

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



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : TEBBAL Raniya

=====

***Optimisation du tournage d'un acier faiblement allié à
l'aide de méthodes MCDM couplées à l'approche
Taguchi***

=====

Sous la Direction de :

Dr. KADDECHE Mounia

Année universitaire 2023/2024



Dédicaces



J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :

- ❖ A l'être le plus cher de ma vie, mon père *Badis* qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui, que dieu le garde et le protège ;
- ❖ A ma mère *Mounira* qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde ;
- ❖ A mes sœurs *Selma* et *Amina* ;
- ❖ A mes frères *Abderrahmane* et *Yahia* ;
- ❖ A tout la famille *TEBBAL* ;
- ❖ A tous mes collègues.



TEBBAL Raniya





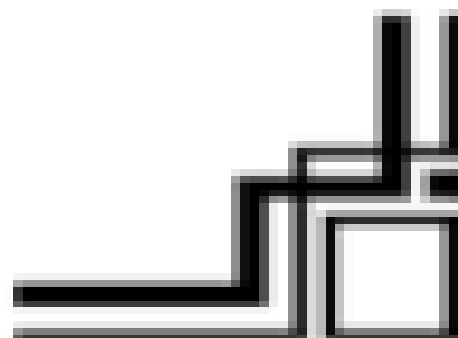

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre *DIEU*, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail. Ce travail a été réalisé au laboratoire de mécanique et structures (LMS) de l'université de Guelma 08 Mai 1945 sous la direction de Madame la professeur *KADDECHE Mounia*, qui a fait preuve d'une grande disponibilité à mon égard tout au long de la période que j'ai passé au labo, pour m'avoir intégré rapidement au sein du laboratoire, pour la confiance qu'il m'a accordé dès mon arrivée, pour son esprit scientifique qui restera une grande source d'inspiration. Je remercie aussi, *Dr. HADJELA Salah* mon Co-Encadreur pour son aide précieuse.

J'adresse également mes chaleureux remerciements et ma gratitude à Monsieur *BELHADI Salim*, Docteur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, pour m'avoir aidé.

J'adresse mes remerciements à tous les membres, les professeurs et les techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) de l'université de Guelma département Génie Mécanique.

Enfin, je remercie tout le personnel technique et administratif du département de Génie Mécanique. Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à l'aboutissement de ce travail.



Résumé :

L'objectif de la fabrication moderne est de garantir la qualité tout en tout en réduisant les coûts de production et en augmentant la productivité. Dans ce contexte, la sélection des matériaux de coupe est importante pour augmenter la productivité en raison de leur large gamme d'application. Dans ce travail, lors de l'usinage de l'acier faiblement allié AISI 4140, une étude expérimentale sera présentée afin de trouver les conditions de coupe qui permettent d'obtenir des valeurs Ra, Vb, et MRR minimales et maximales. Différentes méthodes d'optimisation sont utilisées. Le plan L₉ de Taguchi sera utilisé pour organiser neuf (09) expériences. La vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) seront les paramètres d'entrée, avec quatre (04) niveaux pour chaque paramètre de coupe.

Mots clés :

Usinage de l'AISI 4140, conception de Taguchi, Multi-objective optimisation.

Abstract:

The aim of modern manufacturing is to guarantee quality while reducing production costs and increasing productivity. In this context, the selection of cutting materials is important to increase productivity due to their wide range of application. In this work, when machining AISI 4140 alloy steel, an experimental study will be presented in order to find cutting conditions that achieve minimum and maximum Ra, Vb, and MRR values. Various optimization methods are used. Taguchi's L₉ design will be used to organize nine (09) experiments. Cutting speed (V_c), feed rate (f) and depth of cut (ap) will be the input parameters, with four (04) levels for each cutting parameter.

Key words:

AISI 4140 machining, Taguchi design, Multi-objective optimization.

NOMENCLATURE

Vc	Vitesse de coupe (m/min).
ap	Profondeur de passe (mm).
f	Avance par tour (mm/tr).
HRC	Rockwell hardness.
HB	Dureté Brinell.
rε	Rayon de bec de l'outil (mm).
Xr	Angle de direction principal (degré °).
α	Angle de dépouille principale (degré °).
γ	Angle d'attaque (degré °).
λ	Angle de direction principale (degré °).
Ra	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
Rt	Rugosité totale (μm).
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
Vb	Usure en dépouille (mm).
MRR	Le taux d'enlèvement de matière (Débit de coupeau) (cm ³ /min).
TOPSIS	Technique De Préférence D'ordre Par Similitude Avec La Solution Idéale
GRA	Analyse Relationnelle Grise.

INDEX DES FIGURES

Chapitre I : Revue bibliographique sur l'optimisation du tournage des aciers

Figure I.1 : Opération de tournage.....	3
Figure I.2 : Evolution de la diverse ténacité en fonction de la dureté.....	4
Figure I.3 : Différentes d'usure des outils.....	7
Figure I.4 : Les phénomènes physico-chimiques à l'interface outil-copeau.....	8
Figure I.5 : Usure par abrasion.....	9
Figure I.6 : Usure par adhésion.....	9
Figure I.7 : Cratère formé par usure par diffusion sur une plaquette carbure.....	10
Figure I.8 : Caractéristique du profil.....	12
Figure I.9 : Profil de surface tournée.....	12
Figure I.10 : Les critères de la rugosité.....	14

Chapitre II : Etat d'art

Figure II.1 : graphiques des effets principaux pour la rugosité de la surface (μm).....	18
Figure II.2 : Variation de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage.....	19
Figure II.3 : Variation de l'usure des cratères en fonction du temps d'usinage.....	20
Figure II.4 : Image SEM de (a) $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et (b) $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ après 45 min de tournage	21
Figure II.5 : Images SEM de (a) $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et (b) $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ après 75 min de tournage	22
Figure II.6 : R_a en fonction du temps de coupe pendant le tournage d'échantillons de pièces en utilisant (a) des plaquettes $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et (b) des plaquettes $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ en variant les vitesses de coupe.....	23
Figure II.7 : R_a en fonction du temps de coupe pendant le tournage d'échantillons de pièces en utilisant (a) des plaquettes $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et (b) des plaquettes $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ en faisant varier les vitesses d'avance.....	23
Figure II.8 : Comparaison entre les plaquettes T1, T2 sur l'usure en dépouille à $V_c = 350$ tr/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm après 5 min de tournage.....	24

Figure II.9 : Morphologies d'usure pour les différentes plaquettes de coupe utilisées.....	24
Figure II.10 : Micrographie SEM de l'usure en dépouille de la plaquette GC2015 à $V_c = 350$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,5$ mm, $t = 5$ min et environnement sec.....	25
Figure II.11 : Micrographie SEM de l'usure en dépouille de la plaquette GC4215 à $V_c = 350$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,5$ mm, $t = 5$ min et environnement sec.....	25
Figure II.12 : Micrographie SEM de l'usure en dépouille de la plaquette GC1015 à $V_c = 350$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,5$ mm, $t = 5$ min et environnement sec.....	26
Figure II.13 : Graphique des effets principaux pour la rugosité de la surface.....	27
Figure II.14 : Effet de la longueur de coupe sur le V_{bmax}	28
Figure II.15 : Image de l'usure de l'outil à différentes longueurs de coupe.....	29
Figure II.16 : Effet des paramètres de coupe sur la rugosité de la surface.....	30
Figure II.17 : Graphique des effets principaux pour les plaquettes en carbure et les plaquettes CBN.....	31
Figure II.18 : Tracé de la surface en 3D pour la rugosité de la surface.....	32
Figure II.19 : Micrographie de l'usure des flancs (temps = 2 min).....	33
Figure II.20 : Résultats expérimentaux du plan L_9	34
Figure II.21 : Graphique des effets principaux du S/N de V_b , F_z , R_a et MRR.....	35
Figure II.22 : Graphique des effets principaux du coefficient de proximité 'Ci'.....	36
Figure II.23 : Morphologie des copeaux produits par les essais 2, 5 et 8.....	36

Chapitre III : Partie expérimentale

Figure III.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.....	42
Figure III.2 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais de rugosité.....	43
Figure III.3 : La plaquette de coupe.....	44
Figure III.4 : Le porte outil.....	45
Figure III.5 : Rugosimètre 2D.....	46
Figure III.6 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais d'usure.....	46
Figure III.7 : VISUAL 250 pour la mesure de l'usure.....	47

Chapitre IV : Traitement des résultats

Figure IV.1 : Diagramme des effets principaux sur la rugosité moyenne arithmétique (Ra).....	49
Figure IV.2 : Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour la rugosité moyenne arithmétique (Ra).....	50
Figure IV.3 : Diagrammes de surface 3D de la rugosité moyenne arithmétique (Ra) en fonction de (V_c, f et $a_p = 0.4$).....	51
Figure IV.4 : Diagramme des effets principaux sur l'usure en dépouille (Vb).....	53
Figure IV.5 : Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales l'usure en dépouille (Vb).....	54
Figure IV.6 : Diagrammes de surface 3D de l'usure en dépouille (Vb) en fonction de (V_c, f et $a_p = 0.4$).....	55

INDEX DES TABLEAUX

Chapitre II : Etat d'art

Tableaux II.1 : Résultats expérimentaux pour la rugosité de la surface, l'usure des cratères et leurs illustrations.....	18
Tableaux II.2 : ANOVA pour la rugosité de surface.....	27
Tableaux II.3 : Facteurs d'entrée et leurs niveaux.....	37
Tableau II.4 : Analyse des relations grises pour la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière.....	37
Tableau II.5 : Comparaison des résultats prédits et expérimentaux en utilisant DFA et GRA.....	38

Chapitre III : Partie expérimentale

Tableaux III.1 : Compositions chimiques de l'acier faiblement allié AISI 4140.....	42
Tableaux III.2 : Plaquette de coupe utilisée.....	42
Tableaux III.3 : Désignation géométrique.....	42
Tableaux III.4 : Les dimensions de porte outil.....	43
Tableau III.5 : Plan d'essai expérimental.....	46

Chapitre IV : Traitement des résultats

Tableaux IV.1 : Résultats des essais.....	47
Tableaux IV.2 : L'analyse de variance ANOVA pour le critère de rugosité moyenne arithmétique (Ra).....	48
Tableaux IV.3 : L'analyse de variance ANOVA pour le critère de l'usure en dépouille (Vb)....	52
Tableaux IV.4 : Résultats des calculs après l'étape de la normalisation et la pondération.....	57
Tableaux IV.5 : Résultats des calculs de l'étape 3.....	58
Tableaux IV.6 : Tableau des résultats de la méthode TOPSIS.....	58
Tableaux IV.7 : Résultats des calculs après de la normalisation pondération.....	61
Tableau IV.8 : Tableau des résultats de la méthode GRA.....	61

Sommaire

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

Chapitre I

Revue bibliographique sur l'optimisation du tournage des aciers

I.1 Introduction.....	2
I.2 L'usinabilité des matériaux.....	2
I.2.1 Les critères d'usinabilité.....	2
I.2.2 Le procédé de tournage.....	2
I.2.3 Matériaux de coupe.....	3
I.2.3.1 Les caractéristiques principales du matériau de fabrication des outils.....	3
➤ Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs).....	4
➤ Carbure.....	4
➤ Cermets.....	4
➤ Céramique.....	5
➤ Nitrure de Bore Cubique (CBN).....	5
➤ Diamant.....	5
I.2.3.2 Les paramètres de coupe.....	5
I.2.3.2.1 vitesse de coupe (V_c) (m/min).....	5
I.2.3.2.2 Avance (f).....	6
I.2.3.2.3 Profondeur de passe (a_p).....	6
I.2.4 Etude des mécanismes d'usure et de rupture des outils coupants.....	7
I.2.4.1 Différentes formes d'usure des outils.....	7
a) Usure en dépouille.....	7
b) Usure en cratère.....	7
c) L'écaillage.....	7
d) Déformation plastique.....	7
I.2.4.2. Phénomènes physico-chimiques à l'interface outil-copeau.....	8
a) Usure par effritement.....	8
b) Usure par abrasion.....	9
c) Usure par adhésion.....	9

d) Usure par diffusion.....	9
e) Usure par déformation plastique.....	10
f) Arête rapporté.....	10
I.2.4.3 Formation de la couche blanche.....	10
I.2.4.4 Diffusion à la surface des outils en carbure.....	10
I.2.5 Etat de surface des pièces mécanique.....	11
I.2.5.1 Généralités sur les états de surface.....	11
I.2.5.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques.....	11
1) Surface géométrique.....	11
2) Surface spécifiée.....	11
3) Surface mesurée.....	11
4) Surface réelle.....	11
I.2.5.3 État de surface en tournage.....	12
I.2.5.4 Caractéristique de la surface.....	13
➤ Paramètre caractéristiques des états de surface.....	13
1) Rugosité moyenne arithmétique R_a	13
2) Rugosité moyenne profondeurs R_z	13
3) Rugosité moyenne profondeurs R_z	13
4) Profondeur maximale des vallées R_v	13
5) Rugosité maximale R_t	13
I.2.6 Débit de copeau enlevé (MRR).....	14
I.3 Optimisation.....	14
I.3.1 Les méthodes d'optimisation.....	15
✓ Les méthodes MCDM.....	15
a. Méthode TOPSIS.....	15
b. Méthode GRA.....	15
✓ Taguchi.....	16

Chapitre II : Etat d'art

II.1 Introduction.....	17
II.2 Revue bibliographique.....	17
II.3 Conclusion.....	39

Chapitre III : partie expérimentale

III.1 Introduction.....	40
III.2 Matériels utilisés.....	40
III.2.1 Machine-outil.....	40
III.2.2 Matériaux de l'éprouvette utilisée.....	41
III.2.3 Plaquette de coupe.....	42
III.2.4 Porte outil.....	42
III.2.5 Appareillage de mesures utilisées.....	43
III.2.4.1 Rugosimètre en 2D.....	43
III.2.5.2 Mesure de l'usure.....	44
III.3 Planification des expériences.....	45
III.3.1 Introduction.....	45
III.3.2 Plan d'expérience.....	45
III.4 Conclusion.....	46

Chapitre IV : Traitement des résultats

IV.1 Introduction.....	47
IV.2 Résultats des expériences.....	47
IV.3 Analyse des résultats expérimentaux et discussions.....	48
IV.3.1 Analyse de la rugosité moyenne arithmétique (Ra).....	48
IV.3.1.1 Analyse de variance ANOVA pour la rugosité moyenne arithmétique (Ra).....	48
IV.3.1.2 Graphique des effets principaux pour la rugosité moyenne arithmétique (Ra).....	49
IV.3.1.3 Equation de régression pour la rugosité moyenne arithmétique (Ra).....	49
IV.3.1.4 Diagramme de surface 3D de la rugosité moyenne arithmétique (Ra).....	50
IV.3.2 Analyse de l'usure en dépouille (Vb).....	51
IV.3.2.1 Analyse de variance ANOVA pour l'usure en dépouille (Vb).....	51

IV.3.2.2 Graphique des effets principaux pour l'usure en dépouille (Vb)	52
IV.3.2.3 Equation de régression pour l'usure en dépouille (Vb)	53
IV.3.2.4 Diagramme de surface 3D de l'usure en dépouille (Vb)	54
IV.4 Optimisation	55
IV.4.1 Optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe basée sur l'approche TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)	56
IV.4.2 Optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe basée sur l'Analyse GRA (Grey Relationnel analyse)	59
IV.5 Conclusion	62
Conclusion générale	64

Introduction générale

L'optimisation de l'usinage est l'une des préoccupations des chercheurs et industriels de l'industrie moderne. Ce travail est une contribution à l'étude de l'influence des paramètres de l'un des processus d'usinage par enlèvement de la matière à savoir le tournage. Le couple matériau-outil de coupe utilisé, est aussi très convoité par les industriels.

Le travail réalisé et présenté dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

Dans le premier chapitre du mémoire présente une synthèse bibliographique sur l'optimisation du tournage des aciers, d'abord nous avons exposé l'usinabilité des matériaux et des définitions techniques du tournage, matériau de coupe et les paramètres de processus. Une étude des mécanismes d'usure et de rupture des outils coupants (différentes formes couche blanche et diffusion à la surface des outils en carbure) a été élaborée ainsi que l'état de surface des pièces mécanique et débit de copeau enlevé (MRR), enfin l'optimisation.

Le deuxième chapitre est réservé pour exposer les travaux de recherche relatifs au tournage des aciers faiblement allié, l'utilisation des plans d'expérience et les méthodes statistiques de modélisation et d'optimisation.

Dans le troisième chapitre est présenté les équipements nécessaires à la réalisation des essais tels que, la machine-outil, l'éprouvette utilisée, le matériau de coupe et les dispositifs de mesure. Les conditions expérimentales et le plan d'expérience utilisé sont également exposés.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude des résultats. En premier temps, en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme de surface de réponse du critère de rugosité moyenne arithmétique (R_a) et du critère d'usure en dépouille (V_b). Deux logiciels statistique «MINITAB 18, Design-Expert 12» ont permis de faire les calcul et d'obtenir les différents graphiques. Ensuite une seconde partie est réservée à l'optimisation des paramètres de coupe. L'optimisation multi-objective est réalisée par l'approche Technique De Préférence D'ordre Par Similitude Avec La Solution Idéale (TOPSIS) et l'Analyse Relationnelle Grise (GRA).

Chapitre I

**Revue bibliographique sur
l'optimisation du tournage
des aciers**

I.1 Introduction

L'usinage des aciers faiblement alliés est très convoité par l'industrie moderne pour la fabrication des pièces mécaniques. Ces aciers contiennent généralement moins de 10% d'éléments d'alliage (C, Mn, Cr, Ni, Mo, V et Si combinés) [1, 2,3] ce qui leur procurent une bonne usinabilité et sont également résistants à la corrosion. De plus, ils offrent d'excellentes propriétés mécaniques [4,5]. En effet, les aciers faiblement alliés sont largement utilisés dans la fabrication de pièces mécaniques telles que les broches de tournage, broches de fraisage, arbres de moteur, arbres de pompe et les barres de torsion.

Ce chapitre est conçu en deux parties complémentaires. La première partie de ce chapitre sera consacrée à une recherche bibliographique sur l'usinabilité des matériaux (Les critères d'usinabilité, le procédé de tournage, matériaux de coupe, Etude des mécanismes d'usure et de rupture des outils coupants, la rugosité, MRR, optimisation (mono objectif et multi objectif) et les méthodes MCDM (TOPSIS et GRA). Une deuxième partie est dédiée à une revue critique de plusieurs travaux de recherches récentes dans le domaine de l'usinage des aciers faiblement alliés.

I.2 L'usinabilité des matériaux

I.2.1 Les critères d'usinabilité

Les critères d'usinabilité peuvent être différents selon les pièces à produire. Ils peuvent être classés selon la durée de vie d'outil, du matériau de la pièce, des efforts de coupe permis, l'état de surface désiré, la productivité voulue,...etc. D'autre part, selon le matériau de la pièce à usiner, plusieurs critères sont considérés [6], tels que :

- ✓ Le matériau et l'outil de coupe ;
- ✓ les additifs (par exemple ; le soufre favorise la fragmentation du copeau, le plomb (interdit) favorise l'usinabilité (action lubrifiante) ;
- ✓ La dureté et la résistance à la rupture. Les faibles duretés et résistance à la rupture favorisent l'usinabilité, sauf pour les matériaux très ductiles (formation de l'arrête rapportée) ;
- ✓ La ductilité ; une faible ductilité favorise l'usinabilité ;
- ✓ La conductibilité thermique ; elle favorise l'usinabilité, sauf pour les alliages réfractaires ;
- ✓ L'écrouissage ; un taux élevé accroît la force spécifique de coupe.

I.2.2 Le procédé de tournage

Le tournage est un procédé mettant en jeu des outils à arrête de coupe unique. La pièce à réaliser est animée d'un mouvement de rotation imposé par la machine-outil assimilable au mouvement de coupe, c'est généralement le mouvement principal du procédé. L'outil quant à lui est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance et permettant de définir le profil de la pièce (**Figure I.1**).

La combinaison de ces deux mouvements permet de positionner la partie active de l'outil (arrêt tranchante de l'outil) et permet d'obtenir des formes de révolution complexes. Bien que les

Cinématiques du procédé et des outils soient simples, le procédé de tournage est essentiel au vu de l'importance de ses applications dans l'industrie [7].



Figure I.1 : Opération de tournage [7].

I.2.3 Matériaux de coupe

Les matériaux de coupe contemporains sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement, les opérations d'usinage qui demandent une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre actuellement moins d'une minute. L'importance des matériaux à outil de coupe ne peut pas être sous-estimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe.

Les matériaux utilisés pour les outils de coupe peuvent être classés en trois catégories, dans la première sont les aciers rapides, la deuxième catégorie est celle des carbures et la troisième comprend les céramiques et les matériaux ultra-durs [8].

I.2.3.1 Les caractéristiques principales du matériau de fabrication des outils

Afin d'assumer un enlèvement correct de la matière de la pièce à usiner, l'outil de coupe doit répondre à certaines conditions [9] :

- ✓ Dureté élevée des faces de coupe et de dépouille afin d'assurer une pénétration de l'outil dans le matériau à usiner (entre 28 et 32 HRC) ;
- ✓ Résistance élevée à l'abrasion élevée pour pouvoir résister à l'usure en cratère et en dépouille ;
- ✓ Résistance élevée à la température (600° à 1000°) (il est bien à noter, qu'une température élevée diminue la dureté et la résistance à l'abrasion) ;
- ✓ Résistance élevée à la flexion et à la compression pour pouvoir résister aux contraintes de coupe pendant l'opération de l'usinage ;
- ✓ Bonne état de surface, notamment la rugosité de surfaces de coupe et de dépouille ($R_a \leq 1,6 \mu\text{m}$).

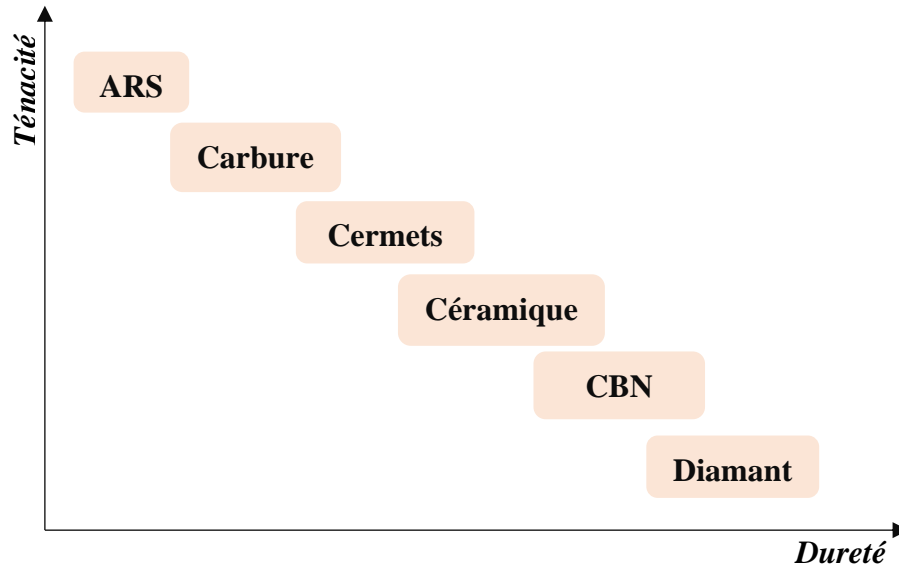


Figure I.2 : Evolution de la diverse ténacité en fonction de la dureté.

➤ Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs)

Ils sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Ils sont toujours utilisés pour certains types d'outils comme les forêts, ou dans le cas de la nécessiter d'un angle de tranchant très faible. Ils sont aussi, utilisés dans le cas d'une vitesse de coupe faible car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil dans le cas d'une vitesse élevée, donc à tendance de créer un effondrement rapide de l'arête de coupe. Ils sont fabriqués par coulé en coquille ou par métallurgie des poudres. Sa composition : 0,7 % de Carbone minimum 4 % de Chrome environ, Tungstène, Molybdène, Vanadium. Cobalt pour les plus durs. Présente une dureté : de 63 à 66 HRC.

➤ Carbure

Vu les avantages présentés par les outils en carbure, ces derniers sont devenus les plus utilisés. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil ce qui rend le changement de la plaquette très rapide. Ils sont souvent couverts par une couche protectrice en carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure. La fabrication de ces types d'outils est assurée par frittage de poudre, puis revêtement. Ils sont composés par un noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°) Ou en carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou molybdène (3500°) Liant : cobalt : le plus courant ou nickel. Le revêtement le plus employé est en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon : Al_2O_3).

➤ Cermets

L'origine de ce mon est de céramique-métal. Ils représentent les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitride de Titane ou de nitrure de Titane. Afin d'augmenter la ténacité de ces outils, ces derniers doivent être alliés à du carbure de Molybdène. Ils sont utilisés

pour la finition, donc pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

➤ **Céramique**

Pour la fabrication des outils de coupe, ce sont, les oxydes d'aluminium et les nitrures de silicium. Ils sont caractérisés par une dureté élevée avec une grande stabilité à haute température d'une part, et d'autre part, par l'absence d'une réaction avec la matière usinée. Les céramiques permettent un grand débit de matière et en parallèle nécessitent une grande stabilité de la machine. Il est important de signaler qu'un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage doivent être adaptés (approche de l'outil).

➤ **Nitride de Bore Cubique (CBN)**

L'avantage de ce type de matériau et sa très grande dureté, il représente le matériau le plus dur après le diamant. Aussi, ne s'oxyde pas à haute température contrairement au diamant. Il est aussi utilisé pour usiner des pièces dures et la fabrication des meules de rectification. Son utilisation exige : une machine stable, une grande rigidité de la pièce et la porte pièce et un arrosage pour le refroidissement.

➤ **Diamant**

Il est utilisé essentiellement pour la fabrication des meules. Il n'exige pas un fort arrosage suite à son faible coefficient de frottement. Cependant, son principal inconvénient est sa non stabilité à haute température. Une fois que le présent matériau sera soumis à une température de plus de 650 °C, ce dernier se transforme en un vulgaire morceau de graphite. A cet effet, on ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Par conséquent, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables.

I.2.3.2 Les paramètres de coupe

I.2.3.2.1 vitesse de coupe (V_c)

En tournage, la vitesse de coupe est la vitesse relative de l'outil par rapport à la pièce. Il s'agit donc de la vitesse tangentielle au point de la pièce coïncidente avec la pointe de l'outil. Cette vitesse qui s'exprime toujours en mètres par minute (**m/min**) se calcule ainsi :

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \dots \dots \dots \mathbf{I.1}$$

V_c : vitesse de coupe ;

D : diamètre de la pièce en mm au point d'usinage ;

N : correspond à la fréquence de rotation de la pièce en mm/tr.

En permutant les termes de la formule précédente, on obtient :

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D} \dots \dots \dots \mathbf{I.2}$$

N : C'est la vitesse de rotation de la broche que l'on règle sur la machine, Donc il faut connaître la valeur de la vitesse de coupe (V_c), dont la valeur est plus souvent issue des méthodes empiriques. Certains organismes, comme le CETIM pour l'industrie mécanique, ont établi des tableaux de référence.

La vitesse de coupe (V_c) est déterminée en fonction de différents facteurs :

- ✓ de la matière à usiner : en général plus elle est tendre et plus la vitesse est élevée ;
- ✓ de la matière de l'outil de coupe, de la géométrie de l'outil de coupe ;
- ✓ du type d'usinage : ébauche, finition, filetage, ...etc ;
- ✓ du lubrifiant, qui permet une augmentation de la vitesse (qui ne s'utilise presque plus dans l'industrie moderne, remplacé par l'UGV) ;
- ✓ de la qualité du tour : plus il est rigide, plus il supportera des vitesses élevées.

I.2.3.2.2 Avance (f)

En tournage, l'avance est la vitesse avec laquelle progresse l'outil suivant l'axe de rotation pendant une révolution de la pièce, cette vitesse est déterminée expérimentalement en fonction des critères précédemment cités. Cela correspond, en première approximation à l'épaisseur du copeau. On règle l'avance directement sur la machine [10].

A ne pas confondre avec la formule de calcul de l'avance en fraisage, qui est :

$$V_f = V_z \cdot Z \cdot N \dots \dots \dots \mathbf{I.3}$$

V_f : avance en mm/min ;

V_z : avance par dent en mm/ (dent. tour) ;

Z : nombre de dents de la fraise ;

N : fréquence de rotation réglée sur la machine en tr/min.

En tournage, si on veut calculer la vitesse d'avance de l'outil, on applique cette formule :

$$V_f = f_z \cdot N \dots \dots \dots \mathbf{I.4}$$

I.2.3.2.3 Profondeur de passe (ap)

Elle est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas selon l'arrêt de l'outil. En chariotage par exemple elle correspond à la différence de rayon entre la surface usinée et la surface précédente. C'est un critère important pour choisir le mode de travail en ébauche ou en finition, mais il reste secondaire par rapport aux précédents. La profondeur de passe est souvent limitée technologiquement au 2/3 de la longueur utile de l'arrêt de coupe utilisé et aussi par la puissance utile disponible sur la broche [7].

I.2.4 Etude des mécanismes d'usure et de rupture des outils coupants

I.2.4.1 Différentes formes d'usure des outils

Pour maîtriser le processus de coupe par enlèvement de matière il est nécessaire de rappeler les modalités d'usure des outils de coupe, c'est à dire les différents mécanismes de l'usure et les différentes formes d'usure des outils [11].

a) Usure en dépouille

Elle se produit sur l'arête de coupe elle-même, ainsi que le rayon du bec. Généralement, elle est plus prononcée soit sur l'arête, soit sur le rayon. Les efforts de coupe et par conséquent les vibrations augmentent avec l'augmentation de l'usure en dépouille. La température de l'arête, donc les risques de déformations plastiques, augmentent également avec cette usure. D'une usure en dépouille concentrée sur le rayon du bec, résulte un mauvais état de surface.

b) Usure en cratère

Le frottement du copeau produit le plus souvent sur la face supérieure de l'outil un cratère plus ou moins accentué. Une forte usure en cratère a une influence sur la formation du copeau.

c) L'écaillage

Se constate quand la fragilité de la nuance employée est trop grande en égard au travail à exécuter, quand l'outil subit des chocs thermiques. Des criques se forment perpendiculairement à l'arête de coupe et des particules de carbure sont arrachées progressivement de cette arête. Ce phénomène est parfois appelé formation de fissure en peigne.

d) Déformation plastique

Sous l'effet des hautes températures et des hautes pressions dans la zone de coupe, la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente. Cette forme d'usure détermine la précision dimensionnelle de la pièce usinée et présente un mode de détérioration de l'outil.

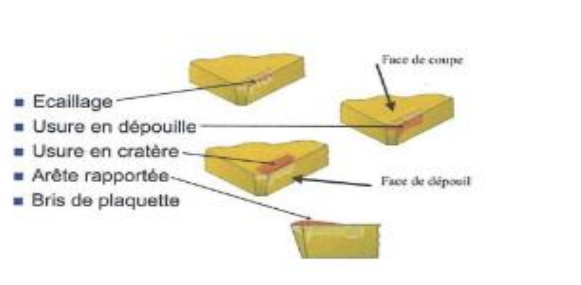


Figure I.3 : Différentes d'usure des outils [12].

I.2.4.2. Phénomènes physico-chimiques à l'interface outil-copeau

La mise hors de service d'un outil peut être provoquée par l'un des différents mécanismes d'usure représentés dans le schéma ci-après (**Figure I.4**).

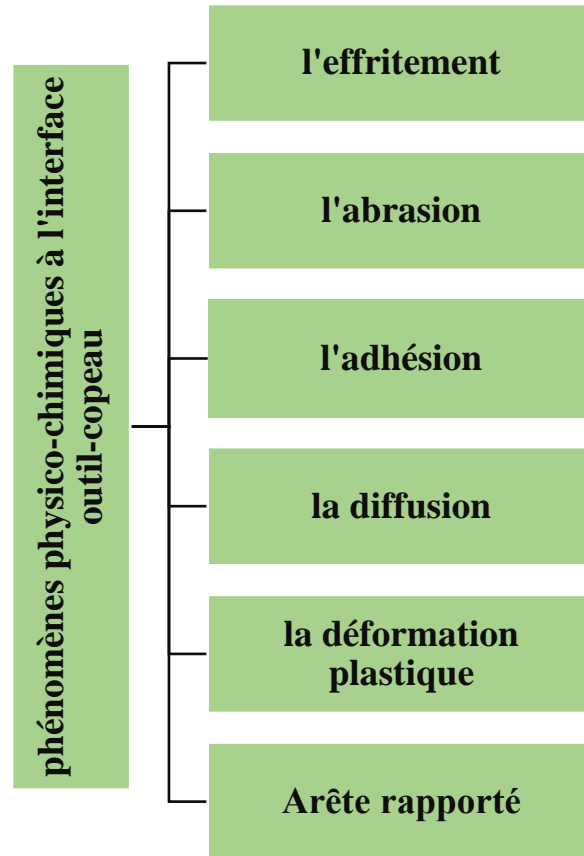


Figure I.4 : Les phénomènes physico-chimiques à l'interface outil-copeau.

a) Usure par effritement

Actuellement, la destruction d'un outil par effritement local doit être considérée comme anormale, bien qu'on la rencontre fréquemment. Plusieurs causes peuvent entraîner cet effritement tels que :

- ✓ Une grande fragilité du matériau à l'outil (mauvaise composition chimique ou mauvais traitement thermique). - Des chocs provoqués par des discontinuités ou par des vibrations importantes ;
- ✓ Des fissures microscopiques formées à l'arête de l'outil ;
- ✓ Mauvais choix des paramètres géométriques de l'outil, les pentes d'affûtage devant être d'autant plus faibles que l'outil est plus fragile.

b) Usure par abrasion

L'usure par abrasion est consécutive à l'enlèvement de matière sur l'outil par des constituants durs dans le matériau usiné. On rencontre ce genre d'usure dans le cas de l'écroûtage des pièces coulées. L'emploi des outils en carbure limite ce genre d'usure (**Figure I.5**).

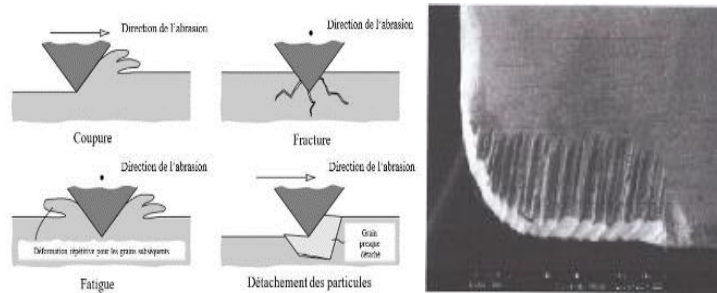


Figure I.5 : Usure par abrasion [13].

c) Usure par adhésion

Cette usure est aussi une usure par arrachement mécanique de particules d'outil, mais après formation d'une microsoudure entre le copeau et l'outil. Les microsoudures sont favorisées par les pressions locales importantes entre les aspérités du copeau et de l'outil entraînant des déformations importantes et une élévation de chaleur provoquant la soudure. L'usure par adhésion est ainsi observée sur les outils en carbure (**Figure I.6**). L'usure par adhésion diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'à une vitesse critique au-delà de laquelle se poursuit une usure par diffusion [12].

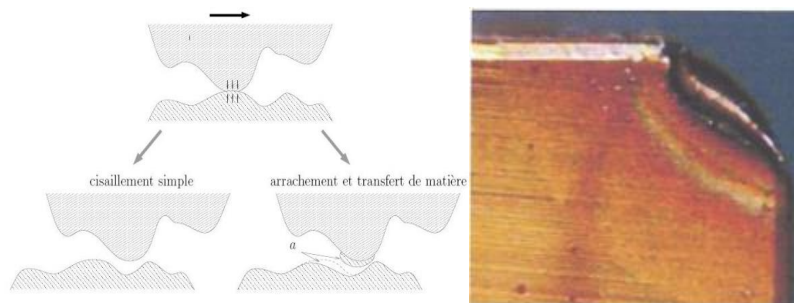


Figure I.6 : Usure par adhésion [14].

d) Usure par diffusion

L'usure par diffusion est une usure continue pour laquelle les éléments de l'outil sont extraits par le copeau par quantités très petites. Elle est due aussi bien à la diffusion des constituants de l'outil dans le copeau qu'à celle des constituants de la matière usinée dans l'outil. Fondements théoriques du mécanisme de coupe (**Figure I.7**) [14].

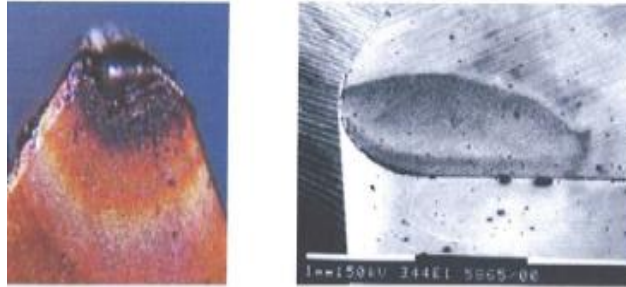


Figure I.7 : Cratère formé par usure par diffusion sur une plaquette carbure[14].

e) Usure par déformation plastique

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente et un effet de fluage, sous l'action des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de contact outil-copeau. Ces divers mécanismes d'usure se manifestent par les types d'usures cités au préalable [12].

f) Arête rapporté

L'arête rapportée est un phénomène que l'on rencontre souvent dans la coupe et qui a des répercussions favorables ou défavorables sur l'usure des outils. Au cours de l'usinage de nombreux métaux et alliages, il se dépose sur l'arête de l'outil un petit amas métallique séparé du copeau et de la pièce en forme de "coin" très caractéristique.

L'observation micrographique d'une section droite d'arête rapportée montre qu'elle est constituée de strates superposées d'épaisseur d'ailleurs inégales.

I.2.4.3 Formation de la couche blanche

Les dernières observations mentionnées sur l'arête rapportée montrent que celle-ci joue, par évidence un rôle important dans l'usure des outils, soit par sa présence proprement dite, modifiant plus ou moins l'écoulement du copeau et surtout sa portée effective, soit par son évacuation par le copeau et par la face de dépouille de l'outil. Par ailleurs, il est intéressant de connaître aussi les phénomènes qui peuvent exister entre l'outil et l'arête rapporté.

I.2.4.4 Diffusion à la surface des outils en carbure

Les conditions d'écoulement à la surface de l'outil jouent un rôle important dans le phénomène de diffusion en favorisant l'enlèvement de matière quand les vitesses sont élevées mais en la diminuant lorsqu'il se forme des couches limites à des vitesses plus réduites. En fait, il est nécessaire de porter une grande attention au rôle joué par la vitesse de coupe pour distinguer deux aspects de l'usure ; **l'usure par adhésion et l'usure par diffusion**, modalités que nous avons mentionnées précédemment.

La diffusion augmente rapidement avec la vitesse et la température inter-faciale, la diminution de l'usure par adhésion avec la vitesse est possible du fait de l'augmentation de la résistance à l'arrachement de particules de l'outil due à une capacité de déformation plus élevée

avec la température. Du fait du rôle de la température dans ces modes d'usure, les paramètres de coupe comme l'avance et les lubrifiants sont à choisir selon qu'il s'agit de réduire l'usure par adhésion ou l'usure par diffusion.

I.2.5 Etat de surface des pièces mécanique

I.2.5.1 Généralités sur les états de surface

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération.

I.2.5.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [15, 16].

1) Surface géométrique

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

2) Surface spécifiée

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

3) Surface mesurée

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

4) Surface réelle

Surface obtenue au cours de la fabrication (**figure I.8**).

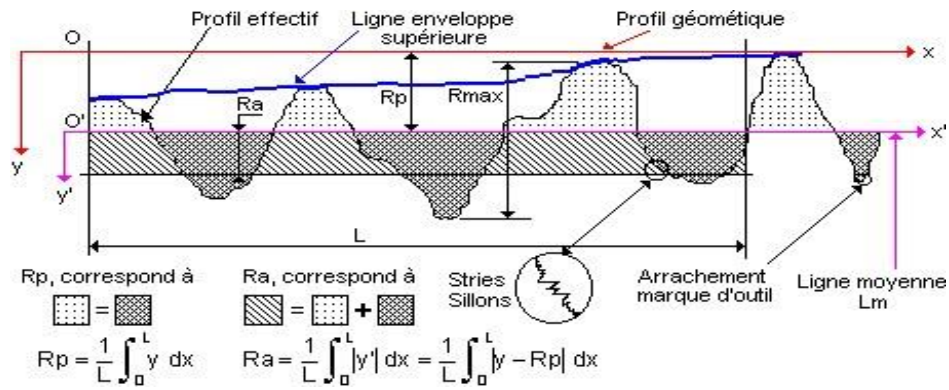


Figure I.8 : Caractéristique du profil [15].

- L la longueur de base du profil moyen ;
- R_p profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L ;
- R_a écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y (entre chaque point de la courbe et l'axe OX).

I.2.5.3 Etat de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la Figure I.9. Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité R_{max} et donné par [17] :

$$R_{max} = \frac{f^2}{8.r} \dots\dots\dots I.5$$

- R_{max} : la rugosité maximale en millimètre ;
- f : l'avance en millimètre ;
- r : le rayon de l'outil de coupe maximal en millimètre.

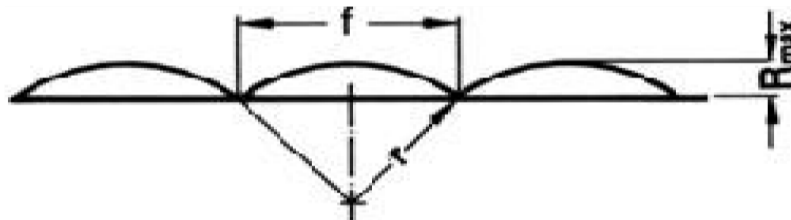


Figure I.9 : Profil de surface tournée [17].

I.2.5.4 Caractéristique de la surface

La nouvelle norme ISO 25178 définit l'analyse en 3D de l'état de surface, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface [18].

➤ Paramètre caractéristiques des états de surface

1) Rugosité moyenne arithmétique R_a :

Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation l_m .

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \dots \dots \dots \text{I.6}$$

2) Rugosité moyenne profondeurs R_z :

Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluation successives l_e .

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \dots \dots \dots \text{I.7}$$

3) Rugosité moyenne profondeurs R_p :

Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m .

$$R_p = R_{p3} \dots \dots \dots \text{I.8}$$

4) Profondeur maximale des vallées R_v :

Profondeur maximale du profil de rugosité R en dessous de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m .

5) Rugosité maximale R_t :

Ecart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité R , sur la longueur totale d'évaluation l_m (Figure I.10) [19].

$$R_t = R_p + R_v + R_{p3} + R_{v4} \dots \dots \dots \text{I.9}$$

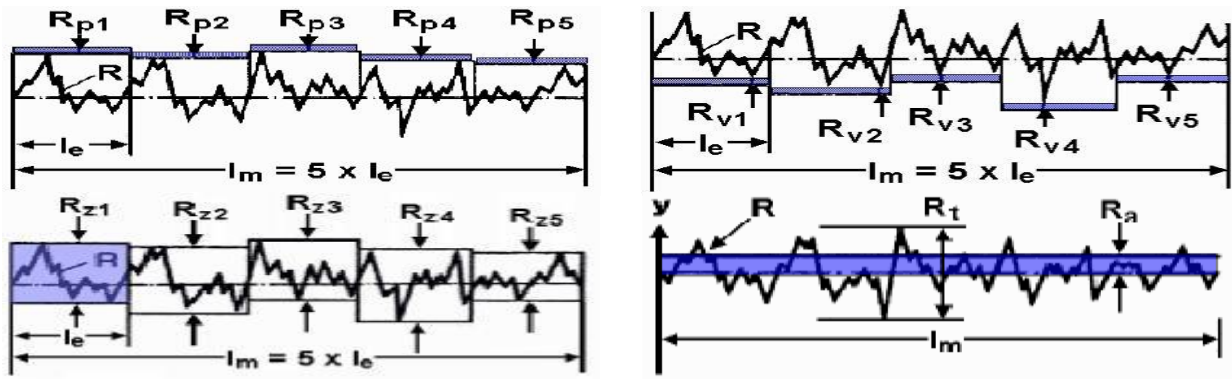


Figure I.10 : Les critères de la rugosité [18].

I.2.6 Débit de copeau enlevé (MRR)

Le débit d'enlèvement de copeaux permet de mesurer la productivité d'une d'usinage. L'on applique le principe selon lequel la cadence de base de la machine diminue à mesure de l'augmentation du débit d'enlèvement de copeaux. Le débit d'enlèvement de copeaux (MRR) désigne la quantité (volume) de copeaux enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante [19] :

$$MRR = Vc \times A \dots\dots\dots I.8$$

MRR : Débit d'enlèvement de copeaux [**cm³ /min**] ;

Vc : Vitesse de coupe [**m/min**] ;

A : Section de coupe [**mm²**] avec :

$$A = ap \times f \dots\dots\dots I.9$$

$$MRR = Vc \times ap \times f \dots\dots\dots I.10$$

I.3 Optimisation

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant le choix des conditions de coupe les plus commodes, afin d'obtenir des valeurs désirées de certaines variables. Ceci a habituellement un impact direct sur le processus en termes de qualité, temps et coût total d'opération [20].

L'optimisation du processus d'usinage prend en compte les aspects suivant :

- La connaissance du processus de coupe ;
- Les équations empiriques reliant la vie d'outil, les forces, la puissance, etc., pour développer des contraintes réalistes ;
- Spécifications des possibilités d'usinage ;
- Développement d'un critère efficace d'optimisation ;

- La connaissance des techniques mathématiques et numériques d'optimisation.

En usinage, les tâches d'optimisation sont critiques, parce qu'il comporte beaucoup de processus complexes. Habituellement, la petite variation d'un paramètre cause les changements notables des autres. D'ailleurs, quelques variables, telles que l'état de surface obtenue et l'usure d'outil, dépendent fortement des conditions de coupe.

I.3.1 Les méthodes d'optimisation

Il existe deux types de méthodes d'optimisation. La première est l'optimisation mono-objectif, qui se base sur la minimisation (ou la maximisation) d'une seule fonction objectif où le but est de trouver la meilleure solution appelée solution optimale, qu'est facilement définie suivant une seule performance du problème étudié (temps de réponse, temps de monté, la robustesse, taux d'erreur,...etc.). D'autre part, l'optimisation multi-objectif optimise simultanément plusieurs fonctions objectives qui sont souvent contradictoires, on cherche à trouver la meilleure solution suivant un ensemble de performance du problème (temps de réponse plus la robustesse, temps de réponse plus temps de monté plus la robustesse,...etc.). Où le résultat d'un problème d'optimisation multicritère est généralement un assortiment de solutions, qui se distinguent par différents compromis réalisés entre les objectifs [21].

✓ Les méthodes MCDM

Les méthodes dites Méthode de la Prise de Décision Multi Critères notées « MCDM » sont un outil de prise de décision aidant les chercheurs et techniciens à choisir la meilleure solution parmi plusieurs options et alternatives, et à développer différentes méthodes pour résoudre le processus de prise de décision complexe, en utilisant plusieurs méthodes telles que « TOPSIS » et « GRA » [22].

Les méthodes MCDM (Méthode de la Prise de Décision Multi Critères) utilisées dans l'étude :

a. Méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

Hwange et Yoon ont développé une technique pour résoudre le processus MCDM par une nouvelle méthode connue sous le nom de méthode TOPSIS. Cette technique aide à classer les alternatives de proximité, basées sur la solution idéale optimale et à obtenir le niveau maximal à partir des alternatives disponibles. La meilleure alternative a le rang un (01) et les pires alternatives ont le rang zéro (00). Pour chaque alternative, il existe un classement intermédiaire entre les meilleurs extrema de réponse [23].

b. Méthode GRA (Grey Relationnel analyse)

L'Analyse Relationnelle Grise (GRA) a été développée par Deng Julong de l'Université des sciences et technologies de Huazhong. Il s'agit de l'un des modèles les plus utilisés de la théorie des « Systèmes Gris ». L'analyse Des Relations Grises utilise un concept spécifique d'information. Elle définit les situations où il n'y a pas d'information comme noires et celles où l'information est parfaite comme blanches. Cependant, aucune de ces situations idéales ne se produit jamais dans

les problèmes du monde réel. En fait, les situations situées entre ces deux extrêmes, qui contiennent des informations partielles, sont décrites comme étant grises, brumeuses ou floues. Une variante du modèle GRA, le modèle GRA basé sur Taguchi, est une méthode d'optimisation populaire dans l'ingénierie de fabrication.

La méthode GRA est donc une technique d'optimisation à réponses multiples, utilisée pour déterminer une solution appropriée aux problèmes complexes de l'industrie moderne [24].

✓ **Taguchi**

La méthode de Taguchi (plan orthogonal) est largement utilisée dans l'analyse d'ingénierie et se compose d'un plan d'expérience avec un objectif d'acquérir les données d'une manière commandée, afin d'obtenir des informations sur le comportement d'un processus donné.

La méthode de Taguchi est basée sur des techniques conventionnelles, avec quelques directives pour des expériences de présentation et l'analyse de conception des résultats de ces expériences. En effet, la méthode de Taguchi utilise une conception spéciale des plans orthogonaux pour étudier l'espace entier de paramètre avec un nombre minimum d'expériences. Le plus grand avantage de cette méthode est d'optimiser le processus de réalisation des expériences : gagner le temps de réalisation des expériences et économiser le coût.

La méthode de Taguchi est un outil puissant pour la conception d'un système de haute qualité. Taguchi a considéré trois étapes pour le développement des processus et des produits : conception de système, conception de paramètre, et conception de tolérance. Dans la conception de système, l'ingénieur utilise les principes scientifiques et technologiques pour déterminer la configuration fondamentale. Dans l'étape de conception de paramètre, les valeurs spécifiques des paramètres de système sont déterminées. La conception de tolérance est employée pour déterminer les meilleures tolérances pour les paramètres. En plus, le rapport S/N et l'analyse de la variance (ANOVA) peut être utilisé pour indiquer l'impact des paramètres de processus sur les paramètres technologiques d'usinage [25].

Chapitre II

Etat d'art

II.1 Introduction

Le tournage est une opération d'usinage polyvalente et utile. C'est l'un des procédés d'enlèvement de matière les plus convoités dans l'industrie en raison de sa capacité à produire des surfaces géométriques complexes avec une précision et une finition de surface raisonnables.

En effet plusieurs chercheurs et industriels se sont intéressés à l'étude de ce procédé pour mieux maîtriser ces phénomènes et en tirer les meilleurs bénéfices.

Dans ce chapitre, une étude approfondie et critique est réalisée sur plusieurs articles scientifiques récents et d'un très grand intérêt scientifique.

II.2 Revue bibliographique

Plusieurs chercheurs ont adopté l'utilisation de la planification d'expérience dans le but de modéliser et d'optimiser les paramètres technologiques des différents processus de coupe. En effet, ci-après sont citées des études récentes très intéressantes dans le domaine de l'optimisation des paramètres de coupe lors du tournage de différents matériaux.

Lors de l'étude réalisée par **Şahinoğlu et al [26]** une étude expérimentale est conduite dans le but de déterminer l'influence des paramètres du régime de coupe (tels que, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) sur la rugosité de la surface usinée et la consommation d'énergie, lors du tournage à sec des aciers faiblement alliés AISI 4140 (63 HRC) avec des plaquettes en carbure multicouches revêtues (TiCN/Al₂O₃/TiN). Les auteurs ont adopté un plan de Taguchi (L₂₇). L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée pour définir l'impact des paramètres du processus de coupe sur les paramètres de réponse. L'ANOVA a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab-19.

D'après les résultats obtenus, l'avance est le facteur le plus significatif qui affecte la rugosité de surface avec une contribution de 42,30%, suivi par la profondeur de passe avec une contribution de 28,70%. L'interaction de l'avance et de la profondeur de passe, avec une contribution de 17,66%, a également un impact important sur la qualité de la surface. La vitesse de coupe, quant à elle, a un effet mineur sur la réponse.

La figure II.1 illustre les graphiques des effets principaux pour les valeurs de la rugosité de surface. Il est à conclure que l'avance est le facteur le plus influant sur la rugosité de la surface de façon proportionnelle. Ces résultats sont confirmés par ceux trouvés dans les études de Asiltürk et Akkuş 2011 [26], Motorcu 2010 [26] et Bouacha et al. 2010 [26]. Aussi, d'après les graphiques de la figure II.1, la rugosité de surface diminue légèrement lorsque la vitesse de coupe augmente. En outre, la profondeur de passe a un impact important sur la rugosité de surface. Toutefois, la valeur minimale peut être obtenue en combinant une vitesse de coupe élevée, une faible avance et une faible profondeur de passe.

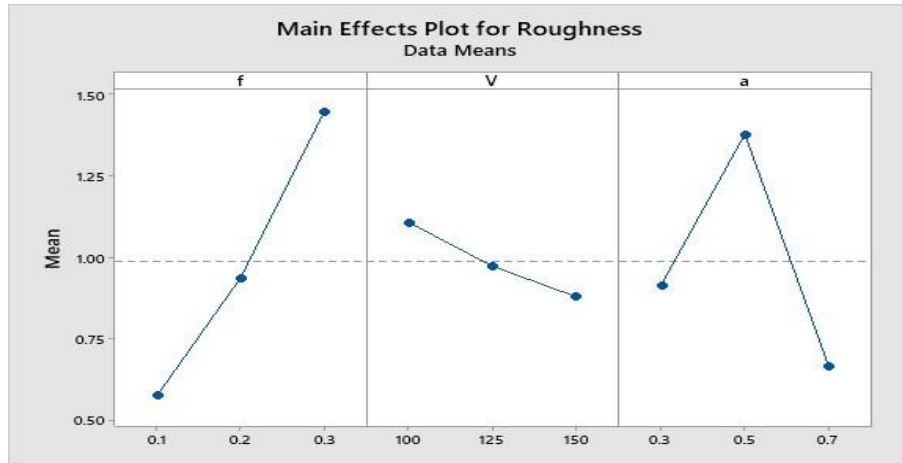


Figure II.1 : graphiques des effets principaux pour la rugosité de la surface (μm) [26].

D'après les résultats du tableau II.1 de l'étude [26], l'usure du cratère était de 0,1 mm à environ 10 minutes du début des essais. Ensuite, l'usure augmente progressivement et atteint 0,15 mm en 50 min. Cependant, l'outil atteint sa valeur limite d'usure (0,3 mm) pendant près de 90 minutes.

Tableau II.1 : Résultats expérimentaux pour la rugosité de la surface, l'usure des cratères et leurs illustrations [26].

Durée de l'usinage (min)	10	50	90	130	170
Rugosité de la surface (μm)	0.30	0.35	0.38	0.40	0.42
Usure du cratère (mm)	0.10	0.15	0.30	1.20	1.80
Illustration de l'usure du cratère					

La figure II.2 permet de constater qu'au fur et à mesure de l'avancement de l'usinage, l'affûtage de l'outil de coupe s'est dégradé, ce qui a entraîné une détérioration de la qualité de la surface. Selon les auteurs la raison de cette dégradation et de l'apparition de l'usure en cratère est le glissement des copeaux sur la surface de coupe de l'outil. Après 90 minutes, la défaillance

catastrophique de l'outil s'est produite en raison de l'usure en cratère causée par l'effondrement de l'arête de coupe. La variation de la rugosité de la surface et de l'usure en cratère en fonction du temps de coupe est illustrée ci-après.

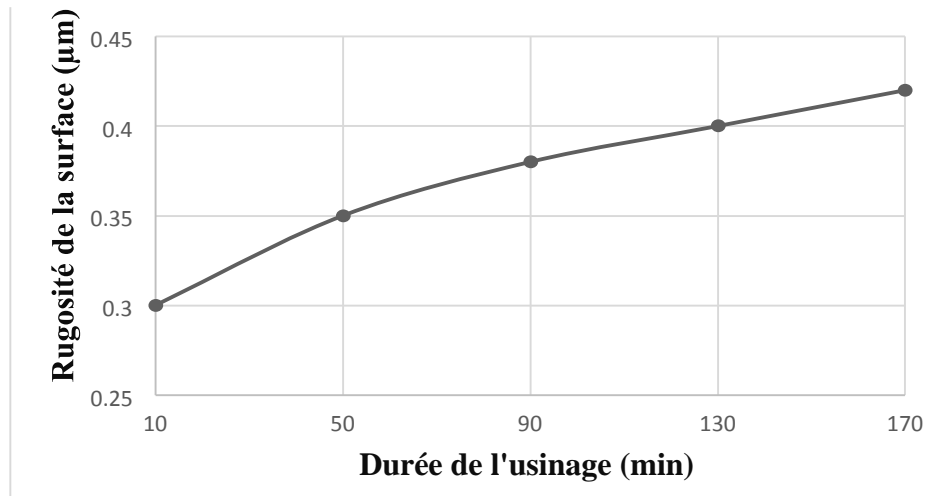


Figure II.2 : Variation de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage [26].

D'après les résultats, la plaquette en carbure revêtue de TiCN/Al₂O₃/TiN présente de bonnes performances lors du tournage dur de l'acier à une vitesse de coupe élevée. La couche revêtue de nitrure de titane (TiN) possède des propriétés lubrifiantes qui diminuent la friction entre les plaquettes de coupe et la pièce à usiner ; elle empêche donc l'augmentation de la température à une vitesse de coupe plus élevée et retarde par conséquent la croissance de l'usure de l'outil. Par conséquent, l'augmentation de la température est évitée au niveau de la surface de contact et de la diffusion. La couche d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) présente de bonnes propriétés de barrière thermique qui réduisent l'usure de l'outil. La couche de nitrure de carbure de titane (TiCN) présente une bonne stabilité thermique et une bonne résistance à l'usure. La couche de revêtement TiN propose de bonnes propriétés de barrière de diffusion. Ces propriétés augmentent la stabilité chimique du matériau de l'outil de coupe, grâce à la barrière thermique de l'Al₂O₃ et à la barrière de diffusion du TiN pendant l'usinage de l'acier trempé à une vitesse de coupe plus élevée.

La figure II.3 montre l'évolution de l'usure en cratère en fonction du temps de coupe pour les outils de coupe en carbure à revêtement multicouche lors du tournage de l'acier faiblement allié AISI 4140 dans des conditions de coupe en mode lubrification. Les résultats montrent que la création de l'usure en cratère est principalement affectée par l'usure chimique et les conditions thermiques associées. Les résultats indiquent que la progression de l'usure de l'outil est due à l'abrasion de la face de coupe de l'outil. Toute usure extrême du cratère entraîne une défaillance catastrophique de l'outil en raison de l'affaiblissement de l'arête de coupe.

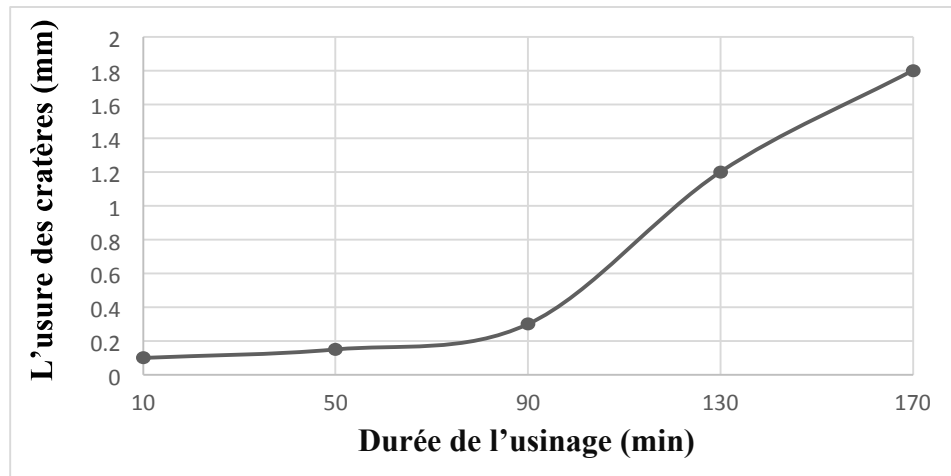


Figure II.3 : Variation de l'usure des cratères en fonction du temps d'usinage [26].

Paengchit et al. [2] Ont étudié l'influence de la vitesse de coupe et celle de l'avance sur la durée de vie de l'outil de coupe des plaquettes en céramique mixte (Al_2O_3+TiC) (Tungaloy, Japon) et des plaquettes revêtues de $TiN+AlCrN$ lors du tournage dur de l'acier faiblement allié AISI 4140 (58 HRC). Les auteurs ont choisi l'équation de Taylor pour obtenir les relations entre la durée de vie de l'outil, la vitesse de coupe et l'avance des deux plaquettes.

Les figures II.4(a) et II.4(b) illustrent des micrographies SEM de plaquettes Al_2O_3+TiC et $TiN+AlCrN$ à un faible grossissement et à un fort grossissement avec un zoom sur la région ovale marquée dans les images à faible grossissement correspondantes après avoir tourné de l'acier faiblement allié AISI 4140 pendant 45 minutes à une vitesse de coupe de 220 m/min et une d'avance de 0,06 mm/tr en maintenant la profondeur de passe constante à 0,1 mm.

L'usure en dépouille et l'usure en cratère ainsi que l'adhérence de la pièce sur la surface usée de l'outil de coupe apparaissent sur les arêtes de coupe des deux plaquettes. L'usure n'est pas uniforme et présente un profil concave. Les largeurs des régions concaves usées étaient supérieures à 200 μm pour les deux plaquettes, ce qui indique une usure importante des arêtes de coupe. En outre, la région concave sur l'arête de coupe de la plaquette $TiN+AlCrN$ était plus profonde que celle de la plaquette Al_2O_3+TiC , ce qui indique une usure importante de l'arête de coupe de $TiN+AlCrN$ pendant l'usinage de l'acier dur.

En agrandissant les images SEM, les régions usées étaient assez rugueuses, présentant des indentations et des protubérances (Saillie en forme de bosse sur une surface anatomique.) de forme aléatoire. En outre, des particules de la taille d'un micron adhéraient aux zones usées, suggérant une possible attrition (Séparation de particules ou usure de matériaux par frottements et par chocs) du matériau de la pièce. Une forte abrasion a provoqué l'adhésion du matériau de la pièce à la surface de l'outil. Les débris d'usure et les copeaux générés sur l'arête de coupe de $TiN+AlCrN$ étaient plus importants que ceux d' Al_2O_3+TiC . Ces caractéristiques sont attribuées au fait que le matériau plus dur de la plaquette de l'outil abrase la surface plus tendre de la pièce dans les directions de compression et de cisaillement, ce qui entraîne la formation de particules et de copeaux. Les résultats indiquent que le volume de matière enlevée par la plaquette $TiN+AlCrN$ est

plus important que celui de la plaquette $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, si l'on en juge par l'usure plus profonde du cratère sur l'arête de coupe au cours de l'usinage dans les mêmes conditions de fonctionnement. Par conséquent, l' $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ présentait une meilleure résistance à l'usure que le $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ en raison des propriétés mécaniques distinctes des matériaux de base et des plaquettes d'outils.

Les figures II.5(a) et II.5(b) montrent des images SEM de plaquettes $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ à faible et fort grossissement, zoomées sur les régions ovales marquées dans les images correspondantes à faible grossissement, après avoir tourné de l'acier faiblement allié AISI 4140 pendant plus de 75 min à une vitesse de coupe de 220 m/min et une vitesse d'avance de 0,06 mm/tr en maintenant la profondeur de passe constante à 0,1 mm. Ils montrent des modes de défaillance catastrophiques des plaquettes sur les arêtes de coupe où les becs disparaissent complètement à cause de la fissuration et de l'écaillage. La fracture de l'outil résulte d'une contrainte élevée et d'une grande quantité de chaleur de coupe due à l'abrasion entre l'arête de coupe de l'outil, en particulier dans la région du bec, et la pièce à usiner, ce qui entraîne la fissuration et l'écaillage du matériau.

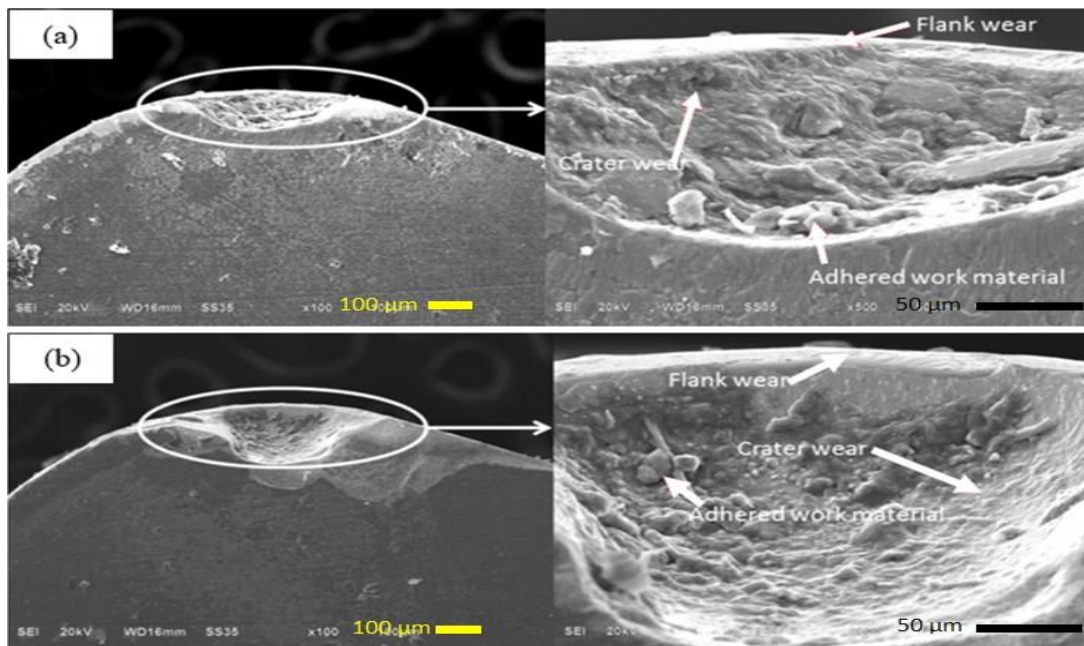


Figure II.4 : Images SEM de (a) $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et (b) $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ après 45 min de tournage [2].

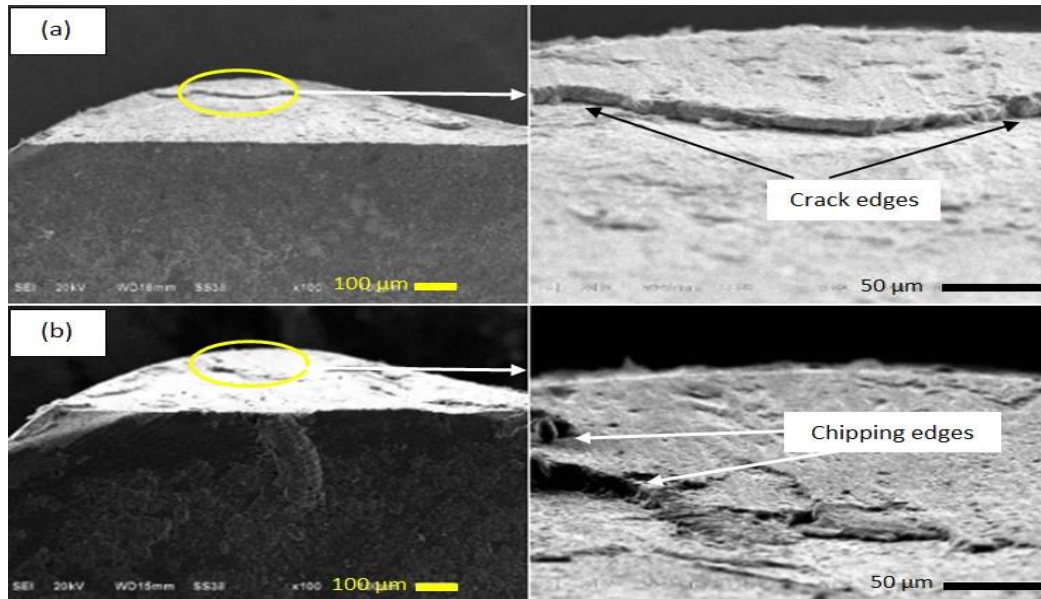


Figure II.5 : Images SEM de (a) $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et (b) $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ après un tournage de plus de 75 min [2].

Les résultats des valeurs R_a des échantillons usinés à différents temps de coupe après l'opération de tournage dans diverses conditions d'usinage en utilisant des outils $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et $\text{TiN}+\text{AlCrN}$ sont listés ci-après.

La figure II.6 montre l'évolution des valeurs moyennes de R_a et en fonction temps de coupe à des vitesses de coupe de 200, 220 et 240 m/min tout en maintenant l'avance constante à 0,06 mm/tr pendant le tournage des pièces par les plaquettes $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ et $\text{TiN}+\text{AlCrN}$, respectivement. De même, la figure II.7 illustre l'évolution des valeurs moyennes de R_a et en fonction temps de coupe à l'avance de 0,04, 0,06 et 0,08 mm/tr tout en maintenant une vitesse de coupe constante de 220 m/min.

Les valeurs moyennes de la rugosité des pièces usinées évoluent de façon proportionnelle au temps de l'usinage pour les deux plaquettes. Le R_a moyen respecte le critère de $0,8 \mu\text{m}$ dans les plages de temps de coupe de 20 à 45 min. Les résultats indiquent également que le tournage à des vitesses de coupe et des avances plus élevées augmente le R_a moyen pour les deux plaquettes. D'autre part, les valeurs R_a ont fortement augmenté avec l'augmentation d'avance à des temps de coupe plus élevés pour les deux plaquettes.

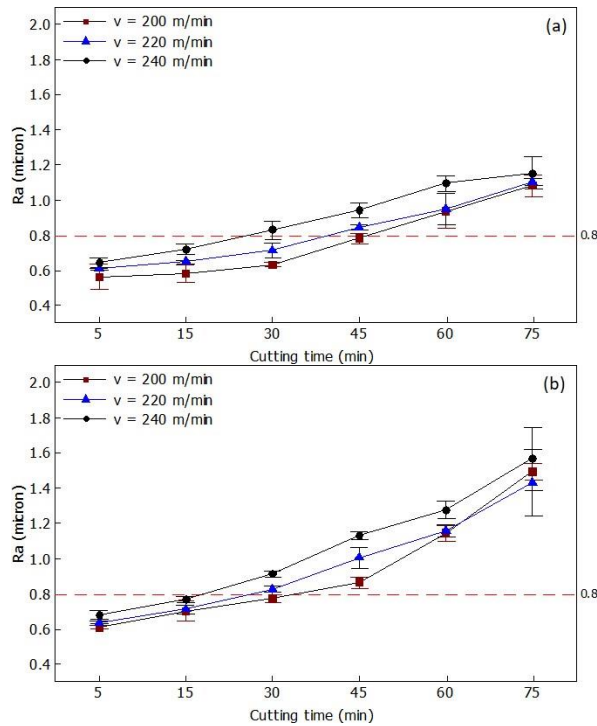


Figure II.6 : Ra en fonction du temps de coupe pendant le tournage d'échantillons de pièces en utilisant (a) des plaquettes Al₂O₃+TiC et (b) des plaquettes TiN+AlCrN en variant les vitesses de coupe [2].

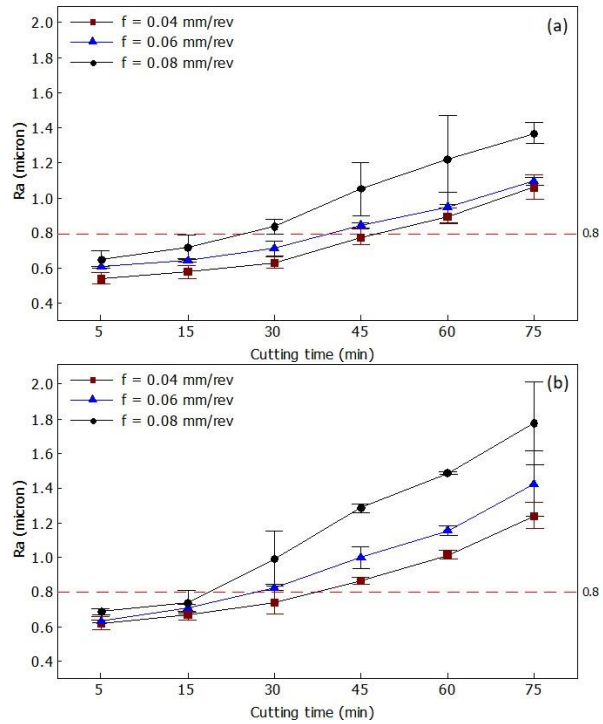


Figure II.7 : Ra en fonction du temps de coupe pendant le tournage d'échantillons de pièces en utilisant (a) des plaquettes Al₂O₃+TiC et (b) des plaquettes TiN+AlCrN en faisant varier l'avance [2].

Hamadi et al [1]. Ont testé des plaquettes en carbure PVD, CVD et MTCVD lors du tournage à sec de l'acier faiblement allié AISI 4140 (284 HB). Les auteurs ont utilisé un plan de Taguchi (L₉) pour la planification des expériences et la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour optimiser les paramètres de coupe.

D'après les résultats de l'étude (**figure II.8**), la comparaison en termes d'usure (Vb) illustre clairement la différence quantitative entre les plaquettes testées. En effet, le rapport (Vb-T2/Vb-T1) est de 2,03 tandis que le rapport (Vb-T3/Vb-T1) atteint 4,43. On peut donc conclure que la plaquette CVD (T1) est la plus adaptée à l'usinage de l'acier faiblement allié AISI 4140 en termes d'usure, et que le triple revêtement (TiCN-Al₂O₃-TiN) de la plaquette (T1) s'est avéré efficace en termes de protection de la plaquette contre l'usure par rapport aux autres revêtements (Al₂O₃-TiCN) et (TiN) dans les conditions de coupe appliquées.

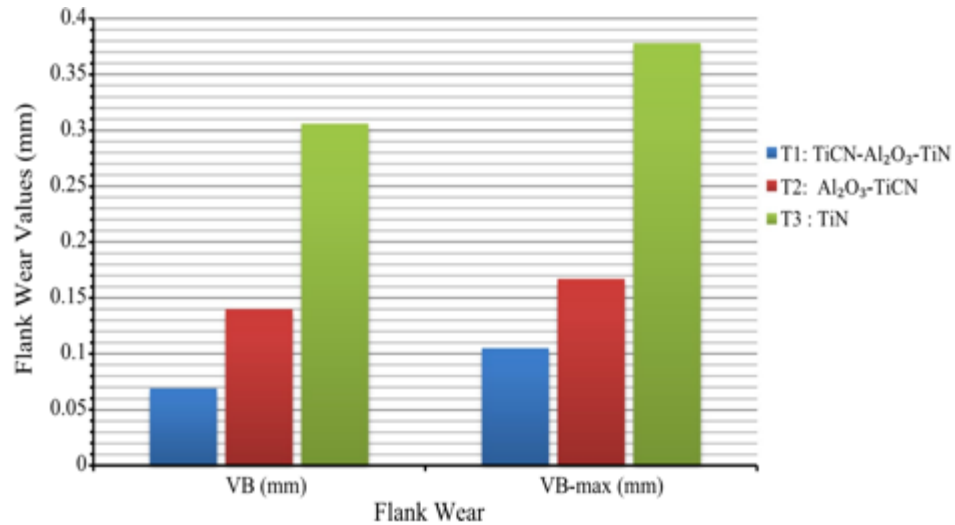


Figure II.8 : Comparaison entre les plaquettes T1, T2 sur l'usure en dépeuille à $V_c = 350$ tr/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm après 5 min de tournage [1].

La figure II.9 montre la morphologie de l'usure sur la surface dénudée des plaquettes utilisées. L'usure des plaquettes "CVD" et "MTCVD" est illustrée dans les figures II.9(a) et II.9(b), où l'on observe que l'usure est régulière et se manifeste par l'apparition d'une bande brillante nervurée parallèle à l'arête de coupe. La figure II.9(c) montre l'usure en dépeuille de la plaquette PVD. On observe un léger affaissement de la pointe de l'outil ainsi que de petites rainures sur la face latérale de la plaquette, ce qui permet de déduire la présence d'une usure abrasive.

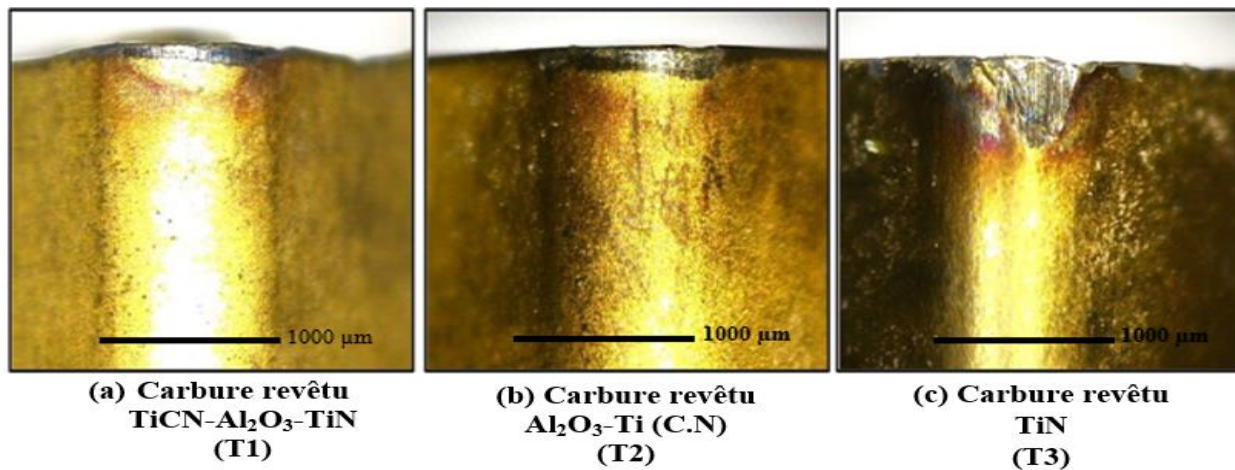


Figure II.9 : Morphologies d'usure pour les différentes plaquettes de coupe utilisées [1].

Afin de mieux comprendre le comportement et les mécanismes d'usure qui accompagnent les opérations d'usinage, des micrographies SEM après 5 min d'usinage et avec le même grossissement ont été prises par les auteurs pour les différentes plaquettes de coupe utilisées. Ces dernières sont présentées dans les figures II.10, II.11 et II.12 et révèlent que la surface d'attaque, la surface de dépouille et la géométrie de coupe sont les trois régions où l'usure se produit. Pour les plaquettes "T1" et "T2" présentées dans les figures II.10 et II.11, l'usure est régulière et l'abrasion est le principal mécanisme d'usure observé. Ceci est principalement dû à la présence de rainures sur toute la longueur de la bande d'usure (Vb). Ces rainures sont principalement produites par les particules dures présentes dans la structure du matériau de la pièce. Elles ne sont pas aussi profondes que celles observées sur d'autres plaquettes de coupe, ce qui s'explique par la présence de couches de revêtement qui agissent comme une protection contre l'usure abrasive. L'usure adhésive est également observée pour les plaquettes CVD et MTCVD, ce qui a été confirmé par les traces de matériau de travail collées à la surface de l'outil, comme le montrent les photographies SEM des plaquettes de coupe T1 et T2 (Les figures II.10 et II.11). C'est une conséquence des températures élevées produites pendant l'usinage ainsi que des caractéristiques physico-mécaniques du matériau usiné.

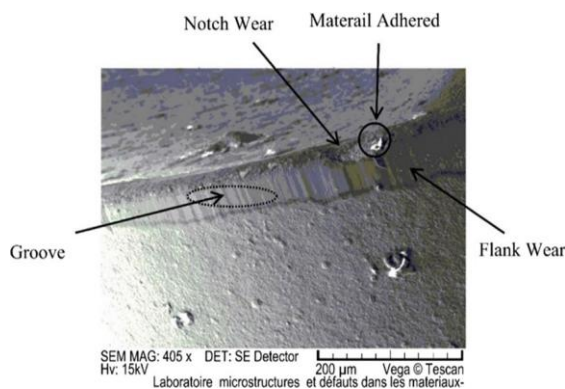


Figure II.10 : Micrographie SEM de l'usure en dépouille Vb de la plaquette GC2015 à $V_c = 350$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,5$ mm, $t = 5$ min et environnement sec [1].

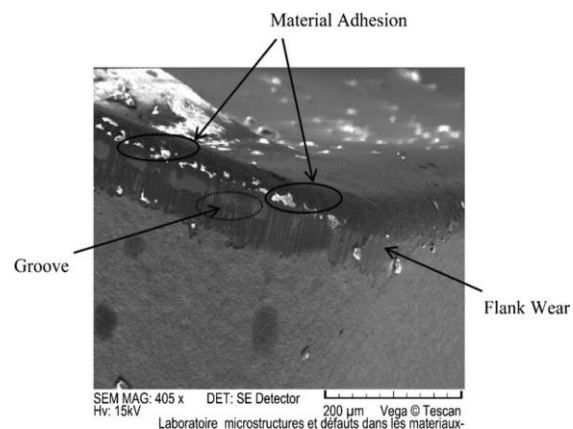


Figure II.11 : Micrographie SEM de l'usure en dépouille Vb de la plaquette GC4215 à $V_c = 350$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,5$ mm, $t = 5$ min et environnement sec [1].

La figure II.12 montre l'illustration SEM de l'usure de la plaquette de coupe PVD. De nombreuses rainures abrasives sont clairement observées sur la face du flanc de l'outil, ce qui confirme que l'usure abrasive est le mécanisme d'usure prédominant. L'usure adhésive est également présente sur les surfaces de l'outil, et l'écaillage est également observé sur la pointe de la plaquette, probablement en raison d'une contrainte élevée.

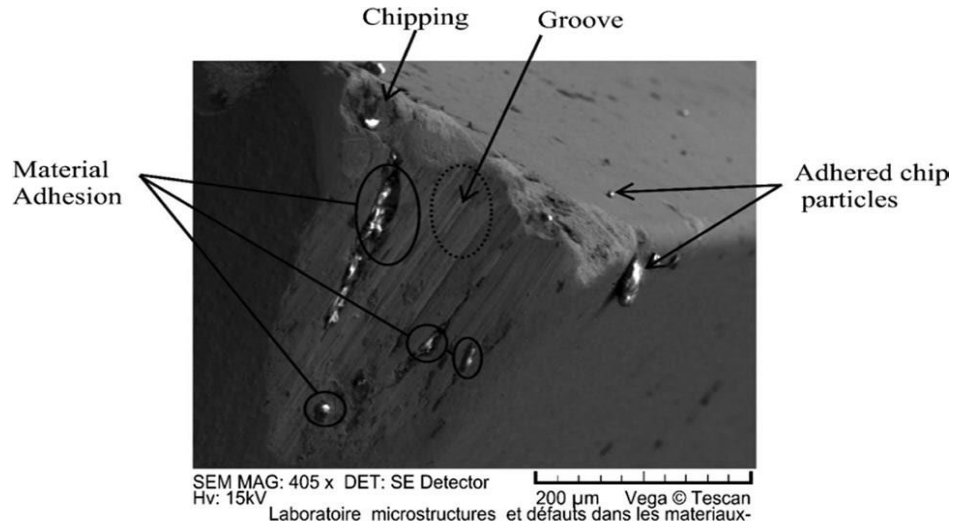


Figure II.12 : Micrographie SEM de l'usure en dépouille de la plaquette GC1015 à $V_c = 350$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,5$ mm, $t = 5$ min et environnement sec [1].

L'analyse des micrographies d'usure présentées dans les figures II.10, II.11 et II.12 permet de conclure que les principaux mécanismes d'usure sont représentés par l'abrasion, l'adhésion et l'écaillage.

Lors de l'étude réalisée par **Nikam et al [3]**. L'aspect de l'usinabilité de l'acier faiblement allié AISI 4140 est analysé en termes de durée de vie de l'outil, des efforts de coupe, de mécanisme d'usure de l'outil et de la rugosité de la surface usinée lors du tournage dur en utilisant des plaquettes en CBN. Les auteurs ont réalisé une étude expérimentale selon un plan L_9 et les essais ont été réalisés sans lubrification.

Selon les résultats de l'étude, les auteurs ont confirmé que la rugosité de surface est un aspect important de l'usinage qui permet d'analyser les caractéristiques de la surface usinée afin de déterminer la résistance à la fatigue et à la corrosion des composants usinés. L'effet des paramètres d'entrée du processus sur la rugosité de surface est illustré sur la figure II.13 et le tableau ANOVA correspondant est représenté au tableau II.2. On remarque que la valeur P de l'avance est inférieure à 0,05. Cela indique que l'avance est un facteur significatif sur (Ra) et (Rz), par rapport à la vitesse de coupe. En effet, la vitesse de coupe n'a pas d'importance statistique sur les critères de la rugosité de surface obtenue (Ra) et (Rz) ce qui est justifié par les faibles valeurs de F (**voir tableau II.2**). Ainsi, cette observation permet de conclure que la rugosité de surface dépend fortement de l'avance par rapport aux autres paramètres d'entrée de l'usinage. De même, l'analyse théorique de l'usinage des métaux, en général, montre que la rugosité de surface est inversement liée à l'avance (Chou et al. 2002 [3]). En outre, pendant le processus de tournage, l'avance génère des hélicoïdes et des sillons en raison de l'action de labourage de la forme de l'outil, et elle augmente avec l'avance (Aouici et al. 2011 [3]).

En outre, les auteurs ont affirmé qu'avec l'augmentation de l'avance, la force de poussée augmentait fortement, ce qui entraînait un risque de vibration. Ces vibrations réduisent la capacité

de coupe des plaquettes et augmentent la déformation plastique pendant le tournage, ce qui se traduit par un mauvais état de surface. La rugosité de surface la plus élevée est observée pour une avance de 0,2 mm/tr et une vitesse de coupe de 200 m/min, tandis que la rugosité de surface la plus faible est observée pour une avance de 0,15 mm/tr et une vitesse de coupe de 175 m/min (voir figure II.13). On peut constater qu'en augmentant l'avance et en diminuant la vitesse de coupe, la rugosité de la surface augmente, comme le montre la figure II.13. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une vitesse de coupe plus faible génère un frottement élevé qui réduit l'état de surface. En revanche, à une vitesse de coupe plus élevée, l'état de surface s'améliore car la résistance au cisaillement des matériaux de la pièce à usiner diminue en raison de la génération d'une température élevée, ce qui facilite l'enlèvement du matériau de la pièce à usiner.

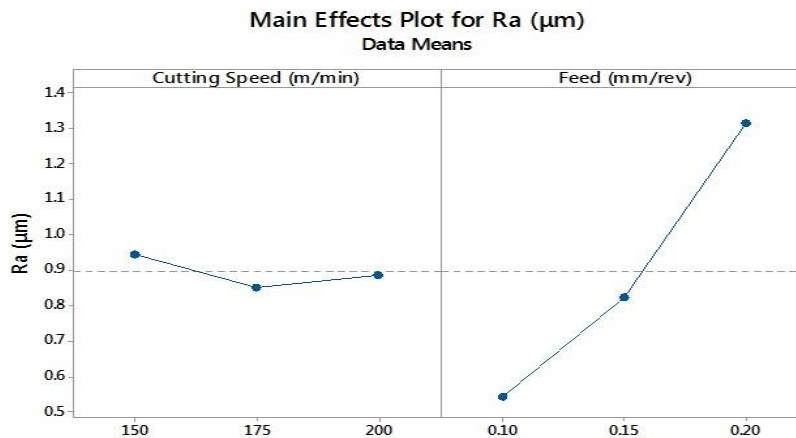


Figure II.13 : Graphique des effets principaux pour la rugosité de la surface [3].

Tableau II.2 : ANOVA pour la rugosité de surface [3].

Source	Ra (μm)			Ra (μm)		
	F-Value	P-Value	Contri	F-Value	P-Value	Contri
V	0.98	0.451	1.35	0.99	0.446	1.62
f	71.15	0.001	98.64	59.81	0.001	98.37

La durée de vie et le mécanisme d'usure de l'outil pour des paramètres de coupe optimaux, obtenus à partir de la technique GRA sont : la vitesse de coupe de 200 m/min, l'avance de 0,1 mm/tr et la profondeur de passe de 0,25 mm. L'effet de la longueur de coupe dans les conditions optimisées sur le V_{bmax} de l'outil est présenté dans la figure II.14. On observe que lorsque la longueur de coupe lors du tournage augmente, le V_{bmax} augmente également. D'autre part, V_{bmax} augmente rapidement jusqu'à une longueur de coupe de 3000 mm, puis régulièrement de 3000 à 5000 mm de longueur de coupe. Cela s'explique par la progression de l'usure en dépouille de l'outil CBN. Au début de l'opération de tournage, l'arête de coupe était fraîche et arrondie.

Compte tenu de l'avancement du processus (disons 1000 mm de longueur de coupe), on observe une usure par abrasion sur la face du dépouille et une texture polie/surface noire sur la face du râteau. Cela est dû aux efforts de coupe plus élevées générées pendant le processus de tournage en raison de la présence de la phase martensitique dans le matériau acier faiblement allié AISI 4140. En outre, sur la face du peigne, la surface noire est observée en raison de la friction qui se produit lorsque les copeaux glissent sur la face du peigne. Ainsi, le phénomène de friction associé à une pression spécifique élevée se produit entre le copeau et la face de l'outil.

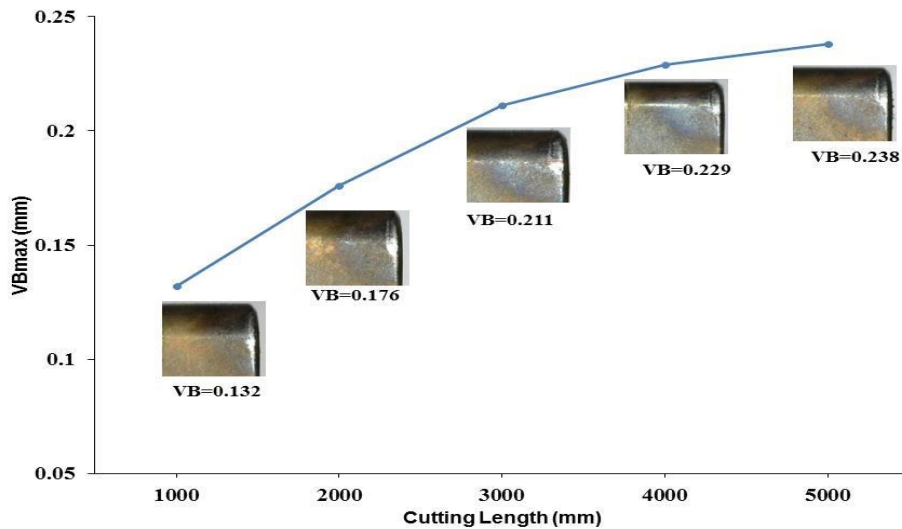


Figure II.14 : Effet de la longueur de coupe sur le Vbmax [3].

Cela est dû à une pression spécifique élevée et à la présence de phases durcies dans le matériau, qui génèrent une température de coupe élevée pendant le tournage à la jonction outil copeau. En outre, au fur et à mesure que le tournage progresse avec la même arête de coupe, la longueur de Vbmax augmente encore (**voir figure II.14 et figure II.15(d)**). À ce stade, des efforts de coupe plus élevés sont générés par le phénomène de cisaillement et de frottement qui provoque le ramollissement de la phase de liant sur la face de l'outil, ce qui réduit la résistance de l'arête de coupe. Enfin, l'état de l'arête de coupe a été analysé après l'achèvement de la longueur de coupe de 5000 mm de la pièce à usiner (**voir figure II.15(e, f)**).

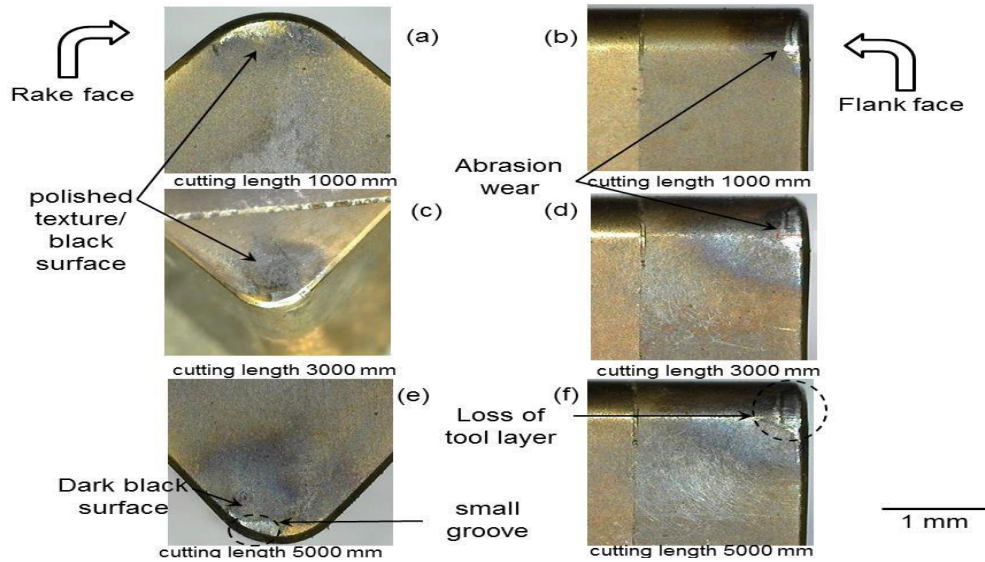


Figure II.15 : Image de l'usure de l'outil à différentes longueurs de coupe [3].

Lors de l'étude réalisée par **Özdemir et al [5]**, ont aussi, appliqué la technique de Taguchi L_9 pour analyser et optimiser les paramètres de coupe en fonction des facteurs d'usinabilité lors du tournage de l'acier faiblement allié AISI 4140 à l'aide d'outils de coupe en carbure VBMT160408FPKCP25 enrichi en cobalt et doté d'un revêtement multicouche MTCVD-TiCN- Al_2O_3 dans des conditions de coupe donnés. La vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe ont été sélectionnées comme des paramètres d'entrées, les paramètres de sortie choisis incluaient les efforts de coupe et la rugosité de surface.

Les auteurs ont conclu qu'une faible avance et de faibles profondeurs de passe peuvent être préférées avec l'outil à rayon de plaquette de 0,8 mm utilisé dans les études expérimentales. Une faible valeur de rugosité de surface peut être obtenue avec une avance ne dépassant pas $\frac{1}{4}$ du rayon de la pointe. Aussi, la valeur de la rugosité de surface se détériore quelque peu aux valeurs d'avance de 0,15 et 0,2 mm, où ces valeurs sont dépassées. Comme la limite d'élasticité du matériau enlevé est faible, des avances élevées ont été testées pour voir plus clairement, les effets des efforts de coupe. La figure II.16 montre la relation entre les paramètres de coupe et la valeur de la rugosité de surface. La valeur de la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de l'avance.

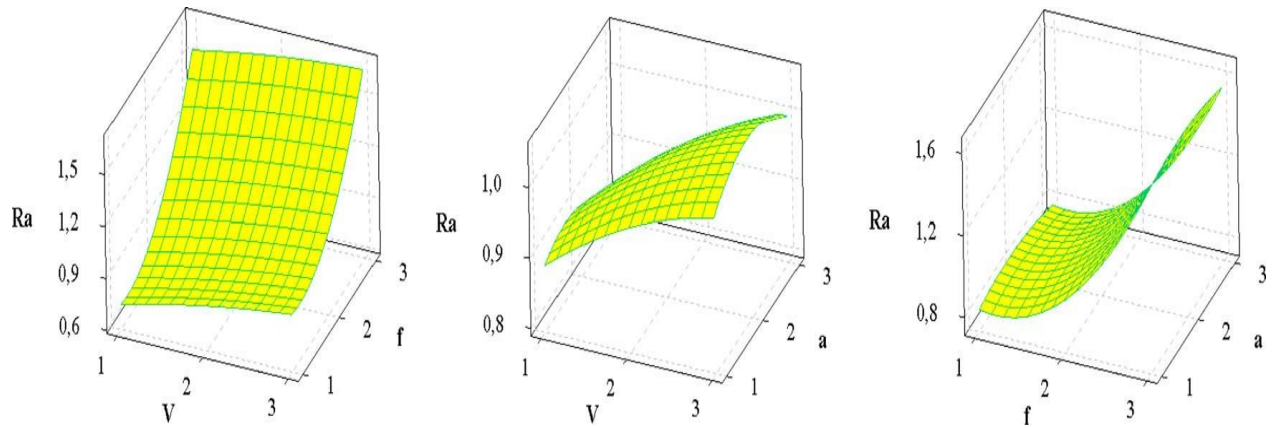


Figure II.16 : Effet des paramètres de coupe sur la rugosité de la surface [5].

Lors de leur seconde étude, **Özdemir et al [27]**, ont réalisé un travail de recherche sur l'évaluation comparative des performances des plaquettes en carbure revêtues et des plaquettes CBN dans le tournage à sec de l'acier faiblement allié AISI 4140 (50 HRC). Cette étude vise à analyser l'effet de divers paramètres d'usinage sur les efforts de coupe et la rugosité de surface en utilisant RSM et ANOVA et L'analyse Des Relations Grises (GRA) basée sur la méthode Taguchi.

Les diagrammes des effets principaux montrant les effets de la vitesse de coupe, d'avance, de la profondeur de passe et du rayon du bec de l'outil sur Ra est présentée à la figure II.17, conformément à l'approche de Taguchi selon laquelle "le plus petit est le meilleur". D'après, l'avance a un impact supérieur sur Ra et Rz, suivie de la vitesse de coupe. La rugosité de la surface est proportionnelle à l'avance. En revanche, l'augmentation de la vitesse de coupe réduit la rugosité de la surface. Il a été conclu que la profondeur de passe et le rayon du bec ont un effet négligeable sur Ra.

L'objectif principal de l'analyse de la variance est de montrer quelles variables indépendantes affectent de manière significative les variables dépendantes. Les résultats de l'ANOVA pour les deux plaquettes de coupe, qui montre la contribution de chaque paramètre d'usinage sur les réponses. Les paramètres d'usinage dont la valeur p est inférieure à 0,05 sont statistiquement significatifs. En raison de l'effet négligeable des interactions ou des carrés des facteurs, seule la ressource linéaire est utilisée dans l'analyse ANOVA.

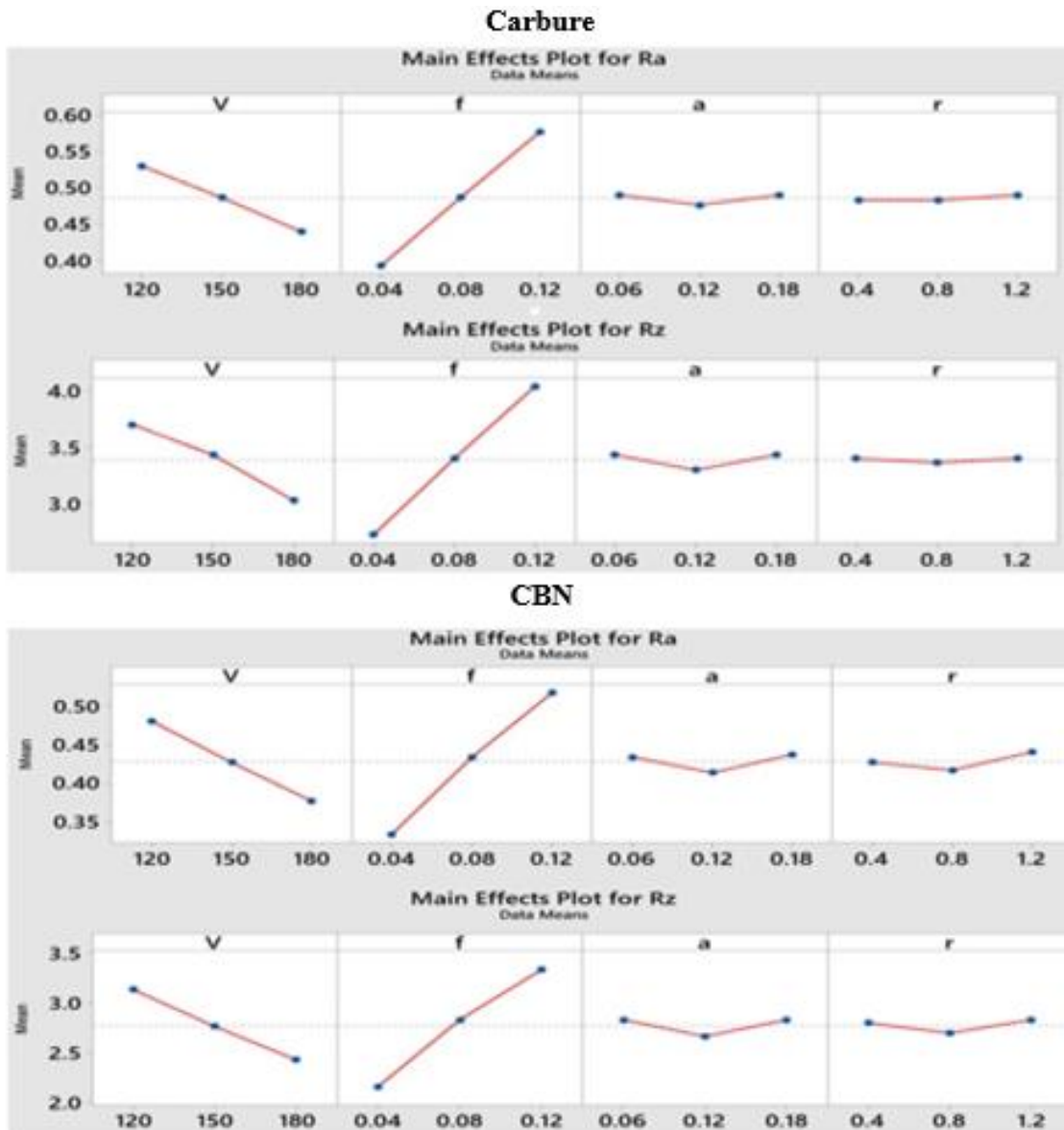


Figure II.17 : Graphique des effets principaux pour les plaquettes en carbure et les plaquettes CBN [27].

L'avance est le facteur dominant de la rugosité de surface de la plaquette en carbure, avec des effets de contribution de 80% et 78,03% pour Ra et Rz, respectivement. La vitesse de coupe est également un indicateur significatif de la rugosité de surface pour les plaquettes en carbure, avec des effets de contribution de 19,28% et 20,52% pour Ra et Rz, respectivement. Pour la plaquette CBN, l'impact d'avance sur Ra et Rz était de 73,76% et 71%, respectivement. Cependant, l'effet de la vitesse de coupe sur Ra et Rz est de 23,43% et 25,56%, respectivement. L'augmentation d'avance élargit la zone de copeaux dans la pièce tournée, ce qui entraîne une rugosité de surface plus élevée. En outre, une faible vitesse de coupe entraîne la formation d'arêtes rapportées sur

l'outil de coupe, ce qui détériore la qualité de la surface. Il convient donc de combiner un faible l'avance et une vitesse de coupe élevée pour obtenir une bonne qualité de surface.

D'après le graphique de la surface en 3D (voir la figure II.18), la rugosité de la surface augmente avec les deux plaquettes de coupe lorsque l'avance augmente, alors qu'elle diminue lorsque la vitesse de coupe augmente. La combinaison d'une faible vitesse de coupe et d'une l'avance élevée entraîne une forte augmentation de Ra et Rz.

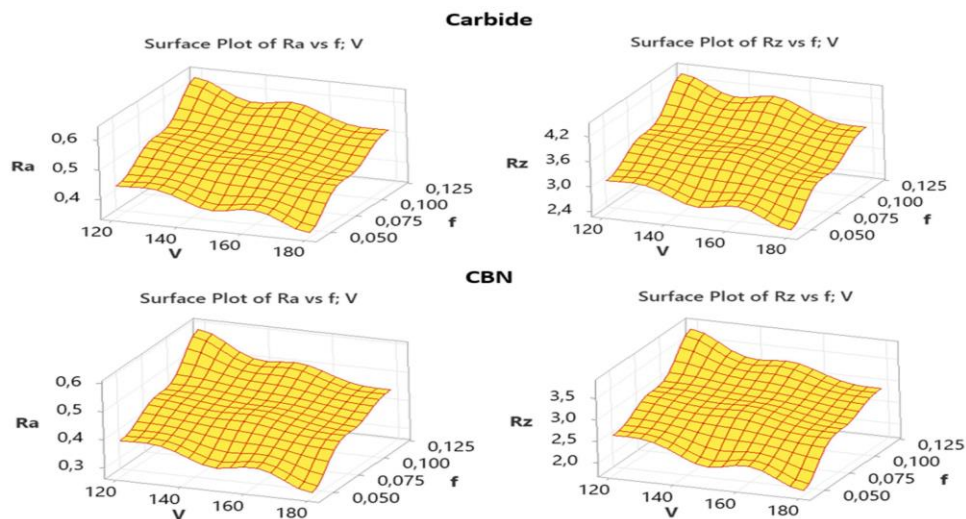


Figure II.18 : Tracé de la surface en 3D pour la rugosité de la surface [27].

L'étude de Hadjela et al [4] est une étude expérimentale de l'usinage de l'acier faiblement allié AISI 4140 afin de trouver les conditions de coupe qui permettent d'obtenir les valeurs minimales de Ra et Vb et des valeurs MRR maximales. Différentes méthodes d'optimisation sont utilisées, à savoir Taguchi, L'analyse Relationnelle Grise (GRA), La Technique Par Ordre De Préférence Par Similarité Avec La Solution Idéale (TOPSIS) et L'analyse Des Ratios D'optimisation Multi-Objectifs (MOORA). Le plan L₁₆ de Taguchi a été utilisé pour organiser 16 expériences. La vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p) étaient les paramètres d'entrée, avec quatre (04) niveaux pour chaque paramètre de coupe.

Les résultats montrent que l'avance et la vitesse de coupe ont eu l'effet le plus important sur Ra et V_c . La figure II.19 montre la morphologie de l'usure pour différentes vitesses de coupe. Après 2 min du temps d'usinage (T_m) se développent des sillons réguliers avec l'augmentation de la vitesse de coupe. L'avance et la vitesse de coupe ont eu l'effet le plus important sur Ra et Vb, selon une analyse ANOVA. La profondeur de passe et la vitesse d'avance par la profondeur de coupe et l'avance. Pour obtenir une rugosité de surface et une usure des copeaux minimales, ainsi qu'un taux d'enlèvement de matière, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe devaient être respectivement de 250 m/min, 0,11 mm/tr et 1,4 mm, selon les résultats de l'optimisation.

Les trois méthodes d'optimisation multi objectifs, GRA, TOPSIS et MOORA, ont abouti à la même combinaison V_{c1}, f_1 et a_{p4} correspondant au régime de coupe optimal ($V_c = 250$ m/min, $f = 0,11$ mm/tr, $a_p = 1,4$ mm) L'application des trois méthodes d'optimisation a permis d'obtenir

un régime de coupe qui fait le compromis entre les objectifs contradictoires, et les valeurs de sortie obtenues sont $R_a = 0,763 \mu\text{m}$, $V_b = 0,054 \text{ mm}$ et $\text{MRR} = 38,5 \text{ cm}^3/\text{min}$.

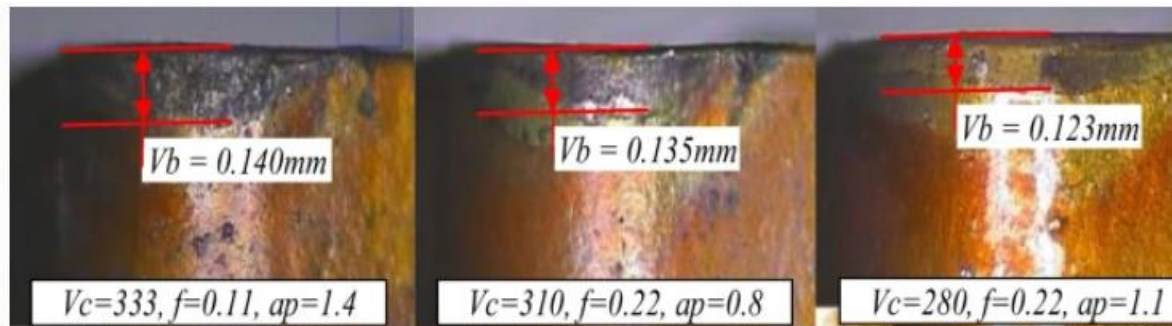


Figure II.19 : Micrographie de l'usure en dépouille V_b (temps = 2 min) [4].

Tougui et al [28]. ont appliqué les approches Taguchi et TOPSIS pour déterminer une combinaison optimale de paramètres de coupe pendant le tournage à sec de l'acier inoxydable AISI316L, en utilisant un outil cermet avec un revêtement PVD (TiCN- TiN). L'objectif est d'obtenir une combinaison optimale des paramètres du processus donnant des réponses minimales (en termes de d'usure en dépouille (V_b), d'effort de coupe tangentiel (F_z) et de rugosité de surface (R_a) et du taux d'enlèvement de matière maximum (MRR) lors de l'usinage du matériau considéré. Pour ce faire un plan réduit de Taguchi L_9 a été réalisé en prenant comme paramètres d'entrée la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), la profondeur de passe (a_p) et le temps de coupe (t_c). Usure (V_b), l'effort (F_z), la rugosité (R_a) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) ont été considérés comme les principales réponses du processus. Les principaux résultats du plan d'expérience sont présentés dans la figure II.20.

Ainsi, afin de distinguer le paramètre de coupe le plus significatif, une analyse de variance (ANOVA) a été appliquée. Les résultats de l'ANOVA ont révélé que le temps d'usinage est le facteur qui affecte le plus l'usure V_b avec une contribution de 50,69%, suivi par l'avance et la vitesse de coupe avec des contributions de 13,34% et 11,02%, respectivement. En ce qui concerne F_z , la profondeur de passe est le facteur le plus important avec 50,84%, suivi par le temps d'usinage avec 17,80%. L'ANOVA a montré aussi que le temps d'usinage est le facteur le plus important qui affecte le R_a avec 58,97%, suivi par l'avance par tour avec 9,61%. L'optimisation mono-objective basée sur l'approche Taguchi, pour atteindre les valeurs minimales de V_b , F_z et R_a ainsi que la maximisation du MRR, Passe le calcul du rapport Signal sur Bruit (S/N). Chaque niveau optimal des facteurs d'entrée correspond à la plus grande valeur du rapport S/N.

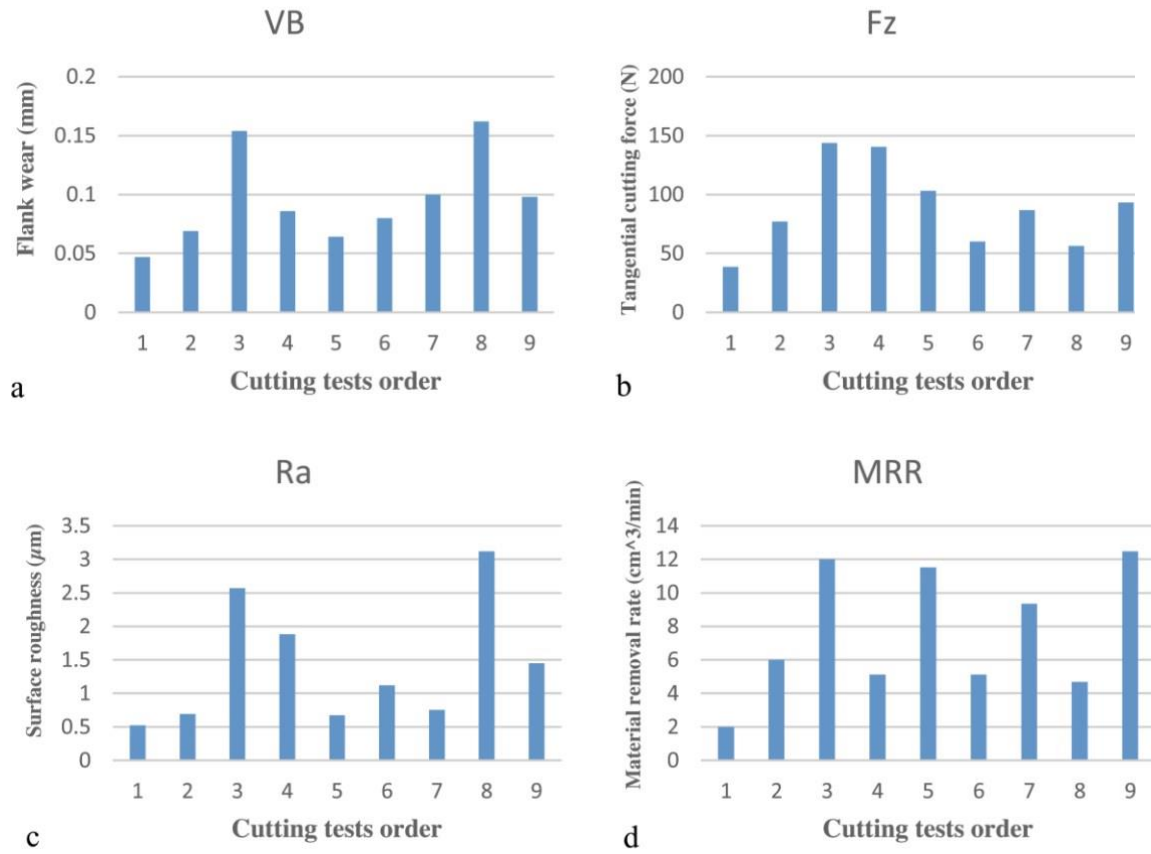


Figure II.20 : Résultats expérimentaux du plan L₉ [28].

La figure II.21 présente les graphiques des effets principaux des rapports S/N des paramètres technologiques considérés.

D'après la figure II.21, il est possible de constater qu'une usure minimale est atteinte lorsque $V_c = 320$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,2$ mm et $t_c = 5$ min, un effort tangentiel de coupe minimal est atteint pour $V_c = 250$ m/min, $f = 0,12$ mm/tr, $a_p = 0,1$ mm et $t_c = 5$ min, le meilleur état de surface est obtenu avec la combinaison $V_c = 250$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,3$ mm et $t_c = 5$ min, alors que le taux le plus élevé d'enlèvement de matière est atteint avec $V_c = 390$ m/min, $f = 0,16$ mm/tr, $a_p = 0,3$ mm et indépendamment du temps d'usinage. Les résultats de l'optimisation mono-objective montrent que chaque critère considéré débouche sur un régime spécifique, c'est-à-dire que cette approche ne permet pas l'obtention d'un régime faisant le compromis entre divers objectifs contradictoires. Pour pallier à cette insuffisance, les auteurs ont eu recours à une technique d'optimisation multi-objective, à savoir la méthode TOPSIS. En effet, cette méthode permet de convertir un problème d'optimisation multi-objectifs en un problème d'optimisation mono-objectif, par le calcul d'un indice de classement regroupant les différents objectifs, il s'agit du 'coefficient de proximité relative pour la solution idéale individuelle' C_i . Une valeur maximale de ce coefficient correspond à la meilleure performance. Dans le cas de l'optimisation

de l'usinage de l'acier AISI 316L, la figure II.22 présente le graphique des effets principaux du Ci.

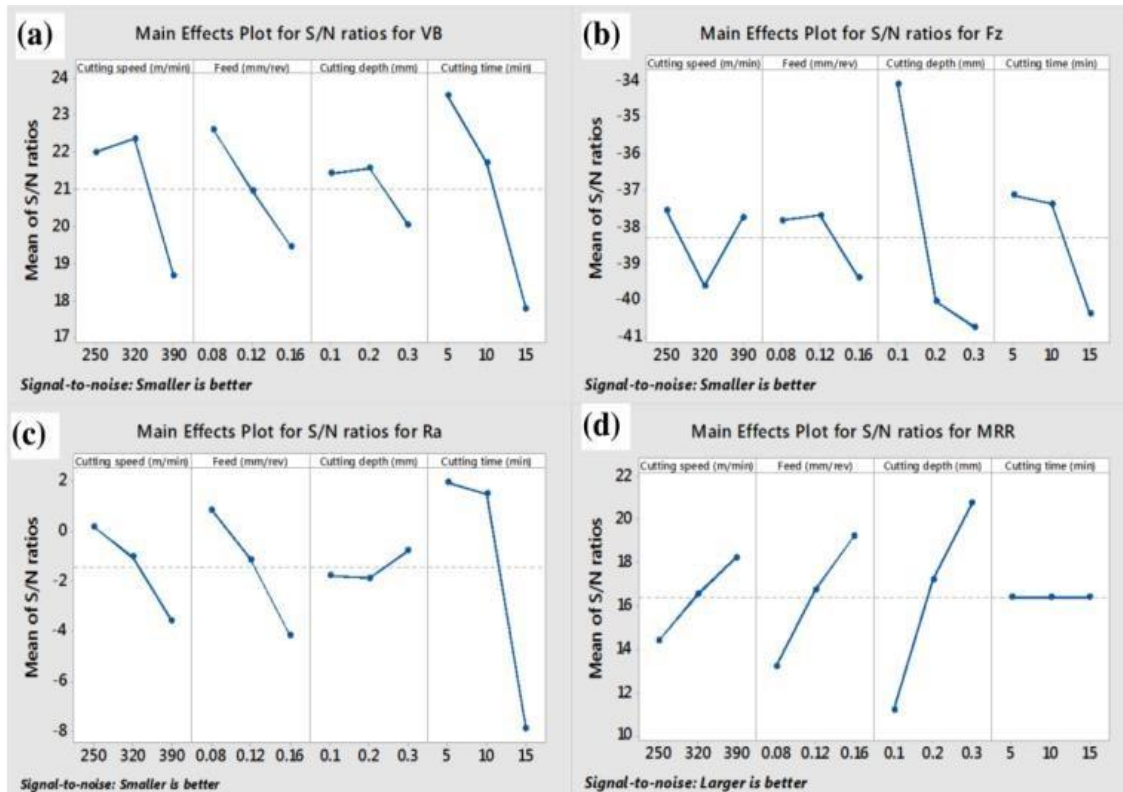


Figure II.21 : Graphique des effets principaux du S/N de Vb, Fz, Ra et MRR [28].

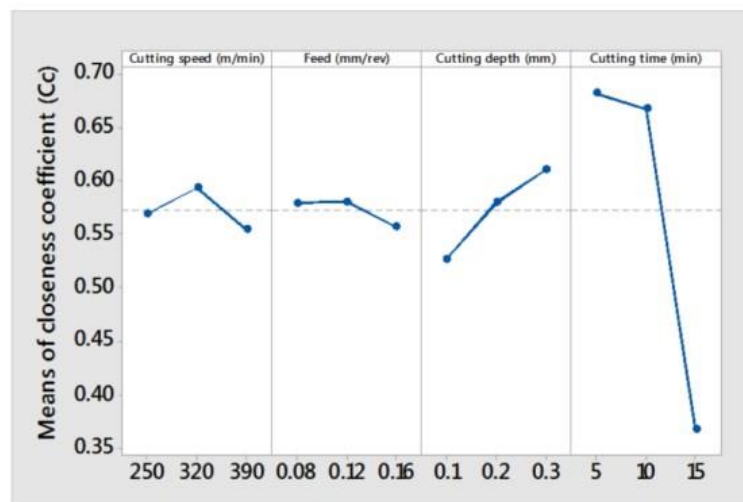


Figure II.22 : graphique des effets principaux du coefficient de proximité 'Ci' [28].

En se basant sur la méthode TOPSIS, d'après la figure II.22, la combinaison des éléments du régime de coupe, permettant de minimiser V_b , F_z et R_a ainsi que maximiser le MRR est donnée par $V_c = 320$ m/min, $f = 0,12$ mm/tr, $a_p = 0,3$ mm et $t_c = 5$ min.

En fin les auteurs confirment l'adéquation du régime obtenu Essai 5, puisqu'il permet aussi d'obtenir un type de copeaux acceptable (**figure II.23**).

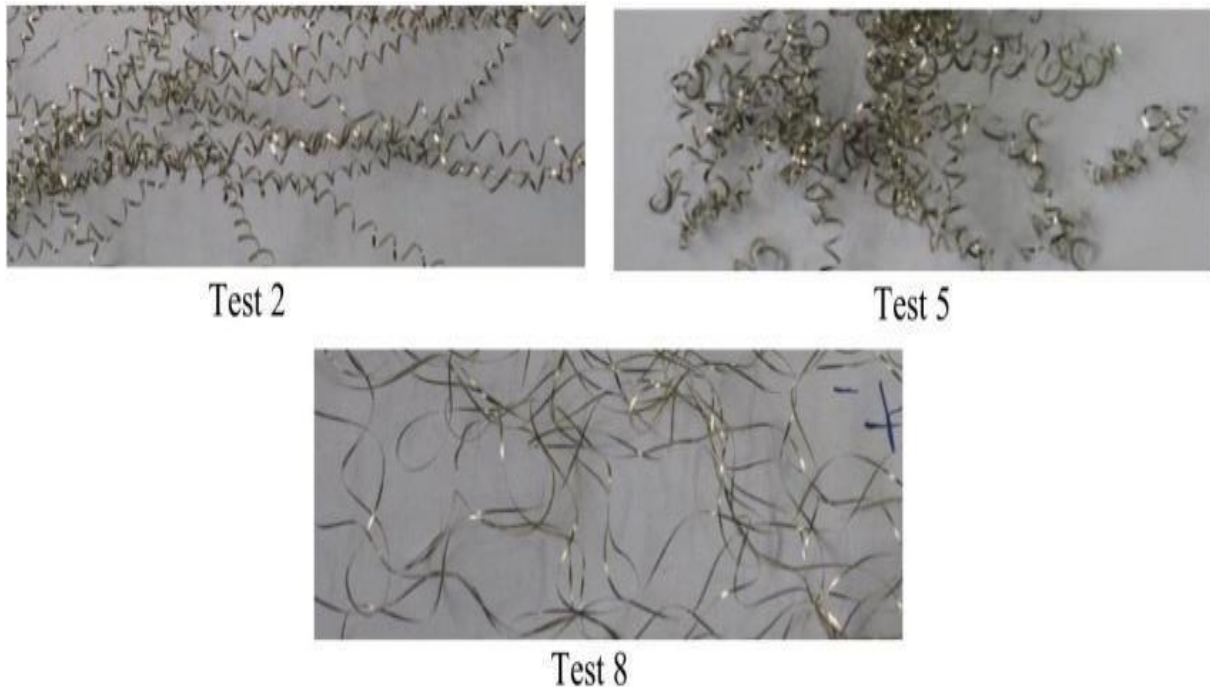


Figure II.23 : Morphologie des copeaux produits par les essais 2, 5 et 8 [28].

Dans leur article, **S. Venkateswarlu & R. K. Suresh [29]** ont mené une étude expérimentale pour optimiser la rugosité de surface (R_a) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) simultanément dans l'usinage à chaud en utilisant l'analyse Relationnelle De Grey (GRA) et la Désirabilité Analyse Fonctionnelle (DFA), basée sur un plan Taguchi L_{18} . La pièce est chauffée à l'aide d'une flamme de chalumeau. L'influence de la vitesse de broche, de l'avance et de la profondeur de passe a été analysée. L'ANOVA est également effectuée pour étudier les paramètres les plus influents sur la rugosité de surface et le taux d'enlèvement du matériau. Quatre paramètres de processus ont été sélectionnés avec une conception mixte présentée dans le tableau II.3.

Une série d'essais de tournage a été réalisée pour évaluer l'effet des paramètres de tournage sur la rugosité de la surface et le taux d'enlèvement de matière. Les résultats de l'expérimentation sont présentés dans le tableau II.4.

Tableau II.3 : Facteurs d'entrée et leurs niveaux [29].

Paramètres de processus	Symbole	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Environnement d'usinage	ME	Dry	Condition à chaud (300°)	-----
Vitesse de broche (tr/min)	N	250	300	350
Avance par tour (mm/tr)	F	0.05	0.07	0.09
Profondeur de passe (mm)	d	0.50	1.0	1.5

Tableau II.4 : Analyse des relations grises pour la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière [29].

Expt. No.	Experimental data		Normalized values		Grey Relational Coefficient		Grey Relational grade
	SR	MRR	SR	MRR	SR	MRR	
1	1.11	233.35	0.486631	0	0.493404	0.333333	0.413369
2	1.82	683.4	0.106952	0.337103	0.358925	0.429961	0.394443
3	1.01	930	0.540107	0.521816	0.520891	0.511151	0.516021
4	1.33	247.8	0.368984	0.010824	0.44208	0.335756	0.388918
5	1.08	770.4	0.502674	0.40227	0.50134	0.455485	0.478413
6	0.85	1568.4	0.625668	1	0.571865	1	0.785933
7	0.33	685.8	0.903743	0.338901	0.838565	0.430627	0.634596
8	0.64	1408.8	0.737968	0.880454	0.65614	0.807042	0.731591
9	2.02	551.88	0	0.23859	0.333333	0.396382	0.364858
10	0.15	795.54	1	0.4211	1	0.463435	0.731718
11	0.32	441	0.909091	0.155537	0.846154	0.371896	0.609025
12	0.33	1192.2	0.903743	0.718213	0.838565	0.63956	0.739063
13	0.28	1053.6	0.930481	0.614396	0.877934	0.564587	0.72126
14	0.54	1007.4	0.791444	0.579791	0.70566	0.543355	0.624508
15	0.24	768.6	0.951872	0.400921	0.912195	0.454926	0.683561
16	0.24	1149	0.951872	0.685854	0.912195	0.614141	0.763168
17	0.36	718.2	0.887701	0.36317	0.816594	0.439819	0.628207
18	0.36	1138.8	0.887701	0.678214	0.816594	0.608431	0.712513

Tableau II.5 : Comparaison des résultats prédits et expérimentaux en utilisant DFA et GRA [29].

Optimum Process Parameters			
DFA	Initial Process Parameters	Predicted Values	Experimental Values
Level of parameters setting	ME1-N1-F1-d1	ME2-N3-F3-d3	ME2-N3-F3-d3
Surface roughness (μm)	1.11	0.3767	0.29
MRR (mm^3/min)	233.35	1471.148	1492.53
Composite desirability	-----	0.9832	0.9429
GRA			
Level of parameters setting	ME1-N1-F1-d1	ME2-N3-F3-d3	ME2-N3-F3-d3
Surface roughness (μm)	1.11	0.3767	0.29
MRR (mm^3/min)	233.35	1471.148	1492.53
Grey relational grade	0.41337	0.8351	0.8552

Analyse de la fonction de désirabilité

- Le réglage optimal des paramètres avec l'analyse de la fonction de désirabilité correspond à un état chauffé (usinage environnement), 350 tr/min (vitesse de broche), 0,09mm/tr (avance) et 1,5 mm (profondeur de coupe). L'optimum prédit la valeur de la rugosité de surface est de 0,3767 μm , le MRR de 1471,148 mm^3/min et la désirabilité composite est de 0,9832. Aussi la valeur expérimentale de la rugosité de surface est de 0,29 μm , le MRR est de 1492,53 mm^3/min et la désirabilité composite est 0,9429.
- En cas D'analyse De La Fonction De Désirabilité (DFA), on constate que les caractéristiques de réponse prédites et expérimentales sont meilleures par rapport aux paramètres d'usinage initiaux. On peut noter qu'il existe un bon accord entre la désirabilité composite prédite (0,9832) et la désirabilité composite expérimentale (0,9429) et donc, la condition ME2-N3-F3-d3 de la combinaison des paramètres de processus a été testée comme étant optimale.

Analyse Relationnelle Grise (GRA)

- Le réglage optimal des paramètres avec l'analyse GRA se situe à l'état chauffé (Usinage environnement), 350 tr/min (vitesse de broche), 0,09 mm/tr (avance) et 1,5mm (profondeur de passe). L'optimum de la valeur prédite pour la rugosité de surface est de 0,3767 μm , MRR 1471,148 mm^3/min , et la qualité relationnelle grise est 0,8351. De plus, la valeur expérimentale de la rugosité de surface est de 0,29 μm , le MRR est de 1492,53 mm^3/min et la désirabilité composite est de 0,8552.
- Dans le cas de L'analyse Relationnelle Grise, on constate que les caractéristiques de réponse prédites et expérimentales sont meilleures par rapport aux paramètres d'usinage initiaux. On peut noter qu'il y a un bon accord entre le GRG prédit (0.8351) et le GRG expérimental (0.8552) et donc la condition ME2-N3-F3-d3 de la combinaison des paramètres de processus ont été testée comme étant optimale.

II.3 Conclusion

L'usinage par enlèvement de matière pour les aciers reste un procédé très convoité par les chercheurs et les fabricants. D'autre part, l'optimisation des paramètres de ce procédé permet un gain de productivité très important.

Dans notre étude nous nous sommes intéressées à l'optimisation de quelques paramètres du procédé de tournage de l'acier faiblement allié AISI 4140 par un outil en carbure revêtu GC-2025.

Chapitre III

Partie expérimentale

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences en tournage. Un tour parallèle est utilisé pour la réalisation des essais, un rugosimètre Mutitoyo pour déterminer la rugosité et un microscope de marque VISUAL 250 pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe. Ces équipements sont nécessaires pour déterminer le comportement du couple (outil-matière) et l'évolution des paramètres technologiques de sortie lors du tournage de l'acier faiblement allié AISI 4140 (le critère de la rugosité moyenne arithmétique (R_a) et le critère d'usure en dépouille (V_b)). Les essais ont été effectués au laboratoire de mécanique et de structure (LMS) du département de Génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945 Guelma.

III.2 Matériels utilisés

Pour la réalisation des expériences il est nécessaire de préparer au préalable les équipements et les moyens de mesure :

III.2.1 Machine-outil

Les expériences de tournage de l'étude, ont été réalisées sur un tour parallèles conventionnel de la société tchèque « **TOS TRENCIN** » modèle **SN40**. La figure III.1 est prise au sein des ateliers du département de Génie mécanique de notre université.

Les caractéristiques de la machine –outil sont :

- Les fréquences de rotation de la broche sont commandées par un variateur de fréquence qui nous permet d'atteindre une vitesse de rotation jusqu'aux 2100 tr/min.
- La puissance du moteur électrique de machine-outil est 6.6 KW.
- Les avances disponible sur cette machine 0.08 à 6.4 mm/tr.



Figure III.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.

III.2.2 Matériaux de l'éprouvette utilisée

Les expériences d'usinage programmées ont été réalisées sur une éprouvette en acier faiblement allié AISI 4140. Ce matériau est largement utilisé dans les entreprises de fabrication mécanique en raison de son faible coût, son excellente propriété mécanique, Les applications générales comprennent les éléments de construction exposés à de fortes contraintes, tels que les arbres, les engrenages, les boulons, ...etc. L'acier faiblement allié AISI 4140 peut également être utilisée en état de trempe comme pièces de machine exposées à une forte usure.

Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont citées ci-après :

- Densité : 7.85 g/cm³.
- Limite d'élasticité : 415 MPa
- Résistance à la traction: 655 MPa
- Module de masse: 140 GPa
- Dureté (Brinell): 197 HB
- Dureté (Rockwell hardness): 13 HRC

L'éprouvette utilisée pour les essais de la rugosité de surface est coupée sur une barre plane en acier faiblement allié AISI 4140 avec une scie mécanique. Cette éprouvette possède un diamètre de 90 mm et une longueur de 400 mm de diamètre.

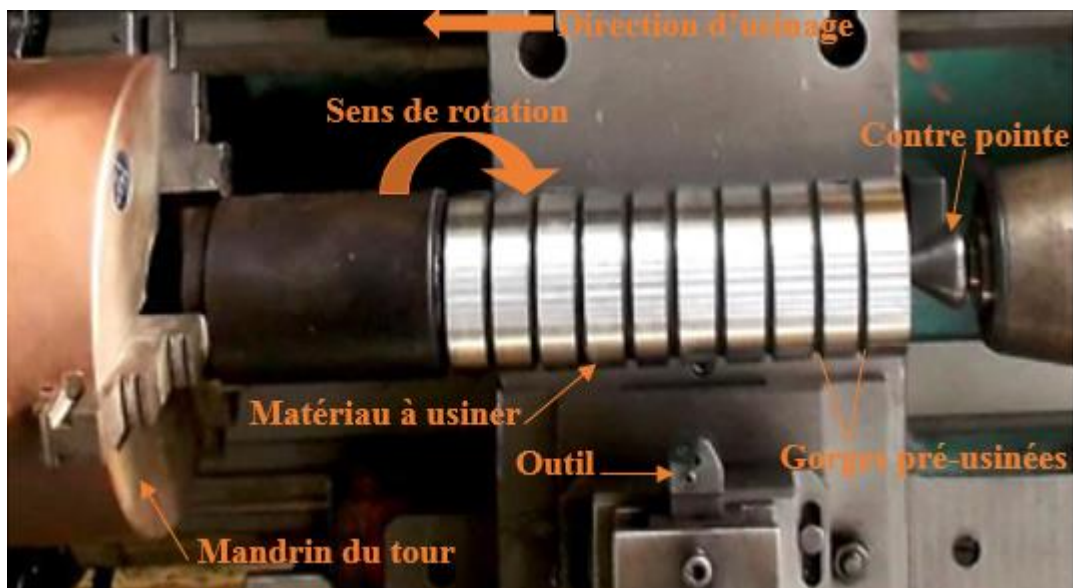


Figure III.2 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais de rugosité.

La composition chimique de l'acier faiblement allié AISI 4140 est présentée dans le tableau III.1 comme suit :

Tableau III.1 : Compositions chimiques de l'acier faiblement allié AISI 4140 [4].

Élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ni	Ti
%	0.43	0.18	0.84	0.007	0.029	1.20	0.18	0.010	0.20	0.002

III.2.3 Plaquette de coupe

La plaquette utilisée est amovible de forme carré, à fixation par bride. Toutes les informations qui concernent la plaquette de coupe sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.2 : plaquette de coupe utilisée.

Matériaux de coupe	Désignation	Marque	Géométrie	Composition chimique	Rayon du bec r_ϵ
Carbure revêtu	GC-2025	Sandvik	SNMG 12-04-08 PM	TiCN-Al ₂ O ₃ TiN	0.8

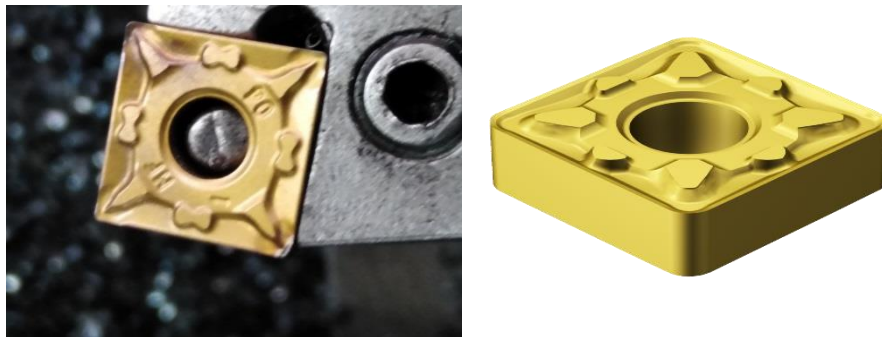


Figure III.3 : plaquette de coupe [4].

III.2.4 Porte outil

Le porte outil (**figure III.4**) est fixé mécaniquement sur un porte-outil de désignation (ISO) PSBNR25×25M12 avec la géométrie suivante :

Tableau III.3: Désignation géométrique.

Porte outil	X_r°	α°	γ°	λ°
PSBNR25×25M12	75	6	-6	-6

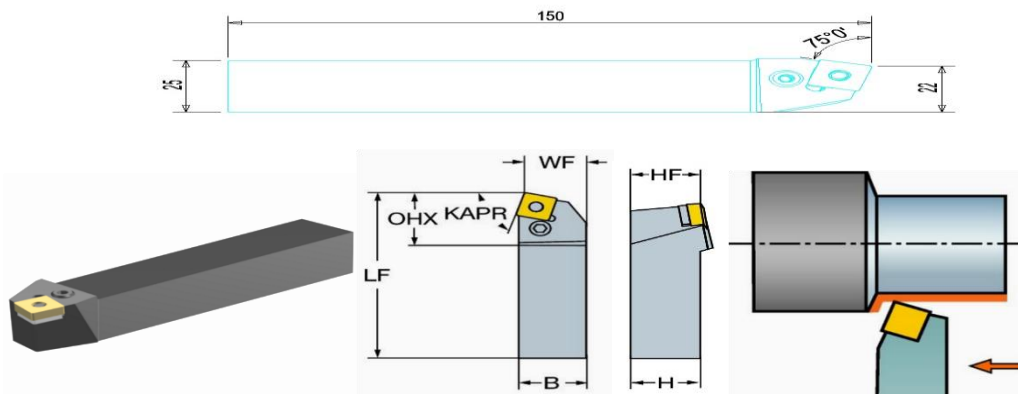


Figure III.4 : Le Porte outil.

Tableau III.4 : Les dimensions de porte outil.

Hauteur de queue (H)	Largeur de queue (B)	Porte à faux Maximal (OHX)	Longueur Fonctionnelle (LF)	Largeur Fonctionnelle (WF)	Hauteur Fonctionnelle (HF)
25	25	27.5	150	22	25

III.2.5 Appareillage de mesures utilisées

III.2.4.1 Rugosimètre en 2D

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) SurfTest 210 (Mitutoyo), muni d'une pointe en diamant de $5\ \mu\text{m}$ et se déplaçant linéairement (axialement) sur la surface usinée. La longueur de palpée (Cut-off) est de 4 mm avec une longueur de base de 0.8mm (0.8x5). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à $40\ \mu\text{m}$) pour R_a et de (0.3 à $160\ \mu\text{m}$) pour R_t et R_z . Les différents critères de la rugosité de surface ont été obtenus instantanément après chaque passage de l'outil (essai), pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précisions, la mesure de la rugosité a été effectuée directement sur la pièce en position de travail sans démonter celle-ci du tour. Les mesures ont été répétées trois fois sur trois lignes de cylindre axial séparées à 120° . La norme pour la mesure de la rugosité de surface est ISO 4287. Le rugosimètre 2D utilisé est présenté dans la (figure III.5) et un pied à coulisse.

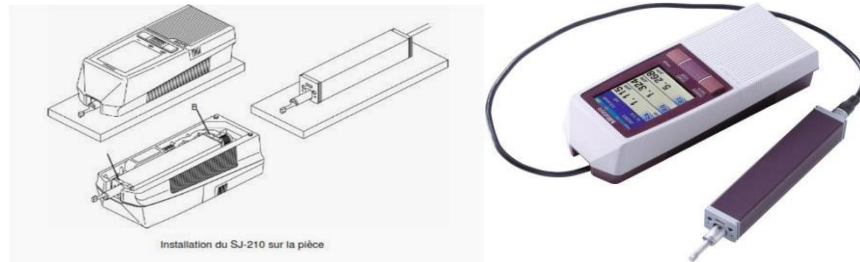


Figure III.5 : Rugosimètre 2D

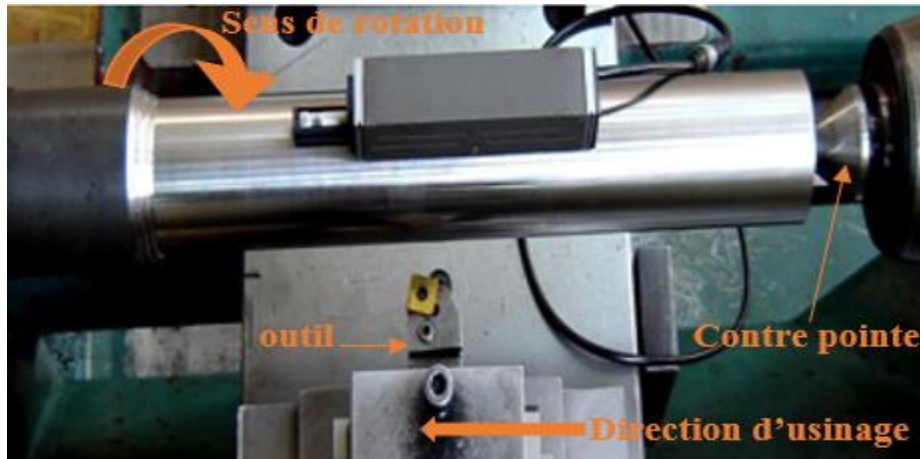


Figure III.6 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais d'usure.

III.2.5.2 Mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (V_b) est un dispositif binoculaire de marque (Visual Gage 250), avec un ordinateur équipé d'un logiciel Visual Gage 2.2.0. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (**Figure III.7**).

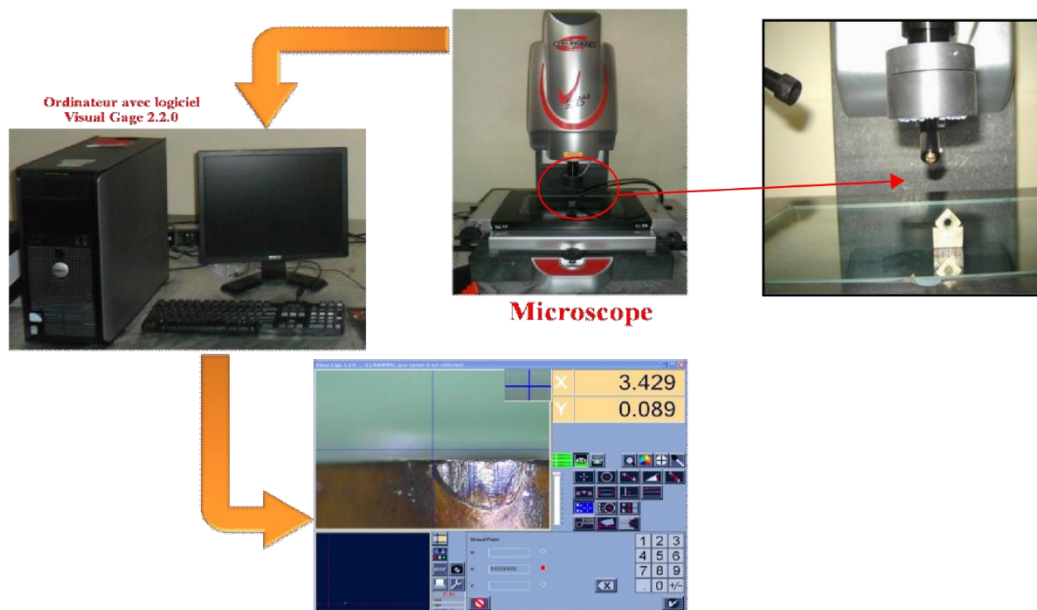


Figure III.7 : VISUAL 250 pour la mesure de l'usure.

III.3 Planification des expériences

III.3.1 Introduction

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe. Parmi ces derniers on peut citer : les éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (r , α , γ , β , ε , etc...), ainsi que les conditions de coupe (rigidité de la machine, lubrification). Effectivement, tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, l'usure, la rugosité, représentent les paramètres de sortie. Lors de cette étude, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivants :

- La rugosité R_a en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) ;
- Le critère d'usure V_b ;
- Le taux d'enlèvement de matière MRR.

III.3.2 Plan d'expérience

Lors de notre étude, dans un souci de gain de temps et de matières, les essais ont été réalisés selon un plan orthogonal réduit de Taguchi L_9 . Les différentes combinaisons sont décrites au tableau III.5. Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage), la pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification.

Tableau III.5 : Plan d'essai expérimental

Essais	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)
1	210	0.08	0.4
2	210	0.12	0.8
3	210	0.18	1.2
4	280	0.08	0.8
5	280	0.12	1.2
6	280	0.18	0.4
7	350	0.08	1.2
8	350	0.12	0.4
9	350	0.18	0.8

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, sont présentés les équipements utilisés lors des essais. La composition chimique des éprouvettes et les caractéristiques des matériaux de coupe (outil et pièce) ont été définies. D'autre part, les conditions de coupe sont mentionnées.

Chapitre IV

Traitement des résultats

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le traitement des résultats en termes de la rugosité moyenne arithmétique (R_a), d'usure en dépouille (V_b) et du taux d'enlèvement de matière (MRR) en fonction des paramètres du régime de coupe à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p) lors du tournage de l'acier faiblement allié AISI 4140 avec un outil en carbure revêtu (GC-2025).

L'étude des résultats est réalisée en premier temps, en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme de surface de réponse du critère de rugosité moyenne arithmétique (R_a) et du critère d'usure en dépouille (V_b). Deux logiciels statistique «MINITAB 18, Design-Expert 12» nous ont permis de faire les calcul et les différents graphiques.

Ensuite, une optimisation multi-objective est réalisée en utilisant deux méthodes très efficaces assez utilisées par littérature dans le domaine l'optimisation du tournage. Ces méthodes nous permettent d'atteindre les objectifs prédéfinis, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois.

IV.2 Résultats des expériences

Le tableau (IV.1) suivant représente les valeurs mesurées du critère de la rugosité moyenne arithmétique (R_a), l'usure en dépouille (V_b) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) lors du tournage de l'acier faiblement allié AISI 4140 par l'outil de coupe en carbure revêtu (GC-2025). Ces valeurs sont obtenues suite aux différentes combinaisons des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) selon un plan d'expérience de neuf (09) essais avec trois (03) facteurs à trois (03) niveaux.

Tableau IV.1 : Résultats des essais.

Essais	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	V_b (mm)	MRR (cm^3/min)
1	210	0.08	0.4	0.541	0.090	6.72
2	210	0.12	0.8	1.203	0.117	20.16
3	210	0.18	1.2	2.104	0.138	45.36
4	280	0.08	0.8	0.495	0.118	17.92
5	280	0.12	1.2	1.071	0.146	40.32
6	280	0.18	0.4	1.610	0.132	20.16
7	350	0.08	1.2	0.452	0.145	33.6
8	350	0.12	0.4	0.841	0.136	16.8
9	350	0.18	0.8	1.513	0.170	50.4

L'analyse des résultats expérimentaux portés au Tableau IV.1 montre que la rugosité moyenne arithmétique (R_a) est enregistrée dans l'intervalle [0,452 à 2,104] μm , l'usure en dépouille (V_b) varie entre [0,090 et 0,170] mm et enfin les valeurs du taux d'enlèvement de matière (MRR) sont comprises [6,72 à 50,4] cm^3/min .

IV.3 Analyse des résultats expérimentaux et discussions

IV.3.1 Analyse de la rugosité moyenne arithmétique (R_a)

IV.3.1.1 Analyse de variance ANOVA pour la rugosité moyenne arithmétique (R_a)

Le tableau IV.2 présente l'analyse de variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité moyenne arithmétique (R_a). Il montre clairement que de l'avance (f) est le facteur le plus influent car sa contribution est de 89,45%, en deuxième lieu on trouve la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution de 6,92%, puis la profondeur de passe (ap) avec une contribution 2,57%. Par contre les autres interactions (V_c*f , V_c*ap et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité moyenne arithmétique (R_a).

Tableau IV.2 : L'analyse de variance ANOVA pour le critère de rugosité moyenne arithmétique (R_a).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	6	2,61140	99,86%	2,61140	0,43523	236,68	0,004
V_c	1	0,18096	6,92%	0,09444	0,09444	51,36	0,019
f	1	2,33930	89,45%	1,14277	1,14277	621,43	0,002
ap	1	0,06720	2,57%	0,02149	0,02149	11,69	0,076
V_c*f	1	0,01496	0,57%	0,00685	0,00685	3,72	0,193
V_c*ap	1	0,00733	0,28%	0,00188	0,00188	1,02	0,419
$f*ap$	1	0,00164	0,06%	0,00164	0,00164	0,89	0,445
Erreur	2	0,00368	0,14%	0,00368	0,00184		
Total	8	2,61508	100,00%				

IV.3.1.2 Graphique des effets principaux pour la rugosité moyenne arithmétique (Ra)

La figure IV.1 présente les droites des effets principaux des paramètres de coupe sur le critère de la rugosité moyenne arithmétique (Ra). Cette figure permet de constater que l'augmentation de l'avance (f) est le facteur le plus influent sur la rugosité de surface moyenne arithmétique (Ra) car il a la plus grande pente. Ce qui signifie qu'une augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la rugosité de surface. Tandis que l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) permet une légère amélioration de la rugosité moyenne arithmétique (Ra). D'autre part la profondeur de passe (ap) n'a pas une influence importante sur la rugosité moyenne arithmétique (Ra).

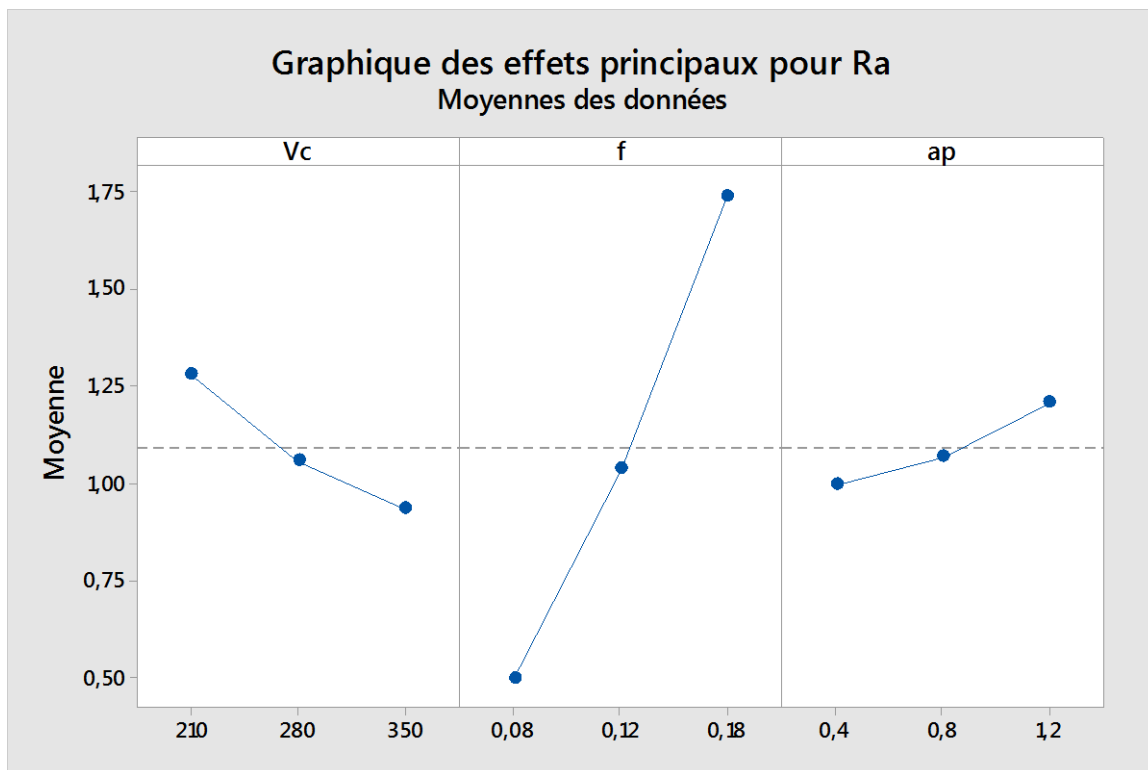


Figure IV.1 : Diagramme des effets principaux sur la rugosité moyenne arithmétique (Ra).

IV.3.1.3 Equation de régression pour la rugosité moyenne arithmétique (Ra)

La relation entre la rugosité moyenne arithmétique (Ra) et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et ap) ont été exprimées par le modèle mathématique linéaire donné par l'équation (IV.1), avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,86\%$).

$$Ra = -0,740 + 0,00112 Vc + 15,96 f + 0,359 ap - 0,01840 Vc * f - 0,00132 Vc * ap + 1,58 f * ap \dots\dots\dots IV.1$$

La vérification du modèle a été effectuée en se basant sur l'analyse des valeurs de l'erreur du modèle développé (**Figure IV.2**). Sur la figure IV.2 on constate que les points de Ra-prévue se rapprochent de la droite à 45° donc des valeurs expérimentales de la rugosité moyenne arithmétique (Ra).

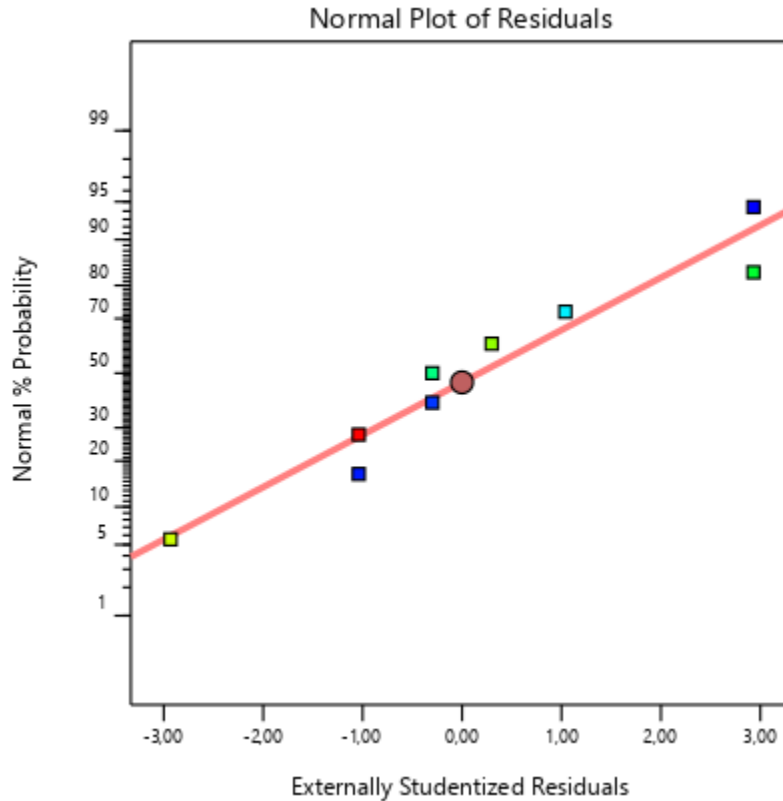


Figure IV.2 : Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales pour la rugosité moyenne arithmétique (Ra).

IV.3.1.4 Diagramme de surface 3D de la rugosité moyenne arithmétique (Ra)

La présentation 3D montre que la pente des diagrammes de l'avance est la plus importante par rapport à celles des deux autres facteurs, ce qui signifie que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité moyenne arithmétique (Ra). Aussi, les tracés de contour permettent la visualisation de la surface de réponse. Ils sont également utilisés pour établir des valeurs de réponse et des conditions de fonctionnement idéales. Les résultats coïncident clairement avec les résultats de l'ANOVA et ceux des droites des effets.

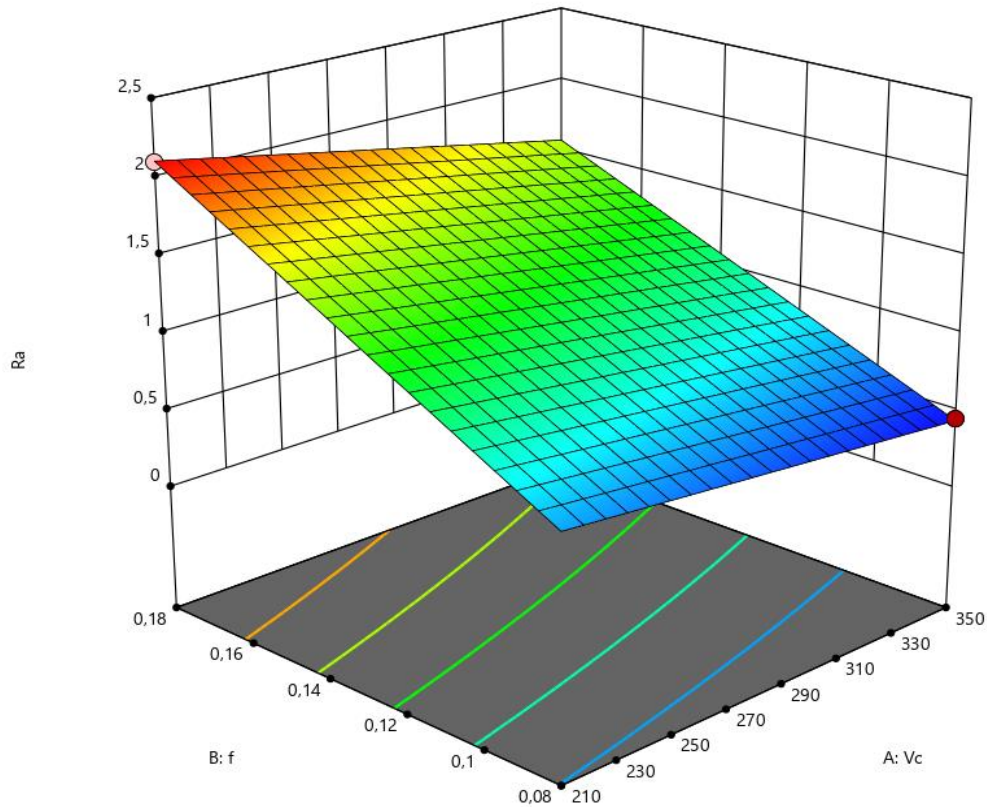


Figure IV.3 : Diagrammes de surface 3D de la rugosité moyenne arithmétique (R_a) en fonction de (V_c, f et $a_p = 0.4$).

IV.3.2 Analyse de l'usure en dépouille (V_b)

IV.3.2.1 Analyse de variance ANOVA pour l'usure en dépouille (V_b)

L'analyse de variance (ANOVA) pour le critère de l'usure en dépouille (V_b) présentée dans le tableau IV.3 montre que la vitesse de coupe (V_c) est le facteur prépondérant sur l'usure en dépouille (V_b) suivie par l'avance (f) avec des contributions de 46,30% et 30,55% respectivement, alors que la profondeur de passe (a_p) 20,77% vient en dernier; finalement, l'interaction (V_c*f) et les termes (V_c*a_p) et ($f*a_p$) n'ont pas un effet significatif sur la variation de l'usure en dépouille (V_b).

Tableau IV.3 : L'analyse de variance ANOVA pour le critère de l'usure en dépouille (Vb).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F
Modèle	6	0,004030	99,65%	0,004030	0,000672	94,75
<i>Vc</i>	1	0,001873	46,30%	0,001058	0,001058	149,30
<i>f</i>	1	0,001235	30,55%	0,000504	0,000504	71,04
<i>ap</i>	1	0,000840	20,77%	0,000784	0,000784	110,56
<i>Vc*f</i>	1	0,000065	1,62%	0,000076	0,000076	10,67
<i>Vc*ap</i>	1	0,000011	0,28%	0,000016	0,000016	2,32
<i>f*ap</i>	1	0,000005	0,13%	0,000005	0,000005	0,75
Erreur	2	0,000014	0,35%	0,000014	0,000007	
Total	8	0,004044	100,00%			

IV.3.2.2 Graphique des effets principaux pour l'usure en dépouille (Vb)

Dans la figure IV.4 sont présentées les droites des effets principaux des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille (Vb). Cette figure montre l'influence considérable des trois facteurs considérés. Nous constatons que l'augmentation de (*Vc*, *f* et *ap*) provoque une augmentation de l'usure en dépouille (Vb). Ceci est confirmé par des pentes assez élevées des trois paramètres.

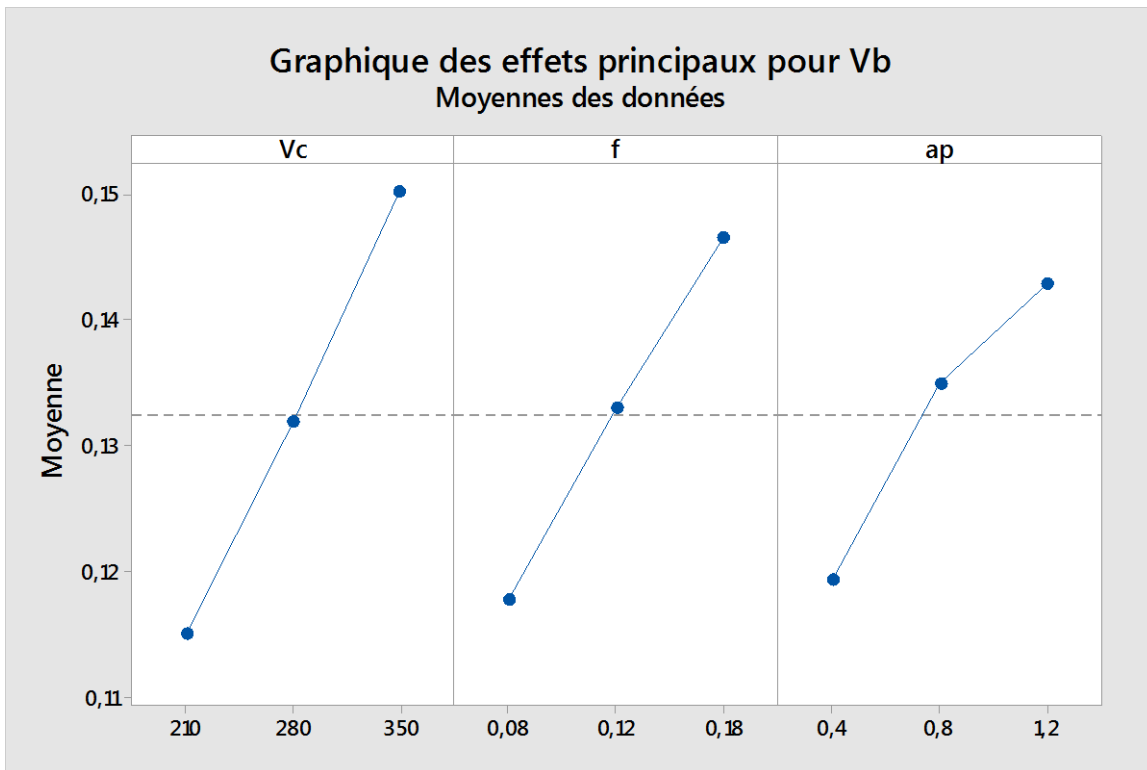


Figure IV.4 : Diagramme des effets principaux sur l'usure en dépouille (Vb).

IV.3.2.3 Equation de régression pour l'usure en dépouille (Vb)

L'équation de régression obtenue et donnée ci-dessous par l'équation (IV.2) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 92,69 \%$.

$$Vb = 0,0350 + 0,000094 Vc - 0,217f + 0,0833 ap + 0,001934 Vc * f - 0,000123 V * ap - 0,089 f * ap \dots \dots \dots \text{IV.2}$$

La Figure IV.5 montre que les données réelles et les valeurs prédites par le modèle mathématique se situent sur une ligne droite 45°, ce qui démontre l'efficacité du modèle de régression.

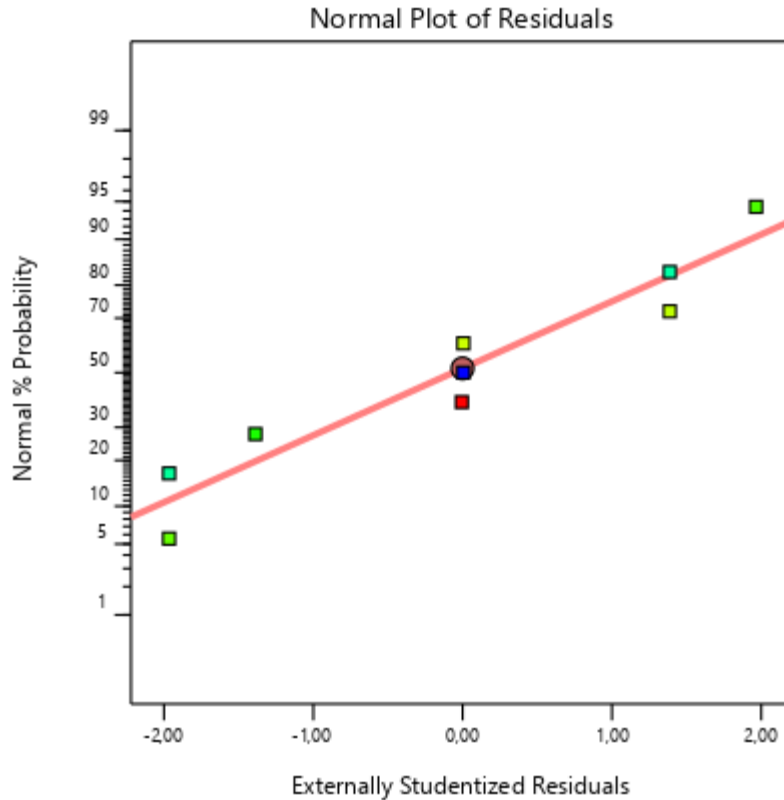


Figure IV.5 : Valeurs prévues par rapport aux valeurs expérimentales l'usure en dépouille (Vb).

IV.3.2.4 Diagramme de surface 3D de l'usure en dépouille (Vb)

Les surfaces de réponse 3D pour l'usure en dépouille (Vb) sont exhibées dans la figure IV.6, on remarque que la vitesse de coupe (V_c) et la distance d'usinage sont les facteurs les plus influés sur l'usure en dépouille (Vb), suivi par le matériau de coupe. Par contre la profondeur de passe (a_p) ne présente aucun effet sur l'usure en dépouille (Vb).

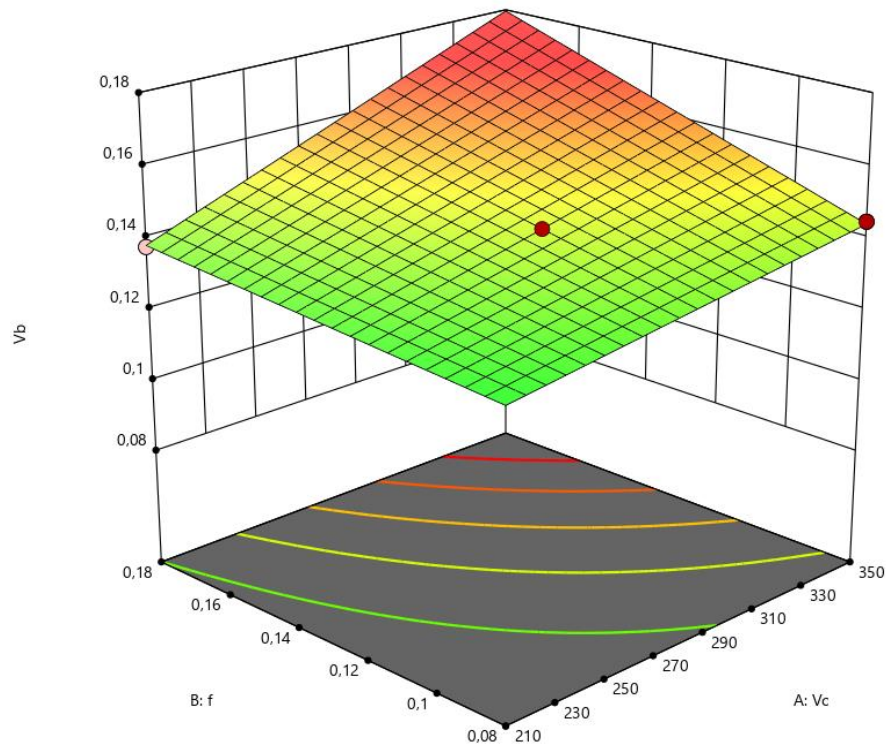


Figure IV.6 : Diagrammes de surface 3D de l'usure en dépouille (V_b) en fonction de (V_c, f et $a_p = 0.4$).

IV.4 Optimisation

L'obtention des conditions de coupes optimales lors du procédé de l'usinage des matériaux, a fait l'objet de nombreux travaux de recherche en utilisant diverses méthodes.

En effet, les conditions de coupe ont un impact économique direct sur la production telle que : le temps d'usinage des pièces mécaniques ou le coût total d'opération d'usinage. L'objectif de ce chapitre est de réussir une optimisation des conditions de coupe, lors du tournage de l'acier AISI 4140 usiné par un outil en carbure de désignation GC-2025, pour une gamme des conditions de coupe prédéfinie. Une Optimisation multi-objective, par les méthodes GRA et TOPSIS, a été adoptée dans cette partie dans un souci de trouver un bon compromis entre les paramètres d'entrée et de sortie de notre étude.

IV.4.1 Optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe basée sur l’approche TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) est une méthode dont le but est de pouvoir classer par ordre de choix un certain nombre d'alternatives sur la base d'un ensemble de critères favorables ou défavorables. Cette méthode s'inscrit dans les techniques utilisées dans le domaine d'aide à la décision multicritères MCDM (prise de décision à critères multiples). Elle a été développée par Hwang et Yoon en 1981. Son principe consiste à déterminer pour chaque alternative un coefficient compris entre 0 et 1 sur la base des distances (euclidiennes) entre chaque alternative d'une part et les solutions idéales favorables et défavorables. Les étapes à suivre pas à pas sont détaillées ci-dessous. Une alternative est dite idéale favorable si elle est la plus loin de la pire alternative et la plus proche de la meilleure alternative. Une alternative est dite idéale défavorisée si elle est la plus proche de la pire alternative et la plus loin de la meilleure alternative, tout en se basant sur le calcul des « coefficients ou Facteurs de proximité » [28].

Dans notre étude l'objectif principal est d'identifier les paramètres de coupe optimaux, pour minimiser Ra, Vb et maximiser le MRR. Pour atteindre cet objectif, l’approche TOPSIS a été choisie est considérée comme une décision multicritère appropriée pour sélectionner les paramètres optimaux dans le processus d'usinage. Les étapes incluses dans l'approche TOPSIS sont décrites comme suit :

Etape 1 : L'équation (IV.3) est utilisée pour la normalisation de la matrice initiale :

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \dots \dots \dots \text{IV.3}$$

Où : j=1,2, 3 ; i=1,2,...,16.

Etape 2 :

Les colonnes de la matrice de décision normalisée ont été multipliées par les poids Correspondants W_j (équation IV.4) :

$$V_{ij} = n_{ij} W_j \dots \dots \dots \text{IV.4}$$

Où : j=1, 2,3 ; i=1,2,...,16; $\sum W_j = 1$

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau IV.4.

Etape 3 :

Cette étape permet de déterminer les solutions positives et négatives idéales, qui sont indiquées dans le tableau IV.5 et ont été calculées à l'aide des équations (IV.5) et (IV.6), respectivement (voir tableau IV.5).

$$V^+ = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} \text{ Solution positive ideal} \dots \dots \dots \text{IV.5}$$

$$V^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} \text{ Solution negative ideal} \dots \dots \dots \text{IV.6}$$

Étape 4 :

La distance entre la solution positive idéale (la plus élevée) et la solution négative idéale (la plus basse). Les équations (IV.7) et (IV.8) sont utilisées pour calculer les deux distances euclidiennes pour chaque alternative. Le tableau IV.6 représente les résultats des calculs.

$$S^+ = \{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2\} \dots \dots \dots \text{IV.7}$$

$$S^- = \{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2\} \dots \dots \dots \text{IV.8}$$

Les résultats du tableau (IV.6) montrent que le régime optimal dans la gamme des valeurs des paramètres d'entrée, à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), et la profondeur de passe (ap), est le régime numéro 7 du tableau (IV.1). En effet, ce régime correspond à une vitesse de coupe $V_c = 350$ m/min, une avance $f = 0.08$ mm/tr et une profondeur de passe $ap = 1.2$ mm. Les résultats obtenus ont permis d'avoir des valeurs des réponses considérées très favorables à un régime de coupe qui donne un bon état de surface ($R_a = 0.452 \mu\text{m}$) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur maximale du tableau IV.1 ($MRR = 33.6 \text{ cm}^3/\text{min}$) D'autre part, l'usure très acceptable ($V_b = 0.145$ mm), sachant que les valeurs des V_b du tableau (IV.1) sont comprises entre $V_{b\text{max}} = 0.170$ mm et $V_{b\text{min}} = 0.090$ mm.

Tableau IV.4 : Résultats des calculs après l'étape de la normalisation et la pondération.

Calcul pour Ra	Calcul pour Vb	Calcul pour MRR
0.04935247	0.07455447	0.02385988
0.10974312	0.09692081	0.07157963
0.19193643	0.11431685	0.16105417
0.04515615	0.09774919	0.06362634
0.09770148	0.12094392	0.14315926
0.1468715	0.10934656	0.07157963
0.04123349	0.12011554	0.11929938
0.07671984	0.11266009	0.05964969
0.13802272	0.14082511	0.17894908

Tableau IV.5 : Résultats des calculs de l'étape 3.

Essais	Ra+	Ra-	Vb+	Vb-	MRR+	MRR-
1	6.59179E-05	0.020330183	0	0.004391798	0.02405266	0
2	0.004693569	0.00675574	0.000500253	0.001927587	0.011528198	0.002277175
3	0.022711374	0	0.001581047	0.000702688	0.000320228	0.018822274
4	1.53872E-05	0.02154445	0.000537995	0.001855535	0.013299334	0.001581371
5	0.003188634	0.008880225	0.002151981	0.000395262	0.001280911	0.014232343
6	0.01115939	0.002030847	0.001210489	0.000990899	0.011528198	0.002277175
7	0	0.022711374	0.002075811	0.000428887	0.003558086	0.0091087
8	0.001259281	0.013274863	0.001452038	0.000793268	0.014232343	0.001280911
9	0.009368156	0.002906687	0.004391798	0	0	0.02405266

Tableau IV.6 : Tableau des résultats de la méthode TOPSIS.

Essais	S+	S-	Ci	Rang
1	0.15530157	0.157232251	0.503088756	5
2	0.12931365	0.104692417	0.447391892	8
3	0.156884191	0.139731748	0.471086443	7
4	0.117697563	0.158054916	0.573176773	4
5	0.081372756	0.153322633	0.653283533	2
6	0.154590029	0.07279369	0.320135895	9
7	0.075059286	0.179579956	0.70523284	1
8	0.130167822	0.12389125	0.487647417	6
9	0.117302828	0.164193017	0.583287533	3

IV.4.2 Optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe basée sur l'Analyse GRA (Grey Relationnel analyse)

C'est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique dans le but d'atteindre une combinaison optimale de niveaux de paramètres pour l'amélioration simultanée de multiples caractéristiques d'usinage [30].

Dans la procédure de GRA, les résultats expérimentaux de Ra, Vb et le MRR sont d'abord normalisés dans la plage comprise entre zéro (00) et un en raison des différentes unités de mesure. Le coefficient gris relationnel (GRC) est ensuite calculé, sur la base des données expérimentales normalisées, pour corrélérer les données expérimentales souhaitées et réelles à l'aide de l'équation (IV.9). Enfin le (GRG) est déterminé en faisant la moyenne des coefficients relationnels gris correspondant aux réponses sélectionnées à l'aide de l'équation (IV.10).

Cette approche convertit un problème d'optimisation de processus à réponses multiples en une seule réponse d'optimisation en calculant la note relationnelle grise globale.

Les étapes suivantes ont permis de calculer le GRG de notre plan d'expériences ;

Etape 1 :

La méthode GRA (Grey Relationnel Analyse) est basée sur la normalisation de l'élément de décision de la matrice (X_{ij}) selon l'équation (IV.9) pour le critère (P) afin de faire correspondre la valeur un (1) à la valeur maximale de S/N.

$$G_i(p) = \frac{x_{ip} - \min(x_{ip})}{\max(x_{ip}) - \min(x_{ip})} \dots \dots \dots \text{IV.9}$$

Où $G_i(p)$ est la valeur normalisée de x_{ip} ; $\max(x_{ip})$ et $\min(x_{ip})$ sont les valeurs la plus élevée et la plus basse de x_{ip} ($i=1$ à $k=16$).

Dans notre cas d'étude, nous avons choisi de traiter les valeurs des rapports S/N pour les différents paramètres considérés (Ra, Vb et MRR). La meilleure performance est obtenue pour une valeur maximale de S/N ; par conséquent, l'équation (IV.7) est utilisée pour la normalisation.

Etape 2 :

L'équation (IV.10) à (IV.13) permettent de calculer le coefficient relationnel gris ($\varphi_i(p)$), qui indiquent la relation entre les résultats calculés et expérimentaux

$$\varphi_i(p) = \frac{\Delta_{min} + \varepsilon \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(p) + \varepsilon \Delta_{max}} \dots \dots \dots \text{IV.10}$$

Dans cette étude, le coefficient de distinction ε (0,1) a été considéré comme égal à 0,5, pour ajuster le coefficient relationnel.

$\Delta_{oi}(p)$ La différence en valeur absolue entre la valeur idéale $G_o(p)$ et $G_i(p)$.

$$\Delta_{oi}(\mathbf{p}) = \|\mathbf{G}_0(\mathbf{p}) - \mathbf{G}_i(\mathbf{p})\| \dots\dots\dots \text{IV.11}$$

$$\Delta_{\min} = \min_{v_i} \min_{v_p} \|\mathbf{G}_0(\mathbf{p}) - \mathbf{G}_i(\mathbf{p})\| \dots\dots\dots \text{IV.12}$$

$$\Delta_{\max} = \max_{v_i} \max_{v_p} \|\mathbf{G}_0(\mathbf{p}) - \mathbf{G}_i(\mathbf{p})\| \dots\dots\dots \text{IV.13}$$

Etape 3 :

L'équation (IV.14) est utilisée pour calculer le gradient de relation grise (δ_i) à partir des résultats $\varphi_i(p)$ afin d'exprimer le niveau de corrélation entre les séries. Les résultats calculés sont présentés dans le tableau IV.7.

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n [G_i(p)] \dots\dots\dots \text{IV.14}$$

Où n est le nombre de paramètres des réponses du processus.

Dans la méthode GRA, la plus grande valeur de ε_i est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale $G_0(p)$ et la séquence expérimentale $G_i(p)$. L'optimisation multi-objectifs est convertie en une optimisation mono-objective lorsque δ_i est calculé.

Les résultats du tableau (IV.8) montrent que le régime optimal dans la gamme des valeurs des paramètres d'entrée, à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), et la profondeur de passe (ap), est le régime numéro 1 du tableau (IV.1). En effet, ce régime n'est pas celui proposé par la méthode TOPSIS. Ce régime correspond à une vitesse de coupe $V_c = 210$ m/min, une avance $f = 0.08$ mm/tr et une profondeur de passe $ap = 0.4$ mm. Les résultats obtenus ont permis d'avoir des valeurs des réponses considérées très favorables à un régime de coupe qui donne un bon état de surface ($R_a = 0.541$ μm) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur maximale du tableau ($\text{MRR} = 6.72$ cm^3/min). D'autre part, l'usure très acceptable ($V_b = 0.090$ mm), sachant que les valeurs des V_b du tableau (IV.1) sont comprises entre $V_{b\max} = 0.170$ mm et $V_{b\min} = 0.090$ mm.

Tableau IV.7 : Résultats des calculs après de la normalisation et la pondération.

Ra	Vb	MRR
0.94612591	1	0
0.54539952	0.6625	0.30769231
0	0.4	0.88461538
0.97397094	0.65	0.25641026
0.62530266	0.3	0.76923077
0.29903148	0.475	0.30769231
1	0.3125	0.61538462
0.76452785	0.425	0.23076923
0.35774818	0	1

Tableau IV.8 : Tableau des résultats de la méthode GRA.

Essais	GRC			GRG	Rang
	Ra	Vb	MRR		
1	0.90273224	1	0.333333333	0.745355191	1
2	0.523779328	0.597014925	0.419354839	0.513383031	7
3	0.333333333	0.454545455	0.8125	0.533459596	6
4	0.950517837	0.588235294	0.402061856	0.646938329	3
5	0.571626298	0.416666667	0.684210526	0.557501164	5
6	0.416330645	0.487804878	0.419354839	0.441163454	9
7	1	0.421052632	0.565217391	0.662090008	2
8	0.679835391	0.465116279	0.393939394	0.512963688	8
9	0.437731849	0.333333333	1	0.590355061	4

IV.5 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre nous ont permis de conclure les points suivants :

- L'analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité moyenne arithmétique (R_a) montre clairement que de l'avance (f) est le facteur le plus influent car sa contribution est de 89,45%, en deuxième lieu on trouve la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution de 6,92%, puis la profondeur de passe (ap) avec une contribution 2,57%. Par contre les autres interactions (V_c*f , V_c*ap et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité moyenne arithmétique (R_a).
- D'autre part, Les droites des effets principaux des paramètres de coupe sur le critère de la rugosité moyenne arithmétique (R_a) ont permis de constater que l'augmentation de l'avance (f) est le facteur le plus influent sur la rugosité de surface moyenne arithmétique (R_a) car il a la plus grande pente. Ce qui signifie qu'une augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la rugosité de surface. Tandis que l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) permet une légère amélioration de la rugosité moyenne arithmétique (R_a). Aussi, la profondeur de passe (ap) n'a pas une influence importante sur la rugosité moyenne arithmétique (R_a).
- L'équation de régression sont obtenue avec un coefficient de corrélation $R^2 = 99,86 \%$.
- La présentation 3D montre que la pente des diagrammes de l'avance est la plus importante par rapport à celles des deux autres facteurs, ce qui signifie que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité moyenne arithmétique (R_a). Aussi, les tracés de contour permettent la visualisation de la surface de réponse. Ils sont également utilisés pour établir des valeurs de réponse et des conditions de fonctionnement idéales. Les résultats coïncident clairement avec les résultats de l'ANOVA et ceux des droites des effets.
- L'analyse de variance (ANOVA) pour le critère de l'usure en dépouille (V_b) montre que la vitesse de coupe (V_c) est le facteur prépondérant sur l'usure en dépouille (V_b) suivie par l'avance (f) avec des contributions de 46,30% et 30,55% respectivement, alors que la profondeur de passe (ap) 20,77% vient en dernier; finalement, l'interaction (V_c*f) et les termes (V_c*ap) et ($f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la variation de l'usure en dépouille (V_b).
- Les droites des effets principaux des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille (V_b). Cette figure montre l'influence considérable des trois facteurs considérés. Nous constatons que l'augmentation de (V_c , f et ap) provoque une augmentation de l'usure en dépouille (V_b). Ceci est confirmé par des pentes assez élevées des trois paramètres.
- L'équation de régression sont obtenue avec un coefficient de corrélation $R^2 = 92,69 \%$.

- Les surfaces de réponse 3D pour l'usure en dépouille (V_b), on remarque que la vitesse de coupe (V_c) et la distance d'usinage sont les facteurs les plus influés sur l'usure en dépouille (V_b), suivi par le matériau de coupe. Par contre la profondeur de passe (a_p) ne présente aucun effet sur l'usure en dépouille (V_b).
- Le régime optimal dans la gamme des valeurs des paramètres d'entrée, obtenu par la méthode TOPSIS, à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), et la profondeur de passe (a_p), est le régime numéro 7 du tableau des résultats des essais. En effet, ce régime correspond à une vitesse de coupe $V_c = 350$ m/min, une avance $f = 0.08$ mm/tr et une profondeur de passe $a_p = 1.2$ mm. Les résultats obtenus ont permis d'avoir des valeurs des réponses considérées très favorables à un régime de coupe qui donne un bon état de surface ($R_a = 0.452$ μm) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur expérimentale maximale ($\text{MRR} = 33.6$ cm^3/min). D'autre part, l'usure très acceptable ($V_b = 0.145$ mm), sachant que les valeurs mesurées des V_b sont comprises entre $V_{b\text{max}} = 0.170$ mm et $V_{b\text{min}} = 0.090$ mm.
- Le régime optimal dans la gamme des valeurs des paramètres d'entrée, obtenu par la méthode GRA, à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), et la profondeur de passe (a_p), est le régime numéro 1 du tableau des résultats des essais. En effet, ce régime n'est pas celui proposé par la méthode TOPSIS. Ce régime correspond à une vitesse de coupe $V_c = 210$ m/min, une avance $f = 0.08$ mm/tr et une profondeur de passe $a_p = 0.4$ mm. Les résultats obtenus ont permis d'avoir des valeurs des réponses considérées très favorables à un régime de coupe qui donne un bon état de surface ($R_a = 0.541$ μm) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur maximale du tableau ($\text{MRR} = 6.72$ cm^3/min). D'autre part, l'usure très acceptable ($V_b = 0.090$ mm), sachant que les valeurs des V_b sont comprises entre $V_{b\text{max}} = 0.170$ mm et $V_{b\text{min}} = 0.090$ mm.

Conclusion générale

Lors de ce travail de recherche, une série d'essais expérimentaux a été réalisée dans le but d'optimiser le processus de tournage du acier faiblement allié AISI 4140 Avec un outil en carbure revêtu GC-2025.

Les résultats obtenus nous ont conduits aux conclusions citées ci-après ;

- L'analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité moyenne arithmétique (R_a) montre clairement que de l'avance (f) est le facteur le plus influent, en deuxième lieu on trouve la vitesse de coupe (V_c), puis la profondeur de passe (ap). Par contre les autres interactions (V_c*f , V_c*ap et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité moyenne arithmétique (R_a).
- D'autre part, Les droites des effets principaux des paramètres de coupe sur le critère de la rugosité moyenne arithmétique (R_a) ont permis de constater que l'augmentation de l'avance (f) est le facteur le plus influent sur la rugosité de surface moyenne arithmétique (R_a) car il a la plus grande pente. Ce qui signifie qu'une augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la rugosité de surface. Tandis que l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) permet une légère amélioration de la rugosité moyenne arithmétique (R_a). Aussi, la profondeur de passe (ap) n'a pas une influence importante sur la rugosité moyenne arithmétique (R_a). L'équation de régression sont obtenue avec un coefficient de corrélation $R^2 = 99,86 \%$. La présentation 3D de la rugosité moyenne arithmétique (R_a) a confirmé les résultats précédents.
- Aussi, les tracés de contour permettent la visualisation de la surface de réponse. Ils sont également utilisés pour établir des valeurs de réponse et des conditions de fonctionnement idéales. Les résultats coïncident clairement avec les résultats de l'ANOVA et ceux des droites des effets.
- D'autre part, l'analyse de variance (ANOVA) pour le critère de l'usure en dépouille (V_b) montre que la vitesse de coupe (V_c) est le facteur prépondérant sur l'usure en dépouille (V_b) suivie par l'avance (f), alors que la profondeur de passe (ap) vient en dernier; finalement, l'interaction (V_c*f) et les termes (V_c*ap) et ($f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la variation de l'usure en dépouille (V_b).
- Les droites des effets principaux des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille (V_b). Cette figure montre l'influence considérable des trois facteurs considérés. Nous constatons que l'augmentation de (V_c , f et ap) provoque une augmentation de l'usure en dépouille (V_b). Ceci est confirmé par des pentes assez élevées des trois paramètres. L'équation de régression sont obtenue avec un coefficient de corrélation $R^2 = 92,69 \%$.
- Les surfaces de réponse 3D pour l'usure en dépouille (V_b) montrent que la vitesse de coupe (V_c) et la distance d'usinage sont les facteurs les plus influés sur l'usure en dépouille (V_b), suivi par le matériau de coupe. Par contre la profondeur de passe (ap) ne présente aucun effet sur l'usure en dépouille (V_b).

- Le régime optimal dans la gamme des valeurs des paramètres d'entrée, obtenu par la méthode TOPSIS, à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), et la profondeur de passe (a_p), est le régime numéro 7 du tableau des résultats des essais. En effet, ce régime correspond à une vitesse de coupe $V_c = 350$ m/min, une avance $f = 0.08$ mm/tr et une profondeur de passe $a_p = 1.2$ mm. Les résultats obtenus ont permis d'avoir des valeurs des réponses considérées très favorables à un régime de coupe qui donne un bon état de surface ($R_a = 0.452$ μm) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur expérimentale maximale ($\text{MRR} = 33.6$ cm^3/min). D'autre part, l'usure très acceptable ($V_b = 0.145$ mm), sachant que les valeurs mesurées des V_b sont comprises entre $V_{b\text{max}} = 0.170$ mm et $V_{b\text{min}} = 0.090$ mm.
- Le régime optimal dans la gamme des valeurs des paramètres d'entrée, obtenu par la méthode GRA, à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), et la profondeur de passe (a_p), est le régime numéro 1 du tableau des résultats des essais. En effet, ce régime n'est pas celui proposé par la méthode TOPSIS. Ce régime correspond à une vitesse de coupe $V_c = 210$ m/min, une avance $f = 0.08$ mm/tr et une profondeur de passe $a_p = 0.4$ mm. Les résultats obtenus ont permis d'avoir des valeurs des réponses considérées très favorables à un régime de coupe qui donne un bon état de surface ($R_a = 0.541$ μm) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur maximale du tableau ($\text{MRR} = 6.72$ cm^3/min). D'autre part, l'usure très acceptable ($V_b = 0.090$ mm), sachant que les valeurs des V_b sont comprises entre $V_{b\text{max}} = 0.170$ mm et $V_{b\text{min}} = 0.090$ mm.

Référence Bibliographique

- [1] Hamadi, B. Yallese, M.A. Boulanouar, L. Hammoudi, A. Nouioua, M. (2022). Evaluation of the cutting performance of PVD, CVD and MTCVD carbide inserts in dry turning of AISI 4140 steel using RSM-based NAMDE optimization.
- [2] Paengchit, P. Saikaew, Ch. (2023). Simulation of the influence of cutting speed and feed rate on tool life in hard turning of AISI 4140 steel.
- [3] Nikam, B. Khadtare, A. Pawade, R. (2021). MACHINABILITY ASSESSMENT OF AISI 4140 HARDENED STEEL USING CBN INSERTS IN HARD TURNING.
- [4] Hadjela, S. Belhadi, S. Ouelaa, N. Safi, K. & Yallese, M. A. (2023). Straight turning optimization of low alloy steel using MCDM methods coupled with Taguchi approach.
- [5] Özdemir, M. Şahinoğlu, A. Rafighi, M. Yilmaz, V. (2022). Analysis and optimisation of the cutting parameters based on machinability factors in turning AISI 4140 steel.
- [6] Ion-Cosmin GRUESCU. Préparation de production en productique mécanique-étude de fabrication et analyse d'usinage. enseignant-chercheur.IUT A Université Lille1. [En ligne] 23 février 2015. (Consulté le 26 avril 2021) Disponible à l'adresse : https://analysefabrication.univ-lille.fr/co/ch4_4_5.html
- [7] **A. MAUREL-PANTEL**, Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : Application à l'identification paramétrique des lois de comportement, thèse doctorat (2009)
- [8] **N. Belhamra**, «Réalizations et caractérisations de revêtements durs à base de nitrures et de carbures : Applications à l'usinage des métaux » Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.
- [9] Etude de la coupe,» institue des études supérieures technologiques, Gafsa, 2014.
- [10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Tournage_m%C3%A9canique#Vitesse_de_coupe
- [11] Bartarya, G., & Choudhury, S. K. (2012). State of the art in hard turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 53(1), 1-14
- [12] Bourdet, P. (2004). *La coupe des métaux*. ENSET.
- [13] Berrouba, K. Approche par la méthode de surfaces de réponse pour déterminer la température de coupe de l'acier AISI 1060 : Application au fraisage (Doctoral dissertation).
- [14] Gautier LIST, étude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-CO, par la caractérisation de l'interface outil coupeau, Thèse de Doctorat Ecole National supérieure d'Art et Métiers. Bordeaux.2004.
- [15] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [16] http://pt.llg.free.fr/13/S2I/etats_de_surface.pdf

- [17] CLAUDE B, LIONEL G, Memotech productique matériaux et usinage, Editions casteilla, PARIS, Septembre 1999.
- [18] Archive multilingue, Actionnées par WorldLingo.
http://www.multilingualarchive.com/ma/frwiki/fr/Etat_de_surface#Rugosit.C3.A9
- [19] DJEDID, M.K. Optimisation et modélisation des conditions opératoires lors de l'usinage d'un alliage de nickel avec un outil en céramique. (Mémoire de Fin d'Études).
- [20] Ross P.J. Taguchi techniques for quality engineering. McGraw-hill int edn, Singapore (1996).
- [21] <http://thesis.univ-biskra.dz/2124/4/chapitre02.pdf>
- [22] K. Kulakowski, "Understanding the Analytic Hierarchy Process," Underst. Anal. Hierarchy Process, no. 2012, 2020, doi: 10.1201/b21817.
- [23] S. Abdal, "Application of TOPSIS Method in Decision Making Via Soft Set," Biomed. J. Sci. Tech. Res., vol. 24, no. 3, 2020, doi: 10.26717/bjstr.2020.24.004045.
- [24] Javed, Saad Ahmed; Gunasekaran, Angappa; Mahmoudi, Amin (2022). "DGRA: Multi sourcing and Supplier Classification through Dynamic Grey Relational Analysis Method". Computers & Industrial Engineering. **173**: 108674. [Doi: 10.1016/j.cie.2022.108674](https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108674). [S2CID 252478074](https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108674).
- [25] Yang W, Tang Y. Design optimization of cutting parameters for turning operations Based on the Taguchi method. J Material Processes Technology 84(1–3), pp.122–129 (1998).
- [26] Şahinoğlu, A. Rafighi, M. (2020). Investigation of tool wear, surface roughness, sound intensity, and power consumption during hard turning of AISI 4140 steel using multilayer-coated carbide inserts.
- [27] Özdemir, M. Rafighi, M. Al Awadh, M. (2023). Comparative Evaluation of Coated Carbide and CBN Inserts Performance in Dry Hard Turning of AISI 4140 Steel Using Taguchi-Based Grey Relation Analysis.
- [28] Touggui, Y., Belhadi, S., Mabrouki, T. (2020). Dry turning optimization of austenitic stainless steel 316L based on Taguchi and TOPSIS approaches.
- [29] Venkateswarlu, S. Suresh, R. K. (2019). DFA & GRA based multi objective optimization during hot machining of AISI D3 tool steel using TNMG insert.
- [30] Jacques Goupy, Lee Creighton, Introduction aux plans d'expériences, Dunod, 2006, 3^{ème} édition Paris.