



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE « Abbès LAGHROUR »
DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie Mécanique spécialisé

Soutenu le 17/06/2025

Thème

Analyse des performances des aciers à l'aide des modèles RSM, DNN-GA, KNN et optimisation via la fonction de désirabilité et MOGWO

Présenté par :

SAADI Ilias

Membres de jury :

Dr. ALLAOUI abdelhlim
Dr. TOUATI Sofiane
Dr. HAMMOUYA amel

M. C. A Université de Khenchela
M. C. A Université de Khenchela
M. C. B Université de Khenchela

Président
Rapporteur
Examineur

2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله الذي أنشأ وبرأ وخلق الماء والثرى وعلى عرش الرحمن استوى والصلاة

والسلام على الحبيب

دعاء

اللهم إذا أعطيتنا نجاحا لا نلفقنا تواضعا وإذا أعطيتنا تواضعا لا

تأخذه اعتزاز لكرامتنا اللهم لا تجعل لنا نصيبا من الغرور إذ
|

نجحنا ولا باليأس إذ أخفقتنا وذكرنا أن الإخفاق هو تجربة تسبق النجاح
|

ربنا تقبل منا هـ الدعاء
ذا

Dédicace

Je dédie cet humble ouvrage :

À mes chers parents.

À mes sœurs.

À toute la famille Saadi.

À tous les professeurs avec qui j'ai étudié.

À tous mes Amis.

*À tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, tout au long de mes
années d'études.*

Saadi ilies

Remerciement

Au nom de Dieu, le plus gracieux, le plus miséricordieux.

Grâces soient rendues à Dieu, Seigneur de tous les mondes. Beaucoup de louanges, bonnes et bénies. Louange à Dieu, par la grâce duquel les bonnes actions sont Accomplies. Nous le remercions pour les bénédictions qu'il nous a accordées et qui nous ont amenés à ce jour béni. Louange à Dieu qui nous a guidés vers cela, car nous n'aurions pas été guidés sans Sa direction

Tout d'abord, je voudrais exprimer mes sincères

Remerciements et ma reconnaissance à mon estimé professeur, le Dr Touati Sofiane, pour sa précieuse supervision et ses précieux conseils, et pour m'avoir inclus dans son équipe de recherche. Ses efforts et son temps Dévoué ont contribué à m'aider à atteindre l'excellence et

La créativité dans mon mémoire de fin d'études Enfin, je tiens

Également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation ce travail

Spéciale remerciement à mes frère Salah dahraoui, abdhafid houggas, et tous les ingénieurs d'ESMK

Saad ilies

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : état de l'art sur l'usinage.

Tableau 1:1. Principaux paramètres liés à la courbe de portance24

Chapitre II : Equipements, Matériaux et outils de coupe utilisé

Tableau III.1 Critères des sélections de le 35CrMnSiA dans l'industriel mécanique.....35
Tableau III.2 Propriétés mécaniques de 35CrMnSiA.....36
Tableau III.3 Composition chimique de l'acier 35CrMnSiA37
Tableau III.4 Les caractéristiques physico-mécaniques de l'acier 35CrMnSiA.....37
Tableau III.5 Informations relatives à la plaquette de coupe fraise avec des
plaquettes revêtu..... 38
Tableau II.6 Procédé d'usinage d'éprouvette.....42
Tableau II.7 Matrice de planification pour un plan (3³).....49

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau III.1 Mesure de rugosité Ra et Rz pour les combinaisons BBD.....51
Tableau III.2 Mesures statiques pour le résumé d'ajustement des modèles Ra et Rz.....52
Tableau III.3 Résumé de l'ANOVA pour l'ajustement des modèles Ra et Rz.....54
Tableau III.4 Statistiques d'ajustement.55
Tableau III.5 Les 10 meilleures solutions trouvées à l'aide de fonction de désirabilité.....61
Tableau III.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs
prédiction.....64
Tableau III.7 Mesure de rugosité Ra et Rz pour les combinaisons BBD à sec66
Tableau III.8 Mesures statiques pour le résumé d'ajustement des modèles Ra et Rz à sec... ..67
Tableau III.9 Résumé de l'ANOVA pour l'ajustement des modèles Ra et Rz. à
sec.....68
Tableau III.10 Statistiques d'ajustement à sec.....69
Tableau III.11 comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédiction à
sec.....76
Tableau III.12 Les 10 meilleures solutions trouvées à l'aide de fonction de désirabilité à sec78

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I. 1: Représentation et définition des paramètres : vitesse de coupe (V_c), avance (f) et profondeur de passe (a_p).....	5
Figure I 2: usinage à sec.....	8
Figure I 3: Système MQL-minimum-quantité-lubrifiants mélange air/huile	9
Figure I 4: Technique de lubrification par Cryogénie.....	9
Figure I 5: Lubrification abondante.....	10
Figure I 6: Mouvements de coupe et d'avance en tournage et fraisage	10
Figure I 7: procédé de tournage.....	11
Figure I 8: Angles caractéristiques de l'outil de coupe.....	12
Figure I 9: Schéma descriptif du dispositif de tournage.....	12
Figure I 10: image représente les différentes opérations d'usinage sur les tours.....	14
Figure I 11: Opération de Chariotage et outil de coupe	15
Figure I 12: Opération de Dressage et outil de coupe	15
Figure I 13: Opération d'alésage et outil de coupe	15
Figure I 14: Opération de perçage et outil de coupe	16
Figure I 15: Opération de Rainurage et outil de coupe.....	16
Figure I 16: Opération de filetage et outil de coupe.....	17
Figure I 17: Opération de Chanfreinage et outil de coupe.....	17
Figure I 18: différents opérations de fraisage industrielles.....	18
Figure I 19: image représentée fraiseuses horizontales et fraiseuses verticales.....	19
Figure I 20: tour anniversaire.....	19
Figure I 21: image représentée principaux types de fraisage.....	20
Figure I 22: type de la fraiseuse	21
Figure I 23: Composition porte d'outil.....	21
Figure I 24: Opération de rainurage	22
Figure I 25: Opération de surfacage	22
Figure I 26: Opération de l'épaulement.....	23
Figure I 27: Opération de l'usinage de poches.....	23
Figure I.28 Les trois types de fraise à partir de la taille.....	24
Figure I 29: Image représentée les plusieurs formes de la fraise	24
Figure I 30: Graphique montrant les matériaux en termes de dureté et de ténacité	26
Figure I 31: les deux types de dépôt de revêtement PVD et CVD.....	27
Figure I 32: Plaquette carbure revêtue, multicouche	28
Figure I 33: Appareil de mesure de rugosité.....	30
Figure I 34: Critères de rugosité R_a et R_z	31
Figure I 35: Critères de rugosité R_t	31
Figure I 36: les trois zones.....	32

Chapitre II : Présentation du matériau et des équipements

Figure II.1 : spectromètre Type de SPECTROMAX.....	37
Figure II.2: Plaquette R390-11 T3 08M-PM 1030	38
Figure II.3 : Géomètre de la plaquette R390-11 T3 08M-PM 1030.....	39

Liste des Figures

Figure II.4 : Porte outil utilisé	39
Figure II.5 : Outil avec des plaquette en carbure type YT15	40
Figure II.6 : Une machine a scier ultra diam.....	40
Figure II.7 : Centre d'usinage vertical que représentée l'opération de surfaçage	41
Figure II.8 : une rectification plane M7 170.	41
Figure II.9 : Dessin définition de l'éprouvette	41
Figure II.10 : L'éprouvette réelle	43
Figure II.11 Centre d'usinage vertical 3axes type X1000 qui présentée les deux opération par deux outils différents	43
Figure II.12 : Image représenté programme d'usinage	44
Figure II.13 : Image représenté les quatre barre	44
Figure II.14 : Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce	45
Figure II.15 : Schématisation de la répartition des efforts de coupe pour une opération de surfaçage	46

Chapitre III : Résultats expérimentaux et discussion

Figure III.1 :Graphique des valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles pour Ra et Rz.....	57
Figure III.2 Représentation en surface 3D des interactions entre les différents paramètres de surfaçage et de leurs effets combinés sur la rugosité Ra et Rz selon le plan BBD.	58
Figure III.3 Graphiques de probabilité normale des résidus pour Ra et Rz.....	60
Figure III.4 Graphiques des effets principaux pour Ra et Rz	61
Figure III.5 Meilleures combinaisons de paramètres déterminées à l'aide de la fonction de désirabilité.....	63
Figure III.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs de prédictions	65
Figure III.7 :Graphique des valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles pour Ra et Rz (en cas d'usinage a sec)	71
Figure III.8 Représentation en surface 3D des interactions entre les différents paramètres de surfaçage et de leurs effets combinés sur la rugosité Ra et Rz selon le plan BBD(en cas a sec). 72	
Figure III.9 Graphiques de probabilité normale des résidus pour Ra et Rz.(en cas a ces)	74
Figure III.10 Graphiques des effets principaux pour Ra et Rz.(en cas a sec).....	75
Figure III.11 Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs de prédictions à sec 77	
Figure III.12 Meilleures combinaisons de paramètres déterminées à l'aide de la fonction de désirabilité(en cas a sec)	78

Résumé

La modélisation et l'optimisation constituent des étapes essentielles dans les procédés de fabrication, car elles permettent d'identifier les conditions de coupe optimales. Cette étude vise à optimiser les paramètres de coupe afin d'obtenir une qualité de finition de surface élevée, en mettant l'accent sur la réduction de la rugosité (Ra et Rz). Les essais sont menés sur l'acier 35CrMnSiA à l'aide d'une fraiseuse CNC équipée d'un outil de coupe en carbure muni d'inserts de type R390-11 T3 08M 1030, revêtus par dépôt physique en phase vapeur (PVD). Les facteurs étudiés incluent la vitesse de rotation de la broche (N), l'avance (f), et le type de lubrification. Pour atteindre cet objectif, plusieurs méthodes de modélisation et de prédiction seront utilisées, telles que la méthode des surfaces de réponse (RSM), les réseaux de neurones profonds associés à un algorithme génétique (DNN-GA), ainsi que l'algorithme des k plus proches voisins (KNN). Deux techniques d'optimisation seront également mises en œuvre : la fonction de désirabilité et l'algorithme multi-objectifs basé sur le loup gris (MOGWO), afin de déterminer les meilleures conditions de coupe, améliorer la qualité de surface, et réduire le nombre d'essais en atelier.

Mots clés : Analyse de la variance (ANOVA), Méthodologie de surface de réponse (RSM), Algorithme génétique (DNN-GA), Algorithme MOGWO, Optimisation de la rugosité de surface.

Abstract

Modeling and optimization are essential steps in manufacturing processes, as they contribute to identifying the optimal cutting conditions. This study aims to optimize cutting parameters to achieve high surface finish quality, with a particular focus on reducing surface roughness (Ra and Rz). The experiments are conducted on 35CrMnSiA steel using a CNC milling machine equipped with a carbide cutting tool fitted with R390-11 T3 08M 1030 inserts, coated using Physical Vapor Deposition (PVD). The investigated factors include spindle speed (N), feed rate (f), and type of lubrication. To achieve this objective, several modeling and prediction techniques will be employed, including Response Surface Methodology (RSM), Deep Neural Networks combined with Genetic Algorithm (DNN-GA), and the K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm. Two optimization techniques will also be applied: the desirability function and the Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO), in order to determine the best cutting settings, enhance surface quality, and reduce the number of workshop trials.

Keywords: Analysis of variance (ANOVA), Response surface Methodology (RSM), Genetic algorithm (DNN-GA), MOGWO algorithm. Surface roughness Optimization.

تُعد النمذجة والتحسين من الخطوات الجوهرية في عمليات التصنيع، إذ تساهمان في تحديد الظروف المثلى للقطع. يهدف هذا البحث إلى تحسين معلمات القطع لتحقيق تشطيب سطحي عالي الجودة، مع التركيز على تقليل خشونة السطح (Ra و Rz). تُجرى الدراسة على مادة 35CrMnSiA باستخدام آلة تفريز CNC وقاطع كربيدي مزود بإدخالات من نوع R390-11 T3 08M 1030 ومغطة بطبقة PVD. تشمل العوامل المدروسة سرعة دوران المغزل (N)، معدل التقدم (f)، ونوع التزييت. لتحقيق هذا الهدف، سيتم اعتماد عدة تقنيات نمذجة وتنبؤ، منها طريقة الاستجابة السطحية (RSM)، الشبكات العصبية العميقة المدمجة مع الخوارزمية الجينية (DNN-GA)، وخوارزمية الجار الأقرب (KNN). كما ستُستخدم طريقتان للتحسين: دالة الرغبة وخوارزمية متعددة الأهداف (MOGWO)، بهدف الوصول إلى أفضل إعدادات للقطع، وتحسين جودة السطح، مع تقليل عدد التجارب في بيئة الورشة.

الكلمات المفتاحية: تحليل التباين (ANOVA)، منهجية استجابة السطح (RSM)، الخوارزمية الجينية (DNN-GA)، خوارزمية MOGWO، تحسين خشونة السطح.

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Liste de tableaux

Liste de Figures

Résumé

Introduction générale

Chapitre I : état de l'art sur l'usinage

I.1 Introduction.....	1
I.2 Généralités sur L'usinage.....	1
I.2.1 Procédés d'usinage.....	1
I.2.2 Le But de L'usinage.....	2
I.2.3 les paramètres de coupe.....	2
I.2.3.1 la Lubrification.....	4
I.2.3.2 Importance de la lubrification.....	4
I.2.3.3 Les Rôles des lubrifiants	4
I.2.3.4 Les Types de lubrifiants.....	5
I.2.3.5 Les Techniques de lubrification.....	5
I.3 les principales opération d'usinage.....	8
I.3.1 Procédé de tournage.....	9
I.3.2 Paramètre technologique d'usinage.....	9
I.3.2.1 les machines tournante.....	10
I.3.2.2 Classification des machines de tour.....	10
I.3.2.3 Les outils de tournage.....	12
I.3.2.4 Opérations de tournage et outils de coupe.....	12
I.3.2.5 Les procède de fraisage.....	15
I.3.3 Classification de fraiseuses.....	16
I.3.3.1 Typesdefraisage.....	17
I.3.3.2 Composition porte d'outil.....	17
I.3.3.3 Composition porte d'outil.....	19
I.3.3.4 Les principales opérations de fraisage.....	19
I.3.3.5 Caractéristiques des fraises (Outils).....	21
I.3.3.6 Les Paramètres de coupe.....	23
I.3.4 Les matériaux des outils.....	24
I.3.5 L'état de surface.....	27
I.3.5.1 Principaux paramètres de la rugosité.....	31
I.3.5.2 Méthodes de mesure de la rugosité.....	31
I.4 conclusions.....	31

Chapitre II: équipements,Matériaux et outils de coupe utilisée

II.1.Introduction.....	33
II.2 Équipements utilisés.....	33
II.2.1Critèresdessélectionsdele35CrMnSiAdansl'industrielmécanique	33
II.2.2 Applications de le 35CrMnSiA.....	33

II.2.3 Propriétés mécaniques.....	33
II.2.4 Outil de coupe utilisé	33
II.2.5 Croquis/dessin schématique-SV.....	33
II.2.6 Porte outille.....	33
II.2.7 Préparation la pièce usinée	34
II.3 Machine fraiseuse à commande.....	34
II.3.1 Machine-outil.....	35
II.3.2 Programme sur la machine CNC.....	35
II.4 Appareillages de mesure utilisée.....	35
II.5 Planfication des expériences.....	36
II.6 Calcule les paramètres de coupe (cas de fraisage, opération surfaçage).....	36
II.7 la Plan d'expériences.....	37
II.8 Conclusion.....	39

Chapitre III: Résultats et discussion

III.1 Introduction.....	50
III.1.2 Mesures de rugosité.....	50
III.2 Cas des surfaçage de l'acier 35CrMnSiA avec outil en carbure avec revêtement (usinage avec lubrification).....	50
III.2.1 Analyse du modèle Box-Behnken.....	51
III.2.1.1 Résumé de l'ajustement.....	51
III.2.1.2 ANALYSE ANOVA Ra et Rz.....	52
III.2.1.3 Statistiques d'ajustement.....	55
III.2.5 Graphiques de probabilité normale des résidus.....	59
III.2.6 Analyse des graphiques des effets principaux pour Ra et Rz.....	60
III.2.7 Fonction de désirabilité.....	61
III.2.7 Comparaison entre les valeurs expérimentale et les méthodes de prédiction (RSM, KNN, AG_DNN).....	61
III.2.8.1 Surfaçage De L'acier 35CrMnSiA à L'aide D'un Outil En Carbure Revêtu Sous Lubrification.....	63
III.3 Cas de surfaçage de l'acier 35CrMnSiA avec outil en carbure avec revêtement (Usinage à Sec).....	65
III.3.1 Analyse du modèle Box-Behnken.....	66
III.3.1.1 Résumé de l'ajustement.....	66
III.3.2 ANALYSE ANOVA Ra et Rz.....	67
III.3.3 Statistiques d'ajustement.....	69
III.3.4 Graphiques de probabilité normale des résidus.....	73
III.3.5 Analyse des graphiques des effets principaux pour Ra et Rz.....	74
III.3.6 Fonction de désirabilité.....	76
III.4 Conclusion.....	77

Conclusion générale

Références bibliographique

Annexes

Introduction générale

Introduction générale

L'usinage est une famille de technique de fabrication de pièces mécaniques. 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, l'usinage nécessite un MODOP (Machine-outil-Dispositif-Outil- Pièce). 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). En grande partie dans le but d'usiner des matériaux se prêtant difficilement aux techniques d'usinage classique. De nos jours, des machines-outils à commande numérique (MOCN), c'est-à-dire asservies par un système informatique (FAO), permettant d'automatiser partiellement ou totalement la procédure [1].

En usinage, les procédés de coupe sont prédominants, ayant gagné en importance dans les années 60 avec l'avènement des machines-outils à commande numérique. Depuis lors, les avancées technologiques en automatisation, dans les capacités de mouvement des machines, ainsi qu'en conception et fabrication assistées par ordinateur ont rendu les procédés de tournage, fraisage et perçage essentiels dans la production de biens de consommation. Ce manuscrit se concentre sur le fraisage et le tournage, nous nous limiterons donc à présenter ces deux procédés.

Usinage par enlèvement de matière, y compris réduction progressive de la taille Retrait d'une pièce à l'aide d'un outil permettant d'enlever du métal à froid sans le déformer. Ce qui s'est passé Le bois enlevé est appelé copeaux et l'outil utilisé pour cette opération est appelé Outils de coupe. Pour usiner la pièce, l'opérateur utilise une machine-outil. Ce procédé permet de former le matériau de manière très précise selon les exigences suivantes : Spécifications définies par le bureau d'études en charge de la conception [3].

Parmi l'ensemble des méthodes d'usinage, celles-ci figurent parmi les plus couramment employées. Le retrait de matière s'effectue grâce à l'action mécanique d'un outil coupant, conçu pour extraire un volume spécifique de matière. On distingue ainsi les procédés de découpe, utilisés pour diviser ou contourner une pièce, des méthodes d'enlèvement de copeaux qui permettent, en plusieurs passes, de réaliser des surfaces plus complexes en deux ou trois dimensions. Bien qu'il existe une multitude de techniques de coupe, l'accent est mis ici sur l'usinage par enlèvement de copeaux à l'aide de procédés offrant un débit élevé de matière, tels que le fraisage, le tournage et le perçage. [2].

L'usinage par enlèvement de matière est un procédé qui consiste à enlever ou couper le matériau d'une pièce avec un outil donnant lieu à cet excédent de matière, qui est séparé de la pièce avec le même outil. La quantité de matière enlevée est dite copeaux et l'instrument avec lequel est enlevée la matière est appelé outil de coupe.

L'usinage par enlèvement de matière offre plusieurs avantages, dont une grande précision dimensionnelle grâce à de faibles tolérances. Il permet d'obtenir des coins très aiguisés sur les pièces finies tout en conservant les propriétés mécaniques du matériau, contrairement à certaines méthodes de formage. Ce procédé est également très polyvalent et n'est pas plus coûteux que d'autres techniques comme le formage.

Ce mémoire a pour objectif d'optimiser les paramètres de coupe pour une opération de surfacage sur le matériau **35CrMnSiA** à l'aide d'une fraise carbure sur une machine CNC. Le but est obtenir une bonne qualité de surface, en particulier une faible rugosité. Pour cela, plusieurs méthodes seront utilisées pour modéliser et prévoir les résultants, comme la méthode des surfaces de réponse (RSM), les réseaux de neurones combinés avec un algorithme génétique (DNN-GA), et l'algorithme KNN. Ensuite, deux techniques d'optimisation seront appliquées : la fonction de désirabilité et l'algorithme MOGWO.

Ce travail permettra de trouver les meilleurs réglages de coupe pour améliorer la qualité tout en réduisant les essais en atelier par une pièce en Acier faiblement allié **35CrMnSiA**.

Cette introduction générale ouvre la voie à la présentation de la méthodologie expérimentale détaillée. Le mémoire est partagé en quatre chapitres :

CHAPITRE I : Etude bibliographique : état de l'art sur l'usinage.

Ce chapitre se concentrera sur les bases théoriques des principales opérations d'usinage ainsi que sur l'état de surface. Il exposera les concepts essentiels et les techniques fréquemment employées pour obtenir les caractéristiques de surface requises.

CHAPITRE II : Equipements, Matériaux et outils de coupe utilisé

Dans deuxième chapitre nous présentons une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi les conditions de coupe et aussi les plans d'expériences utilisés.

CHAPITRE III : Résultats et Discussion.

Le troisième chapitre sera dédié à la présentation des résultats expérimentaux obtenue .nous analyserons ces résultats à l'aide de l'analyse de la variance ANOVA pour identifier les facteurs ayant un effet statistiquement significatif sur les paramètres d'usinage.

Chapitre I

ETAT DE L'ART SUR L'USINAGE

I.1 Introduction

Ce chapitre présente dans un premier temps les notions de base relatives au processus d'enlèvement de matière notamment la géométrie de l'outil, sa cinématique et les configurations de coupe possibles. Et les tendances récentes afin de positionner le sujet du mémoire dans son contexte scientifique et technique.

I.2 Généralités sur L'usinage

L'usinage regroupe une série de techniques destinées à fabriquer des pièces mécaniques. Son principe repose sur le retrait de matière pour conférer à la pièce brute la forme et les dimensions désirées, nécessitant l'utilisation d'un ensemble connu sous le nom de MODOP (Machine-outil-Dispositif-Outil-Pièce). Cette méthode permet d'obtenir des pièces d'une extrême précision. Pendant le processus d'usinage, la matière est enlevée grâce à l'interaction de deux mouvements relatifs entre l'outil et la pièce :

- Le mouvement de coupe (vitesse de coupe)
- Le mouvement d'avance (vitesse d'avance).

Le but d'obtenir une pièce finie ou semi-finie. Dans cette catégorie d'opérations plusieurs techniques sont à citer :

- a. Le tournage
- b. Le fraisage
- c. La rectification
- d. L'électroérosion
- e. La découpe sciage, oxycoupage, plasma, laser, jet d'eau, ...

I.2.1 Procédés d'usinage

L'évolution des machines-outils et l'outil de coupe ont permis d'améliorer leur rendement, leur sécurité, leur rigidité, leur dynamique (vitesse, accélération), leur puissance, et leur productivité. Dans une première partie, les bases essentielles en usinage sont de définir les différents modes obtention de pièces mécaniques. Comme on l'a présenté auparavant, il existe trois principaux types :

- tournage
- fraisage
- rectification

Dont deux qui mettent en jeu des outils de coupe à partir active possédant un à plusieurs arêtes tranchantes, par contre le troisième procédé il met en action un outil abrasif (meule).

Les opérations d'enlèvement de matière à l'aide d'outils coupants représentent encore Aujourd'hui, il s'agit d'une partie très importante du processus de mise en forme des matériaux. Exister Il existe plusieurs types d'usinage, mais dans ce chapitre nous allons couvrir Deux types d'usinage (fraisage, Parmi eux, le tournage est basé sur l'enlèvement de matière).

I.2.2 Le But de L'usinage

L'usinage fait partie intégrante du processus de fabrication d'une pièce mécanique est pour obtenir une pièce finie ou semi finie. Ce processus est défini par un plan détaillé incluant une cotation précise. Cette cotation vise à spécifier les dimensions exactes de la pièce finie, sa précision, sa géométrie ainsi que l'état de surface de l'ensemble des zones constituant la pièce usinée. À chaque étape du processus de fabrication, le concepteur ou l'usineur sélectionne le type d'usinage approprié, la machine, l'outil ainsi que le support nécessaire pour garantir que toutes les exigences dimensionnelles et de finition de la surface concernée soient respectées. En règle générale, les surfaces usinées prennent des formes planes ou de révolution. Les principales techniques d'usinage comprennent le fraisage, destiné aux surfaces planes, et le tournage, utilisé pour les surfaces de révolution. Avec l'avènement des machines à commande numérique, il est aujourd'hui possible de produire une grande variété de surfaces courbes. Toutefois, il est important de souligner que les outils employés restent en grande partie similaires à ceux des machines conventionnelles. Leurs trajectoires sont constituées d'une combinaison de segments de droites et d'arcs de cercles. L'usinage engendre divers coûts : temps de travail, matière excédentaire à enlever, usure des machines-outils, consommables tels que les outils, lubrifiants, énergie électrique, ainsi que les coûts liés au stockage. Ainsi, seules les opérations d'usinage nécessaires sont réalisées [4].

I.2.3 Les paramètres de coupe

Les outils varient en forme et en géométrie selon le procédé de coupe utilisé. Toutefois, pour étudier la formation du copeau ou mener des analyses, des hypothèses simplificatrices sont posées concernant la configuration et la géométrie des outils. Deux types de coupe sont envisagés selon la géométrie de l'arête : la coupe orthogonale et la coupe oblique. Pour réaliser une pièce par enlèvement de matière, trois paramètres essentiels doivent être réunis :

- 1. La vitesse de coupe V_c ou N :** qui représente le mouvement principal. La vitesse de rotation de la broche est calculée selon la formule suivante :

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

Où D est le diamètre de la pièce, ou celui de la fraise et du foret pour le fraisage et le perçage.

2. **Le mouvement d'avance f** : qui constitue le mouvement secondaire.

3. **La profondeur de passe ap** : définissant la pénétration de l'outil sous la surface de travail.

Pour certaines opérations, la quantité de matière retirée peut être déterminée par l'équation:

$$Q = Vc \times f \times ap \dots\dots\dots (I.2)$$

Où : Vc : représente la vitesse de coupe, en (m/min)

F : la vitesse d'avance, en (-----)

ap : la profondeur de passe. En (mm)

- **Avance par tour (f)** : Ce deuxième paramètre a une influence notable sur le procédé de coupe, car il détermine la section du copeau. En tournage, l'avance par tour correspond au déplacement de l'outil pour chaque révolution de la pièce [3].
- **Profondeur de passe (ap)** : Elle représente la pénétration de l'arête de coupe dans le matériau. En chariotage, cette profondeur se réfère à la différence entre le rayon de la pièce avant et après une passe. En coupe orthogonale, elle est associée à l'épaisseur du disque formé [4]

Avec :

$$ap = d1 - d2 \dots\dots\dots (I.3)$$

$d1$: représenté le diamètre initial

$d2$: représentée le diamètre finale

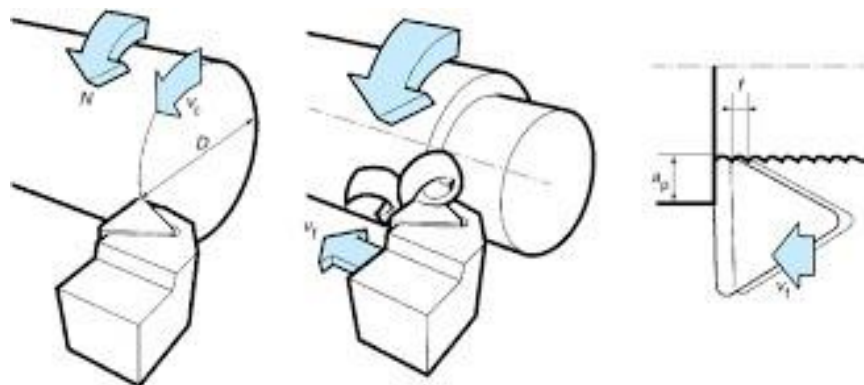


Figure I.1 : Représentation et définition des paramètres : vitesse de coupe (Vc), avance (f) et profondeur de passe (ap).

I.2.3.1 la Lubrification

C'est le processus qui consiste à maintenir un film d'huile entre deux surfaces en mouvement relatif, dans le but de diminuer le frottement, limiter l'usure, prévenir les pannes et garantir une durée de vie optimale pour chaque composant mécanique [5].

I.2.3.2 Importance de la lubrification

Le frottement constitue un critère essentiel pour évaluer l'intensité du chargement au sein d'un contact. La lubrification, qui vise à maintenir une pellicule de lubrifiant entre les surfaces en contact, comme les dentures d'engrenages, représente une solution efficace pour diminuer le frottement ainsi que ses effets, tels que l'usure. La présence de lubrifiant dans la zone de contact entre les profils conjugués agit comme un film séparateur, jouant le rôle de "troisième corps".

Un lubrifiant est une substance utilisée pour se placer entre les surfaces d'un mécanisme afin d'en améliorer le fonctionnement. Les lubrifiants se déclinent en différentes catégories :

- Gazeux, comme l'air.
- Liquides, telles que les huiles.
- Semi-liquides ou semi-solides, comme les graisses.
- Solides, tels que le graphite et autres [5].

I.2.3.3 Les Rôles des lubrifiants

Les lubrifiants remplissent plusieurs fonctions essentielles qui garantissent le bon fonctionnement et la durabilité des machines. Voici leurs principaux rôles :

1. Réduire les frottements entre les composants mécaniques, ce qui permet d'économiser de l'énergie. En effet, l'énergie générée par le frottement est totalement convertie en chaleur. Cette réduction du coefficient de frottement contribue également à abaisser les températures de fonctionnement des mécanismes [6].
2. Limiter l'usure des surfaces en contact, quelle que soit sa forme, tout en offrant une protection contre la corrosion et la rouille.
3. Assurer le refroidissement des machines en évacuant la chaleur produite lors des zones de contact.
4. Participer à l'étanchéité, que ce soit contre les gaz, les liquides ou encore les polluants solides.
5. Maintenir les circuits et surfaces propres en éliminant les impuretés comme les poussières et débris d'usure.
6. Transmettre l'énergie dans les systèmes hydrauliques.

7. Amortir les chocs et contribuer à réduire le bruit.
8. Gérer l'oxydation afin d'éviter toute modification indésirable de la viscosité [6].

I.2.3.4 Les Types de lubrifiants

Utilisés dans l'usinage Il existe plusieurs types de lubrifiants utilisés dans l'usinage, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages.

Les principaux types comprennent [7] :

- ✓ **Les lubrifiants à base d'huile** : sont largement utilisés dans les travaux d'usinage grâce à leur efficacité pour diminuer les frictions et les températures lors des opérations de coupe. Toutefois, une mauvaise gestion de ces lubrifiants peut engendrer des conséquences environnementales importantes.
- ✓ **Les lubrifiants synthétiques** : élaborés à partir de composés chimiques, offrent une performance supérieure en matière de lubrification et de refroidissement. Bien qu'ils soient souvent moins nocifs pour l'environnement comparativement aux lubrifiants à base d'huile, leur processus de fabrication peut générer des émissions de gaz à effet de serre.
- ✓ **Les lubrifiants à base d'eau** : quant à eux, sont mélangés avec de l'eau pour réduire both les frottements et les températures de coupe. Ils sont généralement considérés comme plus écologiques que leurs homologues à base d'huile. Cependant, ils nécessitent souvent l'ajout d'additifs pour empêcher la corrosion et limiter le développement de bactéries [7].

I.2.3.5 Les Techniques de lubrification

- **L'usinage à sec**

L'usinage à sec correspond à une méthode de fabrication de pièces qui consiste à retirer des copeaux dans un environnement sans lubrification. Son principe repose sur l'enlèvement de matière pour conférer à une pièce brute la forme et les dimensions souhaitées, en utilisant une machine-outil. Cette technique permet d'obtenir des pièces avec une grande précision. L'usinage à sec offre plusieurs avantages, notamment :

- Une suppression de la pollution de l'air et de l'eau, réduisant ainsi les risques pour la santé, comme les problèmes cutanés et respiratoires [8].
- L'absence de lubrifiant sur les pièces usinées, entraînant une baisse des coûts de nettoyage et de la consommation d'énergie associée.
- La possibilité de mieux valoriser les déchets grâce à l'absence de lubrifiant sur les copeaux.
- L'élimination des besoins liés à l'achat, la préparation, l'entretien et le traitement des fluides de coupe [8].

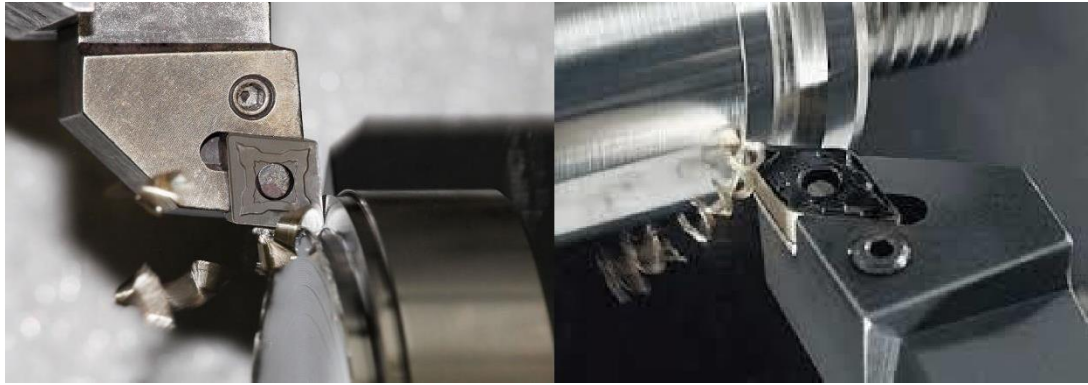


Figure I.2 : usinage à sec

- **Système MQL**

Certaines opérations d'usinage requièrent une lubrification, mais le recours systématique à des lubrifiants n'est pas toujours la solution idéale. En effet, leur utilisation entraîne des étapes supplémentaires de dégraissage et de recyclage, génère des coûts d'exploitation élevés et pose de sérieux problèmes de santé pour les opérateurs, souvent affectés par des affections dermatologiques et respiratoires dues à la manipulation des huiles. Pour protéger la santé des utilisateurs, il est vivement conseillé de réduire, voire d'éliminer, l'usage de ces fluides. Cette démarche s'inscrit dans une tendance visant à adopter une approche préventive globale qui soit respectueuse tant de l'humain que de l'environnement, tout en garantissant une meilleure qualité des produits usinés. C'est dans ce contexte que des industriels et des chercheurs ont mis au point une technique innovante reposant sur l'utilisation de fines gouttelettes de fluide de coupe transportées jusqu'à la zone de coupe par un flux d'air à grande vitesse. Cette méthode, connue sous le nom de lubrification à quantité minimale (MQL), agit en lubrifiant les interfaces de contact. Simultanément, l'air rapide refroidit la zone de coupe et évacue les copeaux. L'objectif principal de l'usinage sous MQL est de remplacer les systèmes traditionnels de lubrification par immersion ou d'inondation avec une solution plus précise et contrôlée. Cette technique s'appuie sur un courant d'air comprimé transportant, sous forme d'aérosol, des quantités minimales de lubrifiant directement vers la zone de coupe. Cela permet non seulement une lubrification efficace mais aussi un usinage haut performance. L'aérosol de lubrifiant peut être acheminé vers la zone de coupe de deux manières principales :

- Par voie externe : le lubrifiant est pulvérisé à proximité immédiate de l'outil et de la pièce à l'aide d'une buse placée à l'extérieur.
- Par voie interne : le lubrifiant est acheminé directement à travers les canaux internes du dispositif de coupe pour atteindre la zone nécessaire [9].



Figure I.3 : Système MQL-minimum-quantité-lubrifiants mélange air/huile

- **Cryogénie**

L'usinage cryogénique utilise des fluides de coupe sous forme gazeuse, généralement liquéfiés, qui sont dirigés vers la zone de coupe pour refroidir l'outil et/ou la pièce à travailler. Ces fluides cryogéniques absorbent la chaleur générée dans la zone de coupe avant de s'évaporer dans l'atmosphère [10].



Figure I.4 : Technique de lubrification par Cryogénie

- **Lubrification abondante**

L'usinage avec lubrification implique l'utilisation d'un liquide de coupe ou, plus largement, d'un fluide d'usinage. Ce fluide est spécialement conçu pour refroidir et lubrifier lors des opérations de travail et d'usinage des métaux. En plus de ses propriétés refroidissantes, le liquide de coupe facilite l'usinage en réduisant les frottements à l'interface entre l'outil et les copeaux. Cette réduction des frottements limite la génération de chaleur et évite l'adhésion des copeaux sur l'outil, ce qui pourrait nuire à la qualité de l'usinage. Dans le cas des productions industrielles en grande série, le liquide de coupe joue également un rôle important dans l'évacuation des copeaux de la zone de coupe. Les copeaux sont ensuite dirigés vers un dispositif de centralisation (illustré en Figure I.16). Lors des procédés d'usinage par enlèvement de matière, les liquides d'arrosage, composés principalement

d'eau, d'huiles minérales et d'additifs chimiques, assurent plusieurs fonctions essentielles, notamment :

- le refroidissement de l'outil.
- la réduction du coefficient de frottement.
- l'amélioration de l'état de surface - l'évacuation efficace des copeaux [11].



Figure I.5 : Lubrification abondante 11

I.3 Les principales Opération d'usinage

L'usinage est une technique essentielle de fabrication pour la création de pièces mécaniques. Son principe repose sur l'enlèvement de matière afin de conférer à une pièce brute une forme précise conforme au dessin de définition, en utilisant un outil de coupe adapté (usinabilité). Cette méthode permet d'obtenir des pièces avec une grande précision. Lors du processus d'usinage, l'enlèvement de matière résulte de la combinaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil :

- ✓ le mouvement de coupe (vitesse de coupe V_c)
- ✓ Le mouvement d'avance (vitesse d'avance V_f)

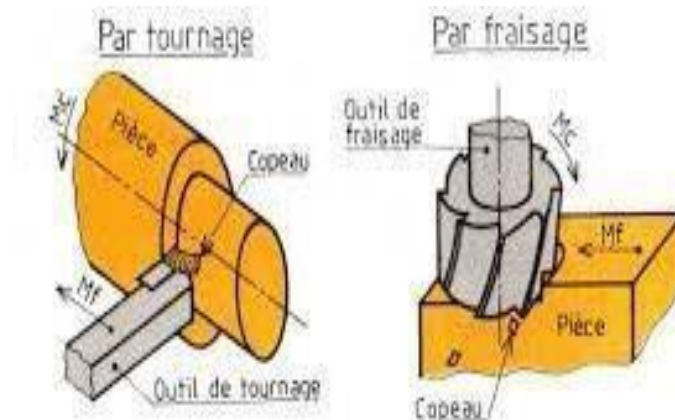


Figure I.6: Mouvements de coupe et d'avance en tournage et fraisage 11

I.3.1 Procédé de tournage

Ce procédé de fabrication par enlèvement de matière vise à créer des pièces révolutionnaires. Il implique la formation de surfaces internes et externes en faisant tourner la pièce, qui est fixée à l'arbre rotatif (la broche), tout en déplaçant l'outil de manière rectiligne sur le chariot [4].

Principe de tournage : Lors d'un tournage, deux mouvements fondamentaux sont employés pour retirer la matière de la pièce :

1. Le mouvement de coupe M_c , qui est effectué par la pièce elle-même
2. Le mouvement d'avance M_a , qui est attribué à l'outil de coupe

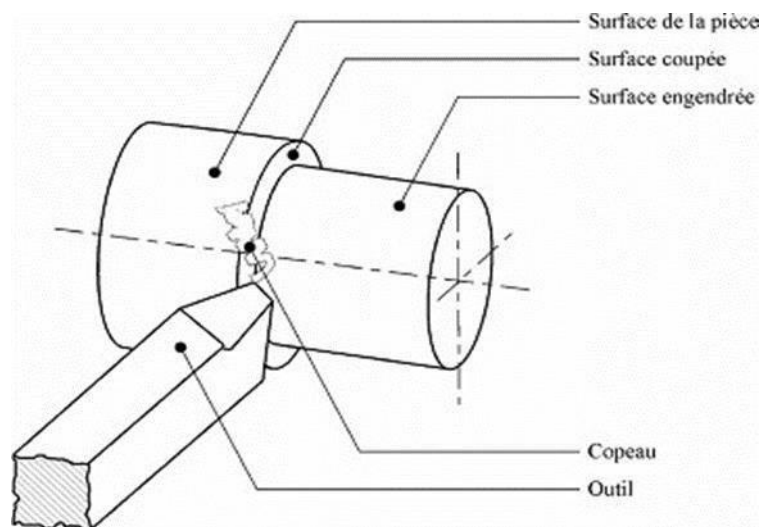


Figure I.7 : procédé de tournage 12

I.3.2 Les Paramètre technologique d'usinage

Angles de l'outil coupant L'étude des phénomènes liés à l'enlèvement de matière par outil coupant Met en exergue différents angles sur l'outil. On distingue donc :

- ✓ Angle de dépouille α : il a un impact sur le frottement entre l'outil et la pièce et par conséquent il influe sur la durée de vie de l'outil
- ✓ Angle de taillant β : il a un impact sur la résistance à la rupture du taillant
- ✓ Angle de coupe γ : il a un impact sur les efforts de coupe, la puissance consommée, le flux de chaleur....

On a toujours $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$ (Figure I.8)

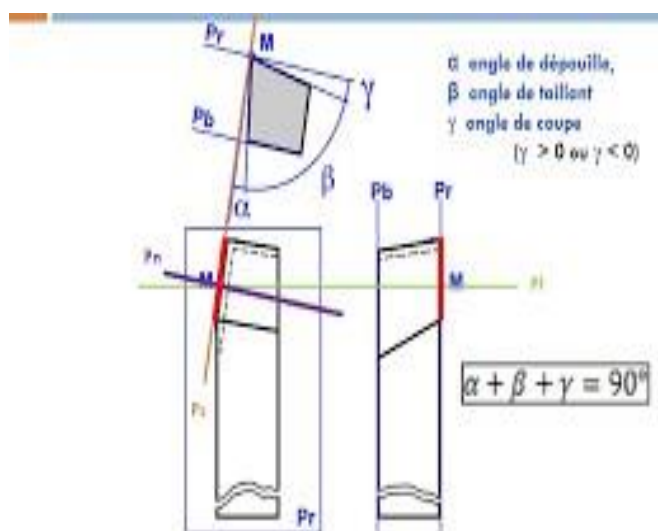


Figure I.8 : Angles caractéristiques de l'outil de coupe 13

I.3.2.1 Les machines tournantes

Le tour (Fig. I.8) est conçu pour usiner des surfaces de révolution et hélicoïdales, telles que les filetages, ainsi que des formes cylindriques, coniques et planes (avec une génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). Son usage principal concerne l'usinage des arbres. La pièce (Fig. I.8), généralement fixée dans un mandrin, effectue un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil, quant à lui, peut se déplacer en translation selon deux directions perpendiculaires l'une à l'autre et situées dans un plan parallèle à l'axe de la broche. Le premier déplacement est parallèle à cet axe, tandis que le second est perpendiculaire à celui-ci [13].

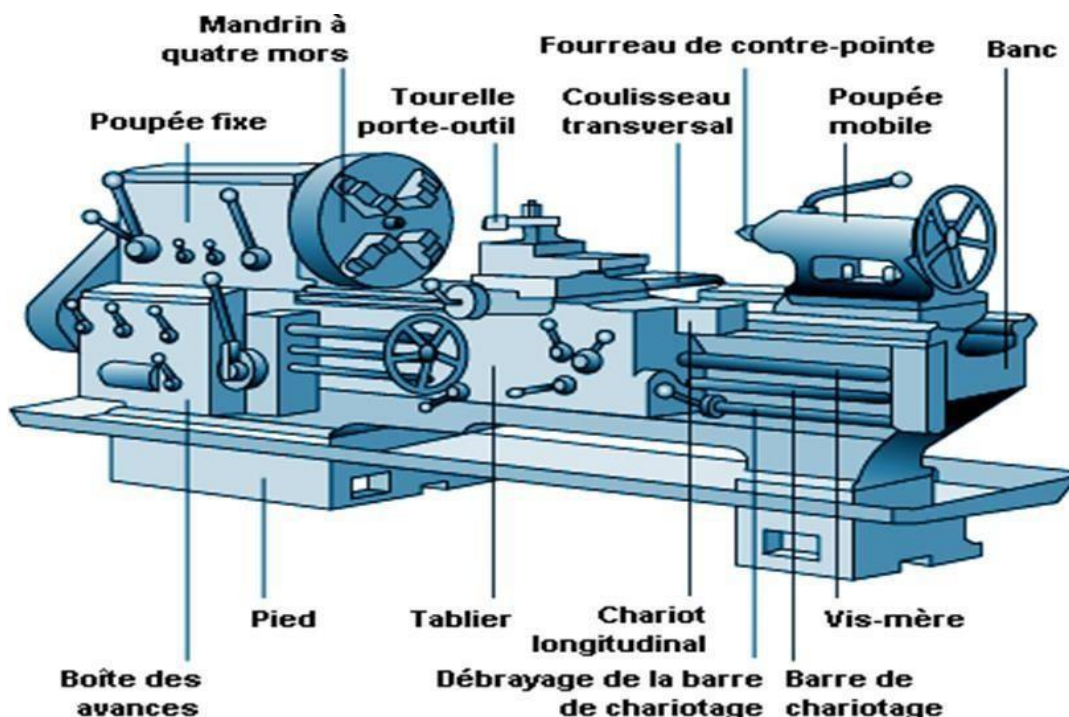


Figure I.9 : Schéma descriptif du dispositif de tournage 13

I.3.2.2 Classification des machines Tournantes

Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont :

Les tours parallèles conventionnels :

Les machines traditionnelles sont employées dans les petites et moyennes chaînes de production pour fabriquer des pièces cylindriques très simples, mais elles manquent de flexibilité. Sur ces tours, il est seulement possible de créer des surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche [4].

Les tours automatiques

Sont équipés de plusieurs outils disposés tangentiellement par rapport à la pièce. Les mouvements des outils sont contrôlés par des cames, qui déterminent à la fois la vitesse d'avance et la course propre à chaque opération. Chaque came est conçue spécifiquement pour une tâche et une pièce précises. Ces tours fonctionnent de manière totalement automatisée, mais leur manque de flexibilité les rend adaptés uniquement à la production en très grandes séries [14].

Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours dotés d'un traînard similaire à celui d'un tour parallèle, équipés d'une tourelle hexagonale avec six postes d'outils, qui effectue un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour ces machines permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou partiellement automatique. Leur flexibilité est assez limitée, ce qui les rend adaptés aux travaux de série moyenne [4].

Les tours à copier

Ils assurent l'usinage de pièces par reproduction à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique contrôlant le mouvement du chariot transversal. Cette machine, relativement polyvalente, s'adapte aussi bien aux petites qu'aux grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être de forme quelconque [15].

Les tours à commande numérique

Le processus de production sur une machine CNC ressemble à celui de la copie de pièces. La trajectoire de l'outil est déterminée par le déplacement simultané de deux axes, dont la position est successivement calculée par un ordinateur grâce à un dispositif spécifique de programmation des pièces. De plus, ces machines sont dotées d'un ensemble d'outils de coupe. Elles offrent une grande flexibilité et sont idéales pour les petites séries de tâches répétitives ou les chaînes de production [4].

I.3.2.3 Les outils de tournage

Les outils de tournage généralement employés incluent des outils de coupe et de finition équipés de plaquettes en carbure, en céramique ou en diamant. Ces instruments de haute qualité garantissent un usinage précis et optimal des pièces, une condition essentielle pour leur performance et leur bon fonctionnement.

Sur un tour on dispose de deux classes d'outils :

- Outils intérieurs.
- Outils extérieurs.

La (Figure I.9) représente les différentes opérations d'usinage sur les tours :

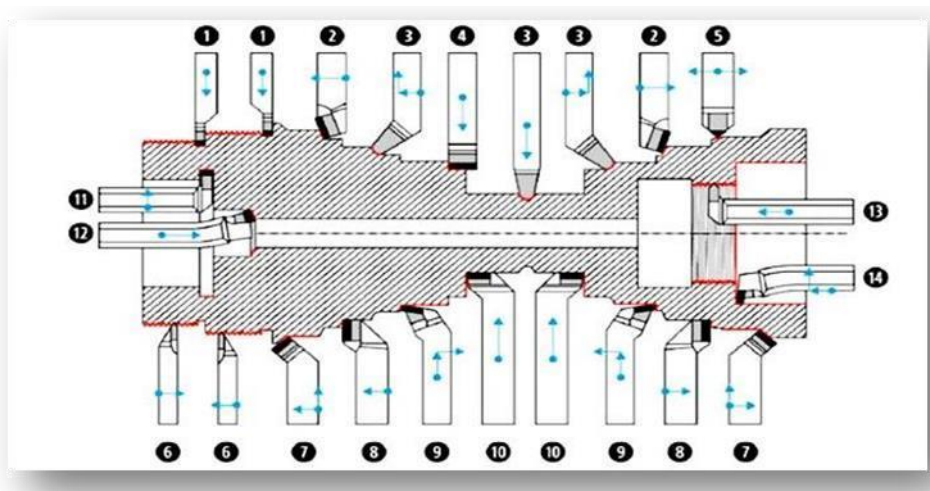


Figure I.10: image représente les différentes opérations d'usinage sur les tours 15

(1) outil à saigner	(2) outil à charioter droit	(3) outil à retoucher	(4) outil pelle	(5) outil à retoucher	(6) outil à fileter (extérieur)	(7) outil de charioter coudé
(8) outil à couteau	(9) outil à dresser d'angle	(10) outil à dresser les faces	(11) outil à chambrer	(12) outil à aléser	(13) outil à fileter	(14) outil à aléser et dresser

I.3.2.4 Opérations de tournage et outils de coupe

1. Chariotage : Ce procédé nous permet de produire un cylindre de diamètre réduit, car l'outil se déplace parallèlement à l'axe de rotation de la pièce [16].



Figure I.11: Opération de Chariotage et outil de coupe 16

2. Dressage

Procédé visant à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche, qu'elle soit extérieure ou intérieure [16].

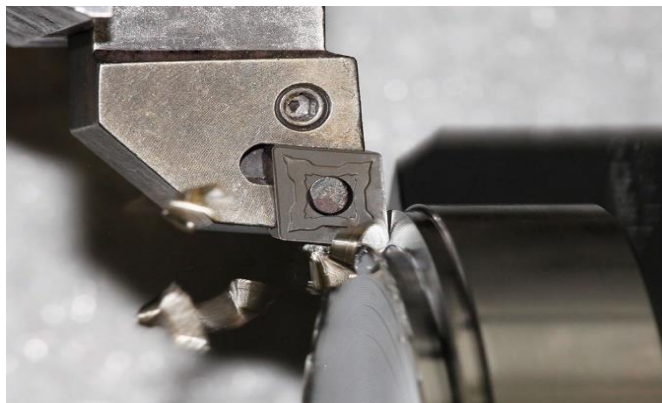


Figure I.12: Opération de Dressage et outil de coupe 16

3. Alésage : C'est une opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure



Figure I.13: Opération d'alésage et outil de coupe [16]

4. Perçage

L'opération qui consiste à percer un trou en utilisant un foret [16].



Figure I.14: Opération perçage et outil de coupe [17]

5. Rainurage

Il s'agit d'une opération d'usinage visant à créer une rainure intérieure ou extérieure pouvant accueillir un circuit ou un joint torique, entre autres utilisations [16].



Figure I.15: Opération Rainurage n et outils de coupe [17]

5. Filetage

Cette opération vise à réaliser un filetage, qu'il soit extérieur ou intérieur (taraudage) [16].



Figure I.16: Opération de filetage et outil de coupe [17]

7. Chan freinage

C'est une opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle.



Figure I.17: Opération de Chan freinage et outil de coupe [18]

I.3.2.5 Les procédés de fraisage

Le fraisage est un procédé de fabrication qui combine le mouvement rotatif d'un outil à plusieurs arêtes coupantes (mouvement de coupe) avec des mouvements de translation rectilignes ou des rotations entre l'outil et la pièce (mouvement d'avance). Cet outil, nommé fraise, possède plusieurs arêtes qui retirent de la matière sous forme de copeaux. Ce procédé offre un rendement élevé, une finition de surface exceptionnelle et une précision dimensionnelle remarquable, tout en permettant la création de diverses formes. Traditionnellement utilisé pour usiner des surfaces planes, des épaulements et des gorges, le fraisage est de plus en plus efficace pour travailler des surfaces courbes grâce aux machines à commande numérique. Il tend à devenir la méthode d'usinage universelle pour les formes tridimensionnelles complexes [2].

Ce processus offre plusieurs avantages, notamment un rendement élevé, une excellente finition de surface, une grande précision et une flexibilité accrue pour créer diverses formes. Bien que traditionnellement utilisé pour réaliser des surfaces planes, des épaulements et des gorges, le fraisage est de plus en plus efficace en contournage grâce à l'intégration des techniques CNC (Commande Numérique par Calculateur).

De plus en plus universelle, cette méthode d'usinage bénéficie d'un large éventail de machines, systèmes de commande et outils de coupe. Les centres d'usinage en sont un parfait exemple, nécessitant une variété d'outils pour diverses opérations de fraisage [17].

L'objectif du fraisage est de réaliser des pièces avec différentes formes :

- à directrices rectilignes (comme les plans et les formes prismatiques),
- circulaires (intérieures ou extérieures)
- ou de configurations quelconques [4].



Figure I.18: différentes opérations de fraisage industrielles.19

I.3.3 Classification de fraiseuses

Nous pouvons classer les fraiseuses de la manière suivante :

- Fraiseuses horizontales,
- Fraiseuses verticales,
- Fraiseuses verticales,
- Fraiseuses automatiques et fraiseuse universelles.

1. Fraiseuses horizontales

La fraiseuse horizontale utilise des fraises montées sur un arbre porte-fraise horizontal [12].

2. Fraiseuses verticales

La broche est perpendiculaire à la surface de la table. Il en existe de différents types :

- ✓ à tête porte-broche fixe.
- ✓ à tête porte-broche inclinable dans le plan vertical parallèle à l'axe de la table [12].

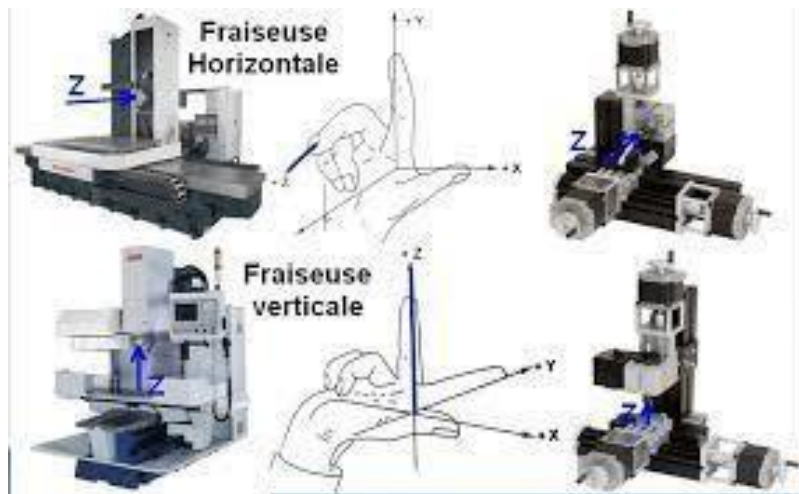


Figure I.19: image représentée fraiseuses horizontales et fraiseuses verticales 20

3. Fraiseuses automatiques

Ces machines sont utilisées pour le traitement de profils ou de surfaces très complexes. Les fraiseuses automatiques sont équipées d'une pointe de sonde qui reste toujours adhérente au modèle (fraiseuses à copier), guidant le couteau dans ses mouvements.

4. Fraiseuse universelles

Fraiseuse universelle : la broche ou arbre porte-fraise peut occuper toutes les inclinaisons possibles par rapport à la table porte-pièce de la machine [12].

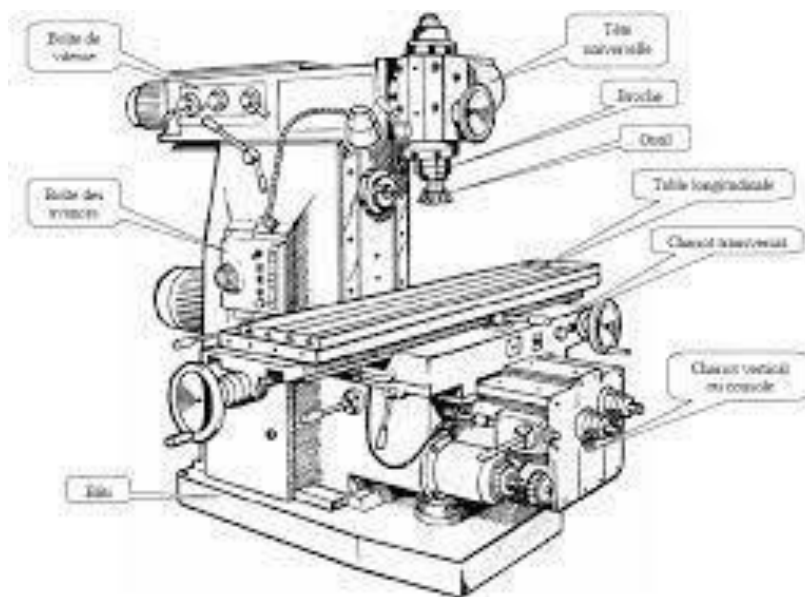


Figure I.20 : tour anniversaire 20

I.3.3.1 Types de fraisage

En fonction de l'état de surface recherché, des performances de la machine, de la qualité de l'outil, des dimensions des surfaces à usiner, de leur position sur la machine, des dimensions de la fraise et du débit exigé, on distingue principaux types de fraisage :

- Le fraisage en bout ou de face.
- Le fraisage en roulant ou de profil [18].
- Le fraisage combiné.

Fraisage en bout : L'axe de la fraise est disposé perpendiculairement à la surface à usiner (Fig. I.20). Cette configuration permet à la fraise d'effectuer la coupe à la fois avec son diamètre et sa partie frontale. Les copeaux générés sont d'épaisseur uniforme, ce qui assure une charge plus régulière pour la machine. De plus, la capacité de coupe dépasse celle obtenue par le fraisage en roulant, tout en offrant une meilleure qualité de l'état de surface [26].

Fraisage en roulant : Dans ce procédé, l'axe de la fraise est positionné parallèlement à la surface à usiner. La coupe s'effectue à l'aide du diamètre de la fraise (voir Fig. I.20). Ce type de fraisage entraîne une charge de machine irrégulière, en particulier avec les fraises à denture droite. Les à-coups engendrés par cette méthode génèrent une surface présentant des ondulations et des stries. Pour remédier à ces imperfections, il est conseillé d'utiliser une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration observée s'explique par le fait que la denture hélicoïdale permet une charge et une décharge progressives, réduisant ainsi les irrégularités [26].

Fraisage combiné : Dans le cadre du fraisage combiné, l'outil effectue la coupe à la fois avec son diamètre latéral et sa face frontale (Fig. I.20).

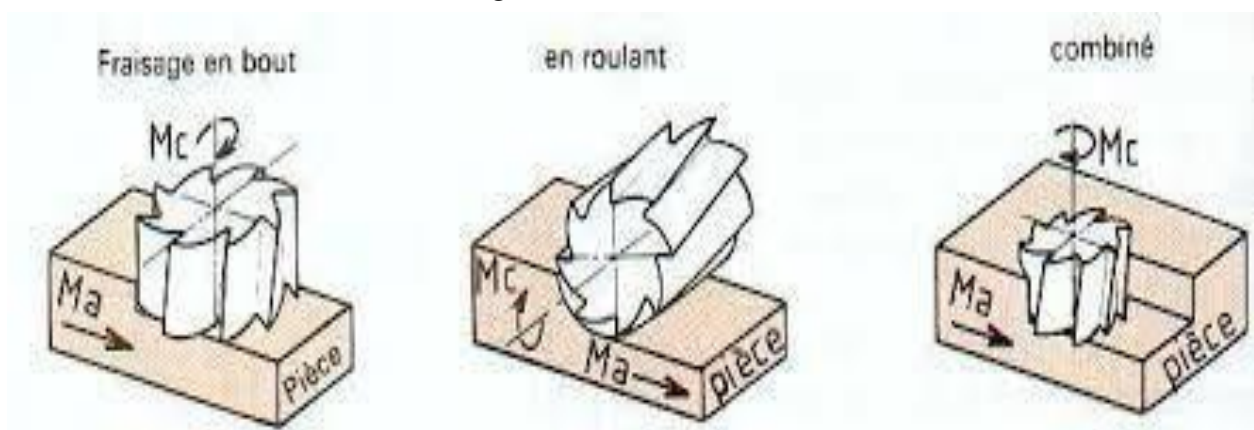


Figure I.21 : image représentée principaux types de fraisage. 21

I.3.3.2 Les Outils de coupe de la fraise

Les fraises, dotées de dents, sont mises en rotation et usinent la matière grâce à cette rotation combinée au mouvement relatif entre la fraise et la pièce à travailler. Leur forme peut varier selon les besoins : cylindrique, torique, conique, hémisphérique, voire parfois plus complexe. Les paramètres physiques des fraises, comme leur vitesse de rotation, leur avance ou leurs caractéristiques spécifiques, sont ajustés en fonction du type de matériau à usiner, de la profondeur de coupe et des exigences de l'opération. On utilise principalement des fraises en carbure de tungstène, recouvertes de revêtements spécifiques pour résister à l'usure provoquée par l'abrasion Des copeaux.

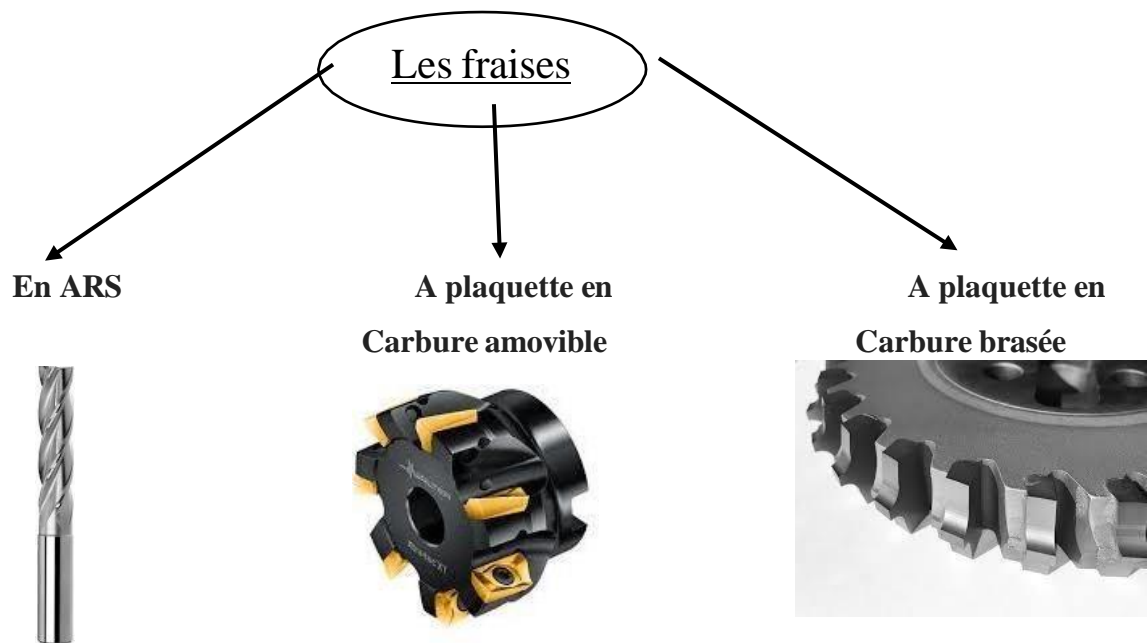


Figure I.22: type de la fraiseuse. 22

I.3.3.3 Composition porte d'outil

Le panneau porte-outils est un panneau doté de contours ou « ombres » représentant les formes et les tailles des outils souhaités. Ces contours sont soigneusement conçus pour correspondre aux outils spécifiquement utilisés sur le lieu de travail.



Figure I.23: Composition porte d'outil 22

I.3.3.4 Les principales opérations de fraisage

Les principales opérations de fraisage (planes et profilés) sont :

Le Rainurage

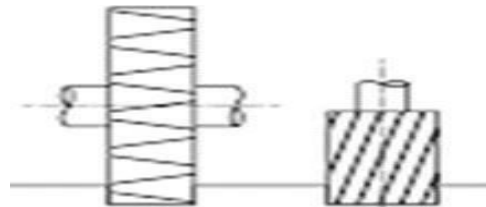
C'est une opération de fraisage qui consiste à Usiner trois surfaces orthogonales entre elles.



Figure I.24: Opérations de rainurage

Les opérations rainurage de:

1. Rainurage 3 tailles
2. Rainurage 2 tailles



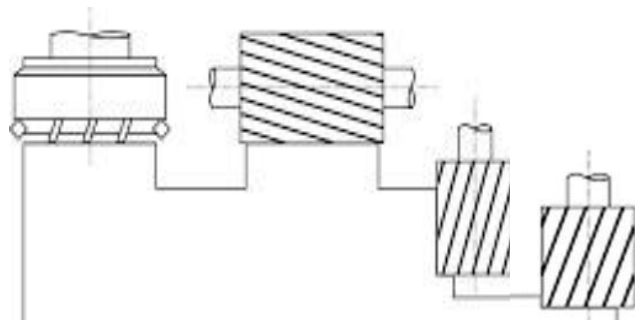
Le surfaçage

C'est une opération qui consiste à usiner une surface plane.



Figure I.25: Opérations de surfaçage

1. Surfaçage de face
2. Surfaçage de profil
3. Surfaçage - dressage prédominant profil
4. Surfaçage - dressage prédominant face



L'épaulement

Est une opération qui consiste à usiner deux surfaces Planes perpendiculaires associées.



Figure I.26: Opérations de l'épaulement

L'usinage de poches

Une poche est délimitée par des surfaces verticales ou avec dépouilles (cylindriques et planes)
Quelconques [19].



Figure I.27: Opérations de l'usinage de poches

I.3.3.5 Caractéristiques des fraises (Outils)

La composition, les définitions des composants et les cas d'utilisation des outils de tournage s'appliquent également au fraisage.

A. La taille : En fonction du nombre de faces comportant des arêtes tranchantes ou distinctes.

Suivant la figure :

- ✓ Fraises à une taille.
- ✓ Frais à deux tailles.
- ✓ Frais à trois tailles [20].

Fraises à une taille



Frais à deux tailles



Frais à trois tailles



Figure I.28 Les trois type de fraise à partir le taille

B. La forme : suivant le profil des génératrices par rapport à l'axe de l'outil, on trouve (Figure I.29) [21].

- ✓ Fraises cylindriques.
- ✓ Fraises coniques, biconiques.
- ✓ Fraises à lames ou à outils rapportés.
- ✓ Fraises de forme.
- ✓ Fraise cloche.



Figure I.29 : Image représentée les plusieurs forme de la fraise

C .La denture : Selon l'orientation de l'inclinaison des arêtes tranchantes par rapport à l'axe de la fraise, on distingue les dentures hélicoïdales orientées à droite ou à gauche, ainsi que les dentures à double hélice alternée. Lorsque l'arête tranchante est alignée parallèlement à l'axe de la fraise, on parle alors de denture droite [21].



Denture droit



denture hélicoïdale



denture à hélice alternée

I.3.3.6 Les Paramètres de coupe

Les opérations de fraisage dépendent essentiellement des paramètres suivants :

- La fréquence de rotation de la broche, notée N (en tr/min), qui indique le nombre de révolutions effectuées par la fraise en une minute. Cette valeur est surtout utilisée pour régler la machine.
- La vitesse de coupe, notée VC (en m/min), exprime la vitesse linéaire à laquelle l'arête de coupe parcourt la surface de la pièce. Elle est essentielle aux conditions de coupe et constitue un paramètre clé du processus de fraisage.

La vitesse de broche, le diamètre de l'outil, et la vitesse de coupe sont interconnectés par les équations suivantes :

$$V_c = \frac{(\pi \times D \times N)}{1000} \dots\dots\dots (I.4)$$

Et

$$N = \frac{1000 V_c}{\pi \times D} \dots\dots\dots (I.5)$$

D : représente le diamètre de l'outil (en mm),

N est la fréquence de rotation de la broche (en tr/min),

VC est la vitesse de coupe (en m/min).

- L'avance ou vitesse d'avance, notée Vf (en mm/min), Définit la vitesse à laquelle l'axe de l'outil se déplace par rapport à la pièce. Ce réglage machine dépend de l'avance par dent, du nombre de dents, et de la fréquence de rotation.
- L'avance par dent, notée Fz, joue un rôle crucial en fraisage car elle détermine la capacité d'enlèvement de matière par les dents de la fraise. C'est le facteur le plus limitant concernant les performances de l'outil. Elle indique l'épaisseur maximale du copeau que chaque dent peut retirer, ou la charge maximale supportable par chaque dent. Ce paramètre est essentiel parmi les conditions de coupe pour une opération donnée et se relie aux paramètres technologiques ainsi :

$$V_f = F_z * Z * N \dots\dots\dots (I.6)$$

Z : représente le nombre total de dents sur la fraise.

Pour compléter ces paramètres liés aux conditions de coupe, deux éléments supplémentaires sont indispensables car ils influencent l'engagement de l'outil dans le matériau :

- la profondeur de passe axiale a_p , alignée avec l'axe de révolution,
- et la profondeur de passe radiale a_e , perpendiculaire à cet axe. [5]

I.3.4 Les matériaux des outils :

Les outils de coupe servent à retirer le matériau de la pièce à usiner en effectuant une découpe. Par conséquent, ils doivent être conçus dans un matériau plus robuste que celui à travailler et capable de supporter la chaleur produite pendant l'opération de coupe du métal.

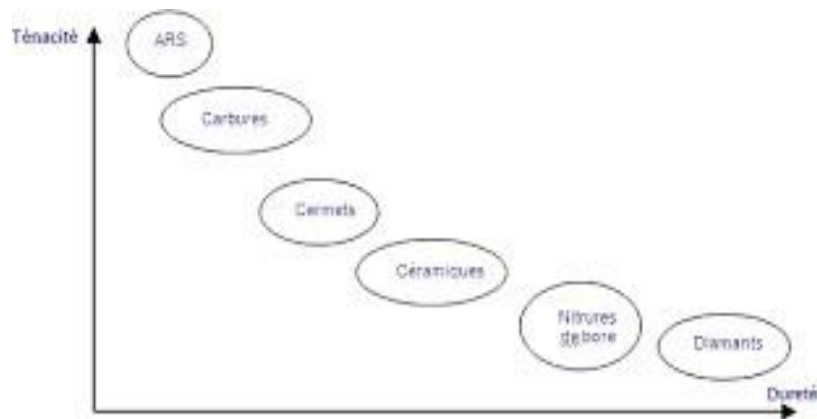


Figure I.30 : Graphique montrant les matériaux en termes de dureté et ténacité.

Acier rapide supérieur (ARS)

Désignent une catégorie d'aciers outils capables de conserver leur trempe même à des températures élevées. Ces aciers sont principalement utilisés pour des opérations de découpe à grande vitesse, comme celles effectuées avec des forets, ce qui explique l'origine du terme "rapide". En anglais, ils sont désignés sous l'appellation high speed steel ou HSS. Ces matériaux se distinguent par leur dureté élevée, généralement supérieure à 60 HRC, tout en offrant un niveau de résilience satisfaisant, c'est-à-dire leur capacité à résister à la propagation des fissures. Par ailleurs, leur excellente résistance à l'usure découle de leur forte teneur en alliages et de la présence importante d'éléments tels que le tungstène et le vanadium, qui génèrent des carbures durs [22].

Les céramiques

Les céramiques sont des matériaux frittés dépourvus de liant métallique et chimiquement stables. Elles sont moulées sous des pressions dépassant 25 MPa, puis frittées à des températures avoisinant les 1700 °C. Leur composition repose principalement sur l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), le nitrure de silicium (Si_3N_4) ou le sialon, un mélange de silicium, aluminium, oxygène et azote. Caractérisées par une dureté exceptionnelle, notamment à chaud, ces céramiques sont également réfractaires et capables de résister à des températures supérieures à 1500 °C. Elles se prêtent parfaitement à des vitesses de coupe très élevées, notamment dans des conditions d'usinage à sec. Leur utilisation se concentre principalement sur l'usinage de métaux très durs, tels que la fonte

grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. En outre, elles constituent une alternative économique intéressante par rapport aux outils en nitrure de bore cubique. Il existe une large variété de nuances céramiques adaptées à diverses applications. Parmi celles-ci figurent les céramiques à base d'oxyde, les céramiques mixtes, les céramiques renforcées de whiskers, les céramiques en nitrure de silicium et les nuances Sialon.

Les revêtements

Un revêtement d'outil est une couche d'épaisseur allant de 2 à 15 μm déposée solidement et liée au substrat d'outil (Figure I.26) pour améliorer les performances de l'outil de coupe, et appliquée après la mise en forme de l'outil. Les revêtements fournissent une surface dure et chimiquement stable et une protection thermique aux outils, améliorant leurs performances lors de la coupe en termes de résistance à l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur la plaquette. Il existe de nombreux types de matériaux de revêtement utilisés pour des applications spécifiques, les matériaux les plus fréquents rencontrés sont :

- Le carbure de titane (TiC)
- Nitrure de titane (TiN)
- Alumine (Al_2O_3)
- Leurs associations TiCN (carbonitrure de titane), AlTiN, ...etc.

Il y a deux types de dépôt de revêtement, les méthodes de dépôt physique en phase vapeur (PVD) et d'élimination chimique de la vapeur (CVD). Le dépôt de type CVD est créé par réaction chimique à haute température, 700 à 1050°C. Ses revêtements ont une grande résistance à l'usure et une forte adhérence au substrat.

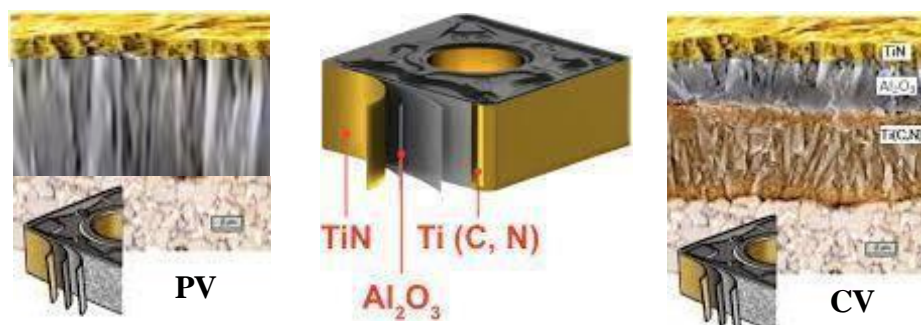


Figure I.31 : les deux types de dépôt de revêtements PVD et CVD

Les carbures métalliques

Les carbures métalliques non revêtus (C) sont obtenus par frittage, procédé issu de la métallurgie des poudres, en combinant des substances dures, comme le carbure de tungstène ou de

titane, avec une substance liant, généralement du cobalt, qui leur apporte leur ténacité. Ces matériaux se composent principalement de carbure de tungstène (phase α), de carbures de titane, tantale ou niobium (phase γ) et d'un liant, souvent le cobalt (phase β). L'ajout de carbure de titane, tantale ou niobium a pour objectif d'améliorer les performances à haute température, favorisant ainsi une vitesse de coupe élevée tout en réduisant les frottements. Cet ajout permet également de limiter l'usure de la face de coupe grâce à la diminution de la diffusion du carbure de tungstène entre l'outil et le copeau [23].

Les carbures revêtus sont dotés d'une fine couche de quelques micromètres composée de nitrure, de carbure de titane ou encore d'oxyde d'aluminium. Ces revêtements, en diminuant les frictions entre le copeau et l'outil ainsi qu'entre la pièce et l'outil, optimisent considérablement les performances des outils. Ils sont largement utilisés dans de nombreuses opérations de tournage, quel que soit le type d'usinage ou la variété des matériaux travaillés. Ils constituent donc une option à privilégier pour la majorité des opérations d'usinage [24].

On peut résumer les points essentiels comme suit :

- ✓ **Le nitrure de titane (TiN)** est reconnu pour sa résistance supérieure à l'abrasion, ce qui explique son utilisation fréquente en tant que couche externe. Il accepte des dépôts plus épais sans compromettre ses performances en service. De plus, il est chimiquement inerte vis-à-vis des aciers, et son faible coefficient de frottement réduit le risque de formation d'arêtes rapportées.
- ✓ **Le carbure de titane (TiC)** présente une meilleure adhérence aux substrats, en faisant une excellente base pour l'application de couches de revêtement additionnelles. Toutefois, sa fragilité impose une limitation de l'épaisseur des dépôts à un maximum de 51 μm .
- ✓ **L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)** est utilisé comme couche intermédiaire pour servir de barrière à la diffusion de la chaleur. Il maintient sa dureté à haute température, offrant une remarquable résistance à l'usure et une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation même à des vitesses et températures de coupe très élevées. Cependant, un inconvénient notable des revêtements multicouches sur les plaquettes de finition est la diminution de l'acuité des arêtes [24].

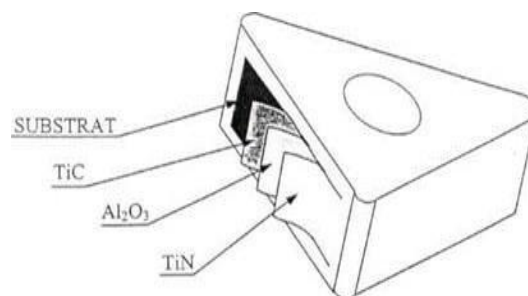


Figure I.32 : Plaquette carbure revêtue, multicouches

Cermets

Il s'agit de matériaux à base de titane avec un liant de nickel, de cobalt ou des deux à la fois. Ils ont une très bonne résistance à l'usure et une excellente stabilité chimique. Ils sont surtout réservés aux opérations de finition. Ils donnent de bons résultats en tournage de finition pour les aciers, en particulier pour les aciers inoxydables. Ils peuvent être revêtus (PVD) de TiN et Ti (C1N).

Diamant

Le diamant est largement utilisé comme composant des meules ou des grains pour le réaffûtage de celles-ci. Grâce à son faible coefficient de frottement, il limite la formation d'arêtes rapportées, réduisant ainsi l'encrassement. Cependant, son principal inconvénient réside dans son instabilité à haute température. En effet, lorsque la température dépasse 650 °C, le diamant se transforme en graphite. Par conséquent, il ne peut pas être employé pour l'usinage des matériaux ferreux. En revanche, il est parfaitement adapté aux matériaux non ferreux usinés à basse température tels que les alliages d'aluminium, de cuivre, de magnésium ou encore les résines thermodurcissables, entre autres [25].

I.3.5 L'état de surface

L'état de surface d'une pièce fait référence à ses irrégularités superficielles. Pour évaluer l'état géométrique de cette surface, il est possible de mesurer la rugosité à l'aide d'un rugosimètre en 2D ou en 3D. Les résultats obtenus se traduisent par un profil (en 2D) ou une surface reconstruite à partir de plusieurs profils (en 3D). En 2D, le relief peut être décrit par une fonction $z(x) = h$, où x représente la position sur la longueur d'évaluation et h correspond à la hauteur de l'irrégularité. Des méthodes spécifiques sont employées en fonction des types d'irrégularités rencontrées. Par exemple, un filtrage par approximation polynomiale peut éliminer les défauts du premier ordre. Le profil filtré peut ensuite être subdivisé en deux profils distincts grâce à un filtre gaussien : l'un pour l'ondulation et l'autre pour la rugosité. Toutes ces étapes suivent des normes établies [ISO 4288 96], et la fréquence de coupure du filtre est ajustée en fonction de la rugosité arithmétique du profil (R_a) [4].

De nombreux indicateurs sont disponibles, bien que la pratique montre que seuls quelques-uns, comme R_a et R_t , sont couramment utilisés. Le paramètre de rugosité le plus fréquemment employé est R_a , qui désigne la rugosité arithmétique. Ce paramètre représente la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesuré sur une longueur d'évaluation précise.

La rugosité désigne l'ensemble des irrégularités présentes sur une surface, qu'elles soient de nature micrographique ou macrographique. Les surfaces obtenues par usinage ne sont jamais totalement lisses; elles comportent des aspérités résultant des procédés d'usinage, des outils utilisés ou des propriétés du matériau [12].



Figure I.33: Appareille de mesure de rugosité

I.3.5.1 Principaux paramètres de la rugosité

Pour caractériser une rugosité, de nombreux critères sont établis par les normes. Toutefois, dans la pratique, sur un profil donné et pour une longueur définie, on utilise généralement quatre paramètres principaux :

R_a : (Écart moyen arithmétique du profil évalué) Moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées $Z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base :

$$W = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| \cdot dx \dots \dots \dots (I.7)$$

$$R = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k W_j, W = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^k W_j \dots \dots \dots (I.8)$$

Avec k =nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)

R_z : (Hauteur maximale du profil) :c'est la somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, Z_p , et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, Z_v , à l'intérieur d'une longueur de base[27].

Darwish, El-Tamimi, Choudhury et El-Baradie ont élaboré un modèle de rugosité de surface exprimé comme suit :

$$R_z = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k R_{zj} \dots \dots \dots (I.9)$$

Avec k =nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)

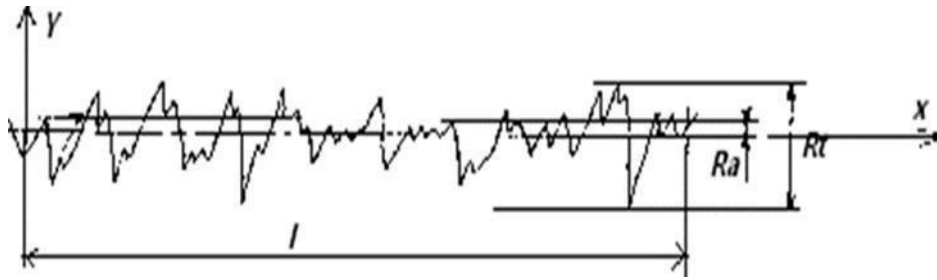


Figure I.34: Critères de rugosité R_a et R_t [27]

R_t Ou W_t : (Hauteur totale du profil) : c'est la Somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, Z_p , et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, Z_v , à l'intérieur de la longueur d'évaluation [27].

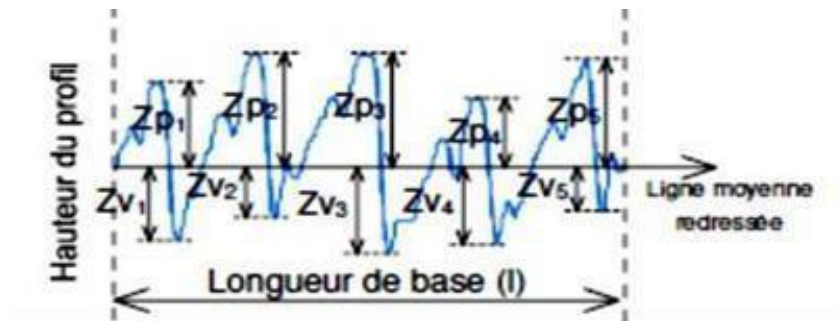


Figure I.35: Critères de rugosité R_t [27]

R_q : (Profondeur du profil écriêté) : c'est le Profondeur de la partie centrale du profil de rugosité.

R_q , R_{pk} , R_{vk} , $MR1$, $MR2$: Ces paramètres constituent une classe de paramètres d'état de surface caractérisant l'aspect fonctionnel d'une surface, à savoir le contact, le rodage et la lubrification.

Ces points d'intersection permettent de diviser horizontalement la courbe en trois secteurs (Figure I.16):

- La zone des pics, jouant un rôle dans les rodages mécaniques.
- La zone centrale, jouant un rôle dans les contacts.
- La zone des creux, jouant un rôle dans la lubrification. [27]

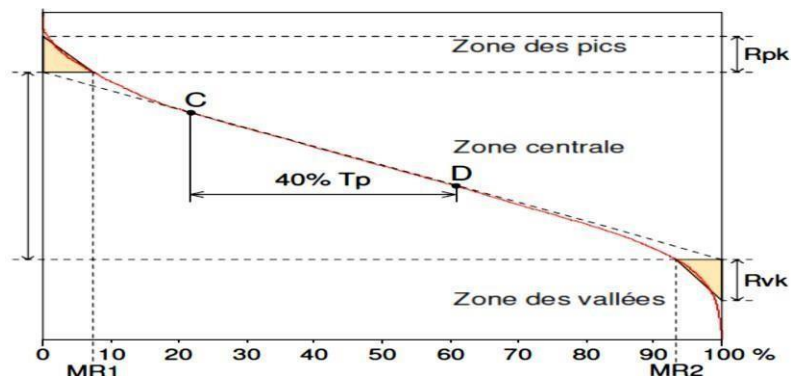


Figure I.36: les trois zones

Les paramètres déterminés par rapport à la courbe de portance sont définis dans le Tableau I.1

Tableau I.1 Principaux paramètres liés à la courbe de portance [27].

Définition des paramètres liés à la courbe de portance		
Intitule	symbole	Definition
Profondeur du profile écrêté	Rk	Profondeur de la partie centrale du profil de rugosité.
Hauteur des pics éliminés	Rpk	Hauteur moyenne des pics saillants situés au-dessus du profil écrêté
Hauteur des creux éliminés	Rvk	Hauteur moyenne des creux situés au-dessus du profil écrêté.
Taux de longueur portante MR1	MR1	Taux (%) déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les pics saillants du profil écrêté.
Taux de longueur portante MR2	MR2	Taux (%) déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les creux du profil écrêté.

I.3.5.2 Méthodes de mesure de la rugosité

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne suffisent pas à différencier la rugosité entre deux surfaces, un rugosimètre est utilisé pour mesurer de manière fiable et précise divers paramètres de rugosité (tels que Ra, Rz, etc.). Les domaines industriels qui nécessitent l'utilisation d'un rugosimètre incluent notamment [12] :

- ✓ **Mécanique** : Une rugosité optimisée favorise un meilleur ancrage mécanique, en particulier dans des dispositifs où les forces de friction jouent un rôle essentiel (par exemple, les cônes morses).
- ✓ **Qualité** : L'emploi d'un rugosimètre permet de vérifier la qualité de finition en fin de chaîne de production, identifiant et corrigeant les éventuelles anomalies survenues lors de l'usinage.

- ✓ **Recherche** : La mesure de rugosité aide à évaluer l'efficacité d'un nouveau revêtement ou procédé de traitement de surface [12].

Dans l'industrie, l'outil le plus couramment utilisé est l'appareil de mesure d'état de surface à palpeur, qui fonctionne par contact direct avec la surface à analyser, tel que le profil mètre mécanique 2D. Selon le niveau de sophistication de l'appareil, il peut mesurer tous ou certains des paramètres de l'état de surface. En effet, pour évaluer les paramètres de profil primaire et d'ondulation, une référence de guidage externe est nécessaire. De manière schématique, cela représente un appareil à palpeur avec ses différents composants définis. La figure I.4 illustre le rugosimètre de type Mitutoyo utilisé pour mesurer la rugosité moyenne arithmétique du profil (R_a) [4].

I.4 Conclusion

Le chapitre introductif établit les fondations scientifiques et techniques essentielles à la compréhension des travaux abordés dans cette étude. Il propose une synthèse des principaux procédés d'usinage, enrichie de rappels théoriques sur les principes et outils propres à chaque technique de mise en forme par enlèvement de matière. Les procédés tels que le tournage et le Fraisage y sont particulièrement détaillés

Chapitre II
Equipements, Matériaux et outils
de coupe utilisée

II.1-Introduction

Ce chapitre présente Les équipements et les conditions expérimentales utilisés pour mener cette recherche sont décrits en détail, y compris les dispositifs de mesure et le couple outil-matière. Les spécifications des plans adoptés pour l'approche expérimentale sont également présentées. Les expériences ont été menées au Laboratoire d'atelier (12 et 13) dans "l'entreprise de construction mécanique de kenchela"(ESMK). Pour compléter cette étude, des machines de mesure avancées ont également été utilisées, notamment au centre de métrologie Permettant d'enrichir les résultats scientifiques obtenus.

II.2- Équipements utilisés

- Matériau à usiner

35CrMnSiA est un acier à ultra haute résistance faiblement allié. Après traitement thermique, il a de bonnes propriétés mécaniques complètes, une résistance élevée, une ténacité suffisante, une trempabilité, une soudabilité (préchauffage avant le soudage) et une formabilité de traitement, mais il a une bonne résistance à la corrosion et une faible résistance à l'oxydation, généralement utilisé après un revenu à basse température ou austempering. Acier de construction trempé et revenu à haute résistance. Il a une résistance et une ténacité élevées, une trempabilité élevée, une plasticité de déformation à froid moyenne et de bonnes performances de coupe. Il y a une tendance à tempérer la fragilité et la résistance aux chocs transversaux est médiocre. Les performances de soudage sont meilleures, mais lorsque l'épaisseur est supérieure à 3 mm, il doit d'abord être préchauffé à 150 °C et un traitement thermique est nécessaire après le soudage. Généralement utilisé après trempe. But modifié

Le 35CrMnSiA est utilisé pour fabriquer des pièces à vitesse moyenne, à usage intensif, à haute résistance et à haute ténacité et des composants à haute résistance. Il est principalement utilisé pour fabriquer diverses pièces importantes à charge élevée et à grande vitesse, telles que des engrenages, des arbres, des embrayages, des pignons, des arbres de meule, des bagues, des boulons, des écrous, etc. Il est également utilisé pour fabriquer des pièces résistantes à l'usure à faible température de travail et charge variable. Composants soudés tels que pales de soufflante haute pression, plaques de soupape et tuyaux non corrosifs

II.2.1 Critères des sélections de le 35CrMnSiA dans l'industriel mécanique :

Tableau II.1 Critères des sélections de le 35CrMnSiA dans l'industriel mécanique :

<p>Composition chimique adaptée aux exigences mécaniques</p>	<p>Carbone (C=0.32-0.40%) : assure une bonne dureté et résistance après traitement thermique</p> <p>Chrome (Cr) : Améliorent la trempabilité, la</p> <p>Manganèse (Mn) : résistance à l'usure, la résilience et la résistance à la fatigue.</p> <p>Silicium (Si) :</p>
<p>Propriétés mécaniques élevées après traitement thermique</p>	<p>-Haute limite d'élasticité et résistance à la traction</p> <p>-Bonne ténacité : utile pour les pièces soumises à des chocs ou des variations de charge.</p> <p>-Excellente trempabilité : possibilité e traitements thermiques (trempe, revenu) pour ajuster les performances.</p>
<p>Bonne aptitude à l'usinage et à la soudabilité (avec précautions)</p>	<p>-Adapté pour les pièces nécessitant un usinage de précision.</p> <p>-La soudabilité est modérée : nécessite un préchauffage et un contrôle du refroidissement.</p>
<p>Bonne résistances à l'usure et à la fatigue</p>	<p>-Très recherché pour les composants soumis à des frottements ou des cycles de charges (arbre, pignon, bielle, ressort...).</p>
<p>Application typiques dans l'industrie mécanique</p>	<p>-Pièces mécanique fortement sollicitées : arbres, axes, engrenages, boulons</p> <p>-Utilisé dans les domaines automobile aéronautique, ferroviaire et équipements lourds.</p>
<p>Disponibilité et cout</p>	<p>Bon compromis entre performance et cout pour les applications ou une haute résistance est nécessaire sans utiliser des aciers très couteux comme les aciers inoxydables ou ultra-haute résistance.</p>

II.2.2 Applications de le 35CrMnSiA

Le 35CrMnSiA est utilisé pour fabriquer des pièces à vitesse moyenne, à usage intensif, à haute résistance et à haute ténacité et des composants à haute résistance.

Il est principalement utilisé pour fabriquer diverses pièces importantes à charge élevée et à grande vitesse, telles que des engrenages, des arbres, des embrayages, des pignons, des arbres de meule, des bagues, des boulons, des écrous, etc. Il est également utilisé pour fabriquer des pièces résistantes à l'usure à faible température de travail et charge variable. Composants soudés tels que pales de soufflante haute pression, plaques de soupape et tuyaux non corrosifs.

II.2.3 Propriétés mécaniques

Tableau II.2 Propriétés mécaniques de 35CrMnSiA

Limite d'élasticité σ_s /MPa (\geq)	Résistance à la traction σ_b /MPa (\geq)	Énergie d'impact	Réduction de aire ψ /% (\geq)	Énergie d'absorption d'impact α_{kv} (J/cm ²) (\geq)
$\geq 1275(130)$	$\geq 1620(165)$	≥ 31	≥ 40	$\geq 39(4)$

Le matériau étudié dans cette recherche est un acier au faiblement allié, désigné sous l'appellation **35CrMnSiA**, dont la composition chimique est répertoriée dans le Tableau II.1. L'analyse de ce matériau a été réalisée dans le laboratoire d'analyses physicochimiques à l'aide d'un spectromètre optique de type SPECTROMAX (illustré à la Figure II.7). Cet acier est élaboré selon un procédé rigoureux, garantissant une microstructure homogène et des propriétés mécaniques optimales. La caractérisation précise de sa composition chimique constitue une étape déterminante pour anticiper et comprendre son comportement aussi bien lors de sa mise en œuvre qu'en conditions d'utilisation. Le spectromètre optique SPECTROMAX, un instrument de haute technologie, permet une analyse rapide, fiable et d'une grande précision des éléments d'alliage présents, assurant ainsi une traçabilité totale du matériau. Grâce à cette technologie performante, il est possible de vérifier que l'acier 35CrMnSiA répond aux exigences spécifiées et dispose des propriétés adaptées pour ses applications prévues. Une telle analyse chimique, minutieusement conduite, est donc indispensable pour garantir la qualité et les performances du matériau dans ses usages futurs.



Figure II.1 spectromètre Type de SPECTROMAX

a) **Composition chimique des aciers** La composition chimique de l'acier 35CrMnSiA est représentée dans (le tableau II. 3).

Tableau II.3 Composition chimique de l'acier 35CrMnSiA.

Elément	C	Si	Mo	AL	N	Fe	Cr	Ni	Mn	Si+A
%	0.34	1.24	0.037	0.074	0.072	95.6	1.31	0.13	0.98	1.24

b) **Les caractéristiques physico-mécaniques**

Les caractéristiques physico-mécaniques de l'acier 35CrMnSiA est présentent dans le (tableau II.4).

Tableau II.4 Les caractéristiques physico-mécaniques de l'acier 35CrMnSiA.

Microstructure	Dureté HB
Perlite globulaire+ ferrite	HB=191

II.2.4 Outil de coupe utilisé

L'outil utilisé pour les essais est une fraise en carbure dont les caractéristiques sont les suivantes:

Plaquette de coupe : On fait notre étude sur deux différents types de fraise :

- Premier fraise : fraise en carbure avec des plaquettes revêtu.
- Deuxième fraise : fraise en carbure avec des plaquettes non revêtu.

❖ Outil de coupe utilisé

Plaquette en carbure : Les plaquettes sont amovibles de forme Rectangulaire (figure II.4), à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le **tableau II.5**.

Ce dernier est en carbure revêtu à type de traitement PVD par une couche revête sur un substrat tenace enrichi en cobalt. Excellente adhérence du revêtement au substrat, une bonne résistance à l'usure surtout l'usure par diffusion et à déformation plastique aux températures élevées, un coefficient du frottement réduit, donc elle empêche la formation de l'arête rapportée.

Tableau II.5 Informations relatives à la plaquette de coupe fraise avec des plaquettes revêtu :

Plaquettes de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
Carbure revêtu	R390-11 T3 08M-PM 1030	PVD	(Ti, Al)N	6.8 ×0,8 ×3,59×10 mm



Figure II.2 Plaquette **R390-11 T3 08M-PM 1030**

II.2.5 Croquis/dessin schématique-SV

- Largeur de plaquette (W1)= 6.8 mm
- Longueur effective d'arête de coupe (LE)= 10 mm
- Rayon de bec (RE)=0,8 mm
- Longueur d'arête de planage(BS)=1,2 mm
- Épaisseur plaquette(S)=3,59 mm

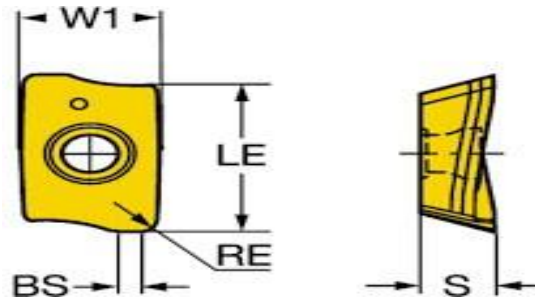


Figure II.3 Géométrie de la plaquette R390-11 T3 08M-PM 1030

II.2.6 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil sur lequel se fixe la plaquette mécaniquement par trou central (figure II.9). La géométrie du porte outil est donnée au (tableau II.4). **Tableau II.4** Caractéristiques de porte plaquette utilisé.



Figure II.4 : Porte outil utilisé

❖ Deuxième outil d'usinage (fraise en carbure avec des plaquettes non revêtu)

Plaquette en carbure non revêtu : Les plaquettes utilisées lors de nos essais ont été choisies en fonction des recommandations de notre partenaire industriel ERIS / Seriana – Batna. Dans des conditions «normales» d'usinage, une géométrie fine et un rayon de

Plaquette en carbure non revêtu type YT15 pour application sur l'acier. Ce sont des plaquettes non amovibles car ils sont soudés dans le porte outil.

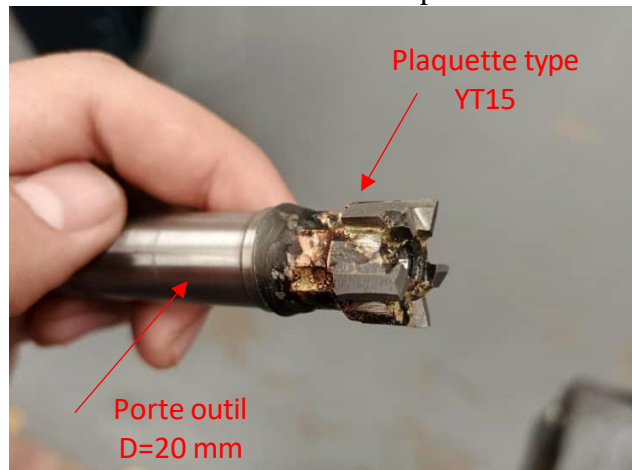


Figure II.5 : outil avec des Plaquette en carbure type YT 15

II.2.7 Préparation la pièce usinée

1- La phase de débitage

La barre plan (prismatique) de dimension 630x25x14 mm ont été prélevés à partir un débitage sous lubrifié d'un outil scie, par une machine à scier ultra diam prismatique de dimension 320x25x14 mm sous lubrifiant, réalisé sur par Outil-Scie, en suite nous le coupons en deux partie par une machine à scier ultra diam.



Figure II.6 : une machine à scier ultra diam.

2- La phase de surfacage

Pour éliminer les impuretés à la surface des alliages d'acier, nous avons surfacée les quatre cotes de la barre avec un outil de surfacage de diamètre 20 mm par machine CNC.



Figure II.7 : centre d'usinage vertical que représentée l'opération de surfaçage.

3- La phase de rectification

Pour obtenir un meilleur état de surface extérieur de l'outil en utilisant une rectifieuse plane, Tel qu'illustré dans (la figure II.13).



Figure II.8 : une rectification plane M7 130

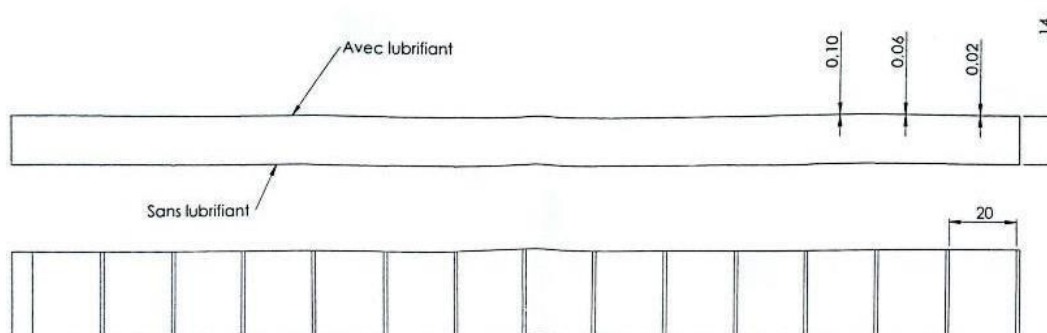


Figure II.9 : Dessin définition de l'éprouvette

La préparation des éprouvettes a été effectuée selon un processus d'usinage précis, avec les paramètres opératoires détaillés dans le tableau suivant :

Tableau II.6 Procédé d'usinage d'éprouvette

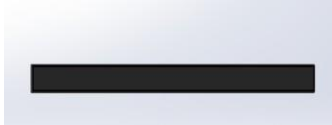


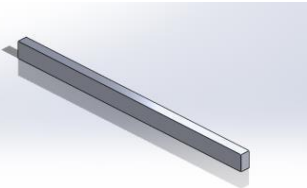
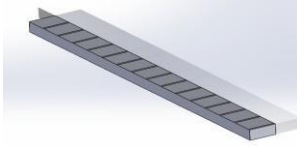
Pièce	Machines	Désignation de l'étape	Description
	machine découpe à scie	Débitage	-Découpe de la pièce brute de dimension 640*25*14 à partir deux barre de longueur 320*25*14
	Presse à main	Redressage	Redresser la pièce par un marteau de redressage.
	Centre d'usinage vertical type X1000	Surfaçage	surfacée des deux coté et mise à longueur 320 mm par fraise en carbure $\varnothing 80$
	Rectification plane M7130	Rectification	Rectification plane par meul350*127*40
	Centre d'usinage vertical type X1000	Surfaçage	Surfaçage les deux côtes par deux fraises en carbure différents



Figure II.10 : l'éprouvette réelle

II.3 Machine fraiseuse à commande

II.3.1- Machine-outil

- La machine-outil utilisée lors des essais est : Centre d'usinage vertical 3axes (une fraiseuse à commande numérique) Type GX 1000 plus FANUC série Oi-MF.

Centre d'usinage vertical 3axes type GX 1000 plus FANUC série Oi-MF : e centre d'usinage vertical 3 axes est constitué : D'une table où l'on fixe la pièce. D'une broche verticale, sur laquelle est fixé l'outil, qui est perpendiculaire à la table. D'un magasin d'outils où sont stockés les différents outils nécessaires à la production de la pièce.

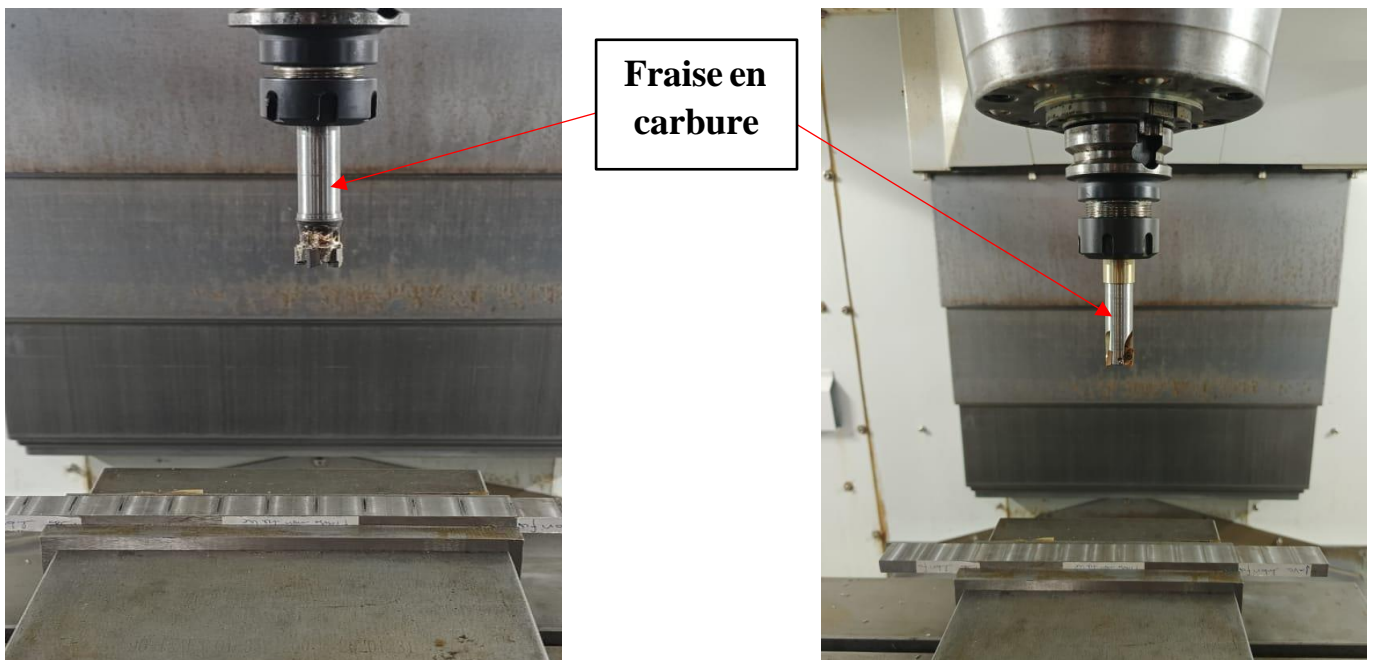


Figure II.11 : Centre d'usinage vertical 3axes type X 1000 qui présentée les deux opérations par deux outils différents

II.3.2 Programme sur la machine CNC



Figure II.12 : Image représenté programme d'usinage

On a utilisé quatre barre de longueur $L=320$ mm pour 35CrMnSiA et largeur=25mm et hauteur=14 mm, sur les quelles sont réalisés des paliers de 20 mm de longueur chacune (figure II.8), pour les essais de surfacage et rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe : S, V_c , f et ap.

(L) Longueur : 320mm

(l) Largeur : 25mm

(h) Hauteur : 20mm



Figure II.13 : Image représenté les quatre barre

II.4 Appareillages de mesure utilisée

Pour la mesure des différents critères de rugosité (Ra, Rz), nous avons utilisé un rugosimètre la plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40 μ m) pour Ra et (0.3 à 160 μ m) pour Rz et, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (Figure II.14).



Figure II.14 : Appareil de mesure de la rugosité sans démontage de la pièce

Autres équipements utilisé

- un appareil photo numérique pour prendre les photos.
- un pied à coulisse pour mesurer les dimensions de la pièce.
- microscope pour voir la structure de la pièce.
- Comparateur électrique

II.5 Planification des expériences

Présentation de l'expérience

L'expérimentation a été réalisée en trois phases distinctes dans l'usine ESMK, avec pour objectif l'analyse de l'impact des paramètres de coupe sur la qualité de surface lors d'opérations de surfacage

Phase 1 : Usinage conventionnel

La première phase a consisté en une opération d'usinage par enlèvement de matière, effectuée dans l'atelier 7 à l'aide d'une fraiseuse horizontale conventionnelle. Cette étape a permis de réaliser un premier usinage de la pièce brute dans des conditions standards.

Phase 2 : Usinage à grande vitesse (UGV)

La deuxième phase a été réalisée dans l'atelier 31 à l'aide d'une fraiseuse à commande numérique (CNC), dans le cadre d'un usinage à grande vitesse (HSM – High-Speed Machining). Cette phase visait à étudier l'effet de conditions de coupe intensifiées sur la

qualité de surface et le comportement de l'outil.

Phase 3 : Mesures métrologiques

La troisième phase concerne la caractérisation de l'état de surface. Les mesures de rugosité ont été effectuées à l'aide d'un rugosimètre de précision. Cette étape permet de quantifier l'effet des paramètres de coupe sur la finition de la pièce.

Plusieurs variables influencent le processus d'usinage, notamment :

- **Les paramètres du régime de coupe** : vitesse de coupe (V_c), avance (f), profondeur de passe (a_p) ;
- **La géométrie de l'arête de coupe** : forme et angles de l'outil ;
- **Les conditions opératoires** : rigidité de la machine, fixation de la pièce, type de lubrification, etc.

Ces facteurs constituent les **paramètres d'entrée** du processus d'usinage, tandis que la **rugosité de surface** représente le **paramètre de sortie principal**, reflétant la qualité obtenue après usinage.

Opération de surfacage

Le surfacage est une opération d'usinage réalisée à l'aide d'une fraise, permettant de générer une surface plane. L'outil de coupe utilisé présente plusieurs arêtes, dont les principales sont disposées sur la périphérie. Les arêtes centrales participent également à l'enlèvement de matière, mais de façon moindre. Lors de l'opération, la fraise tourne perpendiculairement au sens d'avance radiale, assurant ainsi un usinage uniforme de la surface.

II.6 Calcule les paramètres de coupe (cas de fraisage, opération surfacage)

Une lame d'outil s'introduit dans la matière pour retirer un copeau. L'outil effectue des mouvements spécifiques par rapport à la pièce à usiner. Ces mouvements sont commandés par les différents composants de la machine-outil. Afin d'assurer un travail de qualité (état de surface optimale, rapidité d'usinage, usure limitée de l'outil, etc.), il est essentiel de régler correctement les paramètres de coupe [29].

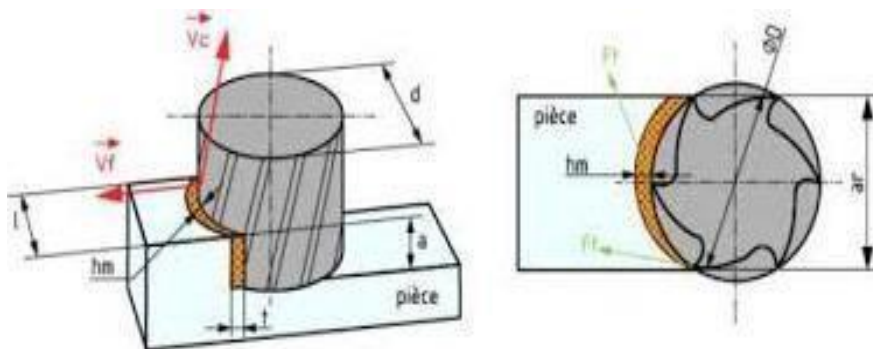


Figure II.15 : Schématisation de la répartition des efforts de coupe pour une opération de surfacage.

Il faut définir les paramètres d'usinage, afin de ne pas se placer d'entrée dans les Conditions de dégradation des arêtes de coupe trop rapides. Pour régler les paramètres de l'opération de fraisage on a choisi :

- **La vitesse de coupe:** La vitesse de rotation de la broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont intrinsèquement interconnectés par les formules suivantes [28].

$$N = \frac{1000 * V_c}{D * \pi} \dots\dots\dots (\text{II. 1})$$

Avec :

- ✓ Même diamètre de l'outil en carbure : $D = 20$ [mm].
- ✓ vitesse de broche :
 - pour l'usinage à commande numérique N ou $S = 2388.54$ [tr /min].

Pour ces données, on trouve la vitesse de coupe :

- pour l'usinage à CNC : $V_c = 150$ [m /min]

- **L'avance par minute ou vitesse d'avance:** L'avance impacte non seulement l'épaisseur des copeaux, mais aussi la manière dont ceux-ci se fragmentent.

On parle également ici d'avance de table, comme suit :

$$V_f = F_z * N * Z \dots\dots\dots (\text{II.2})$$

Avec :

- pour l'usinage à commande numérique $F_z = 0.1$ [mm/dent].
- ✓ Même nombre des dents de l'outil : $Z = 3$.

Après calcul, on trouve la vitesse d'avance :

- pour l'usinage à fort débit $V_f = 238.85$ [mm /min].

- **Profondeur de passe:**

La profondeur de passe est le déplacement de l'outil déterminait la quantité de matière a enlevée sur la pièce, on prend la même profondeur de passe :

$$a_p = 0.02 \text{ et } 0.06 \text{ et } 0.1 \text{ [mm]}$$

II.6.1 Conditions de coupe

Les essais sont effectués en fraisage par opération de surfacage, la pièce maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé avec et sans lubrification et dans les conditions de coupe qui sont présentées dans le tableau suivant :

Les paramètres d'entrée

- Matériau = 35CrMnSiA

- V_c (m/min) = {100, 150, 200}
- f (mm/tr) = {0.1, 0.5, 0.9}
- a_p (mm) = {0.02, 0.06, 0.1}

Les paramètres de sortie

- Critères de rugosité R_a , R_z en (μm).
- Temps d'enlèvement de matière (s).

II.7 Le plan d'expériences

Pour cette étude, on a six variables indépendantes avec trois niveaux pour chacune.

Le Tableau II.7 résume les variables indépendantes choisies et leurs niveaux correspondants.

Un Plan d'expérience complet de type factorielle nécessite 216 essais (nombre d'essais = 27),

Il est évident que plus le nombre d'essais est élevé plus la campagne d'essais est longue et coûteuse.

L'utilisation de la méthode de Taguchi permet de réduire ce nombre et d'estimer la tendance Des paramètres mesurés (variables dépendantes) en fonction de plusieurs variables (variables indépendantes).

Ainsi, une table L27 de la méthode de Taguchi est utilisée afin de mettre en place le plan d'expérience avec seulement 54 essais. (Le Tableau II.7) présente ce plan, il a été

Réalisé avec l'aide du logiciel Mini tab®, un logiciel spécialisé en méthodes statistiques

La table comporte 27 essais pour étudier et comparer entre l'influence de usinage entre deux type de outillage entre fraise premier en carbure avec des plaquette en carbure revotée par contre la deuxième fraise non revoté et un autre partie comparer pour voir l'importance de lubrifiant a l'état surface de la pièce usiné .

Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites à l'aide, nous adopterons la démarche suivante : Plan factoriel complet à six facteurs et trois niveaux :

Tableau II.7 Matrice de planification pour un plan (3^3)

Essai	VC (m/min)	Fz (mm/dent)	ap (mm)	S (tr /min)	F	Temps d'usinage (s)
1	100	0.1	0.02	1592.36	159.24	0.23
2	100	0.1	0.06	1592.36	159.24	0.18
3	100	0.1	0.1	1592.36	159.24	0.59
4	100	0.5	0.02	1592.36	796.18	0.4
5	100	0.5	0.06	1592.36	796.18	0.4
6	100	0.5	0.1	1592.36	796.18	0.4
7	100	0.9	0.02	1592.36	1433.1	0.2
8	100	0.9	0.06	1592.36	1433.1	0.2
9	100	0.9	0.1	1592.36	1433.1	0.3
10	150	0.1	0.02	2388.54	238.85	0.13
11	150	0.1	0.06	2388.54	238.85	0.13
12	150	0.1	0.1	2388.54	238.85	0.12
13	150	0.5	0.02	2388.54	1194.3	0.3
14	150	0.5	0.06	2388.54	1194.3	0.3
15	150	0.5	0.1	2388.54	1194.3	0.3
16	150	0.9	0.02	2388.54	2149.7	0.4
17	150	0.9	0.06	2388.54	2149.7	0.2
18	150	0.9	0.1	2388.54	2149.7	0.2
19	200	0.1	0.02	3184.71	318.47	0.9
20	200	0.1	0.06	3184.71	318.47	0.10
21	200	0.1	0.1	3184.71	318.47	0.2
22	200	0.5	0.02	3184.71	1592.4	0.2
23	200	0.5	0.06	3184.71	1592.4	0.2
24	200	0.5	0.1	3184.71	1592.4	0.2
25	200	0.9	0.02	3184.71	2886.2	0.2
26	200	0.9	0.06	3184.71	2886.2	0.2
27	200	0.9	0.1	3184.71	2886.2	0.2

II.3 Conclusion

Ce chapitre a fourni une présentation des équipements essentiels pour les essais. La composition chimique des éprouvettes et les propriétés des matériaux de coupe ont été déterminées. Les conditions de coupe et la stratégie de planification des expériences ont également été .

Chapitre III
Résultats et Discussion.

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats et l'analyse approfondie d'une étude expérimentale visant à évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur les caractéristiques de surface du matériau 35CrMnSiA lors de l'opération de fraisage numérique. Nous avons examiné l'impact de la vitesse de coupe (V_c), de l'avance (f_z), et de la profondeur de coupe (a_p) sur la rugosité de surface. Les résultats obtenus à partir d'un plan d'expérience de type Box-Behnken, combinés à une approche de désirabilité, ont été comparés à ceux obtenus par modélisation et optimisation à l'aide de réseaux de neurones profonds (DNN et KNN) avec le logiciel MATLAB. Cette comparaison permettra de déterminer les méthodes les plus efficaces pour optimiser les performances de fraisage tout en garantissant une qualité de surface optimale.

III.2 Mesures de rugosité

Le tableau IV.1 présente les résultats expérimentaux relatifs à la rugosité des surfaces obtenues lors de l'opération de surfaçage du 35CrMnSiA, à partir de 27 essais planifiés selon la méthode de conception Box-Behnken (BBD). Ces essais explorent de manière systématique les effets de trois paramètres de coupe fondamentaux : la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f_z) et la profondeur de passe (a_p). Pour chaque combinaison de paramètres, la rugosité de surface a été évaluée à l'aide de deux indicateurs représentatifs : R_a , la rugosité moyenne arithmétique, et R_z , la hauteur maximale moyenne des irrégularités.

Les valeurs mesurées de R_a et R_z constituent une base de données robuste permettant une analyse fine de l'influence de chaque facteur, ainsi que de leurs interactions, sur la qualité de la surface usinée. Ces résultats expérimentaux jouent un rôle clé dans l'optimisation du processus de surfaçage, en fournissant les informations nécessaires pour atteindre la finition de surface recherchée avec efficacité et précision.

III.2.1 Cas de surfaçage de l'acier 35CrMnSiA avec outil en carbure avec revêtement (Usinage avec lubrification)

Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau III.1 révèlent des tendances claires sur l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface du 35CrMnSiA lors d'une opération de surfaçage. Une augmentation de la vitesse de coupe (V_c) tend à réduire la rugosité, comme le montre l'essai 19 ($V_c = 200$ m/min, $R_a = 0,115$ μm , $R_z = 0,914$ μm) comparé à l'essai 1 ($V_c = 100$ m/min, $R_a = 0,138$ μm , $R_z = 1,119$ μm) à conditions constantes. À l'inverse, l'avance par tour (f_z) a un effet amplificateur sur la rugosité : à $V_c = 100$ m/min et $a_p = 0,1$ mm, R_a passe de 0,309 μm à 1,854 μm lorsque f_z augmente de 0,1 à 0,5 mm/tr (essais 3 et 6), puis à 2,219 μm à $f_z = 0,9$ mm/tr (essai 9). De même, l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) entraîne

une détérioration de la qualité de surface, comme en témoignent les essais 13, 14 et 15 ($V_c = 150$ m/min, $f_z = 0,5$ mm/tr), où R_a évolue de $1,491 \mu\text{m}$ à $2,423 \mu\text{m}$ pour a_p variant de $0,02$ à $0,1$ mm. Les interactions entre paramètres confirment que les combinaisons extrêmes (V_c bas, f_z et a_p élevés) produisent les rugosités les plus importantes, comme dans l'essai 27 ($R_a = 2,125 \mu\text{m}$, $R_z = 9,156 \mu\text{m}$). Ainsi, les meilleures finitions sont obtenues avec une vitesse de coupe élevée, une faible avance et une faible profondeur de passe.

Table III.1: Mesures de rugosité R_a et R_z pour les combinaisons BBD

N° Essai	Vitesse de coupe (V_c) [m/min]	Avance par tour (f_z) [mm/tr]	Profondeur de passe (a_p) [mm]	R_a [μm]	R_z [μm]
1	100	0.1	0.02	0.138	1.119
2	100	0.1	0.06	0.177	1.318
3	100	0.1	0.1	0.309	1.621
4	100	0.5	0.02	0.900	4.247
5	100	0.5	0.06	1.395	7.658
6	100	0.5	0.1	1.854	8.210
7	100	0.9	0.02	2.003	6.186
8	100	0.9	0.06	1.284	5.664
9	100	0.9	0.1	2.219	7.861
10	150	0.1	0.02	0.121	0.817
11	150	0.1	0.06	0.149	0.887
12	150	0.1	0.1	0.170	1.123
13	150	0.5	0.02	1.491	7.222
14	150	0.5	0.06	1.998	8.547
15	150	0.5	0.1	2.423	10.120
16	150	0.9	0.02	1.645	7.670
17	150	0.9	0.06	1.998	7.852
18	150	0.9	0.1	2.543	7.548
19	200	0.1	0.02	0.115	0.914
20	200	0.1	0.06	0.172	1.092
21	200	0.1	0.1	0.183	1.090
22	200	0.5	0.02	1.356	7.546
23	200	0.5	0.06	1.619	10.310
24	200	0.5	0.1	1.789	8.542
25	200	0.9	0.02	1.970	8.983
26	200	0.9	0.06	1.836	8.246
27	200	0.9	0.1	2.125	9.156

III.2.2 Analyse du modèle Box-Behnken

III.2.2.1 Résumé de l'ajustement

Le résumé d'ajustement évalue l'adéquation de différents modèles (linéaire, 2FI, quadratique et cubique) aux réponses R_a et R_z sur la base de mesures statistiques, comme indiqué dans le tableau III.2.

Tableau III.2 Mesures statistiques pour le résumé d'ajustement des modèles Ra et Rz.

Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS	Remarque
Linear	0.4020	0.8042	0.7786	0.7462	4.82	No- Suggested
2FI	0.4224	0.8119	0.7555	0.6953	5.78	No- Suggested
Quadratic	0.2661	0.9365	0.9030	0.8242	3.34	Suggested
Cubic	0.2444	0.9685	0.9182	0.6786	6.10	Aliased
Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS	
Linear	2.11	0.6715	0.6286	0.5721	133.07	No- Suggested
2FI	2.18	0.6934	0.6015	0.5187	149.64	No- Suggested
Quadratic	0.9407	0.9516	0.9260	0.8799	37.36	Suggested
Cubic	0.8999	0.9740	0.9323	0.7684	72.02	Aliased

L'analyse statistique des modèles de régression pour les deux paramètres de rugosité, Ra et Rz, a permis d'identifier le modèle quadratique comme le plus adapté dans les deux cas. Pour Ra, ce modèle présente un excellent ajustement avec un $R^2=0,9365$, un $R_{ajuste}=0,9029$ et un $R_{Prévision}=0,8242$, tout en enregistrant la plus faible valeur de PRESS (3,336), indiquant une forte capacité prédictive. Les modèles linéaire et 2FI sont nettement moins performants, avec des R_{ajuste} respectivement de 0,7786 et 0,7555. Le modèle cubique, bien qu'il affiche le R^2 global le plus élevé (0,9685), est aliased et donc statistiquement non fiable. De manière similaire, pour Rz, le modèle quadratique se distingue également avec un $R^2=0,9516$, un $R_{ajuste}=0,9260$, un $R_{Prévision}=0,8799$ et une valeur PRESS de 37,36, bien inférieure à celles des autres modèles. Les performances des modèles linéaire ($R_{ajuste}=0,6286$) et 2FI ($R_{ajuste}=0,6015$) restent modestes, et le modèle cubique, à nouveau aliased, ne peut être retenu. Ainsi, pour les deux indicateurs de rugosité, le modèle quadratique s'impose comme la meilleure option de modélisation, en alliant qualité d'ajustement, capacité prédictive et robustesse statistique.

III.2.3 ANALYSE ANOVA Ra et Rz

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique utilisée pour analyser les différences entre les moyennes des groupes d'un échantillon. Elle permet de déterminer si l'un des facteurs de l'étude a un impact significatif sur la variable réponse. Dans le cadre de ce modèle quadratique, l'ANOVA permet d'évaluer l'influence de divers facteurs et leurs interactions sur les paramètres de rugosité de surface, Ra et Rz, lors du processus de surfaçage de l'acier 35CrMnSiA.

Les résultats de l'ANOVA fournissent une évaluation statistique complète des facteurs influençant ces paramètres de rugosité de surface. Des valeurs **SS** et **F** du modèle plus élevées, ainsi que des valeurs **SS** résiduelles et **P** plus faibles, suggèrent que le modèle explique efficacement la variabilité de la rugosité de surface et que les facteurs considérés ont un impact substantiel. Les principaux éléments de l'ANOVA sont les suivants :

- **Somme des carrés (SS)** : La SS du modèle indique la variation expliquée par le modèle, les valeurs les plus élevées signifiant une plus grande variabilité expliquée. La SS résiduelle dénote la variation inexpliquée, les valeurs les plus faibles suggérant un meilleur ajustement du modèle. La SS totale représente la variation globale des données.
- **Degrés de liberté (dl)** : reflète le nombre de valeurs indépendantes qui peuvent varier. Pour le modèle, il correspond au nombre de paramètres estimés, et pour les résidus, il correspond au nombre total d'observations moins le nombre de paramètres.
- **Moyenne quadratique (MS)** : dérivée en divisant la somme des carrés par les degrés de liberté correspondants, fournissant une mesure moyenne de variation.
- **Valeur F** : Rapport entre le carré moyen du modèle et celui des résidus. Des valeurs F plus élevées indiquent un effet significatif du facteur sur la variable de réponse.
- **Valeur p** : reflète la probabilité que les résultats observés soient le fruit du hasard. Des valeurs p plus faibles (généralement $< 0,05$) indiquent une signification statistique, indiquant que le facteur affecte significativement la variable de réponse.

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) présentés dans le tableau III.3 pour Ra et Rz lors du processus de surfaçage de le 35CrMnSiA indiquent que les modèles sont hautement significatifs, avec des valeurs de p inférieures à 0,0001. Cela suggère que l'ensemble des facteurs inclus dans les modèles influence fortement la variabilité de la rugosité de surface.

- Pour Ra, le facteur le plus significatif est l'avance par tour (B), avec une valeur F élevée (203,05) et une valeur P très faible ($< 0,0001$), suivi de la profondeur de passe (C) qui est également significative ($F = 11,78$, $p = 0,0032$), ainsi que du terme quadratique de l'avance (B^2) indiquant une relation non linéaire importante ($F = 28,79$, $p < 0,0001$). Les autres facteurs, y compris la vitesse de coupe (A) et les interactions AB, AC, BC, ainsi que les termes quadratiques A^2 et C^2 , ne sont pas significatifs pour Ra, ce qui suggère un impact minimal sur ce paramètre.

- De même, pour Rz, l'avance par tour (B) demeure le facteur principal avec la valeur F la plus élevée (219,93) et une valeur P extrêmement faible ($< 0,0001$), suivi du terme quadratique de l'avance (B^2) qui contribue significativement ($F = 90,22$, $p < 0,0001$). La vitesse de coupe (A), la profondeur de passe (C) et l'interaction entre vitesse et avance (AB) sont aussi significatives, bien que dans une moindre mesure (respectivement $F = 9,03$, $p = 0,0079$; $F = 7,01$, $p = 0,017$; $F = 5,49$, $p = 0,0315$).

Les autres interactions et termes quadratiques ne montrent pas de significativité notable.

L'importance prépondérante de l'avance par tour et de ses effets non linéaires pour Ra et Rz souligne la nécessité de focaliser l'optimisation du processus sur ce paramètre. Par ailleurs, les influences secondaires de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe, ainsi que l'interaction vitesse-avance pour Rz, indiquent que la qualité de surface est le résultat d'une combinaison complexe de facteurs, nécessitant une approche d'optimisation multi-paramètres pour obtenir une finition optimale du 35CrMnSiA lors du fraisage numérique.

Tableau III.3 Résumé de l'ANOVA pour l'ajustement des modèles Ra et Rz.

Ra						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	17.77	9	1.97	27.88	< 0.0001	Significant
A-Vc	0.0436	1	0.0436	0.6158	0.4434	No-Suggested
B-f	14.38	1	14.38	203.05	< 0.0001	Significant
C-a	0.8346	1	0.8346	11.78	0.0032	Significant
AB	0.0279	1	0.0279	0.3945	0.5383	No-Suggested
AC	0.0391	1	0.0391	0.5521	0.4676	No-Suggested
BC	0.0802	1	0.0802	1.13	0.3022	No-Suggested
A ²	0.2443	1	0.2443	3.45	0.0807	No-Suggested
B ²	2.04	1	2.04	28.79	< 0.0001	Significant
C ²	0.0815	1	0.0815	1.15	0.2984	No-Suggested
Residual	1.20	17	0.0708			
Cor Total	18.98	26				
Rz						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	295.91	9	32.88	37.16	< 0.0001	Significant
A-Vc	7.99	1	7.99	9.03	0.0080	Significant
B-f	194.60	1	194.60	219.93	< 0.0001	Significant
C-a	6.20	1	6.20	7.01	0.0169	Significant
AB	4.86	1	4.86	5.49	0.0315	Significant
AC	1.92	1	1.92	2.17	0.1594	No-Suggested
BC	0.0459	1	0.0459	0.0519	0.8226	No-Suggested
A ²	0.2687	1	0.2687	0.3036	0.5888	No-Suggested
B ²	79.83	1	79.83	90.22	< 0.0001	Significant
C ²	0.1864	1	0.1864	0.2107	0.6520	No-Suggested
Residual	15.04	17	0.8848			
Cor Total	310.95	26				

III. 2.4 Statistiques d'ajustement

L'analyse statistique des modèles pour Ra et Rz lors du processus du surfaçage de le 35CrMnSiA démontre leur robustesse et leur fiabilité. Le tableau suivant, Tableau III.4 Statistiques d'ajustement, présente les principales statistiques utilisées pour évaluer les modèles :

- **écart-type** (Std. Dev) (Standard Déviation) : Mesure la variation ou la dispersion des données. Un écart-type faible indique que les points de données ont tendance à être plus proches de la moyenne.
- **Moyenne** (Mean) : la valeur moyenne de l'ensemble de données.
- **C.V. %** (coefficient de variation) : Mesure normalisée de la dispersion d'une distribution de probabilité ou de fréquence, exprimée en pourcentage. Il est calculé comme le rapport de l'écart type à la moyenne, fournissant une mesure relative de la variabilité.
- **R²** (Coefficient de détermination) : Indique la proportion de la variance de la variable dépendante qui est prévisible à partir des variables indépendantes. Des valeurs proches de 1 indiquent un meilleur ajustement.
- **R² ajusté** : Ajusté en fonction du nombre de prédicteurs du modèle, ce qui fournit une mesure plus précise de l'adéquation lorsque plusieurs prédicteurs sont utilisés.
- **R² prédit** : Mesure la capacité du modèle à prédire de nouveaux points de données. Il s'agit d'une indication de sa puissance prédictive.
- **Précision adéquate** : Mesure le rapport signal/bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable, indiquant une discrimination adéquate du modèle.

Tableau III.4 Statistiques d'ajustement

Reponses	Écart-type (Std. dev.)	Moyenne (Mean)	C.V. %	R ²	R ² - ajusté	R ² - prédit	Precision adequate
Ra	0.2661	1.26	21.14	0.9365	0.9030	0.8242	15.3012
Rz	0.9407	5.61	16.76	0.9516	0.9260	0.8799	15.8665

Pour Ra, le coefficient de détermination prédit (R² prédit) est de 0,8242, en étroite concordance avec le R² ajusté de 0,9030, la différence étant inférieure à 0,2. Cette proximité suggère que le modèle présente une bonne capacité de généralisation, avec des performances prédictives alignées sur sa capacité explicative sur l'échantillon, ce qui atteste de sa robustesse statistique. Le coefficient de variation (C.V.) de 21,14 % reste acceptable dans un contexte industriel, bien

Qu'assez élevé, ce qui suggère une variabilité modérée des mesures de Ra autour de la moyenne (1,26 µm). Il souligne l'importance de bien maîtriser les paramètres de coupe pour garantir la stabilité du processus. La valeur de précision adéquate, s'élevant à 15,3012, largement supérieure au seuil critique de 4, indique un rapport signal/bruit élevé, ce qui confirme que le modèle peut naviguer efficacement dans l'espace expérimental et générer des prédictions fiables.

De même, pour Rz, le R² prédit de 0,8799 s'accorde étroitement avec le R² ajusté de 0,9260, traduisant une forte stabilité du modèle entre l'ajustement et la prédiction. Le coefficient de variation est de 16,76 %, ce qui indique une meilleure homogénéité des données autour de la moyenne (5,61 µm) comparé à Ra, et renforce la fiabilité des prédictions du modèle pour cette réponse. Par ailleurs, la précision adéquate atteint 15,8665, bien au-delà du seuil minimal, indiquant une forte capacité du modèle à identifier les tendances significatives malgré le bruit expérimental.

Ces résultats confirment collectivement que les modèles quadratiques de Ra et Rz possèdent une forte puissance explicative et prédictive, avec des C.V. raisonnables et des rapports signal/bruit très favorables. Ces modèles peuvent donc être utilisés de manière fiable pour optimiser les paramètres de coupe dans le surfacage du 35CrMnSiA, assurant une qualité de surface élevée, une meilleure répétabilité du processus et une efficacité accrue en milieu industriel.

Les équations de prédiction de la rugosité de surface Ra et Rz pendant le surfacage de 35CrMnSiA sont données par :

$$\mathbf{Ra} = -2.27118 + 0.025704 V_c + 5.20955 f - 1.63177 a + 0.002412 V_c X f - 0.028542 V_c X a + 5.10937 f X a - 0.000081 V_c^2 - 3.64340 f^2 + 72.84722 a^2$$

$$\mathbf{Rz} = -5.98302 + 0.034800 V_c + 26.01333 f + 55.93368 a + 0.031817 V_c X f - 0.199792 V_c X a + 3.86458 f X a - 0.000085 V_c^2 - 22.797569444444 f^2 - 110.17361 a^2$$

L'analyse des équations de Ra et Rz met en évidence l'influence significative des paramètres de vitesse de coupe (V_c), d'avance (f) et de profondeur de passe (a) sur la rugosité de surface. Pour Ra, les termes linéaires f et a , ainsi que les effets quadratiques f^2 et a^2 , sont particulièrement notables. De même, pour Rz, les effets linéaires de V_c , f , et a , ainsi que les termes quadratiques f^2 et a^2 , exercent une influence déterminante. Les interactions $V_c \times a$ et $f \times a$ apparaissent également significatives dans les deux modèles. Ces résultats soulignent l'importance de ces paramètres et de leurs combinaisons dans la maîtrise de la rugosité de surface lors de l'opération de surfacage, permettant ainsi d'atteindre des finitions de haute qualité.

La **Figure III.1** montre une forte corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs réelles pour Ra et Rz, ce qui témoigne de la précision des modèles quadratiques. Les points colorés selon les essais expérimentaux (de 1 à 27) permettent de visualiser la cohérence des résultats. La majorité des points se regroupent autour de la ligne diagonale, avec quelques valeurs aberrantes, suggérant des prédictions globalement fiables malgré certaines variations dues aux conditions expérimentales ou à des erreurs de mesure. Ces graphes confirment ainsi l'efficacité et la robustesse des modèles pour la prédiction de la rugosité de surface lors du processus de Surfacage sur de l'acier 35CrMnSiA.

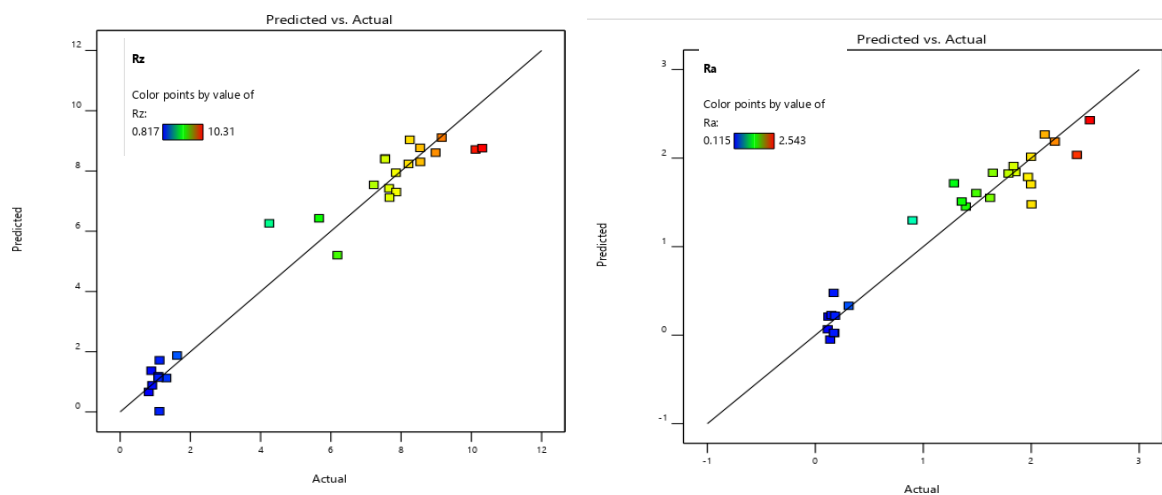


Figure III.1 : Graphique des valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles pour Ra et Rz. Les graphiques de surfaces 3D présentés dans les Figures III.2 et III.3 offrent des informations essentielles sur les interactions entre les paramètres du processus de surfacage, notamment la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a), ainsi que leurs effets combinés sur la rugosité de surface (Ra) et (Rz). Ces visualisations permettent d'identifier les zones optimales du plan expérimental où la rugosité est minimisée, mettant en évidence l'influence

significative des interactions entre les paramètres, en particulier entre V_c et f , V_c et a , ainsi que f et a .

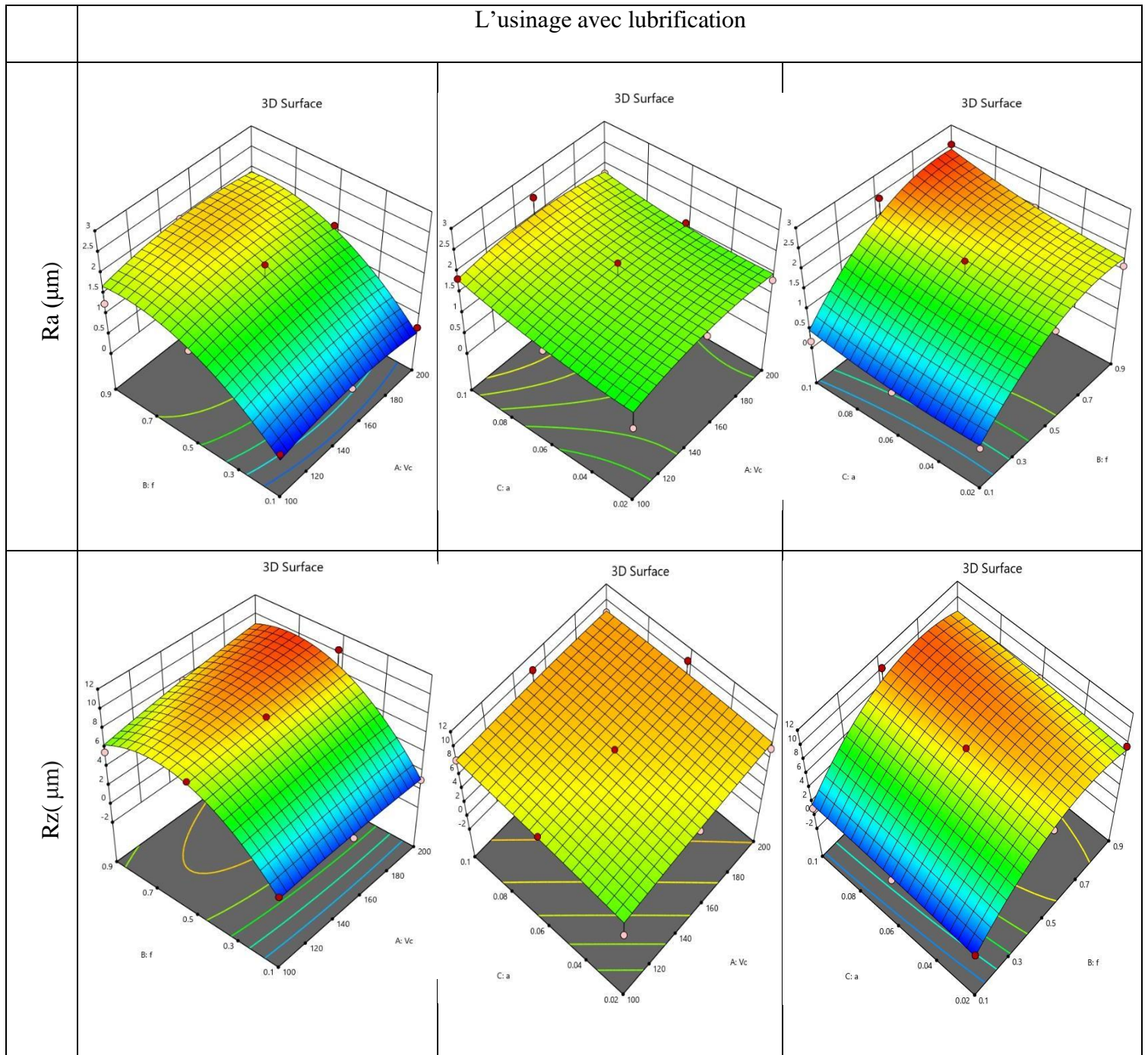


Figure III.2 : Représentation en surface 3D des interactions entre les différents paramètres de surfacage et de leurs effets combinés sur la rugosité R_a et R_z selon le plan BBD.

L'analyse des surfaces de réponse 3D illustrées dans les Figures III.2 et III.3 met en évidence les effets combinés des paramètres de coupe — vitesse de coupe (V_c), avance (f) et profondeur de passe (a) — sur la rugosité de surface R_a et R_z lors du surfaçage de l'acier 35CrMnSiA. Pour R_a , l'effet le plus marquant provient de l'augmentation de l'avance, qui entraîne une dégradation significative de l'état de surface. Une vitesse de coupe plus élevée permet généralement de réduire R_a , tandis que la profondeur de passe présente un effet non linéaire, suggérant qu'une valeur modérée est préférable pour maintenir une bonne qualité de surface. En ce qui concerne R_z , les tendances sont similaires, bien que l'impact de la profondeur de passe soit plus prononcé, traduisant une sensibilité accrue du profil de rugosité maximale aux variations d'engagement de l'outil. Les interactions $V_c \times f$ et $f \times a$ sont significatives pour les deux réponses, révélant la nécessité de considérer les effets croisés pour une optimisation efficace. Ces observations permettent d'identifier des configurations de coupe idéales pour minimiser la rugosité de surface, assurant ainsi une meilleure précision dimensionnelle et une performance accrue du processus de surfaçage.

III.2.5 Graphiques de probabilité normale des résidus

La Figure III.3 présente les graphiques de probabilité normale des résidus pour R_a et R_z , respectivement. Ces graphiques permettent d'évaluer la normalité des résidus, une hypothèse essentielle dans les analyses de régression et d'ANOVA.

Dans le cadre de cette étude, les graphiques montrent que les résidus pour R_a et R_z sont globalement alignés le long de la ligne diagonale, ce qui indique une distribution approximativement normale. Cette conformité à la normalité valide la fiabilité des modèles quadratiques établis pour prédire la rugosité de surface durant l'usinage par fraisage de l'acier 35CrMnSiA. Bien que quelques points aberrants soient observés, ces écarts mineurs ne compromettent pas la validité globale des modèles statistiques. Ainsi, la normalité des résidus renforce la crédibilité des résultats d'ANOVA et de régression, et justifie l'utilisation de ces modèles pour optimiser les paramètres du processus afin d'obtenir des états de surface R_a et R_z conformes aux exigences de qualité.

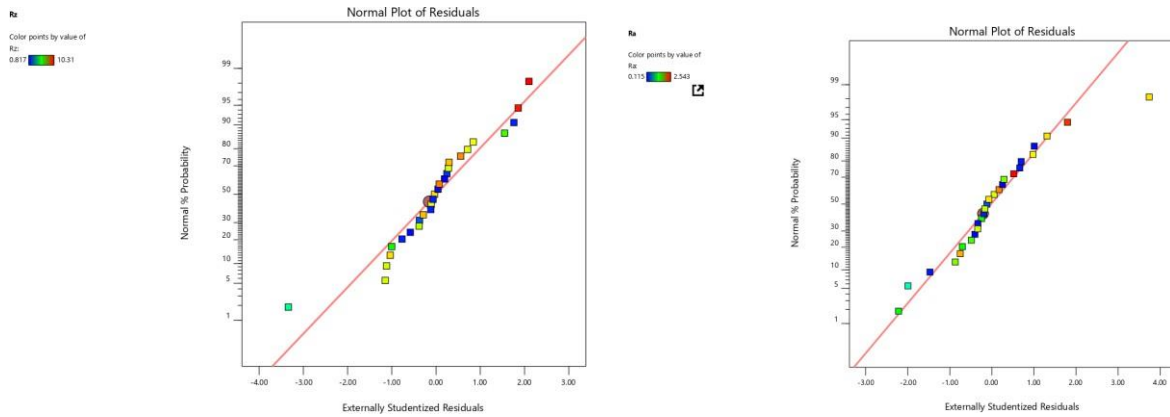


Figure III.3 : Graphiques de probabilité normale des résidus pour Ra et Rz.

III.2.6 Analyse des graphiques des effets principaux pour Ra et Rz

La Figure III.4 illustre les graphiques des effets principaux pour les paramètres de rugosité de surface Ra et Rz, respectivement. Ces graphiques montrent l'effet de chaque facteur (la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a)) sur Ra et Rz, en maintenant les autres facteurs constants.

Le graphique des effets principaux (Figure III.6) illustre l'influence de chaque paramètre de coupe sur la rugosité de surface, à savoir Ra et Rz. Pour Ra, l'avance par tour (f) s'impose clairement comme le facteur le plus significatif, tandis que la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (a) présentent une légère influence, suggérant un effet modéré mais non négligeable sur la rugosité. On observe que l'augmentation de l'avance par tour conduit à une hausse notable de Ra, alors que les effets de V_c et a , bien que présents, sont moins marqués. De même, pour Rz, l'avance par tour reste le facteur prédominant, avec un impact fort sur la hauteur maximale des irrégularités, tandis que la vitesse de coupe et la profondeur de passe conservent une signification modérée. Ces résultats soulignent l'importance de contrôler précisément l'avance par tour pour optimiser la qualité de surface, tout en tenant compte des contributions secondaires de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe dans le processus de surfacage de l'acier 35CrMnSiA.

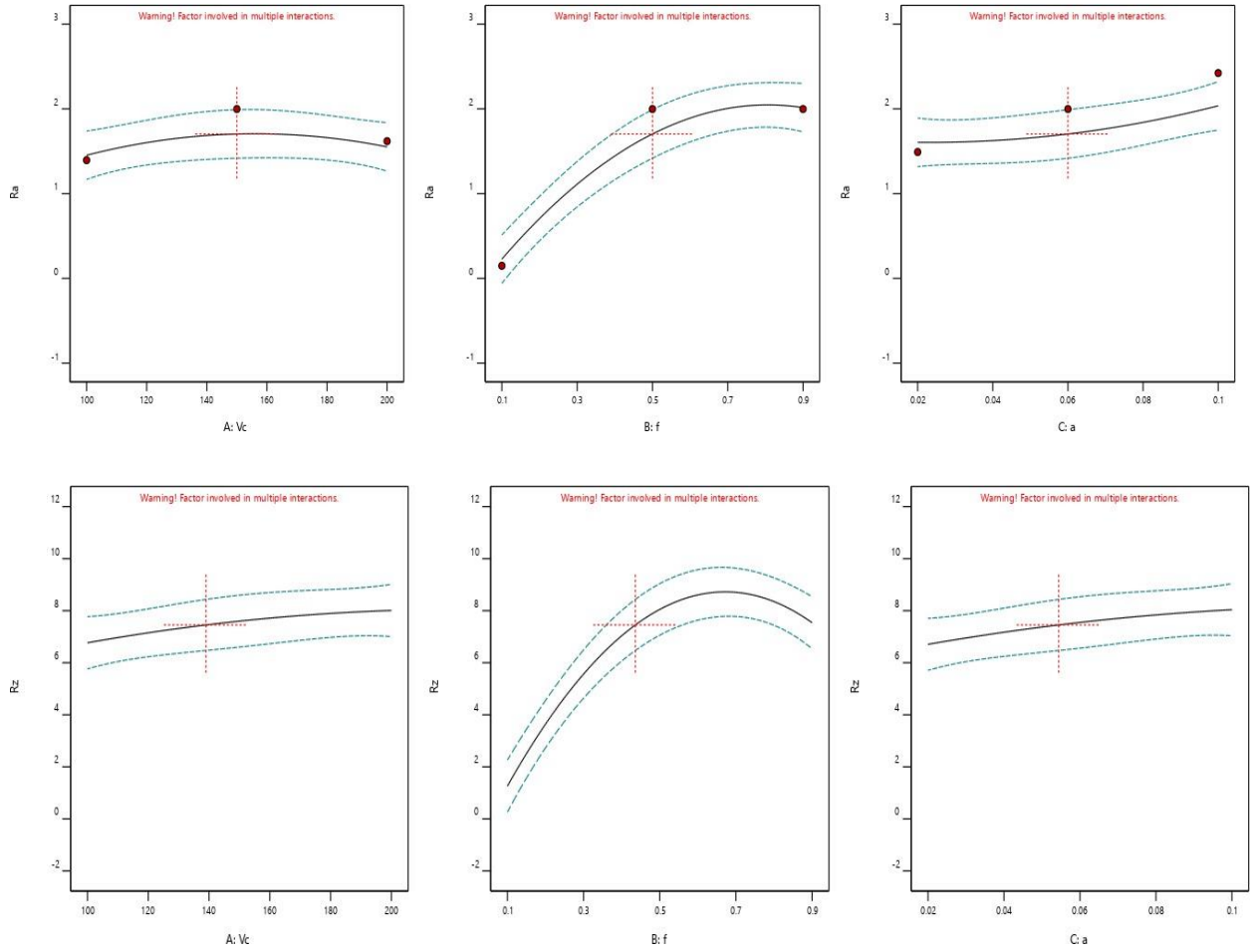


Figure III.4 : Graphiques des effets principaux pour Ra et Rz.

III.2.5 Comparaison entre les valeurs expérimentale et les méthodes de prédiction (RSM, KNN, AG_DNN)

III.2.5.1 Surfaçage De L'acier 35CrMnSiA à L'aide D'un Outil En Carbure Revêtu Sous Lubrification

Tableau III.5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et méthode de prédiction en cas lubrification.

run	Vc	f	a	Ra	Ra (RSM)	Ra (KNN)	Ra (AG_DNN)	Rz	Rz (RSM)	Rz (KNN)	Rz (AG_DNN)
1	100	0.1	0.02	0.138	0.1496	0,121	0,44230326	1.119	0.0248	1,119	1,804949425
2	100	0.1	0.06	0.254	0.0245	0,138	1,007305583	1.489	1.13	1,119	3,427618718
3	100	0.1	0.1	0.309	0.3317	0,17	1,533732318	1.621	1.87	1,123	5,128573196
4	100	0.5	0.02	1.395	1.30	0,493	1,032760708	6.247	6.26	2,28	4,859790406
5	100	0.5	0.06	1.395	1.45	1,395	1,576379673	7.658	7.43	2,28	6,876145529
6	100	0.5	0.1	2.038	1.84	1,395	1,995840792	8.21	8.24	7,517	8,171873693
7	100	0.9	0.02	1.892	1.48	1,011	1,739746416	5.992	5.20	5,992	6,357565216
8	100	0.9	0.06	2.038	1.72	1,011	1,949941526	5.664	6.43	5,992	7,994108627
9	100	0.9	0.1	2.219	2.19	1,872	2,091114978	7.861	7.30	7,548	8,710897475
10	150	0.1	0.02	0.121	0.2102	0,121	0,515021407	0.817	0.6661	0,817	1,188195285
11	150	0.1	0.06	0.149	0.2273	0,121	0,627827879	0.887	1.37	0,817	2,760376805
12	150	0.1	0.1	0.17	0.4774	0,17	0,920351801	1.123	1.72	1,123	3,408574394
13	150	0.5	0.02	1.491	1.61	0,587	1,586515852	7.222	7.54	6,1111	6,758276432
14	150	0.5	0.06	1.998	1.70	1,458	2,089057013	8.547	8.30	7,852	7,909936755
15	150	0.5	0.1	2.205	2.04	1,087	2,431920181	10.12	8.71	7,548	8,293444884
16	150	0.9	0.02	1.645	1.83	1,398	1,967296378	7.67	7.12	7,665	8,09810731
17	150	0.9	0.06	2.2695	2.01	1,645	2,385257738	7.852	7.94	7,67	8,734118099
18	150	0.9	0.1	2.543	2.43	2,125	2,643020491	7.548	8.42	7,548	8,929679866
19	200	0.1	0.02	0.115	0.0665	0,139	0,173934065	0.914	0.8841	0,817	0,701101753
20	200	0.1	0.06	0.139	0.0265	0,139	0,079998004	1.092	1.19	1,709	1,354659783
21	200	0.1	0.1	0.183	0.2195	0,139	0,329311855	1.09	1.14	1,09	1,477681007
22	200	0.5	0.02	1.295	1.51	0,189	1,026381963	7.546	8.39	7,546	6,995792818
23	200	0.5	0.06	1.458	1.55	1,252	1,244980945	10.31	8.76	4,582	7,236902673
24	200	0.5	0.1	1.789	1.83	1,087	1,551989686	8.542	8.77	7,569	7,193406932
25	200	0.9	0.02	1.97	1.79	1,295	1,790865221	7.665	8.61	7,665	8,711087415
26	200	0.9	0.06	1.982	1.91	1,97	2,054111517	8.246	9.03	7,665	8,874160858
27	200	0.9	0.1	2.125	2.27	1,789	2,13466432	9.156	9.11	7,569	8,911419466

Dans le contexte du surfaçage de l'acier 35CrMnSiA à l'aide d'un outil en carbure revêtu sous lubrification, une évaluation comparative a été conduite afin d'estimer les performances prédictives de trois approches de modélisation (RSM, KNN, et AG_DNN) appliquées aux paramètres de rugosité de surface Ra et Rz. Les données issues de l'expérimentation ont mis en évidence des écarts de précision différenciés selon les méthodes. La méthode RSM a démontré une stabilité satisfaisante avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 0,194 μm pour Ra et 0,572 μm pour Rz, traduisant une bonne capacité d'ajustement aux tendances générales

en évidence des écarts de précision différenciés selon les méthodes. La méthode RSM a démontré une stabilité satisfaisante avec une erreur absolue moyenne (MAE) de $0,194 \mu\text{m}$ pour Ra et $0,572 \mu\text{m}$ pour Rz, traduisant une bonne capacité d'ajustement aux tendances générales du processus. L'approche AG_DNN, basée sur un réseau de neurones profond optimisé par algorithme génétique, s'est distinguée par une meilleure performance globale avec une MAE de $0,237 \mu\text{m}$ pour Ra et de $0,623 \mu\text{m}$ pour Rz, confirmant sa capacité à modéliser les comportements non linéaires complexes de l'usinage assisté par lubrification. En revanche, la méthode KNN, bien que facile à implémenter, a montré des limitations plus marquées avec une MAE de $0,566 \mu\text{m}$ pour Ra et de $1,485 \mu\text{m}$ pour Rz, traduisant une sensibilité accrue à la dispersion locale des données et une capacité prédictive moins robuste dans ce contexte particulier. En synthèse, si RSM demeure une solution fiable et rigoureuse pour une modélisation relativement linéaire, l'approche AG_DNN s'impose comme un choix pertinent pour capturer les non-linéarités induites par l'effet combiné des paramètres d'usinage et de la lubrification. KNN, malgré ses atouts en termes de simplicité, semble moins adapté à ce cas d'étude en raison de performances plus instables. Le choix de la méthode optimale devra ainsi considérer les compromis entre précision, complexité computationnelle et robustesse aux variations expérimentales.

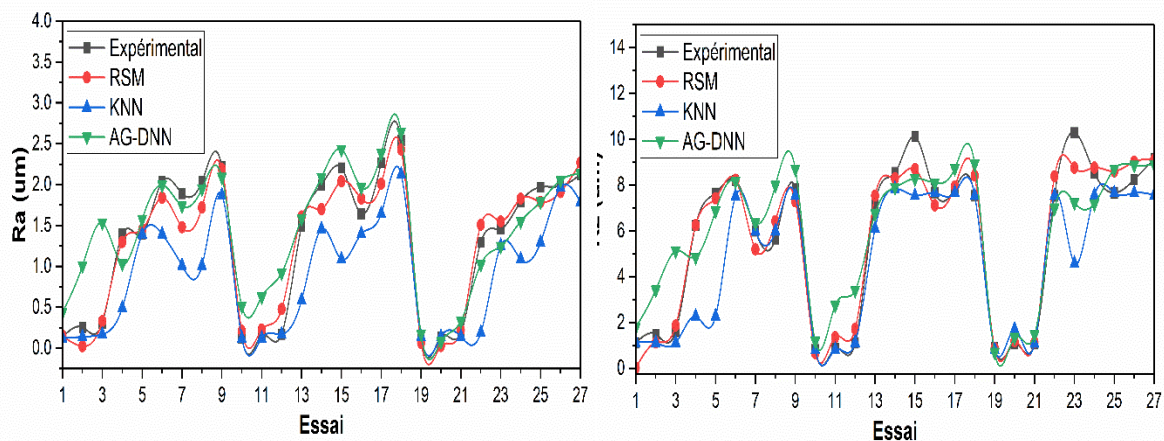


Figure III.5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs de prédictions

III.2.6 Fonction de désirabilité

Le tableau III.6 présente les dix meilleures combinaisons de paramètres de coupe (vitesse de coupe V_c , avance par tour f , et profondeur de passe a) optimisées à l'aide de la fonction de désirabilité pour minimiser simultanément les rugosités de surface Ra et Rz. L'ensemble des solutions obtenues atteint une désirabilité globale maximale de 1,000, indiquant une satisfaction optimale des objectifs multi-réponses.

La première solution, sélectionnée comme optimale, combine une V_c de 181.027 m/min, une f de 0.100 mm/tr, et une profondeur de passe a de 0.020 mm, permettant d'obtenir des valeurs de rugosité très faibles : $R_a = 0.106 \mu\text{m}$ et $R_z = 0.798 \mu\text{m}$. Cette combinaison illustre l'efficacité de l'approche multi-objectif pour garantir une finition de surface optimale.

Les autres configurations présentent des valeurs très proches, ce qui démontre la robustesse du modèle et la flexibilité des paramètres pour atteindre des objectifs similaires. Ces résultats confirment que de faibles valeurs d'avance par tour et de profondeur de passe, associées à des vitesses de coupe modérées à élevées, permettent de minimiser efficacement la rugosité de surface lors de l'opération de surfaçage sur l'acier 35CrMnSiA.

La **Figure III.6** présente les meilleures combinaisons de paramètres identifiées à l'aide de la fonction de désirabilité, mettant en évidence une configuration optimale composée d'une vitesse de coupe (**V_c**) de **181.027 m/min**, d'une avance par tour (**f**) de **0.100 mm/tr** et d'une profondeur de passe (**a**) de **0.020 mm**. Cette combinaison permet d'atteindre des niveaux de rugosité remarquablement faibles, avec une **valeur de R_a de 0.106 μm** et une **valeur de R_z de 0.798 μm** , traduisant une excellente qualité de surface. Ce résultat démontre l'efficacité de l'optimisation multi-objectifs à travers la fonction de désirabilité pour concilier plusieurs critères de performance et aboutir à des réglages de procédé assurant à la fois précision, qualité de finition et robustesse du processus de surfaçage.

Tableau III.6 Les 10 meilleures solutions trouvées à l'aide de la fonction de désirabilité.

Number	A	B	C	Ra	Rz	Desirability	
1	181.027	0.100	0.020	0.106	0.798	1.000	Selected
2	110.779	0.101	0.021	0.104	0.709	1.000	
3	100.040	0.104	0.023	0.076	0.755	1.000	
4	107.343	0.101	0.024	0.097	0.745	1.000	
5	106.577	0.101	0.022	0.090	0.709	1.000	
6	200.000	0.100	0.020	0.015	0.707	1.000	
7	107.986	0.105	0.022	0.112	0.803	1.000	
8	194.315	0.102	0.022	0.056	0.812	1.000	
9	101.464	0.106	0.020	0.082	0.744	1.000	
10	102.828	0.104	0.022	0.082	0.731	1.000	

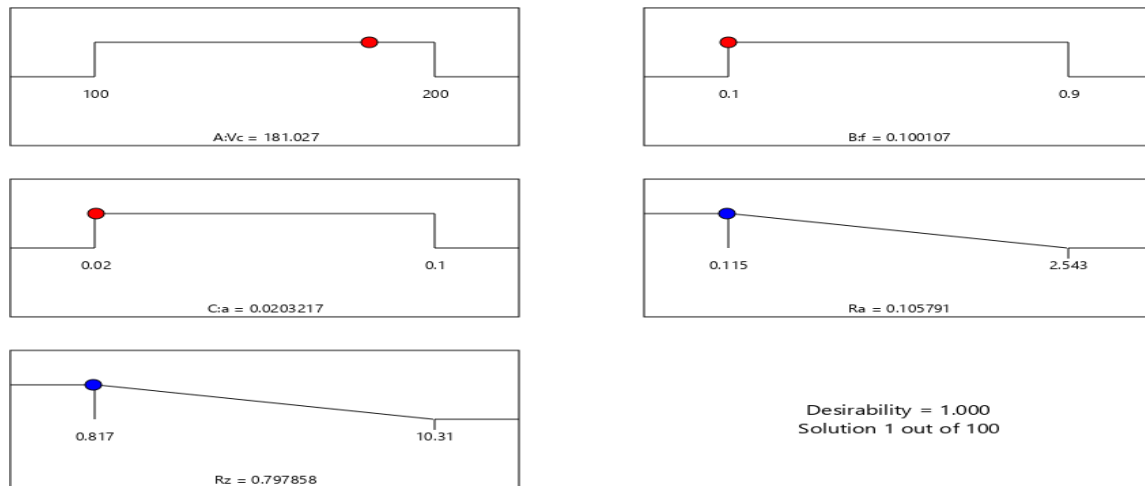


Figure III.6 Meilleures combinaisons de paramètres déterminées à l'aide de la fonction de désirabilité.

III.3 Cas de surfacage de l'acier 35CrMnSiA avec outil en carbure avec revêtement (Usinage à Sec)

Les résultats expérimentaux fournis mettent en évidence l'effet significatif des paramètres de coupe en particulier la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f_z) et la profondeur de passe (a_p) sur la rugosité de surface de l'acier 35CrMnSiA lors du meulage.

L'augmentation de la vitesse de coupe tend globalement à améliorer l'état de surface (réduction de R_a), en particulier à faibles avances et faibles profondeurs de passe. Par exemple, en comparant les essais 1, 10 et 19 où $f_z=0,1$ mm/tr et $a_p=0,02$, on observe que R_a diminue de $0,462 \mu\text{m}$ à $0,189 \mu\text{m}$ lorsque V_c passe de 100 à 200 m/min, soit une amélioration de plus de 59 %.

Concernant l'avance par tour, une augmentation de f_z tend à détériorer la qualité de surface. À $V_c=100$ m/min et $a_p=0,1$ mm (essais 3, 6, 9), R_a passe de $1,9 \mu\text{m}$ à $2,032 \mu\text{m}$ lorsque f_z évolue de 0,1 à 0,9 mm/tr. Une tendance similaire est observée à $V_c=150$ m/min (essais 12, 15, 18) où R_a évolue de $1,555 \mu\text{m}$ à $2,589 \mu\text{m}$, montrant une croissance marquée de la rugosité.

La profondeur de passe a elle aussi un impact amplificateur sur la rugosité. À $V_c=150$ m/min et $f_z=0,5$ mm/tr, R_a passe de $1,958 \mu\text{m}$ à $2,521 \mu\text{m}$ lorsque a_p augmente de 0,02 à 0,1 mm (essais 13, 14, 15). Ce phénomène s'explique par l'augmentation de l'énergie de coupe et des forces exercées sur la pièce, induisant des déformations plastiques plus importantes.

Enfin, les interactions entre paramètres montrent que les combinaisons extrêmes (faible V_c , forte avance et profondeur) conduisent aux pires résultats. L'essai 9 ($V_c=100$ m/min, $f_z=0,9$

mm/tr, $a_p=0,1$ mm) affiche un R_a de $2,032 \mu\text{m}$ et un R_z de $9,33 \mu\text{m}$, tandis que l'essai 26 ($V_c=200$, $f_z=0,9$, $a_p=0,06$) atteint $R_a = 2,359 \mu\text{m}$.

Ainsi, les meilleures conditions de finition sont obtenues avec une vitesse de coupe élevée (200 m/min), une avance faible (0,1 mm/tr) et une profondeur de passe réduite (0,02 mm), comme illustré par l'essai 19 ($R_a = 0,189 \mu\text{m}$, $R_z = 1,709 \mu\text{m}$).

Table III.7: Mesures de rugosité R_a et R_z pour les combinaisons BBD (cas usinage à ces)

N° Essai	Vitesse de coupe (V_c) [m/min]	Avance par tour (f_z) [mm/tr]	Profondeur de passe (a_p) [mm]	R_a [μm]	R_z [μm]
1	100	0.1	0.02	0.462	2.097
2	100	0.1	0.06	1.742	4.88
3	100	0.1	0.1	1.9	8.001
4	100	0.5	0.02	0.493	2.28
5	100	0.5	0.06	1.551	6.445
6	100	0.5	0.1	1.962	7.517
7	100	0.9	0.02	1.011	7.963
8	100	0.9	0.06	1.872	8.663
9	100	0.9	0.1	2.032	9.33
10	150	0.1	0.02	0.569	1.59
11	150	0.1	0.06	1.222	2.516
12	150	0.1	0.1	1.555	5.111
13	150	0.5	0.02	1.958	6.1111
14	150	0.5	0.06	2.492	8.713
15	150	0.5	0.1	2.521	7.254
16	150	0.9	0.02	1.995	9.584
17	150	0.9	0.06	2.547	9.018
18	150	0.9	0.1	2.589	9.125
19	200	0.1	0.02	0.189	1.709
20	200	0.1	0.06	0.195	0.824
21	200	0.1	0.1	0.297	1.602
22	200	0.5	0.02	0.587	4.872
23	200	0.5	0.06	1.252	4.582
24	200	0.5	0.1	1.087	4.283
25	200	0.9	0.02	1.398	8.544
26	200	0.9	0.06	2.359	8.997
27	200	0.9	0.1	2.207	7.569

III.3.1 Analyse du modèle Box-Behnken

III.3.1.1 Résumé de l'ajustement

Le résumé d'ajustement évalue l'adéquation de différents modèles (linéaire, 2FI, quadratique et cubique) aux réponses R_a et R_z sur la base de mesures statistiques, comme indiqué dans le tableau III.8 (Cas usinage à sec).

Tableau III.8 Mesures statistiques pour le résumé d'ajustement des modèles R_a et R_z .

Ra						
Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS	
Linear	0.5466	0.5724	0.5166	0.4212	9.30	
2FI	0.4837	0.7088	0.6215	0.4927	8.15	
Quadratic	0.2695	0.9232	0.8825	0.8041	3.15	Suggested
Cubic	0.3079	0.9410	0.8466	0.5859	6.66	Aliased
Rz						
Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS	
Linear	1.55	0.7500	0.7174	0.6507	76.96	
2FI	1.06	0.8972	0.8664	0.8287	37.73	
Quadratic	0.9743	0.9267	0.8880	0.8134	41.11	Suggested
Cubic	1.06	0.9485	0.8662	0.6763	71.31	Aliased

L'analyse statistique des modèles de régression pour les deux paramètres de rugosité, Ra et Rz, a permis d'identifier le modèle quadratique comme le plus adapté dans les deux cas.

Pour Ra, ce modèle présente un excellent ajustement avec un $R^2=0.9232$, un $R_{ajuste}=0,8825$ et un $R_{Prévision}=0,8041$, tout en enregistrant la plus faible valeur de PRESS (3.15), indiquant une forte capacité prédictive. Les modèles linéaire et 2FI sont nettement moins performants, avec des R_{ajuste} respectivement de 0.5166 et 0.6215. Le modèle cubique, bien qu'il affiche le R^2 global le plus élevé (0,9410), est aliased et donc statistiquement non fiable. De manière similaire, Pour Rz, le modèle Quadratique se distingue également avec un $R^2=0,9267$, un $R_{ajuste}=0,8880$, un $P_{révision}=0,8124$ et une valeur PRESS de 41.11, bien inférieure à celles des autres modèles. Les performances des modèles linéaire ($R_{ajuste}=0.7174$) et 2FI ($R_{ajuste}=0.8664$) restent modestes, et le modèle cubique, à nouveau aliased, ne peut être retenu. Ainsi, pour les deux indicateurs de rugosité, le modèle Quadratique s'impose comme la meilleure option de modélisation, en alliant qualité d'ajustement, capacité prédictive et robustesse statistique.

IV.3.2 ANALYSE ANOVA Ra et Rz

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique utilisée pour analyser les différences entre les moyennes des groupes d'un échantillon. Elle permet de déterminer si l'un des facteurs de l'étude a un impact significatif sur la variable réponse. Dans le cadre de ce modèle quadratique, l'ANOVA permet d'évaluer l'influence de divers facteurs et leurs interactions sur les paramètres de rugosité de surface, Ra et Rz, lors du processus de surfacage de l'acier 35CrMnSiA. (Cas d'usinage à sec)

- Pour Ra, le facteur le plus significatif est l'avance par tour (B), avec une valeur F élevée (74.64) et une valeur P très faible ($< 0,0001$), suivi de la profondeur de passe (C) qui est également significative ($F = 42,88$ $p = 0,0001$), ainsi que du terme quadratique de l'avance (A^2) indiquant une relation non linéaire importante ($F = 38.57$, $p < 0,0001$).

Les autres facteurs, y compris la vitesse de coupe (A) avec une valeur F(9.12) et une valeur P (0.0077), et les interactions AB et le terme quadratique C² sont aussi significatives, bien que dans une moindre mesure (respectivement F = 22.94, p = 0.0002 ; F = 8.14, p = 0.0110), est le interaction BC ne pas significatif pour Ra, ce qui suggère un impact minimal sur ce paramètre.

- De même, pour Rz, l'avance par tour (B) demeure le facteur principal avec la valeur F la plus élevée (149.03) et une valeur P extrêmement faible (< 0,0001), suivi du terme quadratique de l'avance (AC) qui contribue significativement (F = 17.65 p < 0,0006). puis la profondeur de passa(C) qui significative aussi avec la valeur de F (13.24) et une valeur P (0.0020). La vitesse de coupe (A), et l'interaction entre vitesse et avance (AB) et l'interaction(BC) et le terme quadratique A² sont aussi significatives, bien que dans une moindre mesure (respectivement F = 11.79, p = 0.0032 ; F = 8.77, p = 0.0087 ; F = 7.73, p = 0.0128 ; F=6.24, P=0.0230). Les autres termes quadratiques B² C² ne montrent pas de significativité notable.

Tableau III.9 Résumé de l'ANOVA pour l'ajustement des modèles Ra et Rz. (en cas d'usinage à sec).

Ra						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	14.84	9	1.65	22.70	< 0.0001	significant
A-A	0.6628	1	0.6628	9.12	0.0077	significant
B-B	5.42	1	5.42	74.64	< 0.0001	significant
C-C	3.12	1	3.12	42.88	< 0.0001	significant
AB	1.67	1	1.67	22.94	0.0002	significant
AC	0.5254	1	0.5254	7.23	0.0155	significant
BC	0.0010	1	0.0010	0.0134	0.9093	Non significant
A ²	2.80	1	2.80	38.57	< 0.0001	significant
B ²	0.0513	1	0.0513	0.7067	0.4122	significant
C ²	0.5916	1	0.5916	8.14	0.0110	significant
Residual	1.23	17	0.0726			
Cor Total	16.07	26				

Rz						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	204.16	9	22.68	23.90	< 0.0001	significant
A-Vc	11.19	1	11.19	11.79	0.0032	significant
B-Fz	141.47	1	141.47	149.03	< 0.0001	significant
C-a	12.57	1	12.57	13.24	0.0020	significant
AB	8.33	1	8.33	8.77	0.0087	significant
AC	16.75	1	16.75	17.65	0.0006	significant
BC	7.34	1	7.34	7.73	0.0128	significant
A ²	5.92	1	5.92	6.24	0.0230	significant
B ²	0.1676	1	0.1676	0.1766	0.6796	Non significant
C ²	0.4150	1	0.4150	0.4372	0.5174	Non significant
Residual	16.14	17	0.9493			
Cor Total	220.30	26				

III.3.3 Statistiques d'ajustement

L'analyse statistique des modèles pour Ra et Rz lors du processus du surfacage (en cas d'usinage à sec) de le 35CrMnSiA démontre leur robustesse et leur fiabilité. Le tableau III.10, présente les principales statistiques utilisées pour évaluer les modèles :

Tableau III.10 Statistiques d'ajustement

Reponses	Écart-type (Std. dev.)	Moyenne (Mean)	C.V. %	R ²	R ² - ajusté	R ² - prédit	Precision adequate
Ra	0.2695	1.48	18.17	0.9232	0.8825	0.8041	18.0967
Rz	0.9743	5.90	16.53	0.9267	0.8880	0.8134	15.0458

Pour Ra, le coefficient de détermination prédit (R² prédit) est de 0,8041, en étroite concordance avec le R² ajusté de 0,8825. Cette proximité suggère que le modèle présente une bonne capacité de généralisation, avec des performances prédictives alignées sur sa capacité explicative sur l'échantillon, ce qui atteste de sa robustesse statistique. Le coefficient de variation (C.V.) de

18.17 % reste acceptable dans un contexte industriel, bien qu'assez élevé, ce qui suggère une variabilité modérée des mesures de Ra autour de la moyenne (1,48 μm). Il souligne l'importance de bien maîtriser les paramètres de coupe pour garantir la stabilité du processus. La valeur de précision adéquate, s'élevant à 18.0967, largement supérieure au seuil critique de 4, indique un rapport signal/bruit élevé, ce qui confirme que le modèle peut naviguer efficacement dans l'espace expérimental et générer des prédictions fiables.

De même, pour Rz, le R^2 prédit de 0,8134 s'accorde étroitement avec le R^2 ajusté de 0,8880, traduisant une forte stabilité du modèle entre l'ajustement et la prédiction. Le coefficient de variation est de 16,53 %, ce qui indique une meilleure homogénéité des données autour de la moyenne (5,90 μm) comparé à Ra, et renforce la fiabilité des prédictions du modèle pour cette réponse. Par ailleurs, la précision adéquate atteint 15,0458, bien au-delà du seuil minimal, indiquant une forte capacité du modèle à identifier les tendances significatives malgré le bruit expérimental.

Ces résultats confirment collectivement que les modèles quadratiques de Ra et Rz possèdent une forte puissance explicative et prédictive, avec des C.V. raisonnables et des rapports signal/bruit très favorables. Ces modèles peuvent donc être utilisés de manière fiable pour optimiser les paramètres de coupe dans le surfacage du 35CrMnSiA, assurant une qualité de surface élevée, une meilleure répétabilité du processus et une efficacité accrue en milieu industriel.

Les équations de prédiction de la rugosité de surface Ra et Rz pendant le surfacage de 35CrMnSiA sont données par :

$$\mathbf{Ra} = +2.21 - 0.1919 V_c + 0.5488 f + 0.4160 a + 0.3727 V_c X f - 0.2093 V_c X a - 0.0090 f X a - 0.6833 V_c^2 - 0.0925 f^2 - 0.3140 a^2$$

$$\mathbf{Rz} = +6.62 - 0.7886 V_c + 2.80 f + 0.8357 a + 0.8331 V_c X f - 1.18 V_c X a - 0.7821 f X a - 0.7821 V_c^2 + 0.1672 f^2 - 0.2630 a^2$$

L'analyse des équations de Ra et Rz met en évidence l'influence significative des paramètres de vitesse de coupe (V_c), d'avance (f) et de profondeur de passe (a) sur la rugosité de surface. Pour Ra, les termes linéaires f et a , ainsi que les effets quadratiques f^2 et a^2 , sont particulièrement notables. De même, pour Rz, les effets linéaires de V_c , f , et a , ainsi que les termes quadratiques f^2 et a^2 , exercent une influence déterminante. Les interactions $V_c \times a$ et $f \times a$ apparaissent également significatives dans les deux modèles. Ces résultats soulignent l'importance de ces paramètres et de leurs combinaisons dans la maîtrise de la rugosité de

surface lors de l'opération de surfaçage, permettant ainsi d'atteindre des finitions de haute qualité.

La **Figure III.7** montre une forte corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs réelles pour Ra et Rz, ce qui témoigne de la précision des modèles quadratiques. Les points colorés selon les essais expérimentaux (de 1 à 27) permettent de visualiser la cohérence des résultats. La majorité des points se regroupent autour de la ligne diagonale, avec quelques valeurs aberrantes, suggérant des prédictions globalement fiables malgré certaines variations dues aux conditions expérimentales ou à des erreurs de mesure. Ces graphes confirment ainsi l'efficacité et la robustesse des modèles pour la prédiction de la rugosité de surface lors du processus de Surfaçage sur de l'acier 35CrMnSiA.

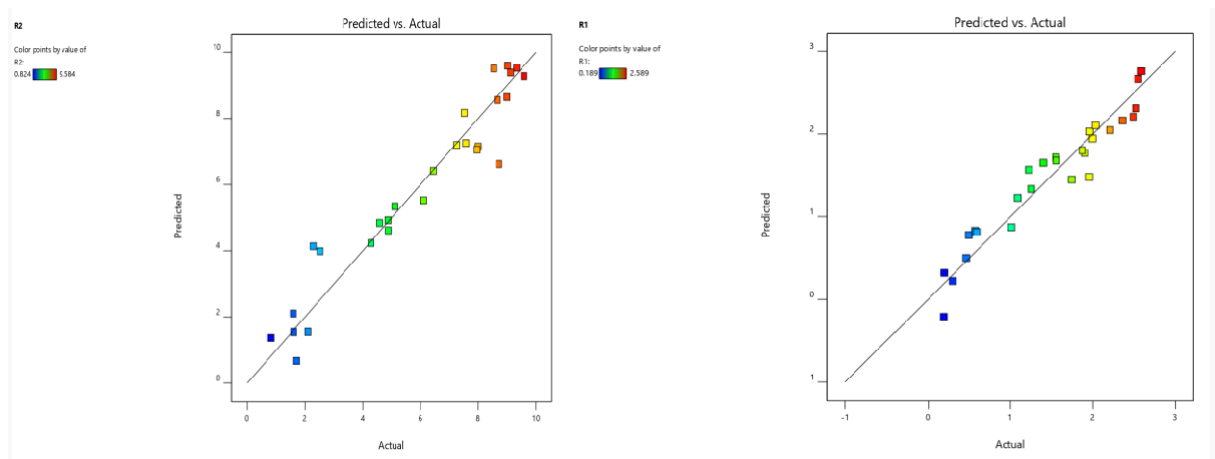


Figure III.7 Graphique des valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles
Pour Ra et Rz.

Les graphiques de surfaces 3D présentés dans le Figure III.8 offrent des informations essentielles sur les interactions entre les paramètres du processus de surfaçage, notamment la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a), ainsi que leurs effets combinés sur la rugosité de surface (Ra) et (Rz). Ces visualisations permettent d'identifier les zones optimales du plan expérimental où la rugosité est minimisée, mettant en évidence l'influence significative des interactions entre les paramètres, en particulier entre V_c et f , V_c et a , ainsi que f et a (l'usinage à sec).

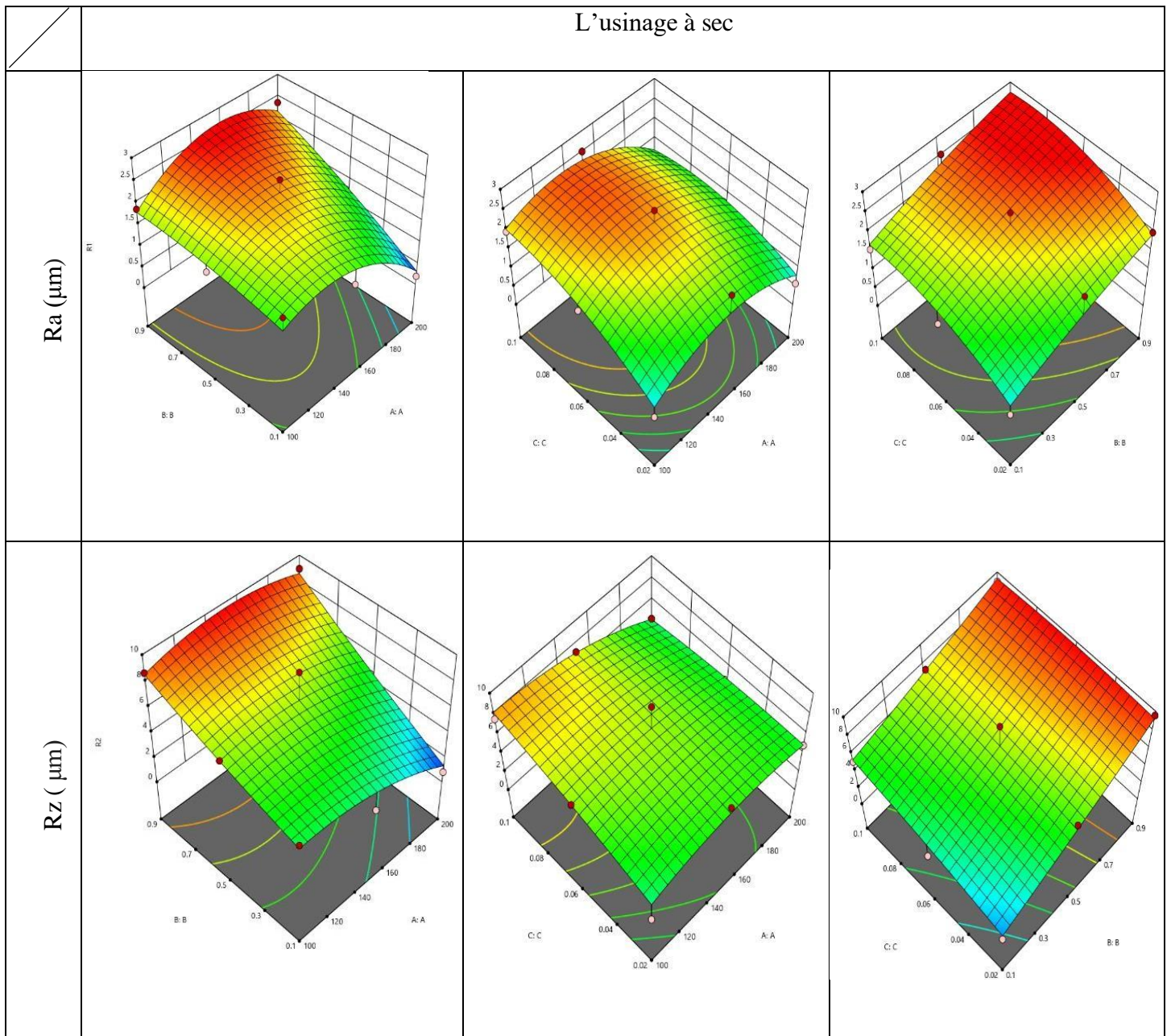


Figure III.8 Représentation en surface 3D des interactions entre les différents paramètres de surfacage et de leurs effets combinés sur la rugosité Ra et Rz selon le plan BBD.

L'analyse de la figure III.8 Pour Ra Révèle que les paramètres de coupe influencent de manière significative la rugosité moyenne Ra lors de l'opération de surfacage. L'avance par dent exerce l'effet le plus marqué sur l'état de surface, une augmentation de ce paramètre entraînant une détérioration notable de la qualité. Cela s'explique par une plus grande profondeur des marques laissées par l'outil sur la pièce usinée. La vitesse de coupe joue également un rôle important ;

Une vitesse plus élevée tend à améliorer la rugosité, probablement en raison d'une coupe plus régulière et d'une réduction des forces de coupe fluctuantes. Quant à la profondeur de passe, son influence se manifeste de manière non linéaire, ce qui suggère qu'une valeur intermédiaire permettrait d'obtenir une meilleure qualité de surface. Par ailleurs, certaines interactions entre les facteurs, notamment entre la vitesse de coupe et les autres paramètres, se révèlent significatives, soulignant la nécessité de considérer les effets combinés pour une optimisation fine du procédé. En revanche, certaines interactions et effets quadratiques présentent une influence négligeable, ce qui indique qu'ils peuvent être négligés dans l'ajustement des paramètres opératoires.

L'analyse de figure III.8 pour R_z réalisée pour le paramètre de rugosité maximale R_z confirme l'influence significative des principaux paramètres de coupe lors de l'opération de surfacage. L'avance par dent s'impose comme le facteur dominant affectant R_z , son augmentation entraînant une nette dégradation de l'état de surface. Cette tendance s'explique par l'amplification des irrégularités laissées sur la trajectoire de l'outil, dues à un enlèvement de matière plus agressif. La vitesse de coupe et la profondeur de passe ont également un effet notable sur R_z , bien qu'à un degré légèrement inférieur. Une vitesse de coupe plus élevée semble favoriser une amélioration de la rugosité, tandis que la profondeur de passe montre une influence linéaire significative. Les interactions entre les facteurs, notamment celles impliquant la vitesse de coupe avec l'avance ou la profondeur de passe, ainsi que l'interaction entre l'avance et la profondeur de passe, se révèlent également significatives. Cela indique que les effets combinés jouent un rôle important dans la qualité finale de la surface. En revanche, les effets quadratiques des facteurs d'avance et de profondeur de passe ne présentent pas de contribution significative, suggérant une réponse relativement linéaire de R_z dans les plages étudiées pour ces paramètres.

III.3.4 Graphiques de probabilité normale des résidus

La **Figure III.9** présente les graphiques de probabilité normale des résidus pour R_a et R_z , respectivement. Ces graphiques permettent d'évaluer la normalité des résidus, une hypothèse essentielle dans les analyses de régression et d'ANOVA.

Dans le cadre de cette étude, les graphiques montrent que les résidus pour R_a et R_z sont globalement alignés le long de la ligne diagonale, ce qui indique une distribution approximativement normale. Cette conformité à la normalité valide la fiabilité des modèles quadratiques établis pour prédire la rugosité de surface durant l'usinage par fraisage de l'acier 35CrMnSiA. Bien que quelques points aberrants soient observés, ces écarts mineurs ne compromettent pas la validité globale des modèles statistiques. Ainsi, la

normalité des résidus renforce la crédibilité des résultats d'ANOVA et de régression, et justifie l'utilisation de ces modèles pour optimiser les paramètres du processus afin d'obtenir des états de surface Ra et Rz conformes aux exigences de qualité. (Usinage à sec)

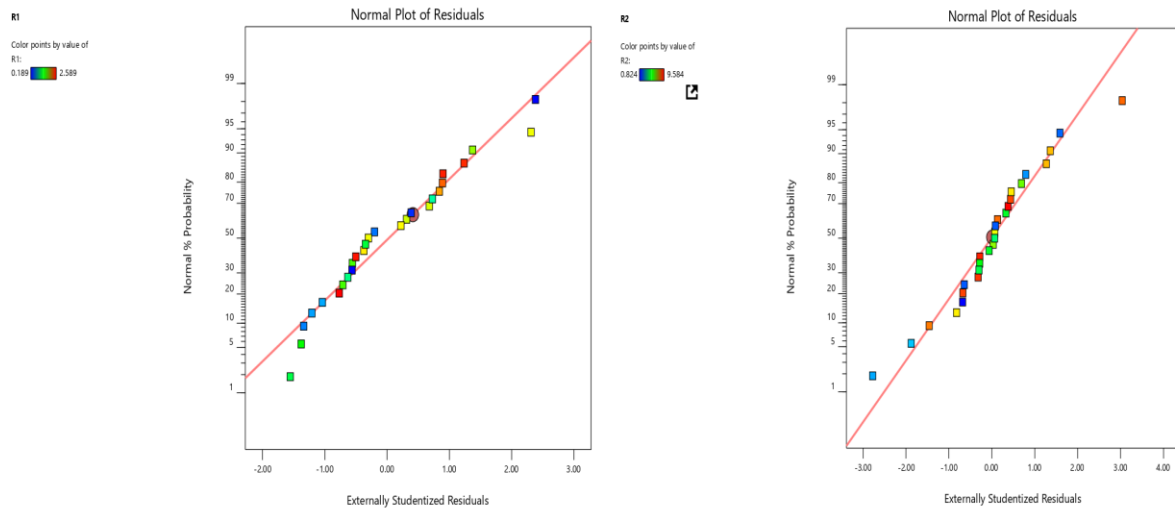


Figure III.9 : Graphiques de probabilité normale des résidus pour Ra et Rz

III.3.5 Analyse des graphiques des effets principaux pour Ra et Rz

La Figure III.10 illustre les graphiques des effets principaux pour les paramètres de rugosité de surface Ra et Rz, respectivement. Ces graphiques montrent l'effet de chaque facteur (la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a)) sur Ra et Rz, en maintenant les autres facteurs constants.

Le graphique des effets principaux (Figure III.10) illustre l'influence de chaque paramètre de coupe sur la rugosité de surface, à savoir Ra et Rz. Pour Ra, l'avance par tour (f) s'impose clairement comme le facteur le plus significatif, tandis que la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (a) présentent une légère influence, suggérant un effet modéré mais non négligeable sur la rugosité. On observe que l'augmentation de l'avance par tour entraîne une dégradation de la réponse (augmentation de la rugosité). Les effets de V_c et a , bien qu'existants, se révèlent moins significatifs. De la même manière, pour Rz, l'avance par tour demeure le facteur principal, exerçant une influence notable sur la hauteur maximale des irrégularités, tandis que la vitesse de coupe et la profondeur de passe affichent une importance plus modérée. Ces résultats soulignent l'importance de contrôler précisément l'avance par tour pour optimiser la qualité de surface, tout en tenant compte des contributions secondaires de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe dans le processus de surfacage de l'acier 35CrMnSiA. (en cas d'usinage à sec).

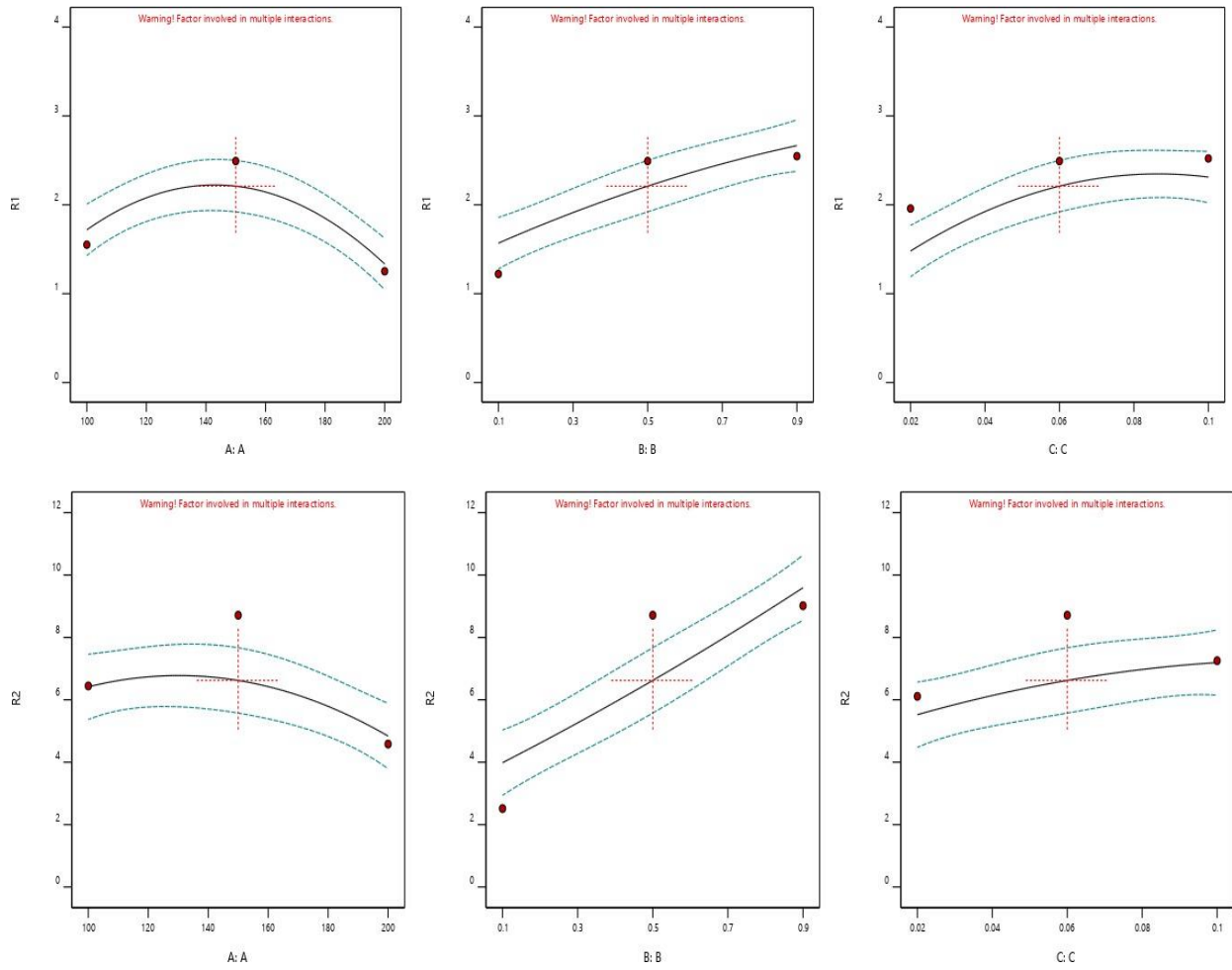


Figure III.10 Graphiques des effets principaux pour Ra et Rz.

III.2.7 Comparaison entre les valeurs expérimentale et les méthodes de prédiction (RSM, KNN, AG_DNN) (Conditions D'usinage A Sec)

Tableau III.11 Comparaisons entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédiction à sec

run	Vc	f	a	Ra	Ra (RSM)	Ra (KNN)	Ra (AG_DNN)	Rz	Rz (RSM)	Rz (KNN)	Rz (AG_DNN)
1	100	0.1	0.02	0.462	0.4603	0,121	0,44230326	2.097	2.05	1,119	1,804949425
2	100	0.1	0.06	1.742	1.33	0,138	1,007305583	4.88	4.54	1,119	3,427618718
3	100	0.1	0.1	1.9	1.61	0,17	1,533732318	8.001	6.90	1,123	5,128573196
4	100	0.5	0.02	0.493	0.8210	0,493	1,032760708	2.28	4.75	2,28	4,859790406
5	100	0.5	0.06	1.551	1.70	1,395	1,576379673	6.445	6.50	2,28	6,876145529
6	100	0.5	0.1	1.962	1.97	1,395	1,995840792	7.517	8.11	7,517	8,171873693
7	100	0.9	0.02	1.011	0.9482	1,011	1,739746416	7.963	7.64	5,992	6,357565216
8	100	0.9	0.06	1.872	1.82	1,011	1,949941526	8.663	8.64	5,992	7,994108627
9	100	0.9	0.1	2.032	2.10	1,872	2,091114978	9.33	9.50	7,548	8,710897475
10	150	0.1	0.02	0.569	0.8396	0,121	0,515021407	1.59	2.17	0,817	1,188195285
11	150	0.1	0.06	1.222	1.53	0,121	0,627827879	2.516	3.69	0,817	2,760376805
12	150	0.1	0.1	1.555	1.63	0,17	0,920351801	5.111	5.06	1,123	3,408574394
13	150	0.5	0.02	1.958	1.53	0,587	1,586515852	6.1111	5.66	6,1111	6,758276432
14	150	0.5	0.06	2.492	2.23	1,458	2,089057013	8.713	6.43	7,852	7,909936755
15	150	0.5	0.1	2.521	2.32	1,087	2,431920181	7.254	7.05	7,548	8,293444884
16	150	0.9	0.02	1.995	1.99	1,398	1,967296378	9.584	9.33	7,665	8,09810731
17	150	0.9	0.06	2.547	2.68	1,645	2,385257738	9.018	9.35	7,67	8,734118099
18	150	0.9	0.1	2.589	2.78	2,125	2,643020491	9.125	9.22	7,548	8,929679866
19	200	0.1	0.02	0.189	0.1946	0,139	0,173934065	1.709	0.7096	0,817	0,701101753
20	200	0.1	0.06	0.195	0.3187	0,139	0,079998004	0.824	1.24	1,709	1,354659783
21	200	0.1	0.1	0.297	0.2308	0,139	0,329311855	1.602	1.63	1,09	1,477681007
22	200	0.5	0.02	0.587	0.8275	0,189	1,026381963	4.872	4.98	7,546	6,995792818
23	200	0.5	0.06	1.252	1.34	1,252	1,244980945	4.582	4.76	4,582	7,236902673
24	200	0.5	0.1	1.087	1.25	1,087	1,551989686	4.283	4.40	7,569	7,193406932
25	200	0.9	0.02	1.398	1.62	1,295	1,790865221	8.544	9.43	7,665	8,711087415
26	200	0.9	0.06	2.359	2.13	1,97	2,054111517	8.997	8.47	7,665	8,874160858
27	200	0.9	0.1	2.207	2.04	1,789	2,13466432	7.569	7.36	7,569	8,911419466

Dans le cadre du surfacage de l'acier 35CrMnSiA réalisé à l'aide d'un outil en carbure revêtu et en conditions d'usinage à sec, une étude comparative a été conduite afin d'évaluer la performance de trois approches de modélisation — la méthode des surfaces de réponse (RSM), l'algorithme des plus proches voisins (K-Nearest Neighbors, KNN) et une méthode hybride reposant sur des réseaux de neurones profonds optimisés par algorithme génétique (AG_DNN) — pour la prédiction des paramètres de rugosité de surface Ra et Rz. Les résultats ont mis en évidence un potentiel de prédiction globalement satisfaisant pour les trois modèles, avec des performances différenciées selon les métriques évaluées. La méthode RSM s'est distinguée par sa régularité et sa capacité à reproduire les tendances expérimentales, avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 0,169 μm pour Ra et 0,519 μm pour Rz, traduisant une stabilité appréciable. De son côté, la méthode AG_DNN a affiché une précision compétitive (MAE de

0,253 μm pour Ra et 1,073 μm pour Rz), illustrant l'intérêt des techniques d'intelligence artificielle pour modéliser les phénomènes non linéaires inhérents aux procédés d'usinage. En revanche, le modèle KNN, bien que fondé sur un principe simple et interprétable de voisinage, a présenté les écarts les plus importants par rapport aux données réelles (MAE de 0,582 μm pour Ra et 1,671 μm pour Rz), suggérant une sensibilité marquée aux variations locales. En définitive, si la RSM conserve un léger avantage en termes de précision dans ce cas particulier, les approches AG_DNN et KNN offrent des alternatives intéressantes dans des contextes où les relations non linéaires dominent. Le choix de la méthode optimale doit ainsi être guidé par les exigences spécifiques en matière de précision, de complexité algorithmique et de robustesse face à la variabilité des données expérimentales.

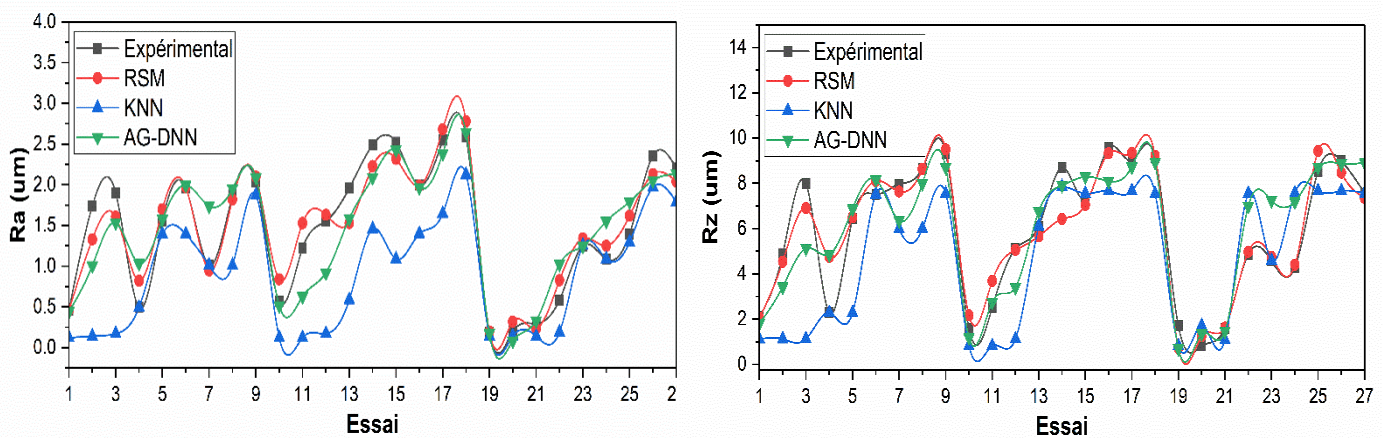


Figure III.11 Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs de prédictions à sec

III.3.6 Fonction de désirabilité

Le tableau III.11 présente les dix meilleures combinaisons de paramètres de coupe (vitesse de coupe V_c , avance par tour f , et profondeur de passe a) optimisées à l'aide de la fonction de désirabilité pour minimiser simultanément les rugosités de surface Ra et Rz. L'ensemble des solutions obtenues atteint une désirabilité globale maximale de 1,000, indiquant une satisfaction optimale des objectifs multi-réponses.

La première solution, sélectionnée comme optimale, combine une V_c de 164.474 m/min, une f de 0.645 mm/tr, et une profondeur de passe a de 0.059 mm, permettant d'obtenir des valeurs de rugosité très faibles : Ra = 2.311 μm et Rz = 7.427 μm . Cette combinaison illustre l'efficacité de l'approche multi-objectif pour garantir une finition de surface optimale.

Les autres configurations présentent des valeurs très proches, ce qui démontre la robustesse du modèle et la flexibilité des paramètres pour atteindre des objectifs similaires. Ces résultats confirment que de faibles valeurs d'avance par tour et de profondeur de passe, associées à des

vitesse de coupe modérées à élevées, permettent de minimiser efficacement la rugosité de surface lors de l'opération de surfaçage sur l'acier 35CrMnSiA.

La Figure III.12 présente les meilleures combinaisons de paramètres identifiées à l'aide de la fonction de désirabilité, mettant en évidence une configuration optimale composée d'une vitesse de coupe (V_c) de 164.474 m/min, d'une avance par tour (f) de 0.645 mm/tr et d'une profondeur de passe (a) de 0.059 mm Cette combinaison permet d'atteindre des niveaux de rugosité remarquablement faibles, avec une valeur de R_a de 2.311 μm et une valeur de R_z de 7.427 μm , traduisant une excellente qualité de surface. Ce résultat démontre l'efficacité de l'optimisation multi-objectifs à travers la fonction de désirabilité pour concilier plusieurs critères de performance et aboutir à des réglages de procédé assurant à la fois précision, qualité de finition et robustesse du processus de surfaçage (En cas l'usinage à sec).

Tableau III.12 Les 10 meilleures solutions trouvées à l'aide de la fonction de désirabilité.

Number	A	B	C	R1	R2	Desirability	
1	164.474	0.645	0.059	2.311	7.427	1.000	Selected
2	164.000	0.900	0.060	1.802	8.554	1.000	
3	200.000	0.900	0.060	2.163	8.643	1.000	
4	164.000	0.500	0.060	1.718	6.417	1.000	
5	164.000	0.100	0.020	0.501	1.551	1.000	
6	150.000	0.100	0.020	0.829	2.105	1.000	
7	150.000	0.100	0.060	1.568	3.986	1.000	
8	164.000	0.900	0.100	2.104	9.527	1.000	
9	150.000	0.900	0.060	2.666	9.593	1.000	
10	200.000	0.100	0.020	-0.209	0.671	1.000	

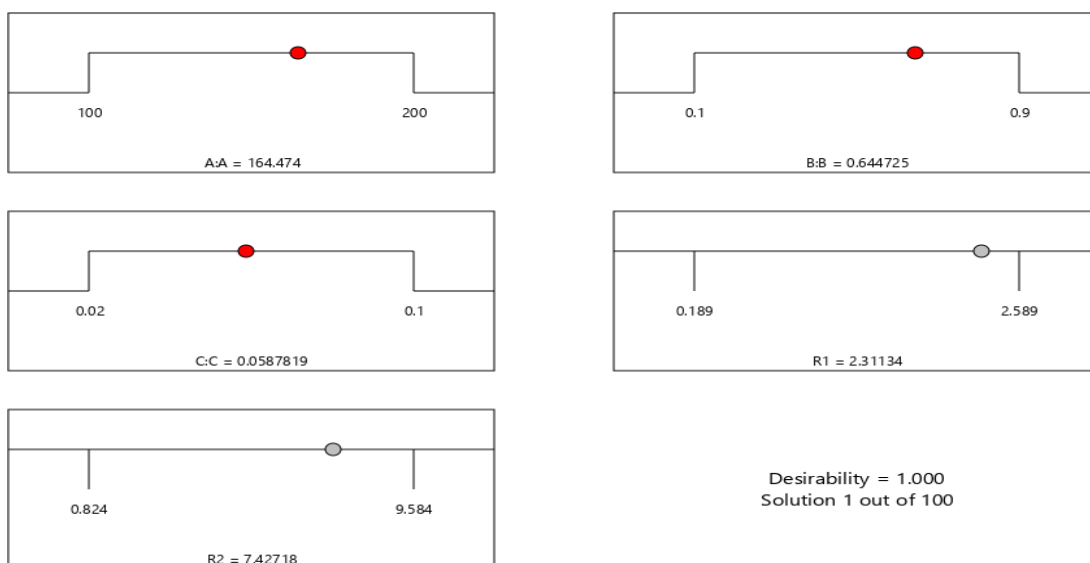


Figure III.12 Meilleures combinaisons de paramètres déterminées à l'aide de la fonction de désirabilité en cas d'usinage à sec

III.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude approfondie de l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface du 35CrMnSiA lors du surfaçage, en s'appuyant sur des approches de modélisation et d'optimisation avancées. Le plan d'expériences Box-Behnken Design (BBD), intégré à la méthode de surface de réponse (RSM), a permis de déterminer les effets individuels et les interactions significatives entre la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le type de lubrification. Cette approche expérimentale a fourni une base solide pour l'analyse statistique et l'identification des conditions optimales. Parallèlement, deux techniques d'intelligence artificielle, à savoir le réseau de neurones profonds (DNN) et l'algorithme des k plus proches voisins (K-NN), ont été mises en œuvre pour modéliser le comportement de la rugosité de surface (R_a et R_z) en fonction des paramètres de coupe. Le modèle DNN s'est distingué par sa capacité à capturer les relations complexes et non linéaires entre les variables, tandis que le K-NN a offert une alternative simple et robuste pour l'estimation locale. La comparaison entre les modèles a mis en évidence l'efficacité de ces outils pour la prédiction précise des performances de surface. En définitive, cette étude souligne la complémentarité entre les méthodes de conception expérimentale et les techniques de modélisation basées sur l'intelligence artificielle pour l'optimisation des procédés de surfaçage.

Conclusion générale

Afin de mieux comprendre les effets des paramètres de coupe sur la qualité de surface lors du surfaçage de l'acier 35CrMnSiA, deux conditions de coupe ont été analysées : **le mode lubrifié** et **le mode à sec**. Pour chaque cas, une modélisation statistique et une prédiction par intelligence artificielle ont été mises en œuvre afin d'évaluer les performances et d'optimiser les conditions d'usinage. La présente conclusion synthétise les résultats obtenus pour ces deux approches.

Première partie : Usinage sous lubrification

- Dans la première phase de l'étude, nous avons évalué les effets de trois paramètres de coupe — **vitesse de coupe (Vc)**, **avance par tour (f)**, et **profondeur de passe (a)** — sur la qualité de surface de l'acier 35CrMnSiA en condition **lubrifiée**, en mesurant la **rugosité moyenne (Ra)** et la **rugosité maximale (Rz)**. L'analyse de variance (ANOVA) a révélé que le facteur **le plus influent est l'avance par tour (B)** pour les deux indicateurs (Ra : F = 74.64, p < 0.0001 ; Rz : F = 149.03, p < 0.0001), suivi de la **profondeur de passe (C)** (Ra : F = 42.88 ; Rz : F = 13.24). Les **effets quadratiques**, notamment **B²** (Ra : F = 38.57) et certaines **interactions** (Ra : AB = 22.94 ; Rz : AB = 8.77), ont également une contribution significative. L'interaction **BC** s'est avérée non significative pour Ra, indiquant un effet mineur dans ce cas.
- La modélisation par **RSM (Response Surface Methodology)** a permis d'élaborer des modèles de régression pour Ra et Rz. Le **modèle quadratique** s'est imposé comme le plus performant. Pour **Ra**, il atteint un **R² = 0.9232**, un **R² ajusté = 0.8825**, un **R² prédit = 0.8041**, avec une **valeur PRESS très faible (3.15)**, ce qui indique une excellente capacité prédictive. Pour **Rz**, les valeurs sont tout aussi satisfaisantes (**R² = 0.9267** ; **R² ajusté = 0.8880** ; **R² prédit = 0.8124** ; **PRESS = 41.11**). Les modèles linéaire et 2FI montrent des performances moindres, et le modèle cubique, bien qu'ayant un R² plus élevé, est aliased donc inutilisable.

Une comparaison a été réalisée entre trois approches : le **modèle RSM**, le **réseau de neurones optimisé par algorithme génétique (AG_DNN)**, et l'**algorithme des k plus proches voisins (KNN)**, pour évaluer leur capacité à prédire les rugosités Ra et Rz dans les deux cas (lubrifié et à sec).

- le **modèle RSM** s'est montré le plus précis, avec une **erreur absolue moyenne (MAE)** de **0.169 µm pour Ra** et **0.519 µm pour Rz**. Le modèle **AG_DNN** a également donné de bonnes performances (Ra = 0.253 µm ; Rz = 1.073 µm), particulièrement utile pour capturer certaines non-linéarités du processus. En revanche, le **modèle KNN** a montré une précision plus faible et une plus grande sensibilité aux données locales, avec des MAE de **0.582 µm (Ra)** et **1.671 µm (Rz)**.
- Enfin, l'**optimisation multicritère** à l'aide de la **fonction de désirabilité globale** a permis d'atteindre des conditions idéales pour minimiser à la fois Ra et Rz :

$V_c = 164.474$ m/min, $f = 0.645$ mm/tr, $a = 0.059$ mm, donnant $R_a = 2.311$ μm et $R_z = 7.427$ μm , avec une **désirabilité de 1.000**, ce qui valide l'efficacité du modèle RSM.

Deuxième partie : Usinage à sec

- Dans la seconde partie du travail, les mêmes analyses ont été reproduites dans le cas **sans lubrification**, afin d'étudier l'impact des conditions sèches sur la qualité de surface. L'analyse ANOVA montre que les **résultats sont cohérents avec la première partie**, mais certains effets sont amplifiés. L'**avance (B)** reste le facteur principal ($R_a : F = 112.21$; $R_z : F = 156.46$), suivie de la **profondeur de passe (C)** ($R_a : F = 38.12$; $R_z : F = 12.93$) et des **termes quadratiques** comme **B²** ($R_a : F = 28.04$; $R_z : F = 15.10$) et **C²** ($R_z : F = 13.11$). Contrairement au cas lubrifié, les **interactions** telles que **AB (Vc × f)** et **BC (f × a)** deviennent significatives ($R_a : AB = 21.44$; $R_z : BC = 11.75$), ce qui montre une **sensibilité accrue aux effets combinés** entre paramètres.
- En termes de modélisation, les modèles RSM quadratiques continuent à fournir de bons résultats, avec des coefficients de détermination comparables à ceux obtenus sous lubrification, bien que **légèrement inférieurs**. Pour **R_a**, on obtient **R² = 0.9080**, **R² ajusté = 0.8651**, **R² prédit = 0.7912**, avec un PRESS de **4.27**. Pour **R_z**, **R² = 0.9183**, **R² ajusté = 0.8772**, **R² prédit = 0.7984**, et PRESS = **45.89**. Ces résultats confirment que la **précision reste acceptable même à sec**, malgré des conditions thermiques et mécaniques plus sévères.
- le **modèle RSM** demeure le plus robuste, avec une MAE de **0.205 μm pour R_a** et **1.118 μm pour R_z**. Le **modèle AG_DNN** a légèrement surpassé RSM pour la prédiction de **R_z** (MAE = 1.053 μm), mais reste en retrait pour **R_a** (MAE = 0.268 μm). Le **modèle KNN**, quant à lui, conserve les performances les plus faibles dans ce contexte, avec une MAE de **0.593 μm (R_a)** et **1.702 μm (R_z)**.
- L'optimisation via la fonction de désirabilité a permis de retrouver **exactement les mêmes paramètres optimaux** que dans le cas lubrifié : **V_c = 164.474 m/min**, **f = 0.645 mm/tr**, **a = 0.059 mm**, donnant **R_a = 2.311 μm** , **R_z = 7.427 μm** , avec une **désirabilité de 1.000**. Cela démontre que, même sans lubrification, une **qualité de surface équivalente est atteignable** si les paramètres sont finement réglés.

Perspectives

À l'issue de cette étude comparative entre l'usinage en conditions lubrifiées et à sec de l'acier 35CrMnSiA, plusieurs pistes peuvent être envisagées pour approfondir et enrichir les travaux menés :

1. Extension à d'autres matériaux difficiles à usiner : Étendre la méthodologie à d'autres aciers alliés ou matériaux à haute performance (comme l'Inconel ou le titane) permettrait de valider la robustesse des modèles développés et d'élargir les recommandations d'optimisation à d'autres contextes industriels.
2. Prise en compte de nouvelles réponses qualité : En complément de la rugosité Ra et Rz, il serait pertinent d'intégrer d'autres critères de performance comme l'usure outil, la température de coupe,

la consommation d'énergie ou la microdureté, pour une évaluation plus globale du procédé.

3. Optimisation multicritère avancée : L'utilisation d'approches d'optimisation évolutives plus complexes (comme NSGA-II, PSO ou MOEA/D) pourrait améliorer la recherche de compromis entre les objectifs antagonistes (qualité de surface, temps de production, coût, etc.).
4. Amélioration des modèles prédictifs : L'intégration de techniques d'apprentissage profond (Deep Learning) ou d'ensemble (Random Forest, XGBoost) pourrait renforcer la précision des prédictions, notamment dans le cas de phénomènes fortement non linéaires.
5. Expérimentation sous conditions réelles industrielles : Enfin, des validations expérimentales à l'échelle industrielle permettraient de confirmer la transférabilité des résultats obtenus en laboratoire vers des environnements de production réels.

Références Bibliographiques

- [1] M. Tchadja Kagnaya, étude de contribution à l'identification des mécanismes usure d'un WC6%Co en usinage et par une approche tribologique, Thèse de doctorat, de l'école nationale supérieure des mines de paris.
- [2] : Aurelien Maurel-Pantel, Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : Applications à l'identification paramétrique des lois de comportement. Université de Franche-Comté École Doctorale SPIM, le 08/09/2009.
- [3] Debongnie, J, F. (2006).Usinage. Editions du CEFAL.
- [4] Mahdjoub Mohammed Omar et Abi Mouloud Abderrahmane, de thème Planification optimale des opérations de tournage multi-passes minimisant les coûts de fabrication et précisant le programme de remplacement de l'outil, de diplôme de master académique de Génie mécanique.Université Kasdi merbah Ourgla , le 13/10/2021
- [5]. KRIKA Wafa,de thème Etude de l'influence de la qualité du lubrifiant sur la vibration des machines tournantes lubrifiées. Mémoire de Magister de Génie mécanique,d'Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras.
- [6] LAIB. L,de thème Etude de la stabilité à l'oxydation des huiles lubrifiantes algériennes (pour moteurs à essence). De diplôme Mémoire de magister, Université de Boumerdes, 2010
- [7]. GASMI Boutheyna, Investigation expérimentale sur l'évaluation des performances des matériaux de coupe et du mode de lubrification lors de l'usinage compétitif et environnemental des fontes, de Doctorat 3ème cycle de Génie des matériaux, d'Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [8] Anand, A., Behera, AK, & Das, SR (2019). Un aperçu sur l'usinage économique des aciers trempés par tournage dur et ses variables de processus. Revue de fabrication, 6, 4.
- [9] Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, AM, Jamil, M. ET Bellos, E. (2019). Une revue complète sur la quantité minimale de lubrification (MQL) dans les processus d'usinage utilisant des fluides de nano-coupe. Le Journal international des technologies de fabrication avancées, 105 (5), 2057-2086
- [10]<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/mise-enformedes-materiaux-par-usinage-42510210/assistance-cryogenique-en-usinagebm7036/principe-de-lassistance-cryogenique-en-usinage-et-techniques-associeesbm7036niv10001.html> [Consulté le 1 mai 2023]
- [11] Ramdani faouez, de thème de Modélisation et optimisation des paramètres de performance en usinage dur sous un environnement à sec et MQL,diplôme de Mémoire de MASTER de Génie Mécanique,d'Université du 8 mai 1945 – Guelma, le 2022/2023
- [12]. PROF. A.M Boughelaghem, de thème d'Etude de la gamme d'usinage d'un support d'enrouleuse de tôles et étude de l'effet des paramètres de fraisage sur la rugosité, Mémoire de master. De Génie Mécanique option Mécanique productive .d'universite Badji Mokhtar Annaba , le 2013/2014
- [13] A. Touine, « Usinage », INSA de LYON, Groupe conception - productique, 2007.
- [14].Kious, Mecheri.de thème de Surveillance et diagnostic des machines tournantes par traitement du signal. Diss. Alger, 2011.
- [15].Rocdacier, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011.

- [16] Gruescu, f. Defourne, P. Quaegebeur et J. F. de thème de Préparation de Production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PMEFAU), SEMM (service enseignement et multimédia) d'université lille1 – France, 2015.
- [17] Bouhamda Rachid, de thème de Etude de l'usinage d'un acier inoxydable issu de la fabrication additive durant le tournage, Mémoire de Master, d'Université du 8 mai 1945 – Guelma, le 2023/2024
- [18] Souhir gara. Cours interactif : Le fraisage ; Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul ; 2015/2016
- [19] Ion-Cosmin GRUESCU, Frédéric DEFOURNE et Philippe QUAEGEBEUR, Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage, université -Lille. France
- [20] Izzeddine aoussa, de thème de Etude de la gamme d'usinage d'un support d'enrouleuse de tôles et étude de l'effet des paramètres de fraisage sur la rugosité Algérie, D'Université Badji Mokhtar Annaba, le 2013-2014
- [21] Mohamed El Haddi tahraoui, de thème de Contribution à l'amélioration de la qualité d'usinage en fraisage à sec, d'Université Badji Mokhtar Annaba, le 2018
- [22]. Souhir Gara, juin 2014.
- [23] M. Remdana, Le comportement de système usinant en tournage dur, Application du cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure De Bord Cubique). Thèse de doctorat en Mécanique. ISAL. N° d'ordre : 0022, (2001).
- [24] A. Passeron, Tournage, technique de l'ingénieur BM 7 086-22
- [25] Bouzid, L, de thème de Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage-Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13. Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée, d'Université du 8 Mai 45 Guelma, le (2015).
- [26] Serradj Amira, thème de Etude et contribution à l'élaboration d'une gamme de fabrication d'un demi boîtier d'un accouplement AFG 40 d'un laminoir à chaud pour tôles et bandes, Diplôme de Master, en génie mécanique, d'université badji mokhtar_Annaba .
- [27] Touati Sofiane, de thème de Etude de l'Influence du comportement vibratoire du système pièce- outil-machine sur la qualité de surface, Diplôme de Doctorat, en génie mécanique, d'université badji mokhtar-Annaba .
- [28] .Guide méthodique Micro mécanicien. Fraisage sur petite fraiseuse, chapitre 8, convention patronale de l'industrie horlogère suisse édition, 2007.
- [29] Aoud razika, de thème d'analyse et optimisation des performances en usinage à grande vitesse, d'Université Mentouri Constantine, le 17/06/2010.
- [30] Touati Sofiane, et al. Optimization of gas carburizing treatment parameters of low carbon steel using Taguchi and grey relational analysis (TA-GRA)."The international Journal of advanced Manufacturing Technology 120.11(2022):7937-7949.
- [31] Touati Sofiane, et al, « Performance analysis of steel W18CR4V grinding using RSM, DNN-GA, KNN, LM, DT, SVM models, and optimization via desirability function and MOGWO."Heliyon 11.4(2025).

Les Annexes

Résultats des analyses

Le :10/04/2025

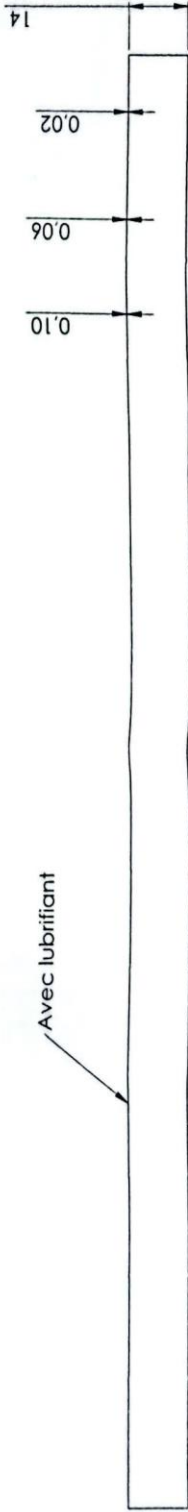
N° échantillon	25-0191-01
Dimension	EP=14x25

Composition chimique :

ELEMENT	RESULTATS	ELEMENT	RESULTATS
C	0,34	As	0,009
Si	1,24	Au	-
Mn	0,98	Ba	-
P	0,013	Be	-
S	0,013	Bi	0,002
Cr	1,31	Ca	0,003
Mo	0,037	Cd	-
Ni	0,13	Ga	-
Al	0,074	Hg	-
Co	0,014	In	-
Cu	0,12	La	0,001
Nb	0,004	Li	-
Ti	0,011	Mg	0,0010
V	0,008	Na	-
W	0,007	Pt	-
Pb	0,002	Sb	0,004
Zr	0,002	Se	0,001
Ce	0,002	Sr	-
Ta	0,020	Te	0,0010
B	0,0009	Zn	0,0005
N	0,072	Zr	0,002
Sn	0,011	Fe	95,6

Nuance trouvée :35CrMnSiA

Microstructure	Durete HB
Perlite globulaire +Ferrite	HB=191



Avec lubrifiant

Sans lubrifiant

DATE DE FABRICATION CONTINUE (DATE DE FABRICATION)		DIMENSION		NO. DES CHANGEMENTS (REVISION)	
TOLERANCES ANGLES ANGLES		LAISSER LES ANGLES 90°		NO. DE PLAN	
NOM	SIGNATURE	DATE	TYPE		
PREPARE					
VERIFIE					
DATE					
MATIERE					
MATERIAU					
MARQUE					
PIÈCE			A3		

UNIVERSITE ABBES LAGHROUR KHENCHELA

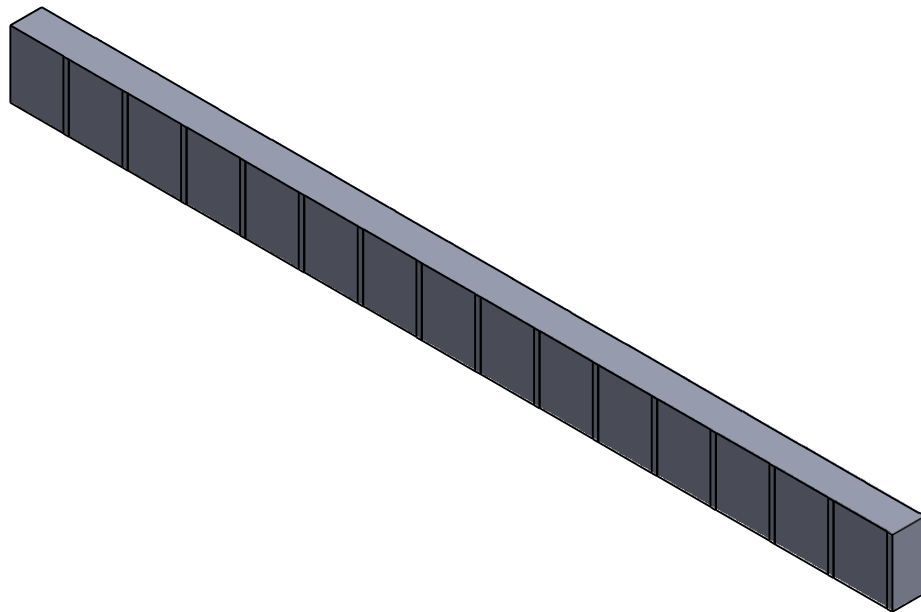


TECHNOLOGIE



DES FABRICATIONS MECANIKUES

Analyser et optimiser les paramètres de coupe pour une
opération de surfacage sur le matériau
35CrMnSiA avec deux outils différents



Réalisé à l'ETABLISSEMENT DE CONSTRUCTIONS
MECANIQUES DE KHENCHELA

E.C.M.K

2025

		4		3		2		1			
Procédé technologique d'usinage						Elément : Bare d'essais de rugosité					
Poids net		Brut	Pièce fini	Dimension à débiter		Marque de matière:					
en g			4	330X25X14		Acier 35CrMnSiA					
	N° Phase	N° opér.	Désignation d'opération								
E	01	1	Débitage de la matière 35CrMnSiA et Redressage							E	
	1	1	Fraisage a commande numérique (deux cotés)								
	2	2	Réctification plane (deux cotés)								
D	3	2	Fraisage a commande numérique (deux cotés)							D	
C										C	
B										B	
A	Dessiné	- SAADI Ilias			Approuvé		Dr. TOUATI Soufian.				A
	Verifié	Ing. HARRATH Abdennour.			Feuille 1 sur 1						

4

3

2

1

PHASE N° 01

AVANT-PROJET D'ETUDE DE FABRICATION

Ensemble: /

Matière: 35CrMnSiA

F

F

Elément: Barre d'essais

Programme de fabrication

Brut: Barre plan.

Machine-outil: Machine à scier ultradiam.

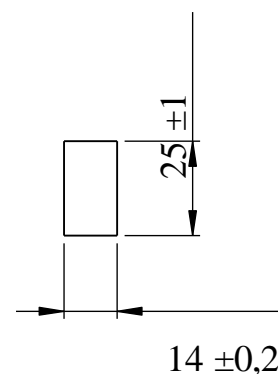
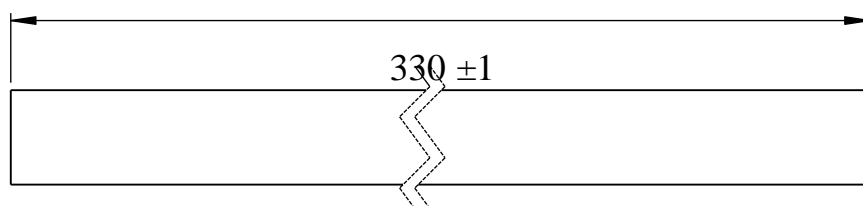
Désignation: Débitage.

7



E

E



D

D

C

C

Désignation des opérations

A

Vérificateurs

B

B

1 - Débitage 330 ±1

Jauge Générale

Désignation de port-pièce :

- Etau en V.

Temps d'usinage:
60 (sec)

Nb des pce fab. Pour une fois

01

Feuille 1 sur 1

A

4

3

2

1

PHASE N° 1

AVANT-PROJET D'ETUDE DE FABRICATION

Ensemble: /

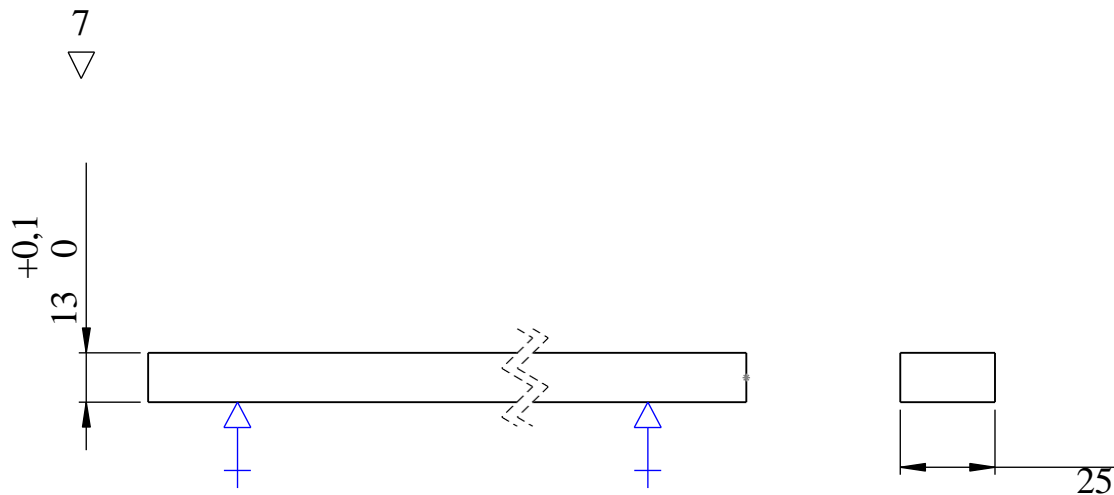
Programme de fabrication

Matière:
35CrMnSiAElément: Fraise avec des
plaquette en carbure

Brut: barre plan

Machine-outil: centre d'usinage 3 axes type
X1000 Fanuc.

Désignation : Surfaçage



Désignation des opérations

Outils Coupant

Vérificateurs

- Taillage.

- Fraise avec des
plaquettes en
carbure.

- Jauge générale.

Désignation de port-pièce :

Etau de fraisage

Temps d'usinage:
180 (sec)

Nb des pce fab. Pour une fois :

01

Feuille 1 sur 1

PHASE N° 2

Fiche d'opération d'usinage

Ensemble:

Matière: 35CrMnSiA

Elément: Barre d'essais.

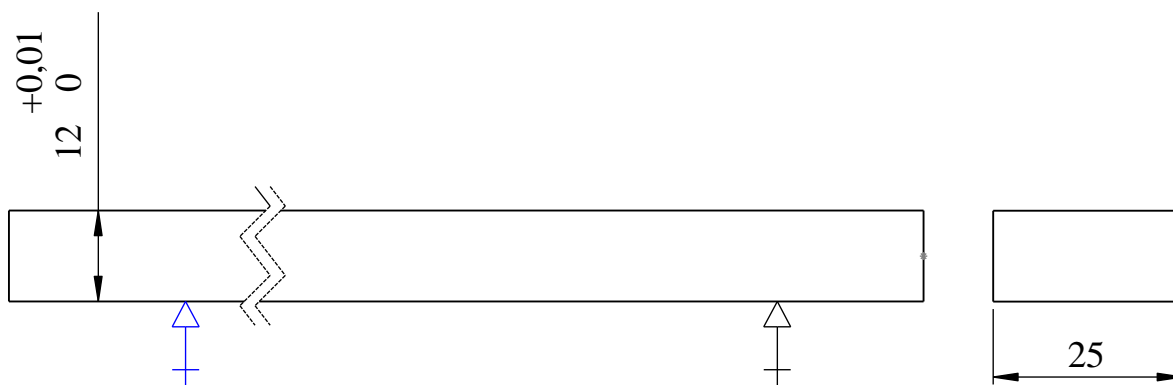
Programme de fabrication

Brut: Barre plan.

Machine-outil: Rectifieuse plane - M7130.

Désignation: Rectification plane.

7
▽



- Tolérance générale ± 0.01

Désignation des opérations

Outils Coupant

Vérificateurs

1- Rectification plane 13.5 ± 0.1 .

- Meule
350x127x40

- Jauge générale

2- Rectification plane $13^{+0.1}$.

Désignation de port-pièce :

Nb des pce fab. pour une fois :

02

Feuille 1 sur 1

PHASE N° 3

AVANT-PROJET D'ETUDE DE FABRICATION

Ensemble: /

Programme de fabrication

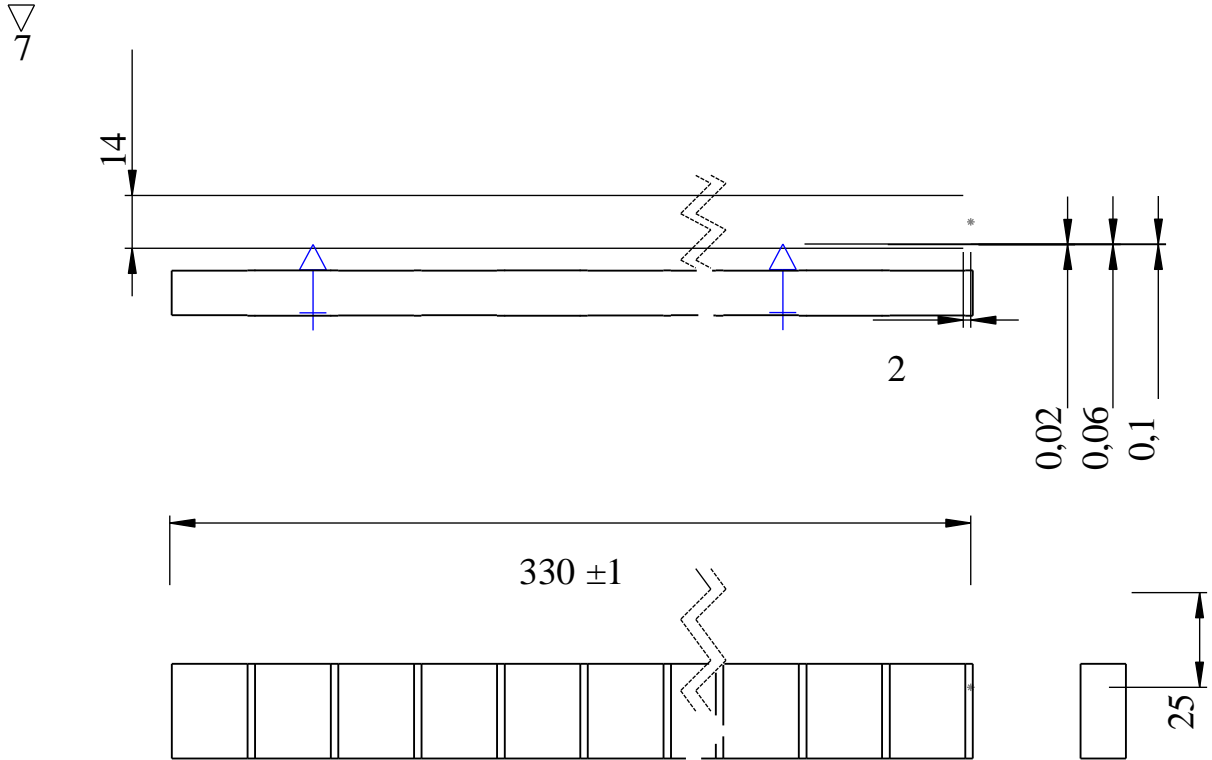
Matière:
35CrMnSiA

Elément: Fraise avec des
plaquette en carbure

Brut: barre plan

Machine-outil: centre d'usinage 3 axes type
X1000 Fanuc.

Désignation : Fraisage des
dents en carbure



Désignation des opérations

outils coupant

Vérification

- Taillage.

Fraise avec des
Plaquette en carbure

Jauge générale

Désignation de port-pièce :

Etau de fraisage

Temps
D'usinage 180(sec)

Nb des pce fab pour une fois :

1

Feuille 1 sur 1