au critère de rugosité (**Ra**). Les valeurs de probabilité (**P**) permettent d'évaluer la signification statistique des différents facteurs et de leurs interactions. D'après ces résultats, il ressort que l'avance (**f**) ainsi que ses interactions **f*Vc** et **f*f** ont un effet significatif sur la rugosité, en raison de valeurs de (**P**) inférieures à 0,05. Parmi tous les facteurs, l'avance se distingue comme étant le paramètre le plus influent, avec une contribution de 80,87 %. Elle est suivie par la vitesse de coupe, avec une contribution 0.26%. Tandis que la profondeur de passe montre une influence quasi négligeable, avec seulement 0,04 % de contribution.

Tableau III.2: Résultats de l'analyse de variance pour (**Ra**).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur P	Observation
Modèle	9	21,5694	92,34%	21,5694	2,3966	22,76	0,000	signifiant
Linéaires	3	18,9597	81,17%	18,3126	6,1042	57,98	0,000	signifiant
Vc	1	0,0596	0,26%	0,0365	0,0365	0,35	0,564	Non signifiant
F	1	18,8908	80,87%	18,2743	18,274 3	173,57	0,000	signifiant
Ap	1	0,0093	0,04%	0,0018	0,0018	0,02	0,897	Non Signifiant
Carré	3	1,6308	6,98%	1,6308	0,5436	5,16	0,010	signifiant
vc*vc	1	0,2024	0,87%	0,2024	0,2024	1,92	0,184	Non signifiant
f*f	1	1,3506	5,78%	1,3506	1,3506	12,83	0,002	signifiant
ap*ap	1	0,0778	0,33%	0,0778	0,0778	0,74	0,402	Non signifiant
Interaction à 2 facteurs	3	0,9789	4,19%	0,9789	0,3263	3,10	0,055	Non signifiant
vc*f	1	0,5020	2,15%	0,5020	0,5020	4,77	0,043	signifiant
vc*ap	1	0,4406	1,89%	0,4406	0,4406	4,18	0,057	Non signifiant
f*ap	1	0,0363	0,16%	0,0363	0,0363	0,34	0,565	Non signifiant
Erreur	17	1,7899	7,66%	1,7899	0,1053			
Total	26	23,3593	100,00%					

En utilisant les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité arithmétique (**Ra**), le modèle peut être écrit comme suit avec tous les facteurs principaux et leurs interactions :

- **Modèle complet :**

$$Ra = 0,16 + 0,0412 Vc - 24,14 f - 3,47 ap - 0,000308 Vc*Vc + 74,1 f*f - 5,06 ap*ap + 0,1016 Vc*f + 0,0508 Vc*ap + 4,58 f*ap \dots\dots\dots(III.I)$$

- **Coefficient de corrélation:** $R^2 = 92,34 \%$

- Coefficient de corrélation ajusté: $R^2 = 88,28 \%$

III.2.1. Diagramme de surface en (3D) et graphiques de contour de (Ra)

La représentation 3D de la figure (III.1) met en évidence que l'influence de l'avance est plus marquée que celle de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe, ce qui indique que l'avance constitue le paramètre dominant affectant la rugosité (**Ra**). Le diagramme de contours permet, quant à lui, de visualiser la surface de réponse.

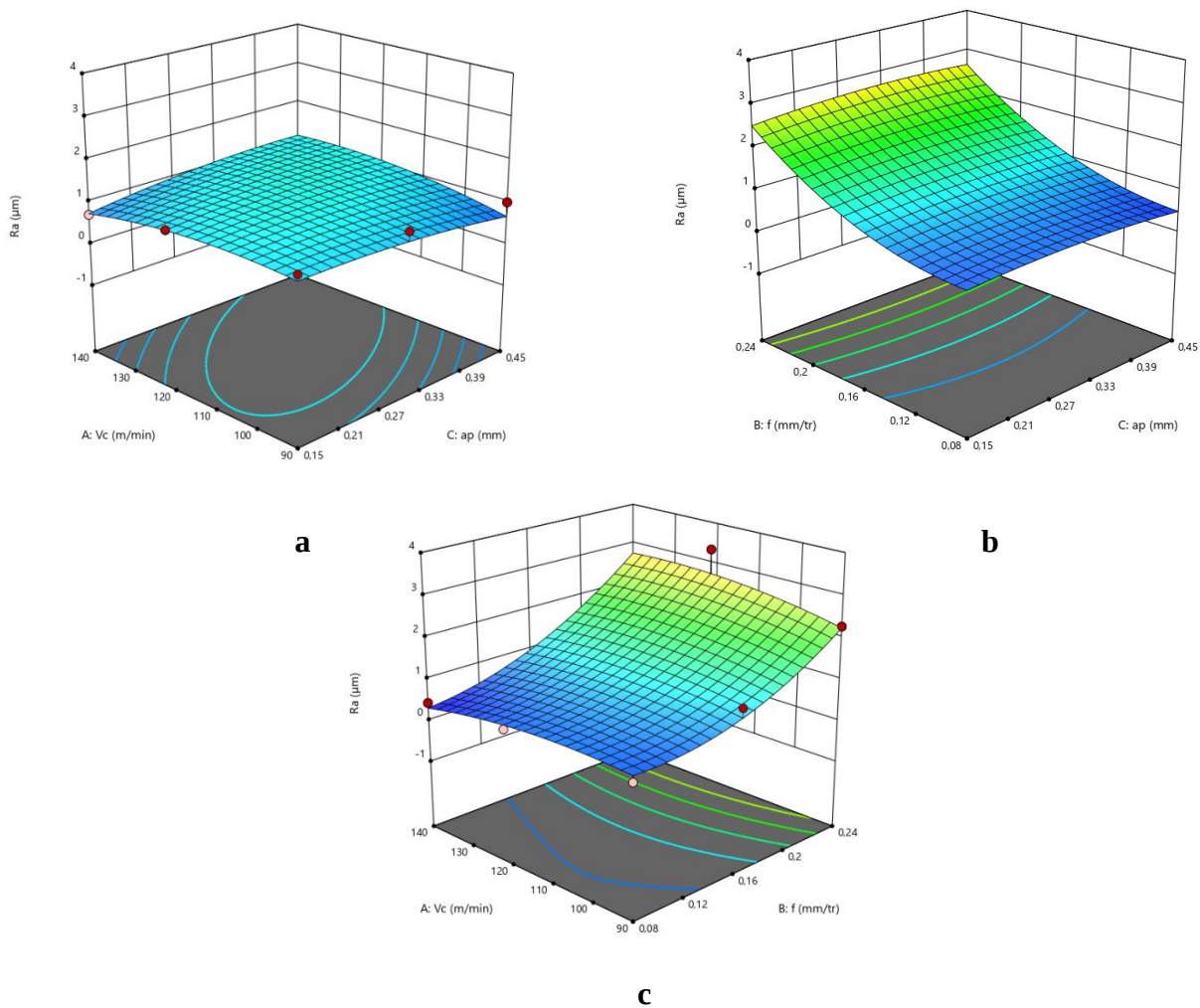


Figure III.1 : Diagrammes de surface 3D de (**Ra**).

D'autre part les graphes de contour, figure III.2 (a, b et c) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

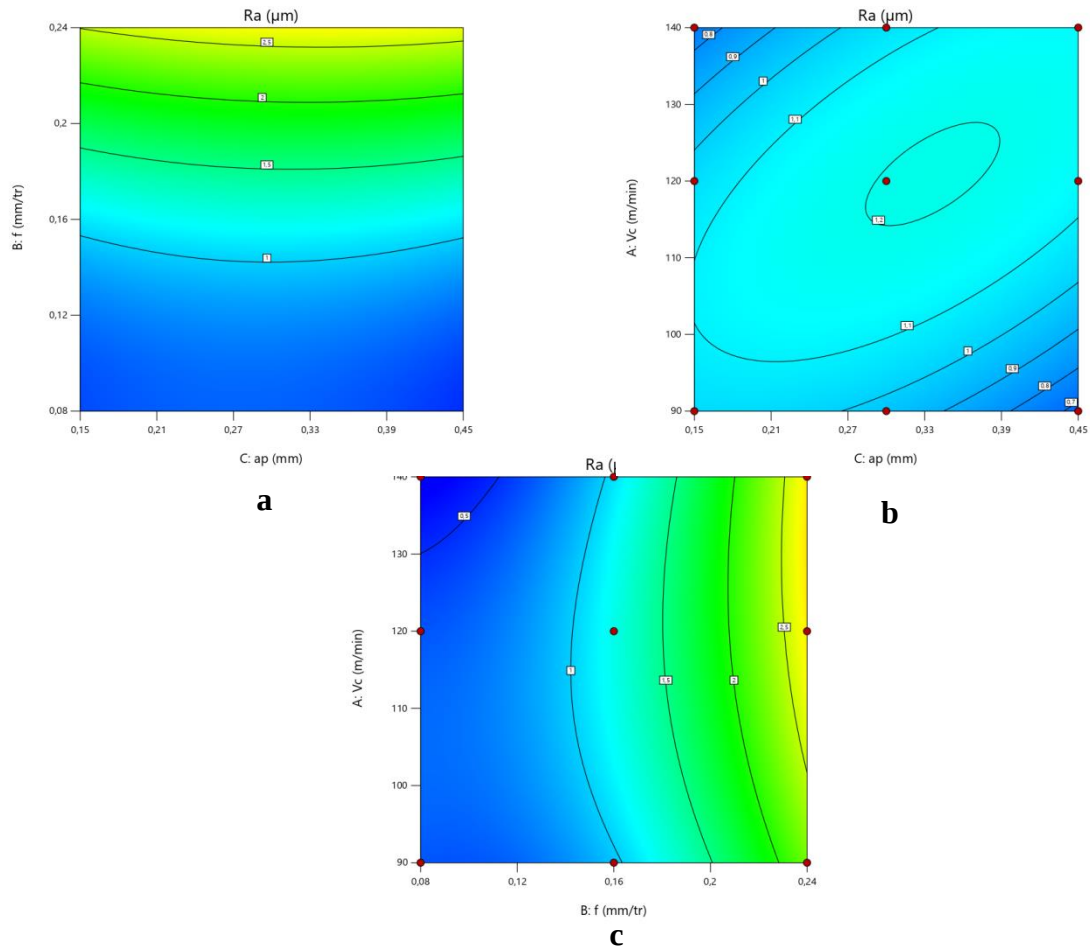


Figure III.2 : Diagrammes de contour de (Ra).

III.2.2. Graphique des effets principaux et d'interaction de (Ra)

La figure (III.3) montre les effets moyens de chaque paramètre de coupe sur la rugosité (Ra). Nous remarquons que l'avance (f) est le facteur le plus influent sur (Ra) car il a une grande pente, puis la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap).

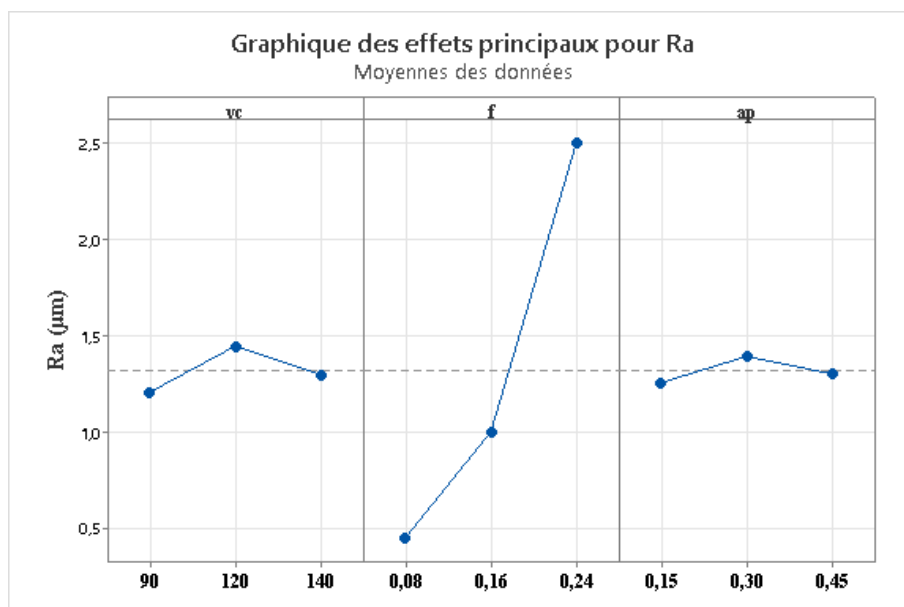


Figure III.3 : Graphique des effets principaux pour (Ra).

La figure (III.3) représente le diagramme des interactions entre les paramètres de coupe, on remarque que l'avance et le facteur le plus influent sur (R_a).

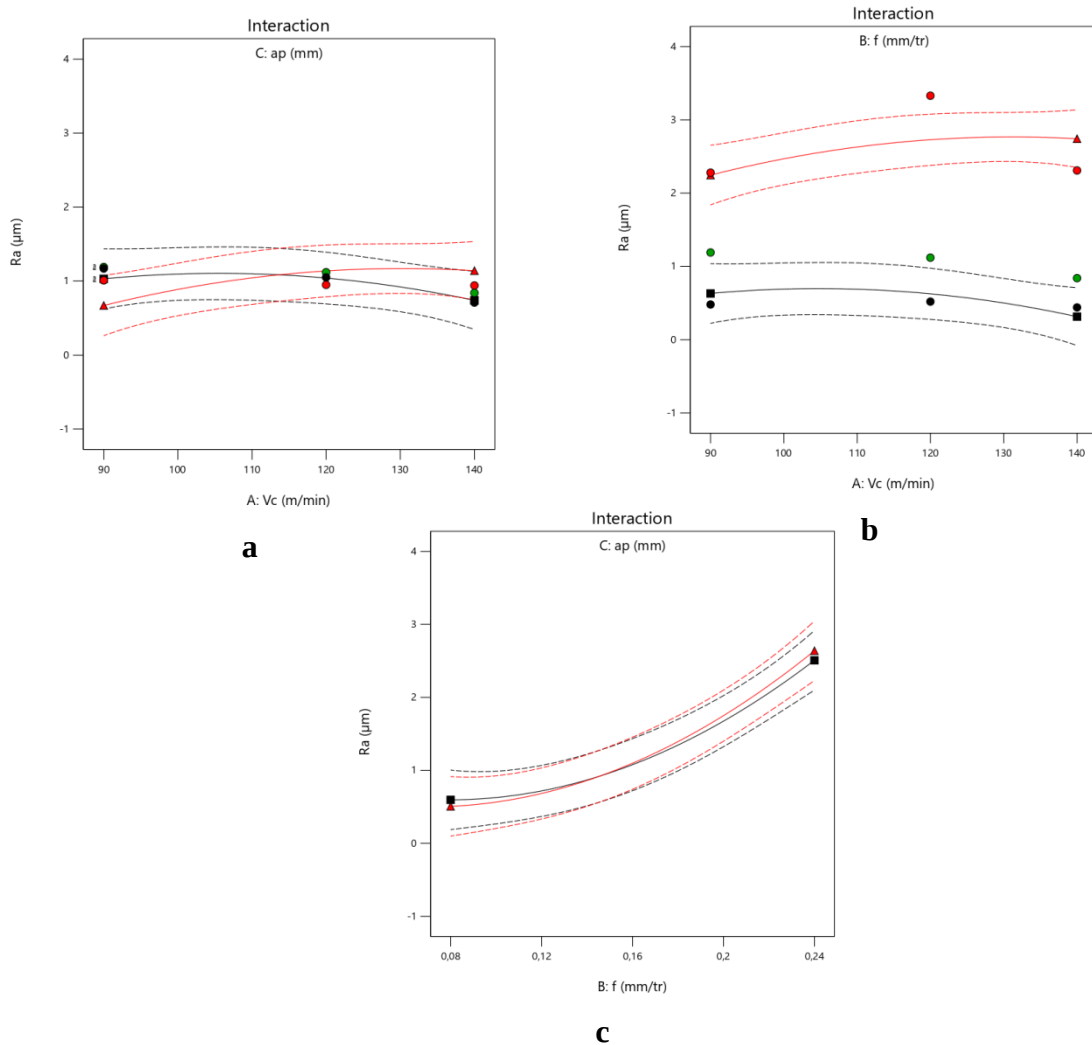


Figure III.4 : Diagramme des interactions pour (R_a).

III.2.3. Test de normalité de (R_a)

La figure (III.5) montre que les différents points expérimentaux sont très proches de 45° , ce qui nous conduit à conclure qu'ils suivent une distribution normale.

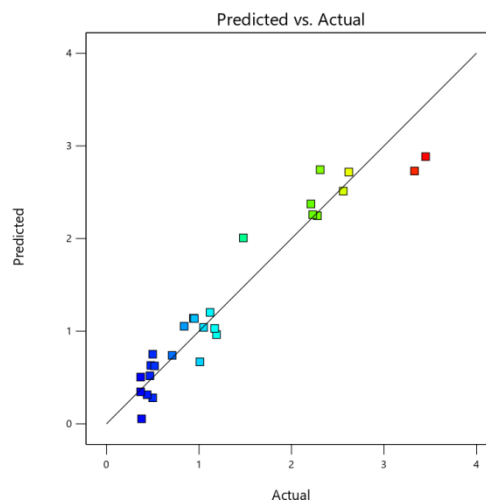


Figure III.5 : Test de normalité de (R_a).

III.3. Analyse de la composante de l'effort de coupe (Fy)

Le tableau (III.3) présente l'analyse de variance ANOVA pour la composante radiale (Fy). Les valeurs de la probabilité P indiquent l'influence de chaque facteur et les interactions. D'après cette analyse on remarque que l'avance est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 30,13%, suivie par la profondeur de passe de 25,30% et en dernier lieu la vitesse de coupe de 4,92%.

Tableau III.3: Résultats de l'analyse de variance pour (Fy).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur P	Observation
Modèle	9	102859	85,43%	102859	11428,7	11,08	0,000	signifiant
Linéaires	3	72668	60,36%	67967	22655,6	21,96	0,000	signifiant
Vc	1	5920	4,92%	4938	4937,5	4,79	0,043	signifiant
f	1	36282	30,13%	35996	35996,3	34,89	0,000	signifiant
ap	1	30467	25,30%	27033	27033,1	26,20	0,000	Signifiant
Carré	3	6845	5,68%	6845	2281,5	2,21	0,124	Non signifiant
Vc*Vc	1	2889	2,40%	2889	2889,2	2,80	0,113	Non signifiant
f*f	1	298	0,25%	298	298,5	0,29	0,598	Non signifiant
ap*ap	1	3657	3,04%	3657	3656,9	3,54	0,077	Non signifiant
Interaction à 2 facteurs	3	23346	19,39%	23346	7781,8	7,54	0,002	signifiant
Vc*f	1	2	0,00%	2	2,5	0,00	0,961	signifiant
Vc*ap	1	13978	11,61%	13978	13977,6	13,55	0,002	signifiant
f*ap	1	9365	7,78%	9365	9365,5	9,08	0,008	signifiant
Erreur	17	17541	14,57%	17541	1031,9			
Total	26	120400	100,00%					

Dans ce cas, le modèle de l'effort radiale (Fy), avec tous les facteurs principaux et leurs interactions, peut s'écrire comme suit :

- **Modèle complet :**

$$F_y(N) = 869 - 11,88 V_c + 189 f - 495 ap + 0,0368 V_c * V_c - 1102 f * f - 1097 ap * ap + 0,23 V_c * f + 9,04 V_c * ap + 2328 f * ap \dots \dots \dots (III.2)$$

- **Coefficient de corrélation:** $R^2 = 85,43 \%$

- **Coefficient de corrélation ajusté:** $R^2 = 77,72 \%$

III.3.1. Diagramme de surface en (3D) et graphiques de contour de (F_y)

Les diagrammes en 3D de la **figure III.6 (a, b et c)** mettent en évidence la relation entre l'effort radial (F_y) et les paramètres d'usinage. L'analyse de ces représentations montre que l'avance (**f**) exerce l'effet le plus marqué, comme en témoigne la forte inclinaison de sa courbe. La profondeur de passe (**ap**) et la vitesse de coupe (**Vc**) présentent également une influence sur (**Fy**), mais de manière décroissante.

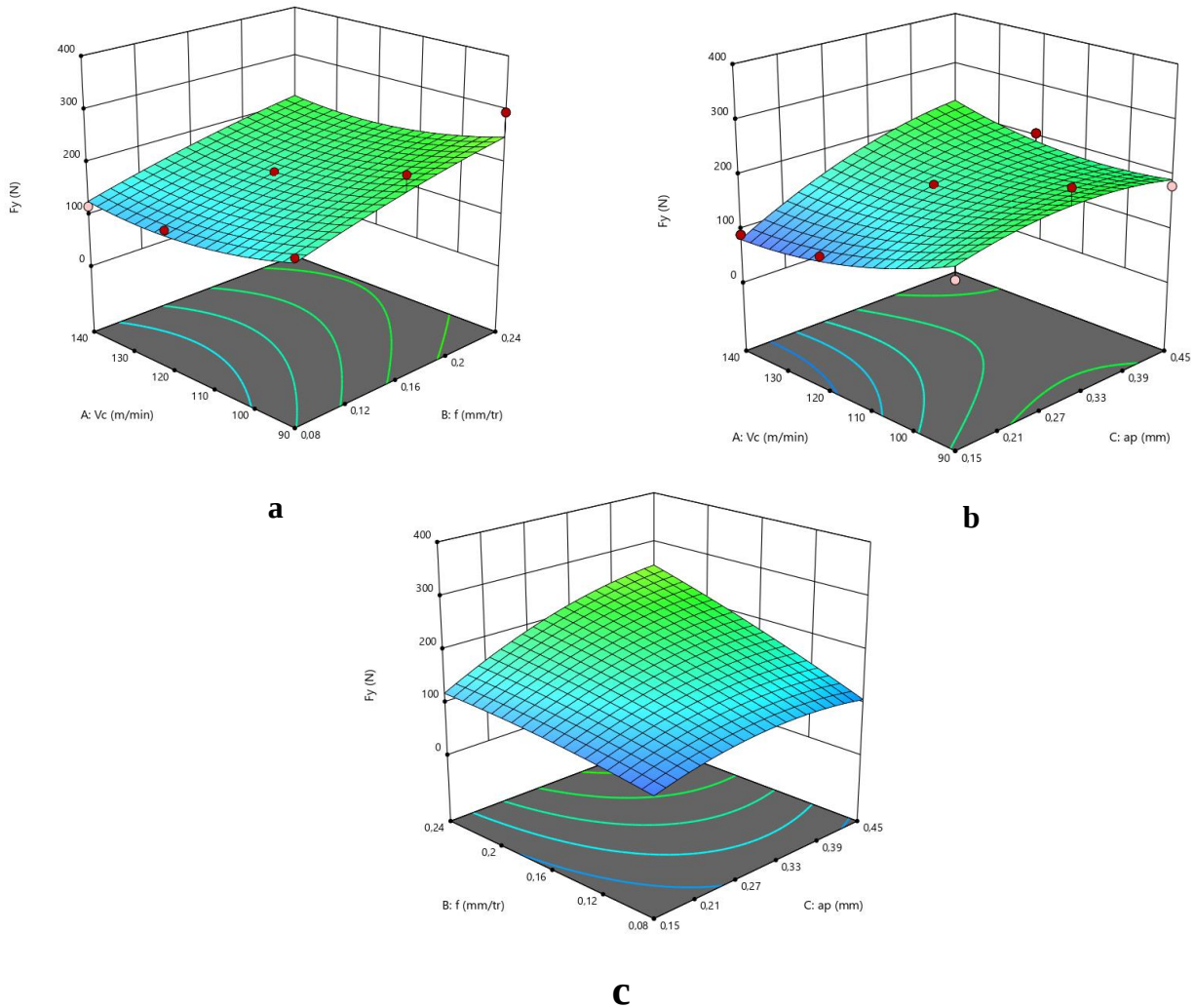
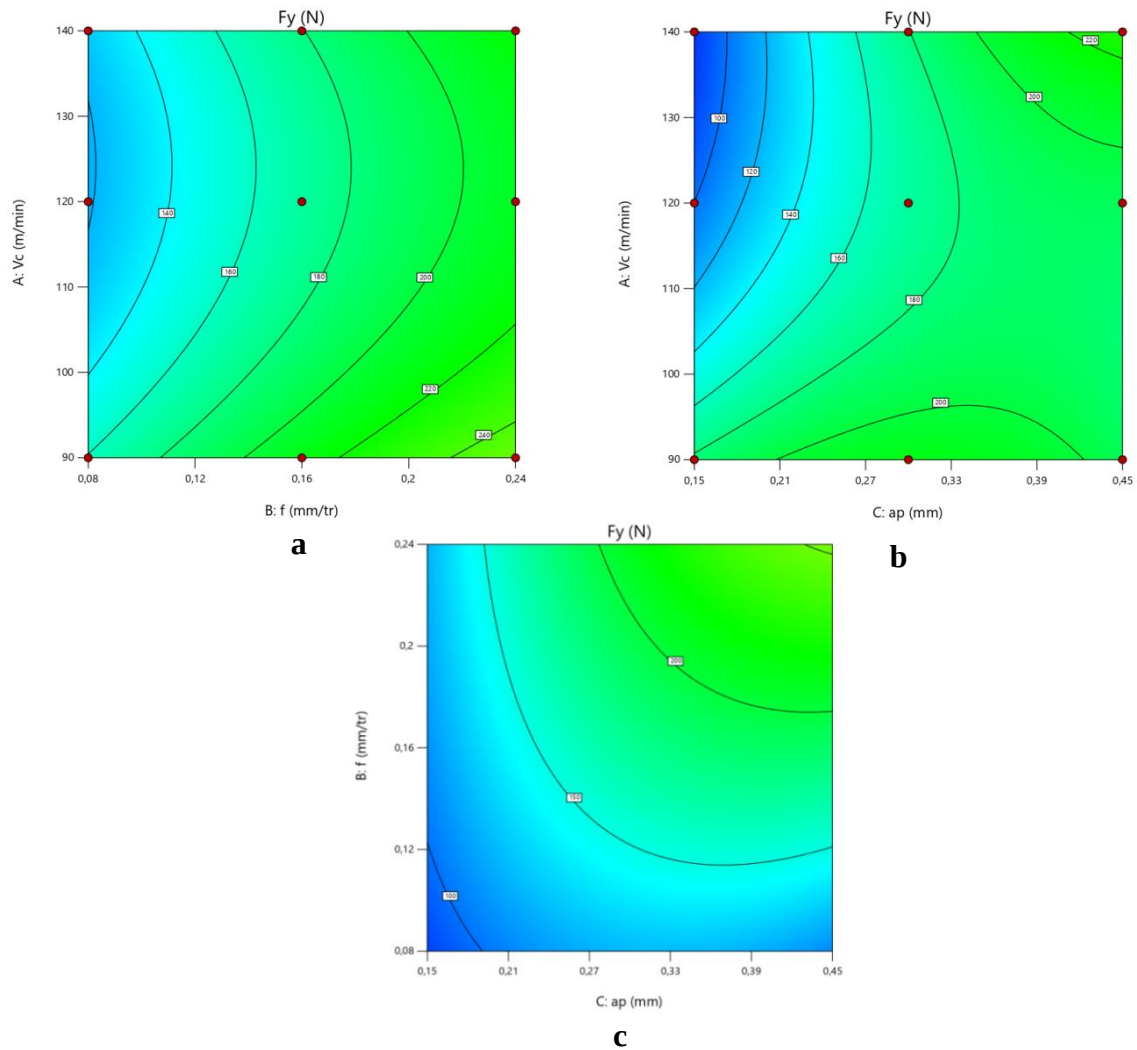


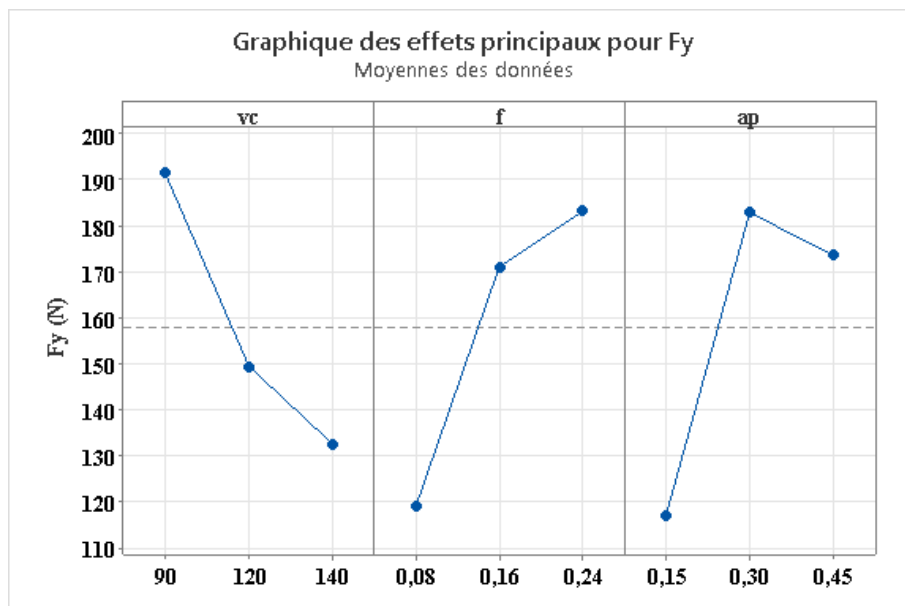
Figure III.6: Diagrammes de surface 3D de (F_y).

Par ailleurs, les graphes de contour **figure III.21 (d, e et f)** offrent une représentation visuelle de la surface de réponse, facilitant ainsi l'identification des valeurs de réponse souhaitables et des conditions d'exploitation optimales.

Figure III.7 : Diagrammes de contour de (R_a).

III.3.2 Graphique des effets principaux et d'interaction de (F_y)

La figure (V.18) illustre les effets principaux de l'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe sur l'effort radial. On observe que cet effort croît avec l'augmentation de l'avance.

Figure III.8 : Graphique des effets principaux pour (F_y).

La figure (III.3) représente le diagramme des interactions entre les paramètres de coupe, on remarque que l'avance et le facteur le plus influent sur (F_y).

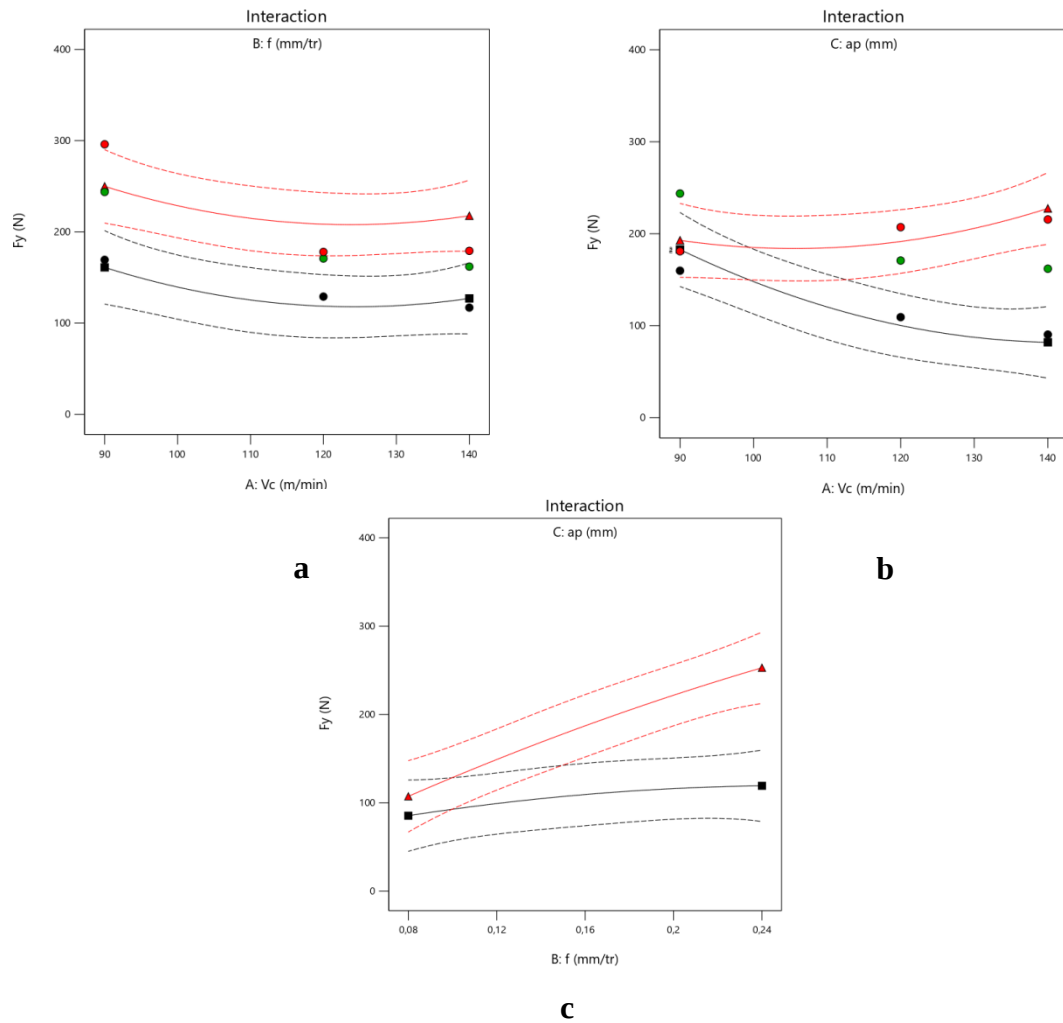


Figure III.9 : Diagramme des interactions pour (F_y).

III.3.3. Test de normalité de (F_y)

Dans la figure suivante, on peut observer que les différents points expérimentaux sont relativement proches de l'angle de 45 degrés, ce qui indique qu'ils suivent une distribution normale.

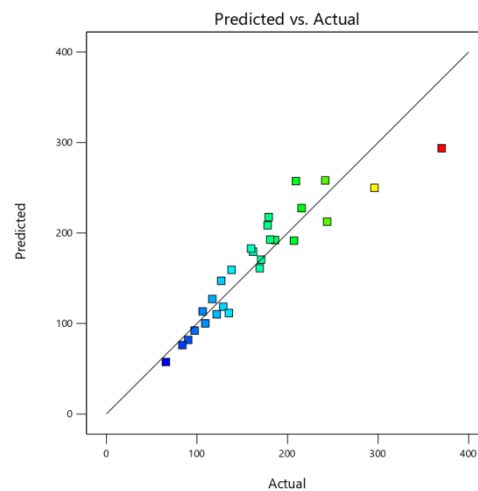


Figure III.10 : Test de normalité de (F_y).



Chapitre IV

Optimisation des Paramètres de coupe



IV.1.Introduction

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de nombreuses recherches utilisant diverses techniques telles que les méthodes Taguchi, **GRA**, **GA**, **PSO**, **DF**, entre autres. Cette démarche vise à déterminer les conditions de coupe les plus appropriées permettant d'atteindre les performances technologiques souhaitées. Elle a, par conséquent, un impact économique significatif, notamment sur le temps d'usinage et le coût global de production.

Dans ce chapitre, deux approches d'optimisation multi-objectives ont été mises en œuvre, à savoir l'approche par fonction de désirabilité (**DF**) et la méthode **MOORA** (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis), afin de sélectionner le régime de coupe optimal répondant simultanément à cinq paramètres de sortie.

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

IV.2.1.Introduction [37], [38]

Grâce à sa simplicité, à la flexibilité qu'elle offre en matière de pondération, ainsi qu'à sa large intégration dans les logiciels statistiques, la méthode basée sur la fonction de désirabilité figure parmi les approches les plus répandues pour l'optimisation multi-objective réactive. Cette méthode permet d'estimer le niveau de satisfaction associé à un objectif donné, à partir des résultats générés par un modèle statistique.

L'utilisation de la méthode de surface de réponse (**RSM**) dans l'optimisation des réponses permet d'identifier les combinaisons optimales des paramètres des variables d'entrée, que ce soit pour une réponse unique ou pour un ensemble de réponses. Lorsqu'il s'agit d'optimiser plusieurs réponses simultanément, la fonction de désirabilité globale (**DF**) intervient comme un outil d'arbitrage entre objectifs concurrents. Elle repose sur des fonctions de désirabilité individuelles (**DI**), dont les valeurs varient entre 0 (configuration inacceptable) et 1 (situation optimale), en tenant compte des différentes unités de mesure. Ainsi, la formulation d'un tel problème d'optimisation se traduit par la définition d'une fonction objectif **F(x)** telle que :

$$DF = (\pi_{i=1}^n d_i^{w_i})^{\sum_{i=1}^{1/n} w_i} \dots \dots \dots (IV.1)$$

$$F(x) = -DF \dots \dots \dots (IV.2)$$

di est la désirabilité définie pour la sortie ciblée.

wi est la fonction de pondération de di.

Pour différent objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité **di** est définie dans différentes formes.

Si le but est de réaliser une valeur **Ti** spécifique, la désirabilité **di** est donnée par :

$$di = 0 \text{ Si } Yi \leq Inf$$

$$d_i = \left[\frac{y_i - Inf_i}{t_i - Inf_i} \right] \text{ si } Inf_i \leq Y_i \leq T_i \dots \dots \dots (IV.3)$$

$$di = 0 \text{ Si } Yi \geq Sup_i$$

$$d_i = \left[\frac{y_i - Sup_i}{t_i - Sup_i} \right] \text{ si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i \dots \dots \dots (IV.4)$$

Pour un objectif de trouver (un maximum) la désirabilité est montrée comme suite :

$$di = 0 \text{ Si } Yi \leq Inf_i$$

$$d_i = \left[\frac{y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \dots \dots \dots (IV.5)$$

$$di = 1 \text{ Si } Yi \geq Sup_i$$

Pour un objectif de rechercher (Un minimum) la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$di = 1 \text{ Si } Yi \leq Inf_i$$

$$d_i = \left[\frac{Sup_i - y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \dots \dots \dots (IV.6)$$

$$di = 0 \text{ Si } Yi \geq Sup_i$$

IV.2.2.Cas d'optimisation étudiés

Trois cas d'optimisation ont été examinés dans le cadre de notre étude.

1^{er} cas : Qualité maximale

Ce cas d'étude est réservé à une optimisation qui cherche une qualité maximale. Le **tableau (IV.1)** présente les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, ainsi que l'importance affectée à chaque paramètre. On a donné l'importance maximale à la rugosité de surface (**Ra**) (5+), tout en gardant la force de coupe (**Fy**) et le taux d'enlèvement de copeaux (**MRR**) à un bas niveau d'importance (3+).

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

Nom	But	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
A : Vc	Est dans l'intervalle	90	140	1	1	3
B : f	Est dans l'intervalle	0,08	0,24	1	1	3
C : ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Ra	minimiser	0,37	3,45	1	1	5
Fy	Minimiser	65,74	370,2	1	1	3
MRR	maximiser	1,08	15,12	1	1	3

Le **tableau (IV.2)** ainsi que la **figure (IV.1)** illustrent la solution obtenue pour ce cas d'étude. On y observe que les valeurs optimales des paramètres de coupe à savoir la vitesse de coupe (**Vc**), l'avance par tour (**f**) et la profondeur de passe (**ap**), ainsi que les réponses correspondantes optimisées, sont associées à une désirabilité globale de 0,81. Les conditions de coupe optimales déterminées sont : **Vc = 140 m/min**, **f = 0,086 mm/tr** et **ap = 0,450 mm**. Dans ces conditions, la rugosité de surface atteint une valeur minimale de **Ra = 0,373 µm**, l'effort radial **Fy** est de **153,704 N**, et le débit de matière enlevée (**MRR**) atteint **5,677 cm³/min**. Ce type d'optimisation est particulièrement recherché lorsque la qualité de surface constitue un critère prioritaire, notamment lors des opérations de finition.

Tableau IV.2 : Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 1^{er} cas d'optimisation.

	Vc	f	ap	Ra	Fy	MRR	Désirabilité	
1	140,000	0,086	0,450	0,373	153,704	5,677	0,812	Selected

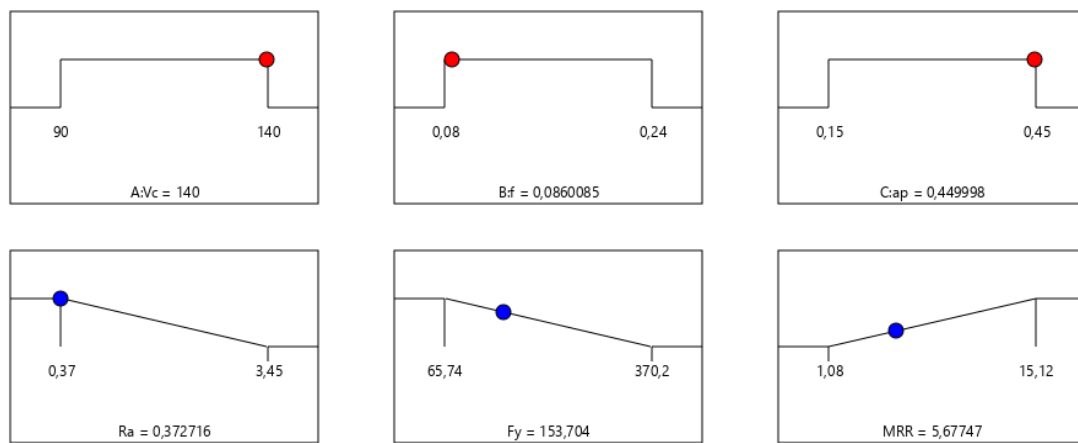


Figure IV.1 : Diagramme des rampes pour le 1^{er} cas d'optimisation.

La figure (IV.2 (a, b, c)) illustre la surface de réponse tridimensionnelle représentant la variation de la rugosité moyenne (**Ra**) en fonction des paramètres d'usinage, à savoir la vitesse de coupe (**Vc**), l'avance par tour (**f**) et la profondeur de passe (**ap**). Les figures (IV.2 (d, e et f)) montrent les courbes de niveau (contours 2D) associées, facilitant l'interprétation des zones optimales de réponse en fonction de deux facteurs à la fois.

La figure IV.2.a : représente l'interaction entre la vitesse de coupe (**Vc**) et l'avance par tour (**f**). Il en ressort que la rugosité diminue significativement avec une réduction de l'avance, tandis que l'effet de la vitesse de coupe est plus modéré, bien qu'une valeur élevée de (**Vc**) (autour de 140 m/min) contribue à améliorer légèrement la qualité de surface.

La figure IV.2.b : illustre l'influence conjointe de la vitesse de coupe (**Vc**) et de la profondeur de passe (**ap**). Elle montre que la rugosité minimale est obtenue pour une profondeur de passe relativement élevée (proche de 0,45 mm) combinée à une vitesse de coupe élevée (proche de 140 m/min), confirmant l'effet positif de ces conditions sur la qualité de surface.

La figure IV.2.c : montre l'évolution de (**Ra**) en fonction de l'avance par tour (**f**) et de la profondeur de passe (**ap**). On observe que la rugosité diminue avec la réduction de l'avance et de la profondeur de passe, atteignant une valeur minimale de **Ra** = 0,372 μm pour des valeurs faibles de ces deux paramètres.

Les contours 2D associés à chaque graphe permettent de localiser visuellement les zones optimales et facilitent le choix des paramètres d'usinage pour atteindre la meilleure qualité de surface possible, avec une désirabilité maximale de 0,372.

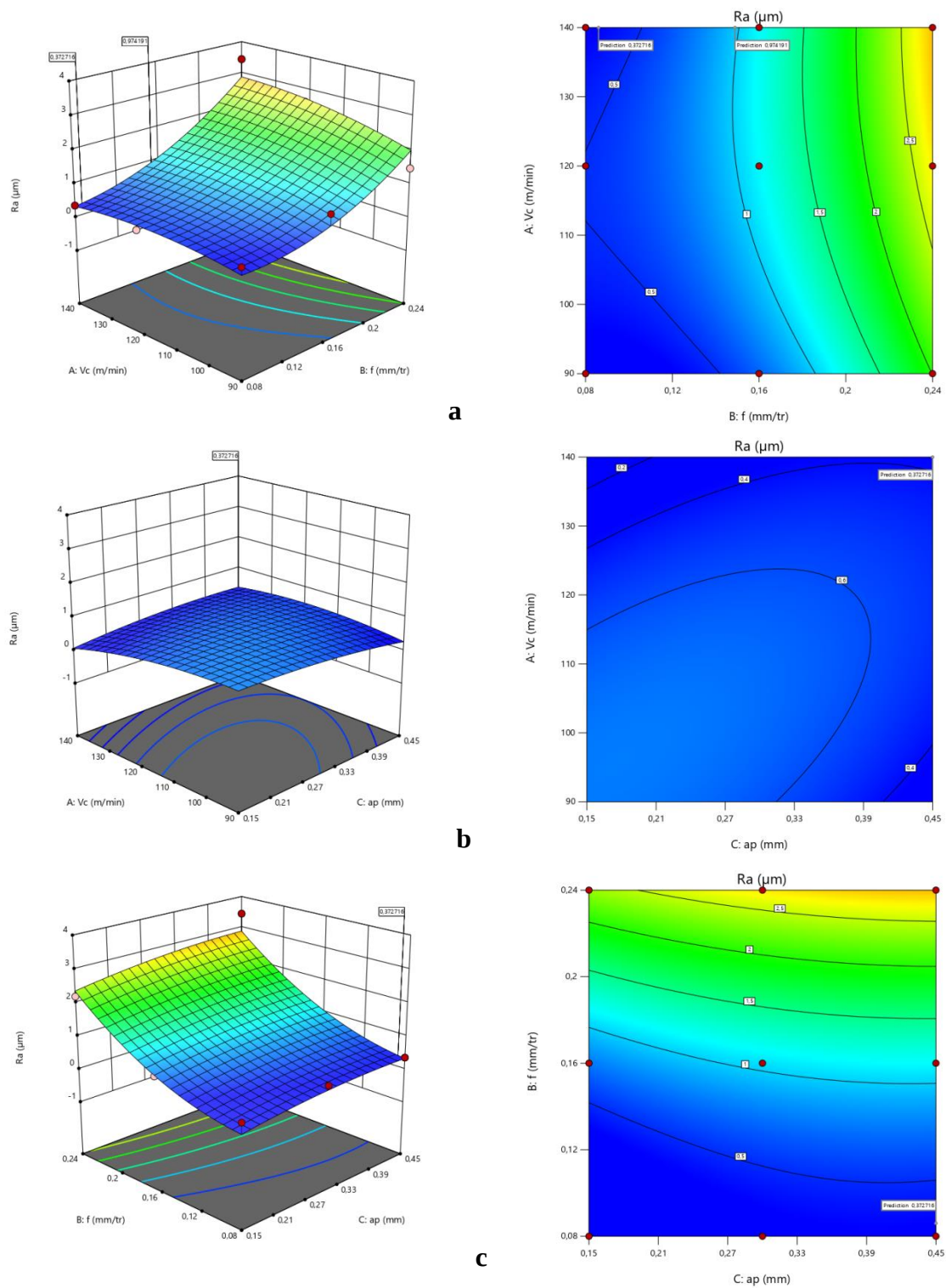


Figure IV.2 : Graphes de désirabilité 3D et les contours (2D) pour 1^{er} cas.

2^{ème} cas : Minimisation de l'effort

Dans ce cas, on a donné l'importance maximale à l'effort de coupe (**Fy**) (+5). Et gardant la rugosité de surface (**Ra**) et le débit de matière enlevée (**MRR**) à (+3).

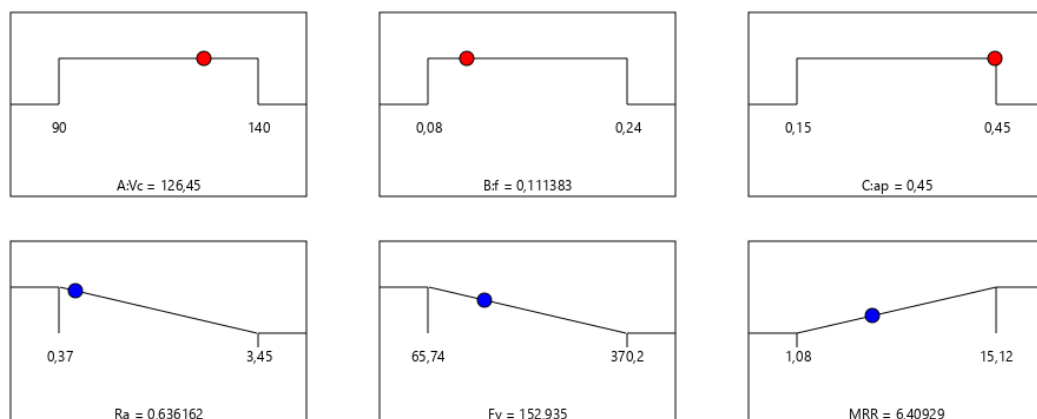
Tableau IV.3 : But et gamme de paramètres pour le 2^{ème} cas d'optimisation.

Nom	But	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
A : Vc	Est dans l'intervalle	90	140	1	1	3
B : f	Est dans l'intervalle	0,08	0,24	1	1	3
C : ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Ra	minimiser	0,37	3,45	1	1	3
Fy	minimiser	65,74	370,2	1	1	5
MRR	maximiser	1,08	15,12	1	1	3

Le tableau (IV.4) et la figure (IV.3) présentent les résultats obtenus pour ce cas d'optimisation. Il ressort que les valeurs optimales des paramètres d'usinage à savoir la vitesse de coupe (**Vc**), l'avance par tour (**f**) et la profondeur de passe (**ap**) conduisent à une désirabilité globale de 0,64. Les conditions de coupe optimales sont : **Vc** = 126,450 m/min, **f** = 0,111 mm/tr, et **ap** = 0,450 mm. Dans ce contexte, la rugosité de surface est minimisée (**Ra** = 0,636 μ m), l'effort radial (**Fy** = 152,935 N), tandis que le débit de matière enlevée s'élève à (**MRR** = 6,409 cm³/min). Ce scénario d'optimisation est privilégié lorsque l'exigence principale porte sur la qualité de surface, comme c'est souvent le cas dans les opérations de finition de précision.

Tableau IV.4 : Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 2^{ème} cas d'optimisation.

	Vc	f	ap	Ra	Fy	MRR	Désirabilité	
1	126,450	0,111	0,450	0,636	152,935	6,409	0,643	Selected

**Figure IV.3 :** Diagramme des rampes pour le 2^{ème} cas d'optimisation.

Les figures (IV.4 (a, b, c)) illustrent l'interaction entre les trois variables technologiques (V_c , f et ap), avec la réponse étudiée qui est la rugosité de surface (R_a). Ces courbes tridimensionnelles, accompagnées de leurs représentations en contours 2D, mettent en évidence l'effet de chaque paire de paramètres d'usinage sur la valeur de (R_a) lorsque le troisième paramètre reste constant :

La figure IV.4 (a) : montre la relation entre la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f). On remarque que la valeur minimale de rugosité de surface est atteinte pour une vitesse de coupe relativement élevée (126,450 m/min) et une faible avance (0,111 mm/tr). Cela indique qu'une augmentation de la vitesse de coupe combinée à une réduction de l'avance permet d'améliorer la qualité de surface.

La figure IV.4 (b) : présente l'interaction entre la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (ap). Il est observé qu'une augmentation simultanée de (V_c) et (ap) conduit à une réduction de (R_a), dans certaines limites. Une zone optimale est clairement identifiable, correspondant à une vitesse et une profondeur de passe élevées.

La figure IV.4 (c) : représente la relation entre l'avance (f) et la profondeur de passe (ap). Les résultats montrent que la rugosité de surface diminue lorsque l'avance est réduite et que la profondeur de passe est augmentée, avec une influence plus marquée de l'avance sur la rugosité.

Ces courbes mettent en évidence que les conditions optimales pour atteindre la rugosité minimale sont :

$V_c \approx 126,45$ m/min, $f \approx 0,111$ mm/tr et $ap \approx 0,45$ mm, avec une valeur minimale de $R_a = 0,636$ μm enregistrée.

Ces conditions sont idéales pour des opérations de finition, où la qualité de surface est prioritaire par rapport au taux d'enlèvement de matière ou à l'effort de coupe, notamment dans des domaines exigeant une précision élevée tels que l'aéronautique ou le médical.

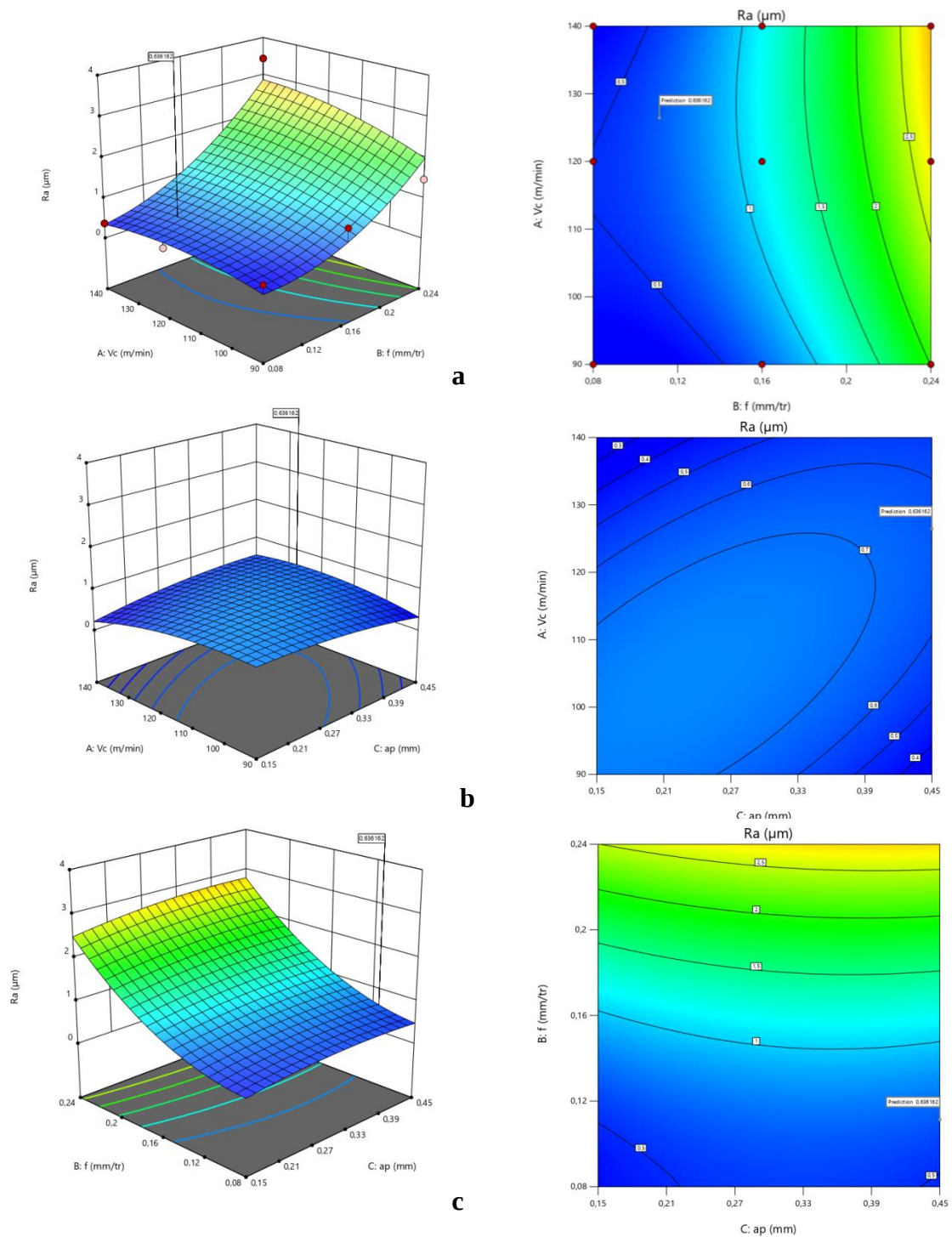


Figure IV.4 : Graphes de désirabilité 3D et les contours (2D) pour 2^{ème} cas

3^{ème} cas : Productivité maximale

Dans ce cas, on a donné l'importance maximale à le débite de matière enlevée (**MRR**) (+5).et gardant la rugosité de surface (**Ra**) et l'effort de coupe (**Fy**) à (+3).

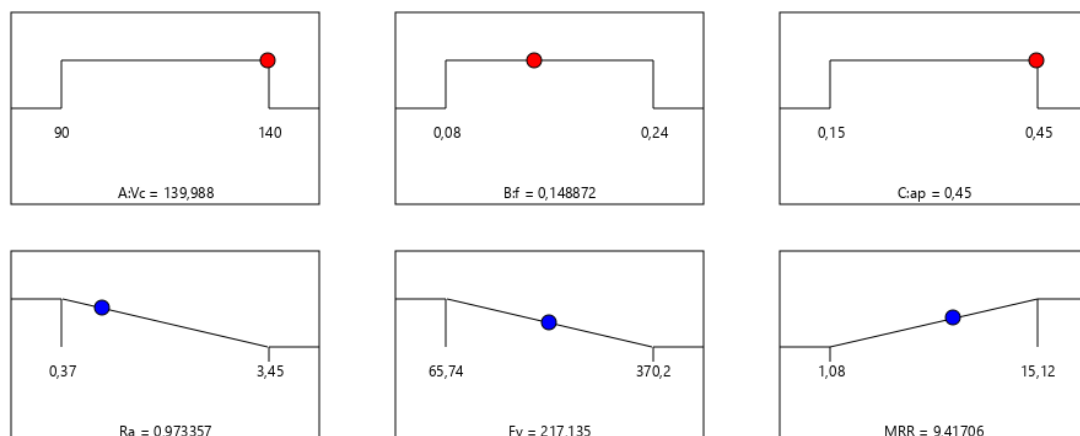
Tableau IV.5 : But et gamme de paramètres pour le 3^{ème} cas d'optimisation.

Nom	But	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
A : Vc	Est dans l'intervalle	90	140	1	1	3
B : f	Est dans l'intervalle	0,08	0,24	1	1	3
C : ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Ra	minimiser	0,37	3,45	1	1	3
Fy	minimiser	65,74	370,2	1	1	3
MRR	maximiser	1,08	15,12	1	1	5

Le tableau (IV.6) ainsi que la figure (IV.5) exposent les résultats issus de ce cas d'optimisation. Les paramètres d'usinage optimaux déterminés à savoir la vitesse de coupe (**Vc**), l'avance par tour (**f**) et la profondeur de passe (**ap**) permettent d'atteindre une désirabilité globale de 0,616. Plus précisément, les conditions de coupe optimales sont : **Vc** = 139,988 m/min, **f** = 0,149 mm/tr et **ap** = 0,450 mm. Dans ces conditions, la rugosité de surface est réduite à **Ra** = 0,973 μ m, l'effort radial (**Fy**) atteint 217,135 N, et le débit de matière enlevée (**MRR**) s'élève à 9,417 cm³/min. Ce type de stratégie d'optimisation s'avère particulièrement pertinent dans un contexte où la qualité de surface constitue un critère prioritaire, comme c'est le cas dans les opérations de finition de haute précision.

Tableau IV.6 : Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 3^{ème} cas d'optimisation.

	Vc	f	ap	Ra	Fy	MRR	Désirabilité	
1	139,988	0,149	0,450	0,973	217,135	9,417	0,616	Selected

Figure IV.5 : Diagramme des rampes pour le 3^{ème} cas d'optimisation.

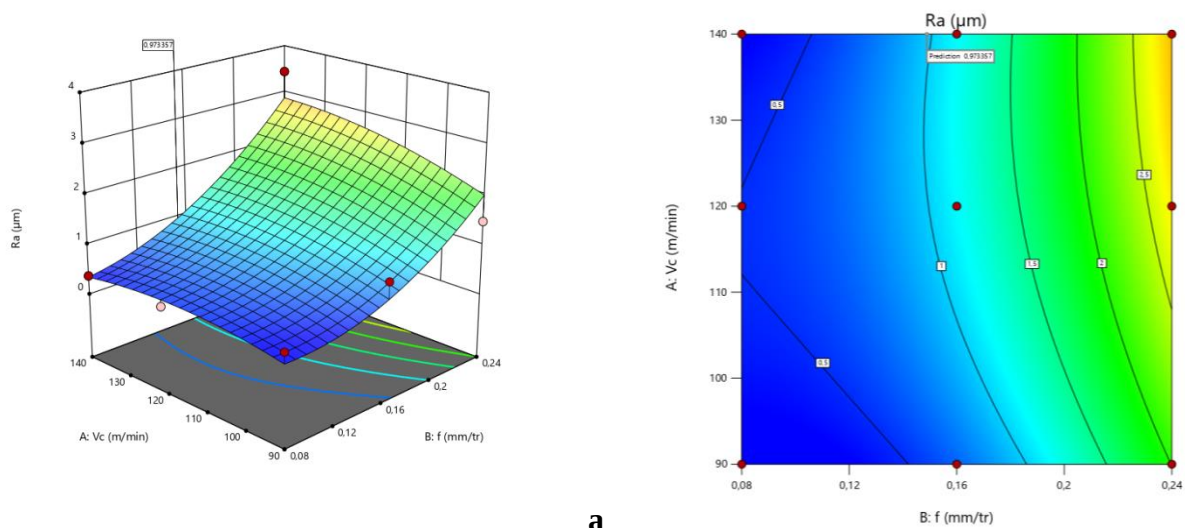
Les figures présentées illustrent l'évolution de la désirabilité en fonction de trois principaux paramètres d'usinage : la vitesse de coupe (**Vc**), l'avance par tour (**f**), et la profondeur de passe (**ap**). L'objectif ici est de maximiser le taux d'enlèvement de matière (**MRR**), et donc la désirabilité est directement liée à l'augmentation de ce taux.

Figure IV.6.a : Cette figure montre que la désirabilité augmente avec l'augmentation simultanée de la vitesse de coupe (**Vc**) et de l'avance (**f**). Les valeurs les plus élevées de désirabilité sont observées dans la zone supérieure droite du graphique, ce qui indique que des vitesses de coupe proches de 140 m/min combinées à des avances élevées (vers 0,24 mm/tr) favorisent un (**MRR**) maximal.

Figure IV.6.b : Ici aussi, la désirabilité est clairement maximisée lorsque la profondeur de passe (**ap**) et la vitesse de coupe (**Vc**) sont élevées. Cela est conforme aux principes de calcul du taux d'enlèvement de copeaux ($MRR = Vc \times f \times ap$), où une augmentation simultanée des paramètres mène à un plus grand volume de matière enlevé.

Figure IV.6.c : Le graphique montre que les valeurs maximales de désirabilité sont atteintes pour des avances (**f**) et des profondeurs de passe (**ap**) élevées. Plus précisément, lorsque (**f**) approche 0,24 mm/tr et (**ap**) avoisine 0,45 mm, le (**MRR**) est optimisé.

Cette combinaison permet d'atteindre la valeur maximale de la désirabilité, ce qui correspond à un enlèvement de matière efficace et rapide. Toutefois, il est important de considérer que ces conditions peuvent accroître les efforts de coupe et l'usure de l'outil, ce qui nécessite un compromis selon les objectifs de production



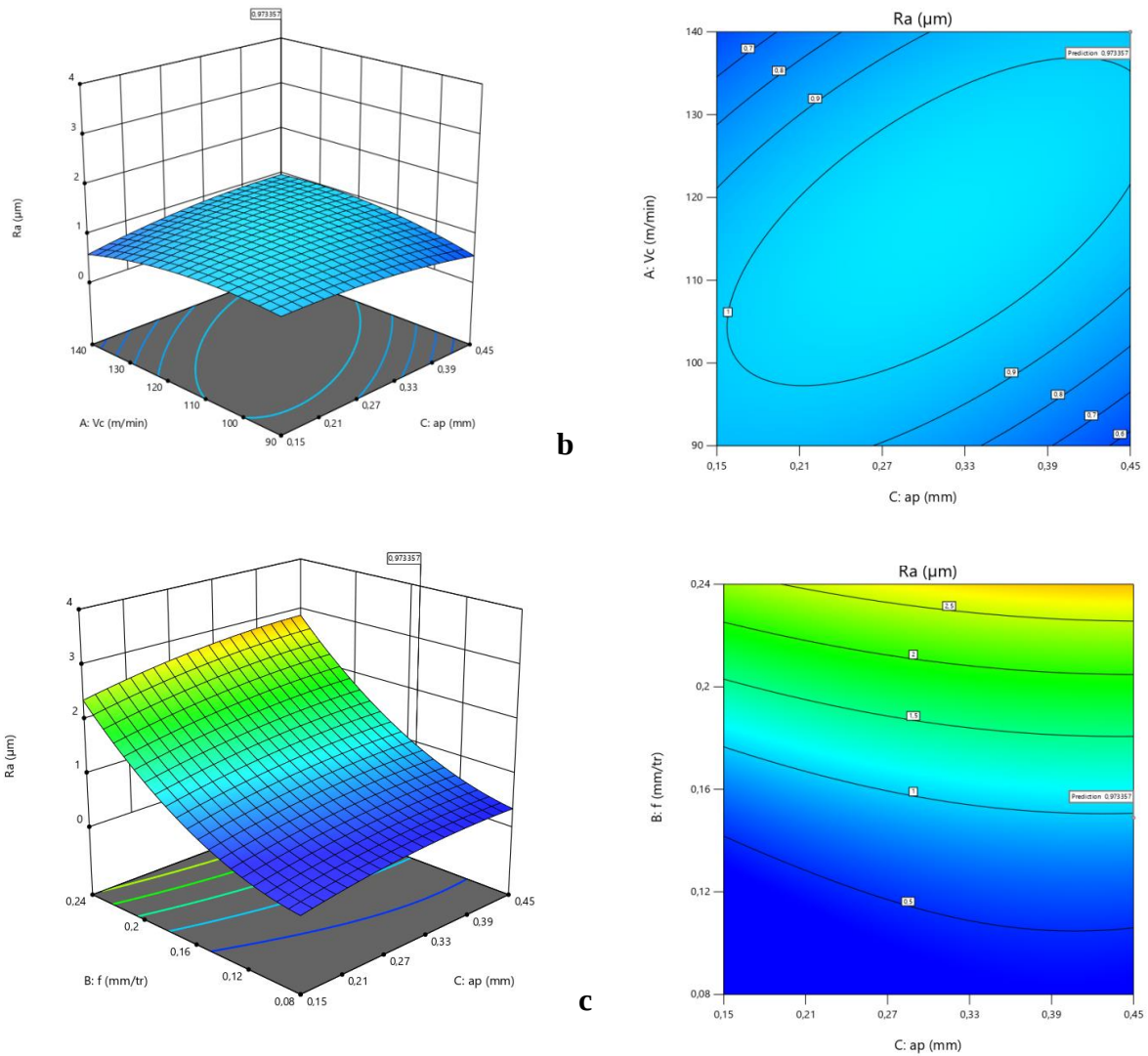


Figure IV.6 : Graphes de désirabilité 3D et les contours (2D) pour 3^{ème} cas.

4^{ème} cas : Optimisation combinée

Ce cas correspond à une optimisation multi-objective combinée. Le **tableau (IV.7)** présente les objectifs visés, les plages de variation des paramètres de coupe, ainsi que le poids (ou l'importance) attribué à chaque critère de réponse. Une importance maximale (+5) a été attribuée de manière équitable à l'ensemble des paramètres étudiés, à savoir : la rugosité moyenne (**Ra**), la force de coupe (**Fy**) et le taux d'enlèvement de copeaux (**MRR**).

Tableau IV.7 : But et gamme de paramètres pour le 4^{ème} cas d'optimisation.

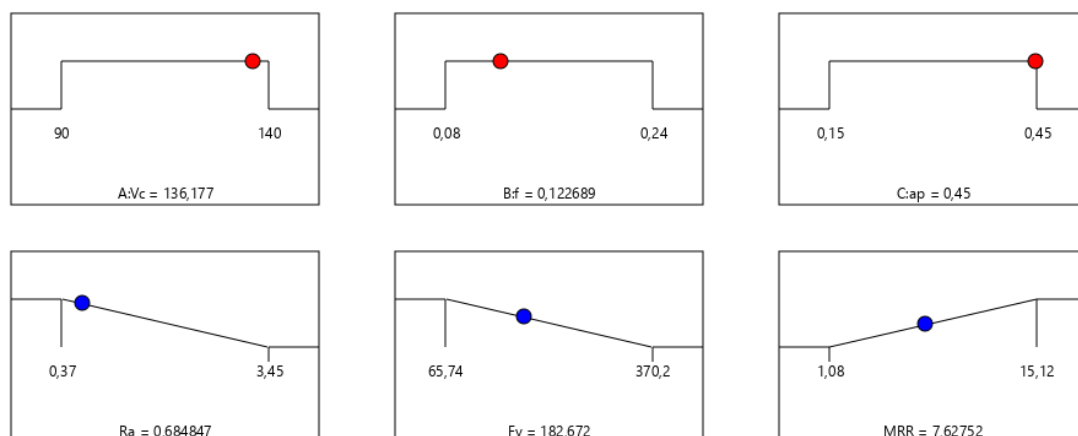
Nom	But	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Poids supérieur	Importance
A : Vc	Est dans l'intervalle	90	140	1	1	3
B : f	Est dans l'intervalle	0,08	0,24	1	1	3
C : ap	Est dans l'intervalle	0,15	0,45	1	1	3
Ra	minimiser	0,37	3,45	1	1	5
Fy	minimiser	65,74	370,2	1	1	5
MRR	maximiser	1,08	15,12	1	1	5

Le **tableau (IV.8)** ainsi que la **figure (IV.7)** présentent les résultats obtenus pour ce cas d'optimisation combinée. On y observe les valeurs optimales des paramètres de coupe à savoir la vitesse de coupe (**Vc**), l'avance par tour (**f**) et la profondeur de passe (**ap**) ainsi que les réponses correspondantes, pour une désirabilité globale de 0,637. Le régime optimal identifié est : **Vc** = 136,177 m/min, **f** = 0,123 mm/tr et **ap** = 0,450 mm. Les valeurs des réponses associées à cette configuration sont : effort de coupe **Fy** = 182,672 N, rugosité moyenne **Ra** = 0,685 μ m, et taux d'enlèvement de matière **MRR** = 7,628 cm³/min.

Ce type d'optimisation est particulièrement adapté lorsque l'utilisateur souhaite équilibrer simultanément l'ensemble des critères de performance, sans accorder de priorité particulière à l'un des paramètres au détriment des autres.

Tableau IV.8 : Régime de coupe optimal et réponses optimisées pour le 4^{ème} cas d'optimisation.

	Vc	f	ap	Ra	Fy	MRR	Désirabilité	
1	136,177	0,123	0,450	0,685	182,672	7,628	0,637	Selected

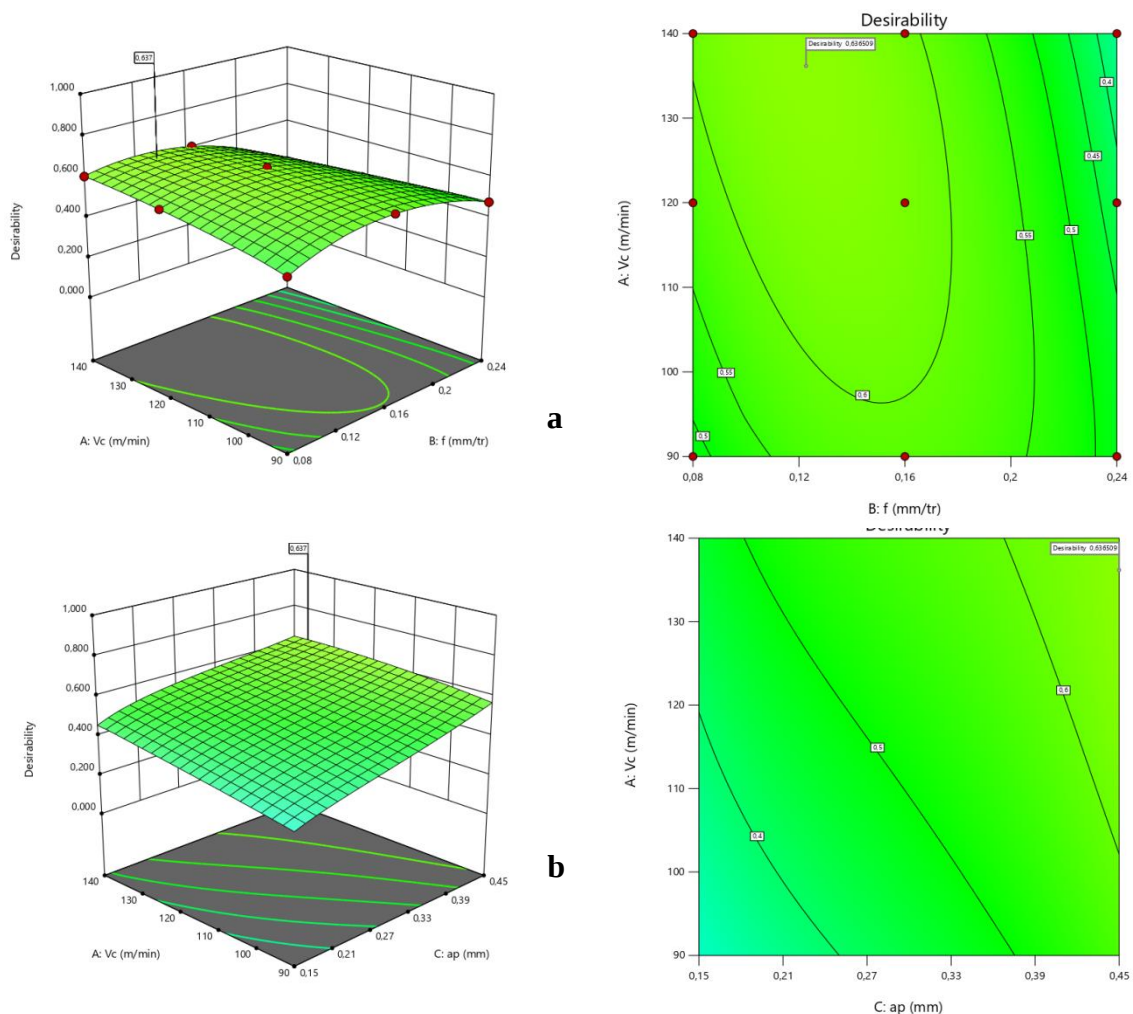
**Figure IV.7 :** Diagramme des rampes pour le 4^{ème} cas d'optimisation.

La figure (IV.8) illustre le domaine associé à la valeur maximale de la désirabilité, en fonction de la variation des paramètres d'usinage (V_c , f et ap), ainsi que les contours en 2D permettant une lecture facilitée de l'impact de deux facteurs simultanés.

La figure IV.8.a : présente la surface de réponse en 3D de la désirabilité selon la vitesse de coupe (V_c) et l'avance par tour (f). Il ressort de ce graphique qu'une valeur minimale de l'avance, combinée à une vitesse de coupe comprise entre 130 et 140 m/min, permet d'atteindre une désirabilité maximale.

La figure IV.8.b : montre l'évolution de la désirabilité en fonction de (V_c) et de la profondeur de passe (ap). Il est clair que la désirabilité maximale est obtenue lorsque la profondeur de passe est élevée et que la vitesse de coupe avoisine 140 m/min.

La figure IV.8.c : illustre l'influence conjointe de l'avance (f) et de la profondeur de passe (ap) sur la désirabilité. Les résultats indiquent que la valeur maximale de la désirabilité est atteinte avec une profondeur de passe maximale et une avance minimale.



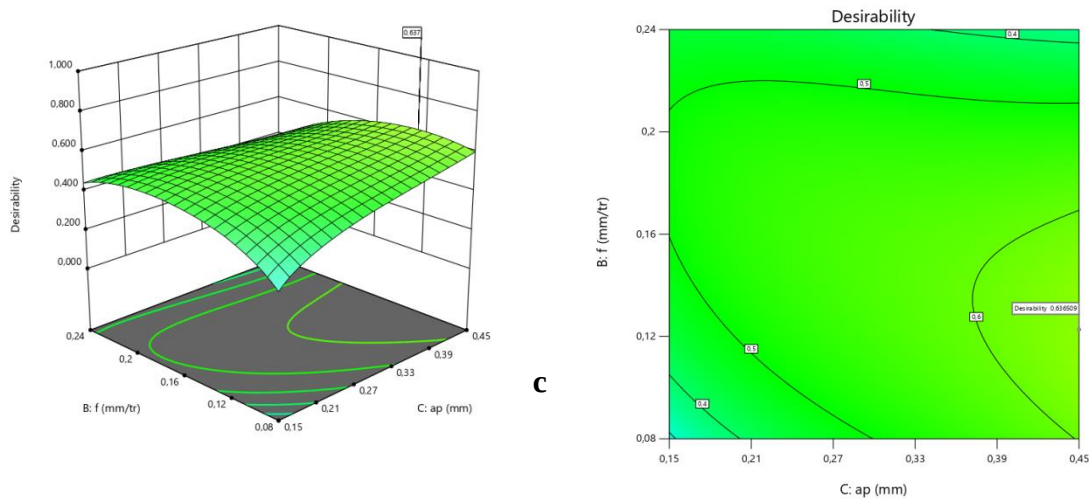


Figure IV.8 : Graphes de désirabilité 3D et les contours (2D) pour 4^{ème} cas.

IV.2.3. Résumé des paramètres optimaux selon la fonction désirabilité

Le tableau (IV.8) présente un résumé des paramètres optimaux déterminés selon la fonction de désirabilité pour les quatre scénarios d'optimisation étudiés.

Tableau IV.8 : Résultats de l'optimisation par la fonction désirabilité.

	Vc	f	ap	Ra	Fy	MRR	Désirabilité
1er cas	140,000	0,086	0,450	0,373	153,704	5,677	0,812
2eme cas	126,450	0,111	0,450	0,636	152,935	6,409	0,643
3eme cas	139,988	0,149	0,450	0,973	217,135	9,417	0,616
4eme cas	136,177	0,123	0,450	0,685	182,672	7,628	0,637

IV.3. Méthode MOORA

La méthode **MOORA** (Multi-Objective Optimization Ratio Analysis), introduite par **Brauers [39]**, est une approche de décision multicritère conçue pour résoudre des problèmes complexes. Elle se distingue par l'utilisation simultanée de critères favorables (désirables) et défavorables (indésirables) dans le processus de classement, ce qui permet d'identifier l'alternative la plus performante parmi un ensemble de choix. Cette méthode est largement utilisée dans divers domaines, notamment pour le choix de fournisseurs, l'optimisation des

paramètres des procédés industriels, ou encore la sélection de fabricants. La démarche de prise de décision multicritère selon la méthode **MOORA** se déroule en plusieurs étapes clés :

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

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x_{mn} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV.7)$$

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

Étape 2: Calcul de la matrice de décision normalisée [**Xi**] basée sur la formule :

$$k = [x_{ij}]_{m \times x} \dots \dots \dots (IV.8)$$

$$k_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \dots \dots \dots (IV.9)$$

Tableau IV.9 : Matrice des valeurs normalisées.

Essai N°	Ra*	Fy*	MRR*
1	0,059769	0,148423	0,031331
2	0,057378	0,181848	0,062662
3	0,059769	0,114117	0,093993
4	0,139859	0,171551	0,062662
5	0,14225	0,261724	0,125324
6	0,120733	0,19425	0,187986
7	0,266569	0,19993	0,093993
8	0,272546	0,317816	0,187986
9	0,176916	0,259566	0,281978
10	0,056183	0,090108	0,041775
11	0,06216	0,138577	0,083549

12	0,044229	0,14532	0,125324
13	0,125515	0,117284	0,083549
14	0,133882	0,183384	0,167098
15	0,113561	0,222382	0,250648
16	0,306017	0,130749	0,125324
17	0,398061	0,19119	0,250648
18	0,313189	0,224701	0,375971
19	0,045424	0,070588	0,048737
20	0,052597	0,125617	0,097474
21	0,044229	0,136172	0,146211
22	0,084872	0,09698	0,097474
23	0,100412	0,173838	0,194948
24	0,112365	0,231391	0,292422
25	0,264178	0,104636	0,146211
26	0,276132	0,192403	0,292422
27	0,412405	0,397498	0,438633

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

$$W_{ij} = w_j \times k_{ij} \dots \dots \dots (IV.10)$$

Tableau IV.10 : Valeurs normalisées pondérées.

Essai N°	wxRa*	wxFy*	wxMRR*
1	0,019724	0,04898	0,010339
2	0,018935	0,06001	0,020678
3	0,019724	0,037659	0,031018
4	0,046154	0,056612	0,020678
5	0,046942	0,086369	0,041357
6	0,039842	0,064103	0,062035
7	0,087968	0,065977	0,031018
8	0,08994	0,104879	0,062035
9	0,058382	0,085657	0,093053
10	0,01854	0,029736	0,013786

11	0,020513	0,04573	0,027571
12	0,014596	0,047956	0,041357
13	0,04142	0,038704	0,027571
14	0,044181	0,060517	0,055142
15	0,037475	0,073386	0,082714
16	0,100985	0,043147	0,041357
17	0,13136	0,063093	0,082714
18	0,103352	0,074151	0,124071
19	0,01499	0,023294	0,016083
20	0,017357	0,041454	0,032166
21	0,014596	0,044937	0,04825
22	0,028008	0,032003	0,032166
23	0,033136	0,057367	0,064333
24	0,037081	0,076359	0,096499
25	0,087179	0,03453	0,04825
26	0,091124	0,063493	0,096499
27	0,136094	0,131174	0,144749

Étape 4: Définissez **Pi** et **Ri** en fonction par les formules suivantes:

$$p_i = \frac{1}{|B|} \sum_{j \in B} W_{ij} \dots\dots\dots(\text{IV.11})$$

$$R_i = \frac{1}{|NB|} \sum_{j \in NB} W_{ij} \dots\dots\dots(\text{IV.12})$$

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 **Qi** sur la base de la formule suivante :

$$Q_i = P_i - R_i \dots\dots\dots(\text{IV.13})$$

Tableau IV.11 : Résultats MOORA (distances, coefficient de proximité Q_i et le classement pour chaque alternative).

Essai N°	Y_i	Rank	Essai N°	Y_i	Rank
1	-0,05836	19	15	-0,02815	9
2	-0,05827	18	16	-0,10278	23
3	-0,02636	6	17	-0,11174	24
4	-0,08209	21	18	-0,05343	16
5	-0,09195	22	19	-0,0222	4
6	-0,04191	12	20	-0,02664	7
7	-0,12293	26	21	-0,01128	1
8	-0,13278	27	22	-0,02784	8
9	-0,05099	14	23	-0,02617	5
10	-0,03449	10	24	-0,01694	2
11	-0,03867	11	25	-0,07346	20
12	-0,02119	3	26	-0,05812	17
13	-0,05255	15	27	-0,12252	25
14	-0,04956	13			

Le tableau (IV.11) regroupe les résultats obtenus à l'aide de la méthode **MOORA**, en incluant les distances, les coefficients de proximité Q_i , ainsi que le classement correspondant à chaque alternative. Parmi l'ensemble des options évaluées, le test de coupe n°21 se distingue en affichant le plus haut coefficient de proximité, avec une valeur de -0,01128. En conséquence, cette alternative est considérée comme la plus performante.

IV.4 Comparaison des résultats d'optimisation

Les différentes méthodes d'optimisation multi-objective appliquée ont permis d'obtenir les résultats présentés dans le tableau (IV.12).

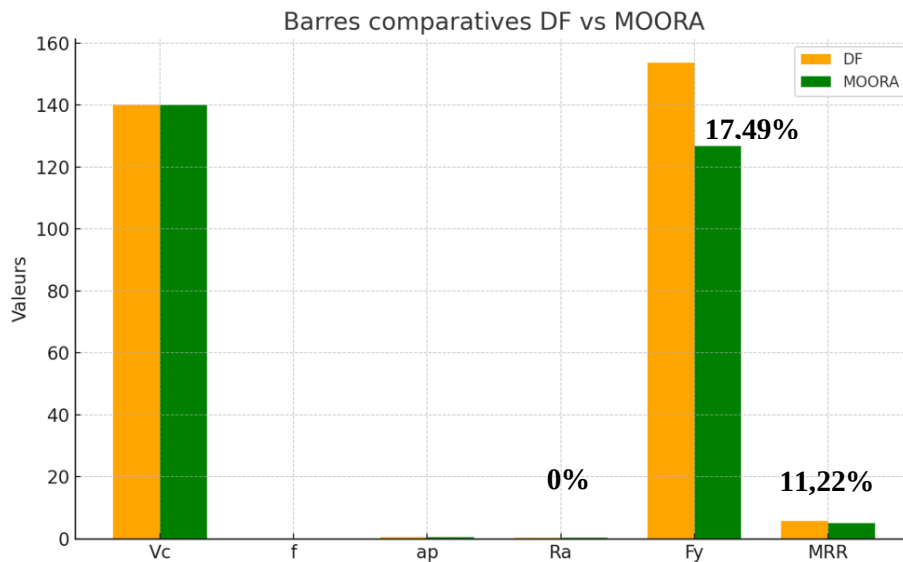


Figure IV.9 : Comparaison des paramètres d'usinage optimisés.

Cette figure présente une comparaison entre les deux méthodes d'optimisation multi-objective, à savoir **(DF)** et **MOORA**, en mettant en évidence les régimes de coupe optimaux (**Vc**, **f**, **ap**) ainsi que les réponses obtenues (**Ra**, **Fy**, **MRR**).

- Régimes de coupe optimaux : Les deux méthodes ont proposé exactement les mêmes paramètres :
 - Vitesse de coupe (**Vc**) = 140 m/min
 - Avance par tour (**f**) = 0,08 mm/tr
 - Profondeur de passe (**ap**) = 0,45 mm

Cela indique une cohérence entre les deux approches sur les conditions de coupe idéales.

- Rugosité de surface (**Ra**) : Les deux méthodes donnent la même valeur (0,37 μ m), ce qui reflète une qualité de surface équivalente.
- Effort de coupe (**Fy**) : La méthode **DF** présente un effort plus élevé (153,704 N) par rapport à **MOORA** (126,82 N), soit une réduction de **17,49 %** en faveur de **MOORA**. Cela représente un **avantage important** en termes de réduction des contraintes mécaniques sur l'outil et la machine.
- Taux d'enlèvement de matière (**MRR**) : La méthode **DF** permet un (**MRR**) plus élevé (5,677 cm³/min contre 5,04 cm³/min), avec une amélioration de **11,22 %**, ce qui peut se traduire par une productivité accrue.

Conclusion générale

Cette étude a pour objectif d'analyser l'usinage à sec de l'acier **AISI D3** en utilisant un outil de coupe en céramique de nuance **CC6050**. Elle se concentre sur une analyse statistique suivie d'une modélisation et d'une optimisation multi-objective des conditions de coupe. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les conditions de coupe optimales suivantes :

- 1) Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) concernant la rugosité de surface (**Ra**) indiquent que le modèle est statistiquement significatif. L'avance (**f**) s'avère être le facteur prédominant, avec une contribution de **80,87 %**, tandis que la vitesse de coupe (**Vc**) n'exerce qu'un faible impact, estimé à **0,26 %**.
- 2) L'analyse de la variance (ANOVA) des résultats relatifs à l'effort radial (**Fy**) montre que l'avance (**f**) est le facteur le plus influent, avec une contribution de **30,13 %**, suivie de la profondeur de passe (**ap**) avec **25,30 %**, puis de la vitesse de coupe (**Vc**) dont la contribution est plus faible, à hauteur de **4,92 %**.

La mise en œuvre d'un plan d'expériences réduit de type factoriel complet a permis, avec succès, de limiter le nombre d'essais nécessaires tout en identifiant les conditions de coupe optimales.

L'optimisation effectuée à l'aide de la fonction de désirabilité a permis d'identifier les conditions de coupe optimales suivantes :

- 1^{er} Cas : $V_c = 140$ m/min, $f = 0.086$ mm/t, $a_p = 0.45$ mm, $R_a = 0.37 \mu\text{m}$, $F_y = 153,704$ N, $MRR = 5,677 \text{ cm}^3 / \text{min}$, $DF = 0,812$.
- 2^{ème} Cas : $V_c = 126,450$ m/min, $f = 0,111$ mm/t, $a_p = 0.45$ mm, $R_a = 0,636 \mu\text{m}$, $F_y = 152,935$ N, $MRR = 6,409 \text{ cm}^3 / \text{min}$, $DF = 0,643$.
- 3^{ème} Cas: $V_c = 139,988$ m/min, $f = 0,149$ mm/t, $a_p = 0.45$ mm, $R_a = 0,973 \mu\text{m}$, $F_y = 217,135$ N, $MRR = 9,417 \text{ cm}^3 / \text{min}$, $DF = 0,616$.
- 4^{ème} Cas: $V_c = 136,177$ m/min, $f = 0,123$ mm/t, $a_p = 0.45$ mm, $R_a = 0,685 \mu\text{m}$, $F_y = 182,672$ N, $MRR = 7,628 \text{ cm}^3 / \text{min}$, $DF = 0,637$.

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

- $V_c = 140$ m/min, $f = 0.08$ mm/t, $a_p = 0.45$ mm, $R_a = 0,37 \mu\text{m}$, $F_y = 126,82$ N.
 $MRR = 5,04 \text{ cm}^3 / \text{min}$.

La comparaison entre les deux méthodes d'optimisation (**DF** et **MOORA**) a montré que les résultats obtenus étaient globalement similaires. Les deux approches ont donné la même valeur pour la rugosité de surface (**Ra**), tandis que la méthode **DF** s'est distinguée par une meilleure valeur du taux d'enlèvement de matière (**MRR**). Par conséquent, la méthode d'optimisation par (**DF**) peut être considérée comme la plus performante par rapport à **MOORA**.

L'application des deux méthodes d'optimisation, à savoir la fonction de désirabilité (**DF**) et la méthode **MOORA**, a été réalisée avec succès pour résoudre les problématiques d'optimisation multi-réponse dans le cadre du tournage de l'acier **AISI D3**. Les résultats ont montré que les deux approches fournissent des valeurs de sortie proches, notamment en ce qui concerne la rugosité de surface (**Ra**). Cependant, la méthode (**DF**) s'est démarquée en offrant un meilleur taux d'enlèvement de matière (**MRR**), ce qui suggère un meilleur compromis global entre les critères de performance analysés. Ainsi, la méthode (**DF**) peut être considérée comme la plus avantageuse, selon les objectifs visés par l'utilisateur.

Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- L'étude comparative d'autres aciers trempés en tournage dur.
- L'introduction de nouveaux critères de performance comme la température et l'usure de l'outil.
- L'application d'autres méthodes MCDM pour valider les résultats obtenus.

Référence bibliographique

- [1] **Olivier Oullié**, Éléments d'usinage et métrologie dimensionnelle, cours-TEC 040, 2009, ESTML Québec.
- [2] **Gilles, G.** Usinage : Principes, procédés, moyens. Éditions Dunod, 4^e édition, 2015.
- [3] <https://images.app.goo.gl/81yUeewq1fQ1A6ex5>.
- [4] **Roux, M.** Technologie de l'usinage. Éditions Casteilla, 3^e édition, 2010.
- [5] **Azizi M W**, Utilisation des plans d'expériences en TD pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage, Thèse Doctorat, Université de Guelma, 2014.
- [6] <https://images.app.goo.gl/TSxhEEKSXaq1gZdM7>.
- [7] **Astakhov V. P.** Geometry of Single-Point Turning Tools and Drills. Fundamentals and Practical Applications. London: Springer, 2010.
- [8] **Poulachon G.** Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis. Techniques de l'ingénieur, BM7048, 2004.
- [9] **PAGÈS C.** Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition, Thèse de doctorat, 2003.
- [10] **C. Pages**, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. N° d'ordre : 37, 2003.
- [11] **Windels F.** Le tournage dur, un concurrent pour la rectification cylindrique, Techniwatch. 2003, pp 1-3.
- [12] **Poulachon G.**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Thèse de doctorat de l'ENSAM de Cluny, 1999.
- [13] **BELHADI S**, Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau, Thèse de doctorat de Productique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2009.
- [14] **BUTIN R & PINOT M**, Fabrications mécaniques technologie, tome III, Fouchier, juillet 1988.
- [15] <https://images.app.goo.gl/hgMDBvO8NtVEHmrV6>.

- [16] **BAGUR F**, Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7080.
- [17] **Davim J. P.** Machining of hard materials. London: Springer-Verlag. ISBN 1849964505, 9781849964500. Doi: 10.1007/978-1-84996-450-0, 2011.
- [18] **Suha K. S., Zahid A. K., Aas M. & Arshad N. S.** A review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications, Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal, 2:1, 24-49, 2014.
- [19] **Pastor H.**, Etat actuel et développement des matériaux durs et superdurs, Matériaux et techniques, 2 ème partie, 1987, pp.319-327.
- [20] **Mokas N**, Usinabilité de l'acier c18 lors des opérations de perçage, Mémoire de Magister, Université de Annaba, 2011.
- [21] **Alexandre Toumine** : cours d'usinage, groupe conception production, INSA de Lyon, France.
- [22] **Yahya I.** Investigating the machinability of tool steels in turning operations. Materials and Design 28 1417–1424, 2007.
- [23] **Bouacha K., Yallese M. A. Mabrouki T., Rigal J. F.** Statistical analysis of surface roughness and cutting efforts using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. Int J Refract Met Hard Mater; 28: 349–361, 2010.
- [24] **BELHADI S**, Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau, Thèse de doctorat de Productique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2009.
- [25] **Weil R.**, techniques d'usinage, Dunod, Paris 1971.
- [26] **R. BUTIN & M. PINOT**, Fabrications mécaniques technologie, tome3, 1988, Edition Foucher juillet.
- [27] **GORDANA Globočki, DAVORIN Kramar**, Metal Cutting Theory And Applications, Banja Luka and Ljubljana, 2014, University of Banja Luka.
- [28] **CLAUDE Barlier, LIONEL Girardin**, Memotech productique matériaux et usinage, 1999, Editions Casteilla, PARIS.

[29] **EZUGWU, E. O. et TANG, S. H.** Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, vol. 55, no 2, p. 63-69.

[30] **G.Boothroyd**, *Fondamentaux de l'usinage des métaux*, Arnold, 1986, Paris.

[31] **Bhemuni, V., & Chalamalasetti, S. R. (2014).** Statistical Model for Surface Roughness in Hard Turning of AISI D3 Steel. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 8(6).

[32] **Bhemuni, V. (2016).** Investigations of Forces, Power and Surface Roughness in Hard Turning with Mixed Ceramic Tool. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 10(1), 107-120.

[33] **Bensouilah, H., Aouici, H., Meddour, I., Yallese, M. A., Mabrouki, T., & Girardin, F. (2016).** Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. *Measurement*, 82, 1-18.

[34] **Dureja, J. S., Singh, R., & Bhatti, M. S. (2014).** Optimizing flank wear and surface roughness during hard turning of AISI D3 steel by Taguchi and RSM methods. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 767-783.

[35] **David, A. O., & Olorunfemi, E. S. (2022).** COMPARISON OF EFFECT COLD WORK AND HOT WORK ROUGHNESS SURFACE PARAMETERS OF TOOL STEEL HARD TURNING. *BW Academic Journal*, 11-11.

[36] **Notter A.T, Heath J.P.**, usinage des métaux ferreux de grande dureté à l'aide de l'amborite, *Matériaux et Techniques*, N°386, 1981, pp.301-308.

[32] **M. CHAHAL, V. SINGH, R. GARG**, Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-13 (2016).

[33] **Myers R.S**, *Montgomery D.C. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc.: New York, (2002).

[39] **Brauers W.K.M.** *Multi-Objective Optimization Methods for Decision-Making: A Revolution in Economic Thinking by Multi-Objective Optimization*. Kluwer Academic Publishers: Boston, (2004).