

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



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : ZEREG Hiba

=====
**Contribution à l'étude de l'usure des
plaquettes en carbure métallique**
=====

Sous la Direction de :

- **Dr. KADDECHE Mounia**
- **Dr. BELHADI Salim**

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice de mémoire, Madame **KADDECHE Mounia**. Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé. Je remercie aussi, **Dr. Belhadi Salim** mon Co-Encadreur pour son aide précieuse.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de Guelma département Génie Mécanique, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

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.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mon père *ZEREG chérif* qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui, que DIEU le garde et le protège ;

Ma mère *Oummeddour Elfahma* qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que DIEU la garde ;

Mon frère *Abd el Raouf*, mes sœurs *Zeyneb ; Nour el Houda ; Salsabil*, symbole de tendresse et de fidélité ;

Mes bien chères amies *.Bouthaina Belhireche ; Randa Freine*.

Merci de m'encourager et d'être à mes côtés
dans mes moments difficiles

INDEX DES TABLEAUX

CHAPITRE II

Etat de l'art

Tableaux II.1 : Résultats de l'ANOVA pour l'usure, l'effort tangentiel et l'émission acoustique.....	18
Tableaux II.2 : Comparaison des performances de coupe dans le tournage au diamant de matériaux couramment utilisé.....	21
Tableau II.3 : Les mécanismes d'usure les plus fréquents.....	22
Tableaux II.4 : Optimisation des paramètres du processus de tournage à l'aide de différentes méthodes MCDM	24
Tableaux II.5 : Régime optimal des méthodes PSI, MABAC et MAIRCA pour deux matériaux.....	25

CHAPITRE III

Essai et méthode

Tableaux III.1 : Composition chimique de l'acier Z40CDV5.....	35
Tableaux III.2 : Informations relatives aux plaquettes utilisées.....	35
Tableaux III.3 : Condition de coupe pour les essais de l'usure, la rugosité et l'effort en fonction des paramètres de coupe (essais Taguchi réduit).....	42

CHAPITRE V

Optimisation

Tableaux V.1 : Résultats des essais.....	57
Tableau V.2 : Résultats des calculs après l'étape de la normalisation et la pondération.....	58
Tableau V.3 : Résultats des calculs de l'étape 3.....	59
Tableau V.4 : Tableau des résultats de la méthode TOPSIS.....	59
Tableau V.5 : Résultats des calculs après de la normalisation et la pondération.....	63
Tableau V.6 : Tableau des résultats de la méthode GRA.....	63

INDEX DES FIGURES

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 :	Déférentes l'usure des outil.....	3
Figure I.2 :	Usure par abrasion.....	4
Figure I.3 :	Usure par adhésion	5
Figure I.4 :	Cratère formé par usure par diffusion sur une plaquette carbur	5
Figure I.5 :	Phénomène de coupe	7
Figure I.6 :	Arêtes et parties actives d'un outil de tournage.....	9
Figure I.7 :	Principaux plans de l'outil en main.....	11
Figure I.8 :	Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage.....	12

CHAPITRE II

Etat de l'art

Figure II.1.a :	Graphiques des effets qui affectent l'usure des outils en carbure multi couches	15
Figure II.1.b :	Graphiques des effets qui affectent l'usure de l'outil en carbure non revêtu.....	16
Figure II.1.c :	Graphiques des effets qui affectent l'usure d'un outil en carbure revêtu d'une seule couch.....	16
Figure II.2(a-c) :	Influence des paramètres de coupe sur l'usure de différents types d'outils de coupe.....	17
Figure II.3.a :	Graphiques des effets principaux de VB.....	19
Figure II.3.b :	Graphiques des effets principaux de Fx.....	20
Figure II.3.c :	Graphiques des effets principaux de Fy.....	20

Figure II.3.d : Graphiques des effets principaux de F_z	20
Figure II.4 : Les images SEM de l'usure des outils en Diamonds après 50 m d'usinage	22
Figure II.5 : Visualisation de l'usure des arêtes de coupe en fin d'usinage.....	26
Figure II.6 : Résultats expérimentaux des neuf essais de coupe.....	27
Figure II.7 : Micrographie de l'usure des flancs (temps = 2 min)	28
Figure II.8.a : Graphique des effets principaux pour R_a	28
Figure II.8.b : Graphique des effets principaux pour VB.....	29
Figure II.8.c : Graphique des effets principaux pour MRR.....	29
Figure II.9.a : Graphique de l'effet principal pour S/N_{ratio} à $R_a(a)$	30
Figure II.9.b : Graphique de l'effet principal pour S/N_{ratio} à $F_y (b)$	30
Figure II.9.c : Graphique de l'effet principal pour S/N_{ratio} à MRR (c).....	30
Figure II.11 : Evolution de l'usure de l'outil en fonction de la vitesse de coupe	31
Figure II.12 : Usure de l'outil en fonction de la vitesse de coupe, a,a1 108 m/min, b,b1 168 m/min, c,c1 220 m/min et d, d1 300 m/min.....	32

CHAPITRE III

Essai et méthode

Figure III.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.....	33
Figure III.2 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais de rugosité, des efforts de coupe et de vibration.....	34
Figure III.3 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais d'usure.....	34
Figure III.4.a : Eprouvette utilisée pour les essais de longue durée.....	34
Figure III.4.b : Eprouvette utilisé pour les essais de courte durée.....	35
Figure III.5 : Plaquettes de coupe utilisées.....	36
Figure III.6 : Porte-plaquette.....	37
Figure III.7 : VISUAL 250 pour la mesure de l'usure.....	37
Figure III.8 : Mesure de la rugosité de la rugosimètre Surface 201 sans démontage de la pièce.....	38
Figure III.9 : Montage du dynamomètre sur la table de la machine.....	39

Figure III.10 : Capteur d'effort de coupe KISTLER	39
Figure III.11 : Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».....	40
Figure III.12 : Chaîne de mesure des efforts de coupe.....	41

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

Figure.IV.1 : Comparaison entre l'usure des différents matériaux a $V_c=170\text{m/min}$, $T_u=204\text{Ssec}$	45
Figure.IV.2 : Evolution de la rugosité en fonction de temps a $V_c=170\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$, Pour : a) GC1025, b) H10F, c) GC3025, d) GC1525, c)CC650.....	46
Figure. IV.3 : Comparaison entre les rugosités de surface mesurées par les cinq nuances a $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=204\text{sec}$	47
Figure. IV.4 : Evolution des efforts de coupe en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe a $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=204\text{sec}$	48
Figure. IV.5 : Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés pour les cinq nuances a $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=204\text{sec}$	49
Figure. IV.6 : Evolution des pressions spécifiques de coupe pour les cinq nuances de coupe a $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{sec}$	50
Figure. IV.7 : Comparaison entre l'usure des différents matériaux a $V_c=340\text{m/min}$, $T_u=108\text{sec}$	51
Figure.V.8 : Evolution des efforts de coupe en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe a $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{sec}$	52
Figure. IV.9 : Comparaison des rugosité de surface pour les cinq nuances à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.8\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{s}$	53
Figure. IV.10 : Evolution des efforts de coupe en fonction du temps à $V_c=340\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ pour : a) GC1025 ; b) H10F ; c) GC1525 ; e) CC650.....	54
Figure. IV.11 : Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés pour les cinq nuances à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{sec}$	55
Figure. IV.12 : Evolution de les pressions spécifiques de coupe pour les cinq nuances de coupe à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{sec}$	56

Sommaire

<i>Résumé</i>	<i>i</i>
<i>Remerciement</i>	<i>ii</i>
<i>Dédicaces</i>	<i>iii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>v</i>

<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
---	-----------------

Chapitre I : Recherche Bibliographique

I.1. Introduction	2
I.2. Etude des mécanismes d'usure et de rupture des outils coupants	2
I.2.1. Différentes formes d'usure des outils	2
I.2.2. Phénomènes physico-chimiques à l'interface outil-copeau	3
I.2.3. Formation de la couche blanche	5
I.2.4. Diffusion à la surface des outils en carbure	5
I.3. Les matériaux des outils de coupe	6
I.3.1. Les paramètres de coupe	6
I.3.2. Les Carbures métalliques	8
I.3.3. Céramiques	9
I.3.4. Cermets	9
I.3.5. Lacier Rapid (HSS - High Speed Steel)	10
I.4. Géométrie des outils de coupe	10
I.4.1. Les angles de coupe	10
I.4.2. Les mouvements de l'outil	11
I.4.3. Le Revêtement	12

I.4.4. Types d'acier inoxydable.....	13
---	-----------

ChapitreII : Etat de l'art

II.1. Introduction.....	15
II.2. Etudes récentes sur l'étude de l'usure des outils de coupe.....	15
II.3. Etude bibliographique sur l'optimisation des paramètres du tournage.....	23
II.4. Conclusion.....	32

ChapitreIII : Essai et méthodes

III.1. Introduction.....	33
III.2. Matériels utilisés.....	33
III.2.1. Machine-outil.....	33
III.2.2. Le Matériau utilisé pour les essais d'usinage.....	33
III.2.3. Appareillages de mesures utilisés.....	37
III.2.3.1. Mesure de l'usure.....	37
III.2.3.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	38
III.2.3.3. Mesure dès l'effort.....	38
III.2.3.4. Autres équipements.....	41
III.3. Conditions de coupe.....	41
III.4. Planification des expériences.....	42
III.4.1. Méthode de planification des expériences.....	42
III.4.1.1. Introduction.....	42
III.5. Conclusion.....	43

ChapitreIV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Performances des matériaux de coupe à $V_c=170\text{m/min}$	44
IV.3. Performances des matériaux de coupe à $V_c=340\text{m/min}$	50
IV.4. Conclusion.....	56

ChapitreV : Optimisation

V.1. Introduction.....	57
V.2. Résultats des essais.....	57
V.3. L'approche TOPSIS.....	57
V.4. L'Analyse GRA.....	61
Conclusion	64

<i>Conclusion générale</i>	65
---	-----------

Référence Bibliographique.....	66
--------------------------------	----

RESUME

Le choix des paramètres de coupe est très important en usinage. L'objectif de ce travail est de déterminer les paramètres de coupe optimaux lors du tournage dur de l'acier Z40CDV5, par rapport à l'état de surface des pièces usinées et la productivité. Des conditions optimales ont pu ainsi être déterminées en fonction des objectifs désirés, à l'aide de deux méthodes d'optimisation multi-objectifs. Il s'agit de trouver un régime de coupe satisfaisant divers objectifs tels que Rz, Ftot, VB et MRR. Pour ce faire, nous avons exploité dans ce travail deux méthodes MCDM, à savoir la méthode TOPSIS et la méthode GRA.

Abstract

In machining, the choice of cutting parameters is crucial. The purpose of this research is to determine the optimal cutting parameters during hard turning of Z40CDV5 steel with regard to surface quality and productivity. Using two multi-objective optimisation techniques, optimal conditions could be determined based on the intended objectives. The objective is to discover a cutting regime that satisfies multiple objectives, including Rz, Ftot, VB, and MRR. In order to accomplish this, this paper employs two MCDM methods: the TOPSIS method and the GRA method.

ملخص

بعد اختيار معلمات القطع مهمًا جدًا في المعالجة. الهدف من هذا العمل هو تحديد معلمات القطع المثلى أثناء التقليل الصعب لصلب Z40CDV5 ، فيما يتعلق بحالة سطح الأجزاء المصنعة والإنتاجية. وبالتالي يمكن تحديد الظروف المثلى وفقًا للأهداف المرغوبة ، باستخدام طريقتين للتحسين متعدد الأهداف. إنها مسألة إيجاد نظام قطع يلبي أهدافًا مختلفة مثل Rz و Ftot و VB و MRR. للقيام بذلك ، استخدمنا في هذا العمل طريقتين من MCDM ، وهما طريقة TOPSIS وطريقة GRA.

Introduction générale

La qualité d'une pièce usinée dépend fortement de l'état d'usure de l'outil de coupe. Cette usure constitue donc un problème majeur dans le domaine de la fabrication industrielle. Elle est fonction de plusieurs facteurs notamment du matériau usiné, des conditions de coupe et du procédé de coupe. Tous ces facteurs induisent une usure accélérée de l'outil de coupe.

Notre travail s'inscrit dans ce cadre, en effet il consiste en une campagne expérimentale de tournage de l'acier fortement allié Z40CDV5 avec différentes nuances de coupe. Le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur certains paramètres technologiques tels que l'usure de l'outil, la rugosité de surface et les efforts de coupe et le taux d'enlèvement de matière.

Dans le premier chapitre, tous nos efforts ont été consacrés à l'étude bibliographique qui concerne le tournage et les phénomènes physiques régissant le processus de coupe. Dans le 2^{ème} chapitre on a exposé l'état d'art sur les différents travaux de recherche réalisés en tournage. Dans le 3^{ème} chapitre, nous avons présenté les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe. Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté l'évolution de l'usure des différents outils de coupe utilisés selon les conditions de tournage choisis. Un cinquième chapitre est dédié à l'étude de l'optimisation multiobjective des conditions de coupe lors du tournage du Z40CDV5 par deux méthodes MCDM très utilisées à savoir le TOPSIS et L'approche GRA. Le document contient aussi une conclusion générale et une section qui résume les références bibliographiques utilisées.

I.1. Introduction

L'usinage de l'acier est l'ensemble des procédés industriels effectués sur une pièce ou un produit semi-fini en acier (tels que les barres, tubes ou tôles fabriquées à partir de forgeage ou de moulage, entre autres) en éliminant les excès de matériau pour acquérir la forme et les dimensions désirés. L'acier inoxydable est l'un des matériaux les plus usinés car il possède de multiples propriétés avantageuses, telles que la résistance à la corrosion, à l'oxydation et aux températures élevées. C'est un matériau recyclable, ayant une résistance et une dureté supérieures à celles des autres métaux, une bonne finition esthétique et facile à nettoyer et à entretenir. Dans ce travail, nous évoquerons l'usinage de *l'acier fortement allié Z40CDV5* par plusieurs matériaux de coupe [1].

Les matériaux de coupe contemporains sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement les opérations d'usinage qui demandaient une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre actuellement moins d'une minute. Aujourd'hui, on peut trouver sur le marché un matériau de coupe approprié pour chaque matériau usiné et pour chaque type d'opération d'usinage. L'importance de l'étude des matériaux à outil de coupe ne peut pas être surestimée, car le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances ces derniers [2].

Pour choisir un outil de coupe convenable, il faut prendre en compte plusieurs facteurs comme: la nature de l'opération de coupe (ébauche ou finition, précision demandée, coupe continue ou intermittente), la forme et la matière de la pièce usinée (structure, dureté, résistance, état de couche superficielle, affinité chimique, inclusion), le type de la machine-outil (puissance, rigidité, capacité), les conditions de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe), l'état de la surface demandé (rugosité, contraintes résiduelles) et les coûts associés à cette opération. Étant donné le nombre de facteurs à considérer et la difficulté de les définir précisément, le choix d'un outil de coupe devient un problème très complexe [2].

La première partie de ce chapitre sera consacrée d'une part, à une recherche bibliographique sur l'usinabilité des aciers et leurs propriétés comme matériaux de coupe. D'autre part une deuxième partie est consacrée à l'état de l'art sur les derniers travaux réalisés sur le sujet.

I.2. Etude des mécanismes d'usure et de rupture des outils coupants

I.2.1. 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 [1].

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.

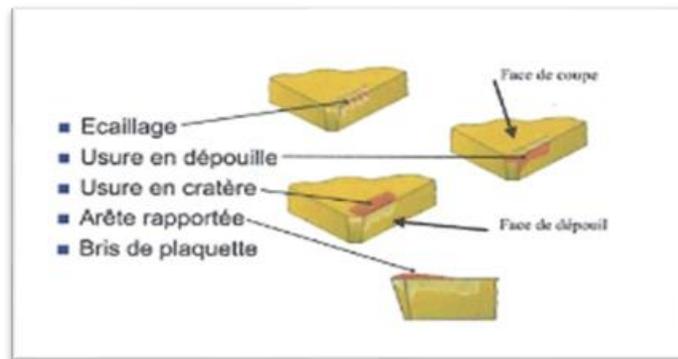


Figure I.1. Différentes d'usure des outils [3]

I.2.2. Phénomènes physico-chimiques à l'interface outil-copeau

La mise hors de service d'un outil peut être provoquée par les différents mécanismes d'usure à savoir : - L'effritement - L'abrasion. - L'adhésion. - La diffusion. - La déformation plastique.

a) Usure par effritement

Actuellement, la destruction d'un outil par effritement local doit être considérée comme anormale, malgré 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'écroutage des pièces coulées. L'emploi des outils en carbure limite ce genre d'usure (Figure I.2).

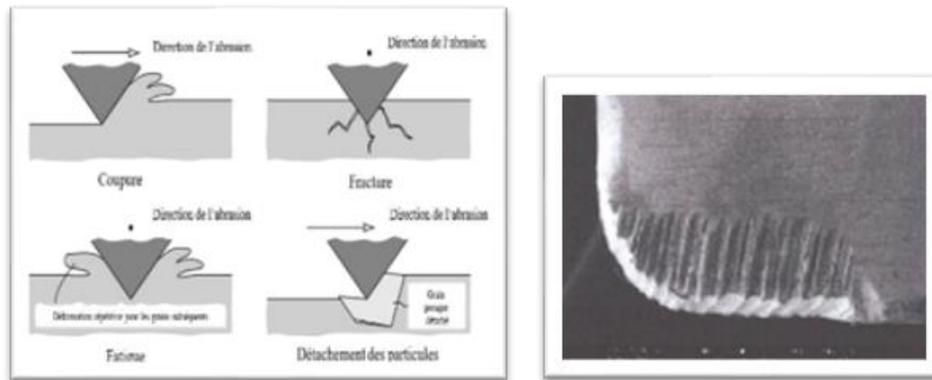


Figure I.2. Usure par abrasion [4]

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.3). L'usure par adhésion diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'à une vitesse critique au-delà de laquelle se poursuit une usure par diffusion [3].

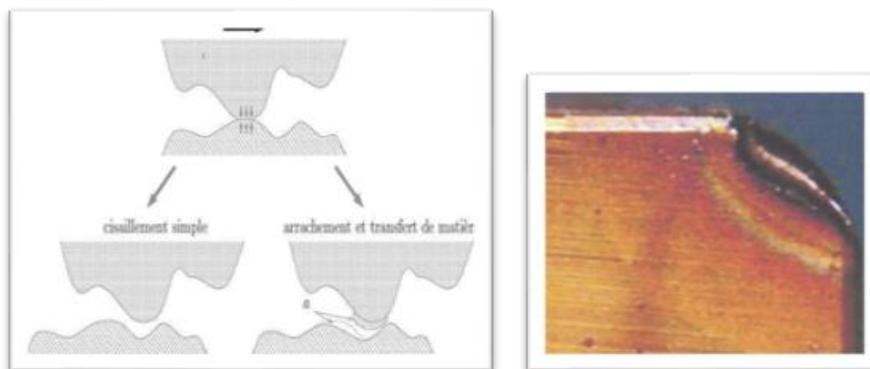


Figure I.3. Usure par adhésion [5]

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.4) [5].

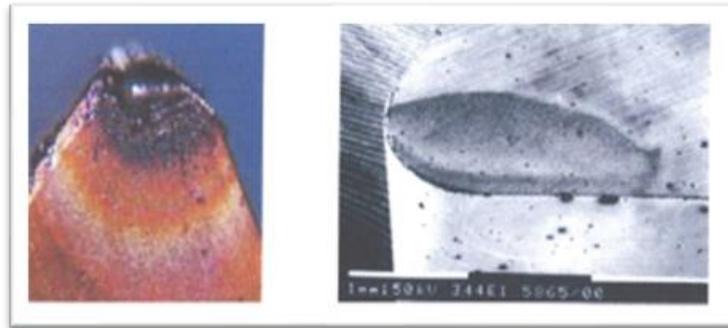


Figure I.4. Cratère formé par usure par diffusion sur une plaquette carbure[5]

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 [3].

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 [6].

I.2.3. 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 [6].

I.2.4. 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 interfaciale, 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 [6].

I.3. Les matériaux des outils de coupe

I.3.1. Les paramètres de coupe

➤ Généralité

La formation du copeau résulte d'une action mécanique complexe. L'arête de coupe (intersection de la face de coupe avec la face de dépouille) pénètre dans la matière et provoque la formation du copeau. Le frottement de celui-ci sur la face de coupe et celui de la pièce sur la face de dépouille provoquent une augmentation importante de la température, qui peut entraîner une fusion locale du copeau. Ce phénomène peut conduire à l'adhérence du copeau sur la face de coupe (copeau adhérent). La création d'une arête rapportée.

Les principaux facteurs influençant la formation du copeau sont :

- La vitesse de coupe (V_c) [m/min] ;
- La profondeur de passe (a_p) [mm] ;
- La vitesse d'avance (V_f) [mm/tour] ou [mm/dent/tour];
- La géométrie de l'outil ;
- Les matériaux de l'outil et de la pièce ;
- La lubrification [7].

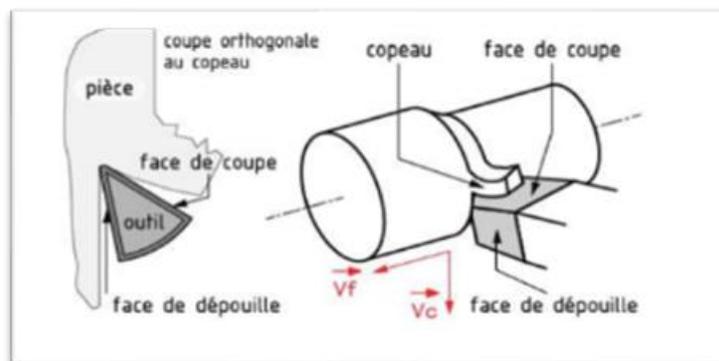


Figure I.5. Phénomène de coupe [7]

➤ La notion de copeau minimum

Lorsque la profondeur de passe et l'avance sont trop faibles l'outil ne coupe plus. Le métal se comprime superficiellement et la pression de contact outil-pièce provoque l'usure prématurée de l'outil ainsi que l'obtention d'un mauvais état de surface. Il est nécessaire de choisir des valeurs minimales pour obtenir un résultat satisfaisant.

➤ Les critères de choix :

Plusieurs critères permettent de définir les paramètres de la coupe tel que ;

- Le type de machine et sa puissance,
- La mise en œuvre,
- La matière de l'outil,
- Le type d'opération.

L'objectif est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela il faut déterminer certains paramètres spécifiques, notamment la vitesse de coupe (V_c), l'avance f et la profondeur de passe (a_p).

a) La vitesse de coupe (V_c) (m/min)

Représente l'espace parcouru (en mètres) par l'extrémité d'une dent de l'outil en une minute. Ce paramètre influe sur la durée de vie des outils et varie :

- ✓ Avec le type de matière à usiner et le matériau de l'outil,
- ✓ Selon la nature de l'opération (ébauche ou finition),
- ✓ Par rapport au type d'usinage effectué (application d'un coefficient réducteur lorsque l'usinage est délicat).
- ✓ Fonction de l'utilisation des conditions de lubrification (travail à sec ou lubrifié). Les valeurs usuelles des vitesses de coupe en fonction de la matière à usiner et de la matière de l'outil, sont données dans des abaques [7].

b) La fréquence de rotation N [tour/min]

Se calcule par la formule suivante :

$$N = \frac{1000 - V_c}{\pi * D}$$

Où D [mm] représente le diamètre de la pièce à usiner (en tournage) ou le diamètre de la fraise/du foret (en fraisage/perçage).

A l'aide des tableaux indiquant les fréquences de rotation disponibles sur les machines-outils, on choisit les valeurs les plus proches de celles calculées.

c) L'avance (f) ou (fz) [mm/tour]

S'exprime par le déplacement de la pièce (en fraisage) ou de l'outil (en tournage) pour une dent c'est l'avance par dent (f) utilisée en fraisage. Elle est prise plus grande en ébauche qu'en finition, les valeurs des avances sont également données par des abaques.

d) La vitesse d'avance

C'est la vitesse de translation de la pièce/outil qui sera affichée sur la machine. Ce paramètre se calcule par la formule suivante :

$$V_f = f_z \times Z \times N$$

Avec Z le nombre de dents de la fraise et N la fréquence de rotation

e) Le paramètre profondeur de passe (ap)

Dépend de la surépaisseur de matière à usiner ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition) [8].

➤ La section du copeau

La valeur de l'avance par tour (f) multipliée par la profondeur de passe (a) déterminé la section du copeau enlevée par chaque dent, valeur qui influe elle-même la puissance demandée à la machine-outil [8].

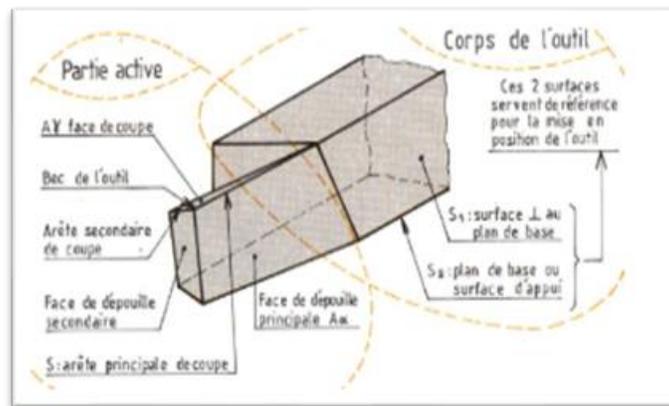


Figure I.6. Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [9]

I.3.2. Les Carbures métalliques

Pour permettre une coupe encore plus rapide, les outils en aciers au carbone ou en acier allié sont remplacés par des alliages métalliques élaborés par frittage de carbures très durs.

Les carbures métalliques sont des agglomérés de poudre de cobalt, de carbures de tungstène, de Tantale, et de bore.

Le mélange des carbures et de la poudre de cobalt est comprimé à $4000\text{kg}/\text{cm}^2$ dans un moule ensuite cuit en atmosphère d'hydrogène à 850°C , puis chauffé à 1500°C . A cette température, le cobalt seul fond et sert de liant. Ce mode d'obtention est appelé frittage.

La dureté des carbures métalliques est voisine de celle du diamant et ils la conservent jusqu'à 1000°C . Ils permettent de travailler quatre à huit fois plus vite qu'avec des aciers rapides mais sont sensibles aux brusques variations de températures. Suivant leur composition, les carbures métalliques sont adaptés à des usages bien limités tels que l'ébauche, finition, métaux ferreux et non ferreux, travail avec chocs ou sans chocs. Ils sont présents dans le commerce sous forme de plaquettes moulées, car les carbures métalliques étant très fragiles aux efforts de flexion donc ils sont préparés en plaquettes de dimensions réduites fixées sur le corps de l'outil par sou débrasage ou par des moyens mécaniques [10].

I.3.3. Céramiques

Les céramiques sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Elles sont comme les carbures, des matériaux obtenus par frittage mais les carbures métalliques sont remplacés par des éléments à base d'alumine pure (A1203) c'est la solution la plus ancienne sous forme de poudre A1203 avec utilisation comme liant l'oxyde de chrome.

Les céramiques présentent les propriétés suivantes :

- Absence de copeaux adhérents pendant la coupe.
- Très bonne acuité de l'arête de coupe, ce qui autorise éventuellement un copeau minimum d'épaisseur voisine de 0.01mm
- Obtention d'une bonne rugosité ($R_a = 0.8\mu\text{m}$). Utilisation des vitesses de coupe 3 à 5 fois supérieures à celles admises pour les carbures. Elles ont l'inconvénient d'être d'une utilisation plus délicate que celle des carbures par ex :
 - Elles sont plus sensibles aux chocs.
 - Elles nécessitent des machines robustes et puissantes. Les céramiques se présentent uniquement sous forme de plaquettes fixées sur un corps d'outil par un dispositif mécanique [3].

I.3.4. Cermets

Le cermet, un terme formé de deux syllabes : *cer* vient de *céramique* et *met* de *métal*. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, Mo_2C , WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co.

Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci - dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN, et TiCN et du rapport $N / (C + N)$ qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3.

La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

Les cermets présentent, en outre, une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe.

De bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige [3].

I.3.5. Lacier Rapid (HSS - High Speed Steel)

C'est un acier fortement allié, est très employé pour la production d'outils de coupe. Les caractéristiques qui le rendent intéressant sont sa dureté d'environ 65 HRC et sa ténacité qui lui confère une bonne longévité [11].

I.4. Géométrie des outils de coupe

La plaquette de coupe est la partie active dans une opération d'usinage. Les outils de coupe se caractérisent par leurs matériaux et par différents paramètres géométriques comme : les angles de coupe, l'acuité d'arête, le brise-copeaux, et le rayon de bec. La géométrie des outils est étudiée pour assurer une formation aisée des copeaux, offrir une arête de coupe robuste et fragmenter les copeaux en éléments d'une longueur acceptable [11].

I.4.1. Les angles de coupe

Les angles de coupe sont repérés dans différents plans de projection. Dans le cas de l'outil en main, les principaux plans de projection sont les plans : Pf, Pp, Pr, Ps Les angles de coupe (figure I.7) sont :

- Angle de direction d'arête principale K_r (angle mesuré entre le plan Pf et ps).
- Angle d'inclinaison de l'arête de coupe λ_s (angle mesuré entre le plan Pr et l'arête de coupe).
- Angle de pointe de l'outil α (angle mesuré entre le plan principal Ps et le plan secondaire).
- Angle de direction d'arête secondaire K_r' (angle mesuré entre le plan Pf et le plan Pr) [11].

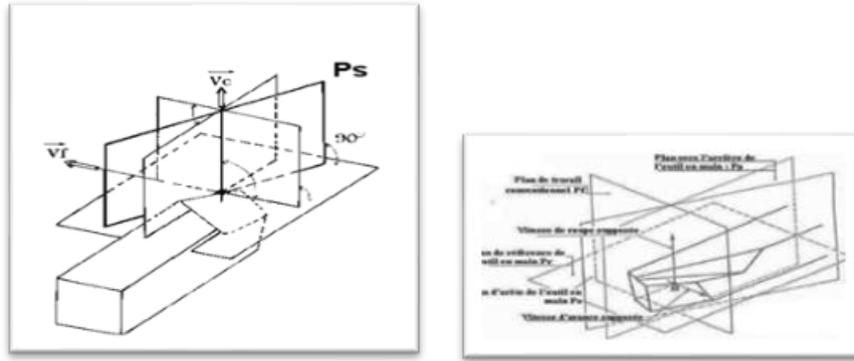


Figure I.7. Principaux plans de l'outil en main [8]

Les angles de direction d'arête principale K_r , de pointe de l'outil ϵ_r , et de direction d'arête secondaire K_r' sont liés par l'équation (équation I.1) :

$$K_r + \epsilon_r + K_r' = 180^\circ \quad (\text{I.1})$$

Les angles g f angle de coupe et l s angle d'inclinaison sont les éléments fondamentaux pour l'évacuation des copeaux. La variation de l'angle de pointe de l'outil de coupe joue un rôle sur la durée de vie de l'outil et sur la segmentation des copeaux. L'augmentation de l'angle de coupe g f diminue l'effort de coupe et la température durant l'usinage. L'angle en dépouille principale a f n'a aucune influence sur l'effort coupe. Mais les angles en dépouille principale ont f , et secondaire a f_0 , sont très importants et seront toujours minimisés pour augmenter la résistance mécanique des arêtes et du bec de l'outil. Plus l'angle de dépouille d'une plaquette augmente plus la résistance de l'arête de coupe de cette plaquette aux forces mécanique diminue. L'angle de dépouille a f joue un rôle important sur l'usure de la face de dépouille, car plus cet angle est grand plus l'usure en dépouille diminue [11].

I.4.2. Les mouvements de l'outil

○ **Mouvement relatif outil /pièce**

Lors de la génération d'une surface par enlèvement de matière, la surface engendrée sur la pièce est due au mouvement de l'outil par rapport à la pièce (figure I.8).

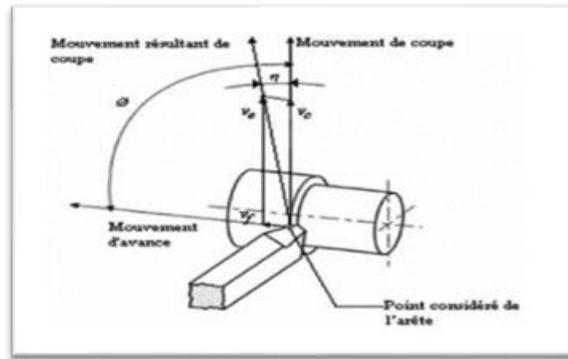


Figure I.8. Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage [7]

- **Mouvement de coupe M_c**

Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce. Il participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux Pendant la course de travail.

- **Mouvement d'avance M_a**

Mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne.

Le mouvement d'avance a pour but de décaler latéralement une quantité f dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.

Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance combinés constituent le mouvement résultant de coupe (v_e), alors que l'angle contenu entre ces deux mouvements est appelé angle de direction d'avance (ϕ).

- **Mouvement de pénétration M_p**

C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe [7].

I.4.3. Le Revêtement

Souvent, les outils en acier rapide ou en métal dur sont revêtus d'une ou plusieurs couches, ils possèdent une durée de vie plus longue et permettent une augmentation des vitesses d'usinage et un état de surface meilleur.

Les différents types de revêtement sont :

- Le nitrure de titane (TiN), matériau standard.
- Le carbonitrure de titane (TiCN), grande dureté, bonne résistance à l'abrasion.
- L'oxyde d'aluminium (AlO₃) et nitrure de silicium (Si₃N₄), appartiennent à la classe des céramiques ; ce sont deux matériaux de base auxquels on peut additionner différentes matières en fonction des caractéristiques recherchées : oxyde de zirconium (ZrO₂), carbure de titane (TiC) ou du carbure de silicium (SiC).
- Le diamant utilisé pour l'usinage de métaux non-ferreux et de non-métaux abrasifs tels que : carbone ou céramique.
- Le nitrure de bore utilisé pour l'usinage de métaux ferreux trempés [11].

I.4.4. Types d'acier inoxydable

Comme nous l'avons déjà commenté dans d'autres articles, il existe jusqu'à 5 types d'acier, à savoir [12] :

○ **Acier austénitique**

Ce type d'acier présente une teneur en nickel de plus de 7%, entre 16 à 28% de teneur en chrome, et une très faible teneur en carbone, ce qui permet une haute résistance à la corrosion, une bonne malléabilité et soudabilité et d'excellentes propriétés mécaniques. Les grades 304 et 316 sont les plus utilisés.

○ **Acier ferritique**

Ce type d'acier a des alliages avec du chrome dans une gamme de 10,5% à 30%, mais avec une très faible teneur en carbone (0,08 % par rapport aux aciers martensitiques), ce qui le rend économique et avec des propriétés de résistance à la corrosion et de dureté assez bonnes. En plus, contrairement aux austénitiques, les ferritiques sont magnétiques. Certaines nuances peuvent contenir du molybdène, du silicium, de l'aluminium, du titane et du niobium, ce qui leur confère des caractéristiques différentes.

○ **Acier martensitique**

Il a une teneur élevée ou faible en carbone (jusqu'à 1,2%), 12% de chrome et est construit autour de fer de type 410. Sa microstructure de martensite tétragonale centrée sur le corps le rend durcissable par traitement thermique (par refroidissement), lui donne de la dureté et de la résistance. Il est principalement utilisé pour les outils médicaux (scalpels, rasoirs et pinces internes). La martensite non trempant est de faible dureté et donc cassante.

- **Acier duplex**

Riche en chrome (19-32%) et en molybdène (jusqu'à 5%) et plus faible en nickel que les aciers inoxydables austénitiques, ce qui le rend deux fois plus résistant. Sa microstructure mixte offre une résistance améliorée à la fissuration par corrosion sous contrainte due au chlorure par rapport aux aciers inoxydables austénitiques de type 304 et 316. Cela le rend plus cher.

- **Acier trempé par précipitation**

Ils contiennent du chrome et du nickel, qui offrent une combinaison optimale des propriétés des aciers inoxydables martensitiques et austénitiques. Avec les premiers, ils partagent leur capacité à acquérir une résistance élevée par traitement thermique, et ils ont des seconds une grande résistance à la corrosion. Ceci est obtenu après addition d'un ou plusieurs des éléments de cuivre, aluminium, titane, niobium et molybdène à une matrice martensitique ou austénitique soumise à un processus de traitement thermique qui conduit à son durcissement [12].

II.1. Introduction

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés dans l'industrie mécanique. Ainsi, le choix des paramètres de coupe optimaux est très important afin d'assurer un meilleur état de surface des pièces usinées, une durée de vie plus importante des outils de coupe et une productivité plus élevée. Le résultat d'un bon choix de conditions de coupe peut être constaté par une diminution des niveaux d'efforts de coupe et de vibrations de l'outil.

Plusieurs chercheurs ont eu recours à l'optimisation pour répondre à ce dilemme. En effet, l'optimisation peut être définie comme la science qui détermine la meilleure solution à certains problèmes, mathématiquement définie, qui sont souvent des modèles de la physique réelle. C'est une technique qui permet de « quantifier » les compromis entre des critères parfois non commensurables. En fait, l'optimisation cherche à améliorer une performance en se rapprochant d'un point optimum. La résolution d'un problème d'optimisation s'appuie généralement sur un algorithme d'optimisation [13].

II.2. Etudes récentes sur l'étude de l'usure des outils de coupe

Dans l'étude de **Suresh** [14], l'auteur a tenté d'étudier l'influence des paramètres d'usinage sur l'usure des différents types de outils de coupe pendant le tournage de l'acier trempé. Multicouches CVD (dépôt de vapeur chimique) et PVD (dépôt de vapeur physique). Aussi, des inserts en céramique ont été utilisés. L'analyse ANOVA a révélé que la vitesse de coupe, le temps de coupe, l'avance et la profondeur de passe étaient statistiquement importants pour les paramètres d'usure des différents outils de coupe utilisés (figure II.1 et II.2).

La figure II.1(a-c) montre les graphiques des effets principaux de l'usure pour les différents outils de coupe [14] utilisés dans l'étude. Il est clair que l'usure augmente avec l'augmentation des paramètres d'usinage.

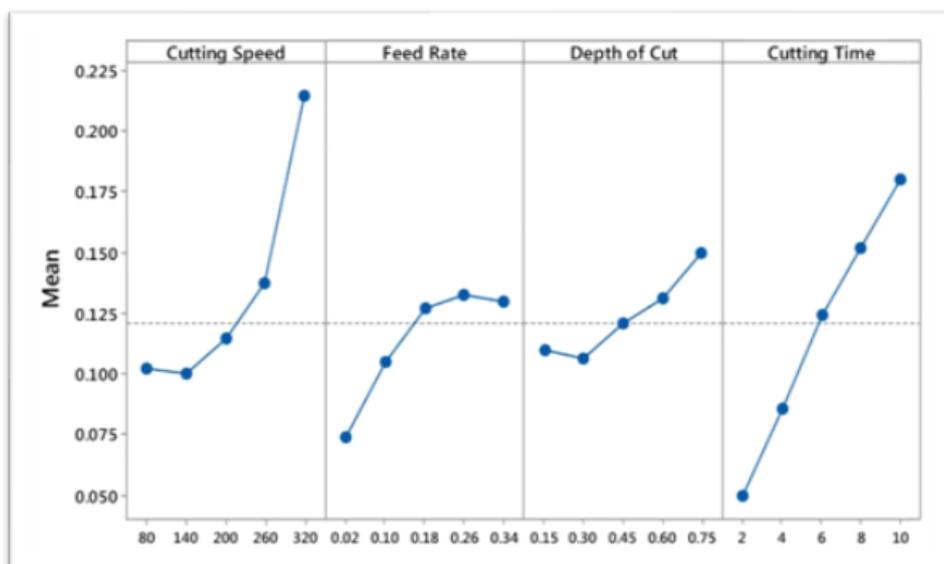


Figure II.1.a. Graphiques des effets qui affectent l'usure des outils en carbure multi couches (multilayer-coated carbide tool) [14].

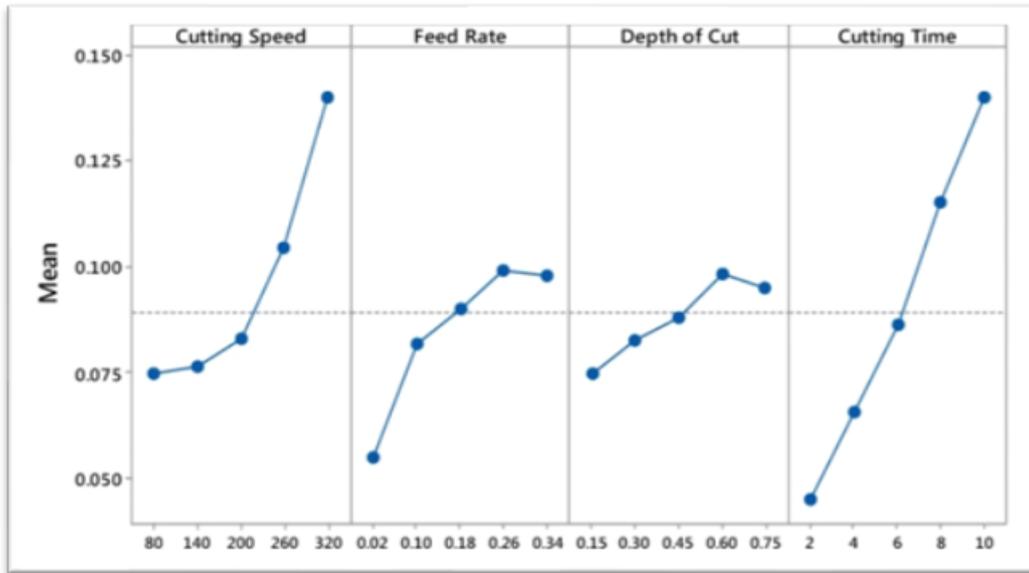


Figure II.1.b. Graphiques des effets qui affectent l'usure de l'outil en carbure non revêtu [14]

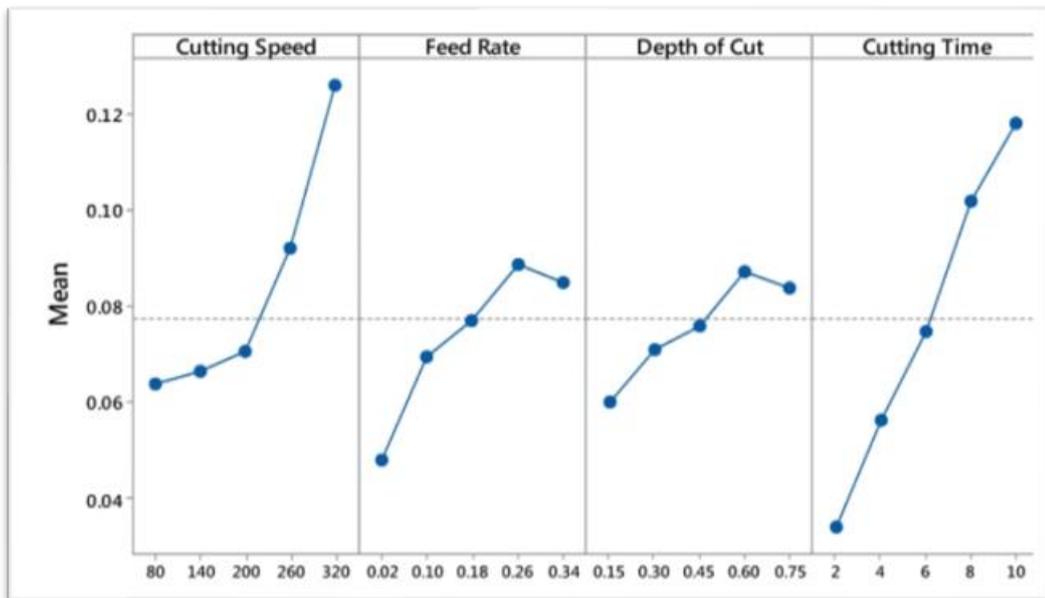
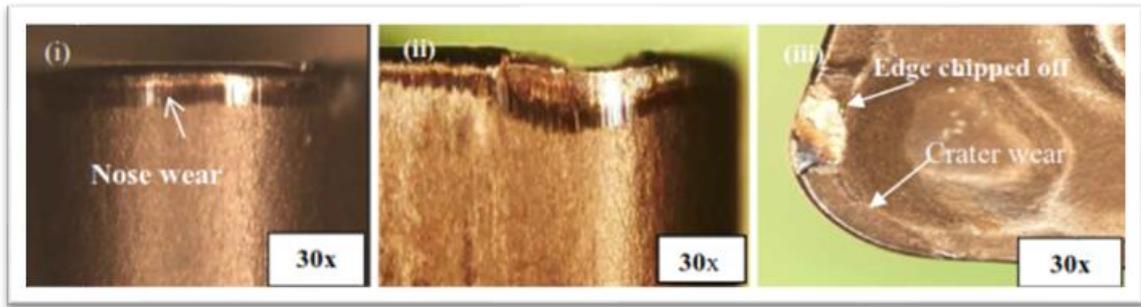
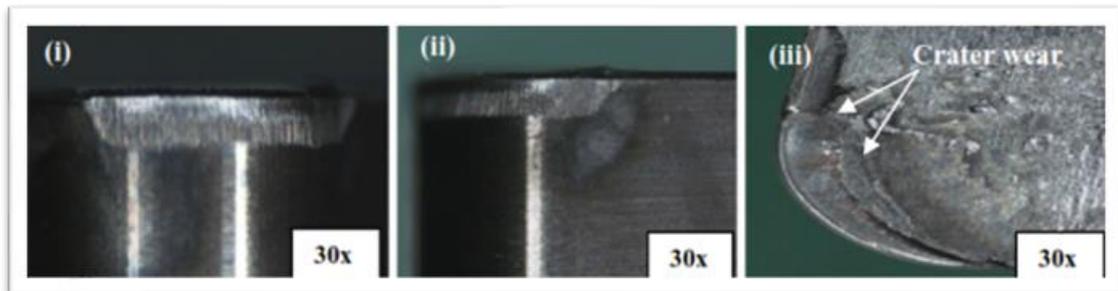


Figure II.1.c. Graphiques des effets qui affectent l'usure d'un outil en carbure revêtu d'une seule couche [14].

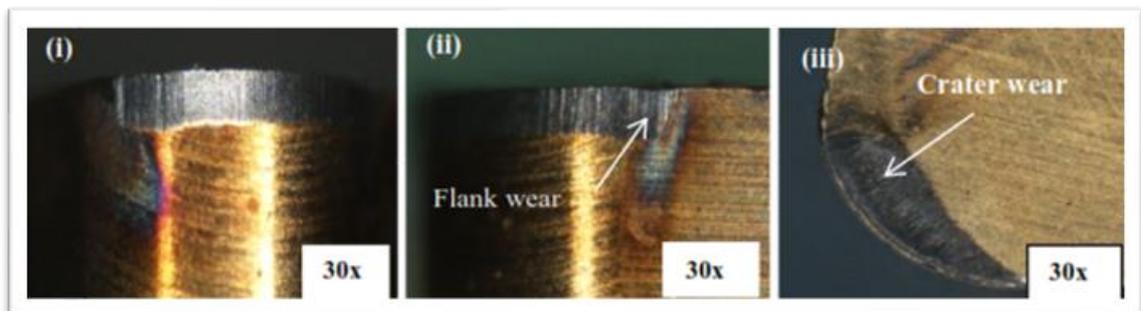
Les images microscopiques prise par un microscope électronique à balayage ont montré que l'outil de coupe multicouche revêtu présentait l'usure principale tels que l'abrasion, l'usure des cratères. Les outils de coupe ont démontré une usure adhésive à des faible valeurs des paramètres d'usinage élevés (figure II.2).



(a) Outil en carbure à revêtement multicouche [14]



(b) Outil en céramique non revêtu [14]



(c) Outil en céramique revêtue [14]

Figure II.2(a-c). Influence des paramètres de coupe sur l'usure de différents types d'outils de coupe [14]

Le mécanisme d'abrasion a été observé à des conditions de coupe faibles, lors de l'utilisation de plaquettes en carbure multicouche revêtues. Une plus grande formation de cratères a été observée lors de l'utilisation d'outils en carbure multicouche et d'outils non revêtus au cours de l'usinage dans l'ensemble des conditions de coupe. L'outil en céramique a présenté une usure adhésive dans des conditions de coupe faibles, et une usure abrasive dans des conditions de coupe plus élevées.

Les méthodes de surface de réponse (RSM) et réseau neuronal Artificiel (ANN) ont été utilisés pour prédire l'usure des outils. Les paramètres d'usinage pris en compte dans l'étude étaient l'avance, la vitesse de coupe, profondeur de passe et le temps de coupe. Les valeurs prédites et expérimentales étaient très proches de l'usure en dépouille de l'outil grâce aux modèles RSM et ANN, ce qui suggère l'adéquation des modèles présentés. Cependant, le

modèle ANN a fait preuve d'une plus grande précision ($R^2 > 99,957\%$) et MSE ($< 0,2\%$) et d'un meilleur contrôle sur les réponses de sortie (usure de l'outil) par rapport au modèle RSM. Il aide à la sélection de paramètres d'usinage adéquats avec une contrainte appropriée de durée de vie d'outil souhaitée pour les applications d'ingénierie. Les modèles ANN et RSM développés sont d'une grande précision ($R > 98,5\%$ et $EQM < 0,2\%$).

L'étude réalisée par **Kuntoglu** [15] sur l'usure des outils est très importante pour réduire les coûts de production en optimisant les paramètres d'usinage. Le but de ce travail est d'investiguer l'influence des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil, lors du tournage du AISI 1050 par trois types d'outils ont été choisis comme P10, P25 et P35 (BOHLER), La géométrie des outils de coupe (TCMT 16T304). Le porte-outil (TAKIMSAS R/L 140 0 20 16) a un angle d'approche de 60 et est intégré au dynamomètre. Sur l'effort tangentiel de coupe et l'émission acoustique (AE). Les résultats de l'ANOVA ont montré que la vitesse de coupe est la plus influente sur l'usure de l'outil (environ 45 %) suivie par le rayon du bec de l'outil (environ 35 %). L'effet de l'avance sur l'effort de coupe tangentielle est de (%88) et de la vitesse de coupe sur l'AE est de (%80). Afin d'obtenir une usure minimale de l'outil, les paramètres de coupe optimaux ont été sélectionnés comme suit $v_1 = 135$ m/min, $f_2 = 0,214$ mm/rev, $T_2 = P25$. Grâce au système de capteurs mis en œuvre, les cassures des outils peuvent être détectés avec succès.

Tableaux II.1. Résultats de l'ANOVA pour l'usure, l'effort tangentiel et l'émission acoustique [15].

Paramètres de coupe PC	DOF	SS	MS	F	P	PC
Usure en dépouille						
Vitesse de coupe	2	5.4005	2.7002	24.32	0.039	0.44
Vitesse alimentation	2	2.244	1.122	10.11	0.09	0.18
Type d'outil	2	4.2103	2.1051	18.96	0.05	0.34
Erreur	2	0.222	0.111			
Totale	8	12.0767				
Effort de coupe tangentielle						
Vitesse de coupe	2	0.2899	0.14495	13.32	0.07	0.02
Vitesse alimentation	2	13.25	6.62598	608.86	0.002	0.88
Type d'outil	2	1.4044	0.70218	64.52	0.015	0.09
Erreur	2	0.0218	0.01088			
Totale	8	14.9680				
Émission acoustique						
Vitesse de coupe	2	53.41	26.7052	42.42	0.023	0.79
Vitesse alimentation	2	3.713	1.8566	2.95	0.253	0.05
Type d'outil	2	8.861	4.4307	7.04	0.124	0.13
Erreur	2	1.259	0.6295			
Totale	8	67.244				

Les contributions de la vitesse de coupe, de l'avance et du type d'outil l'usure en dépouille ont été trouvées 44%, 18% et 34% respectivement et sur la force de coupe tangentielle ont été trouvées 2%, 88% et 9% respectivement et sur l'AE ont été trouvées 79%, 5% et 13% respectivement.

L'objectif principal de l'étude de **Kumar** [16] est d'effectuer une opération de tournage sur une pièce en acier EN36B avec un outil en carbure de tungstène EN36B, d'étudier les paramètres de coupe optimaux et d'effectuer une analyse de l'usure en dépouille. Une méthodologie de recherche expérimentale et basée sur l'optimisation a été choisie dans cette étude. Les résultats expérimentaux ont été obtenus à partir de l'optimisation des paramètres a été réalisée en utilisant la méthode RSM (response surface méthodologie) pour optimiser l'usure en dépouille de l'outil de coupe. Dans les résultats, le tracé de l'effet principal pour l'usure en dépouille et les effort (F_x , F_y et F_z) ont été obtenus (Figure II.3). Il a été conclu que l'usure en dépouille de l'outil est affectée par la profondeur de passe et que l'usure en dépouille augmente généralement de manière linéaire avec l'augmentation de la vitesse de coupe, de la profondeur de passe et de l'avance. Pour valider les résultats obtenus, les valeurs prédites et mesurées ont été tracées et se sont avérées en très bon accord avec un niveau de précision de 96,33% à 98,92%.

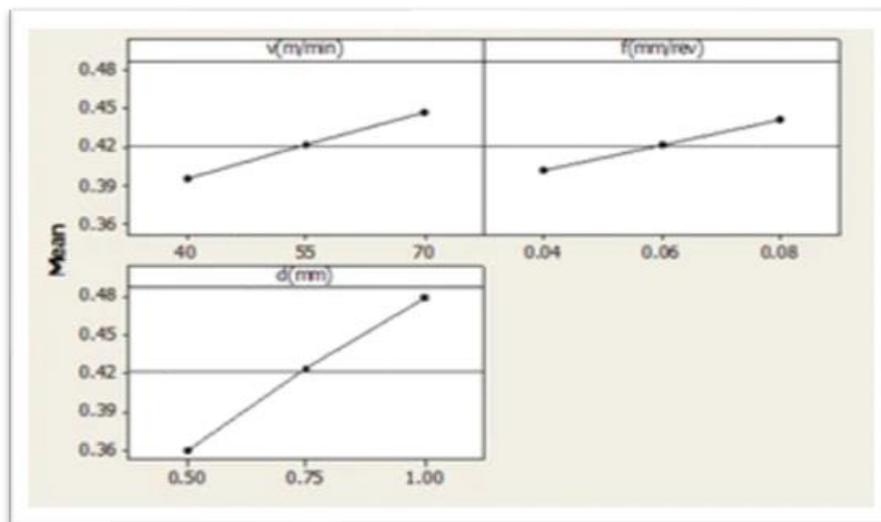


Figure II.3.a. Graphiques des effets principaux de VB [16]

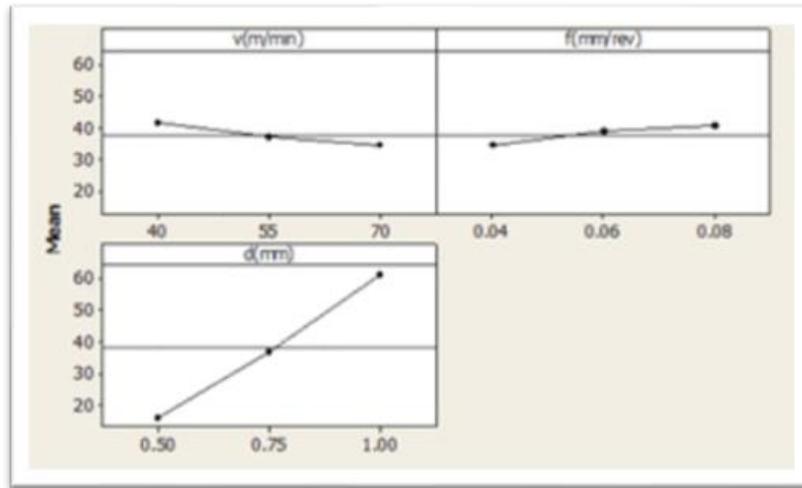


Figure II.3.b. Graphiques des effets principaux de Fx [16]

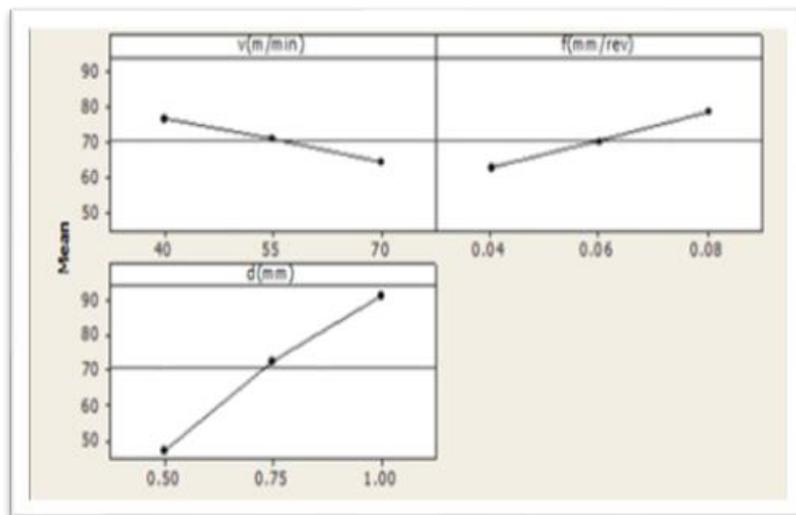


Figure II.3.c. Graphiques des effets principaux de Fy [16]

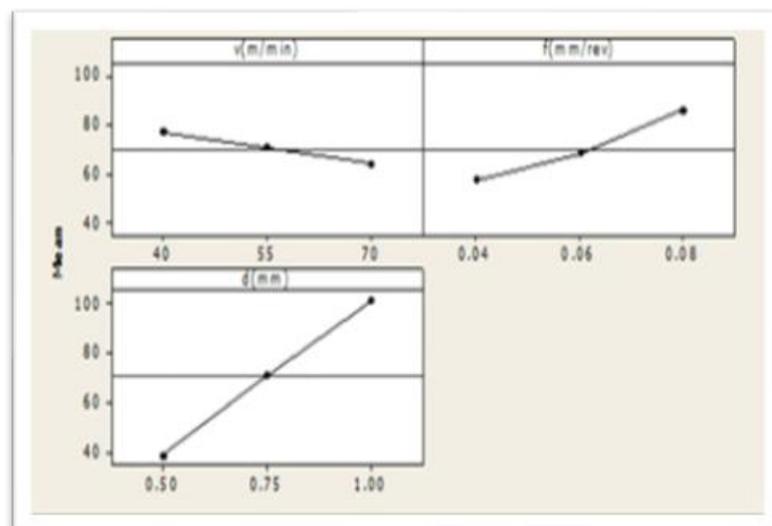


Figure II.3.d. Graphiques des effets principaux de Fz [16]

L'étude bibliographique de **Wang** [17] est un résumé de plusieurs études réalisées sur l'usinage d'ultra-précision. Les mécanismes d'usure et les schémas de l'usure des outils diamantés lors de l'usinage des matériaux ferreux sont examinés.

Tableaux II.2. Comparaison des performances de coupe dans le tournage au diamant de matériaux couramment utilisés [18, 19, 20, 21]

Maériaux	Distance Usinée	Ra	Distance Usinée	VB max
(1) Nickel chimique à haute teneur en phosphore nickel chimique	20Km	10nm	200Km	<5µm
(2) Silicium	---	---	24Km	20µm
(3) Acier inoxydable	Impossible de découper la surface du miroir dans des conditions normales		>20µm	250m

(1) matériaux usinables avec le diamant, (2) matériaux difficilement usinables avec le diamant, (3) matériaux non usinables avec le diamant.

La figure II.4 montre les derniers résultats de l'étude de **Lee et al.** [22]; ils ont modifié des outils en diamant en y implantant des ions de gallium. Les résultats de la recherche ont montré que lors du tournage d'un acier de 50 m, la rugosité de surface de la pièce était de 9,3 nm et de 137,4 nm après un tournage de 350 m ; cependant, il n'y a pas d'usure significative de l'outil en diamant. Cependant, l'implantation ionique endommagera le réseau de diamants et ne permettra pas d'obtenir une rugosité de surface de haute qualité. Par conséquent, il est encore difficile de réaliser la coupe à longue distance (> 1 km) de métaux ferreux avec des outils diamantés, même après 70 ans de recherche. Par conséquent, l'étude approfondie du mécanisme d'usure des outils diamantés dans le tournage des matériaux ferreux et le développement de méthodes de suppression de l'usure restent une question essentielle dans l'usinage de haute précision.

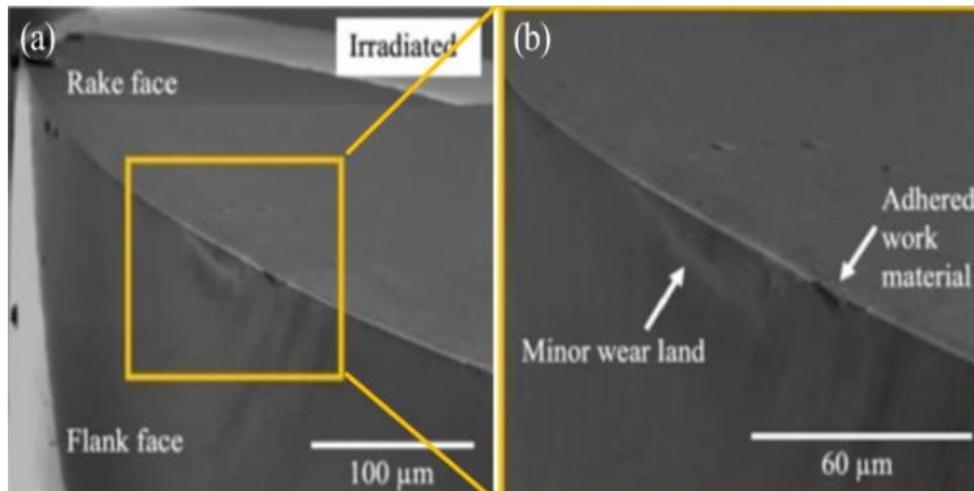
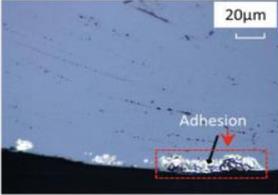
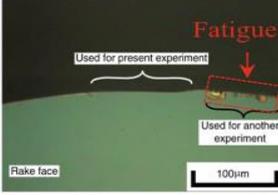
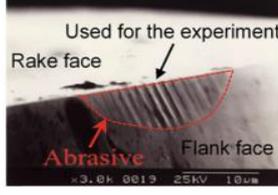
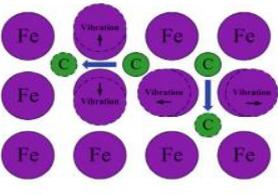
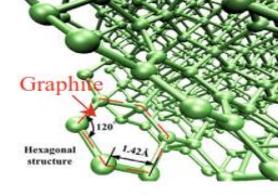


Figure II.4. Les images SEM de l'usure des outils en Diamonds après 50 m d'usinage [17]

Tableau II.3. Les mécanismes d'usure les plus fréquents [23, 24, 25]

Wear forms	Type I: Adhesion	Type II: Fatigue	Type III: Abrasive wear
Tool wear for details			
Wear forms	Type IV: Diffusion	Type V: Graphitization	Type VI: Oxidative wear
Tool wear for details			$C_xO_y + Fe_aO_b \rightarrow Fe_aO_\beta C_\gamma$

Comme la montre le tableau II.3, les types I~IV sont des formes d'usure mécanique, tandis que les types V~VI sont des formes d'usure chimique. Parmi eux, dans le domaine du tournage diamanté monopoint des matériaux ferreux, les chercheurs accordent plus d'attention à la forme d'usure de type 3 [17]. Cependant, il est intéressant de noter qu'en raison de la dureté du diamant, il est impossible pour les matériaux ferreux de former une usure en peigne sur la surface du diamant ; par conséquent, certains changements susceptibles de réduire la dureté du diamant doivent intervenir avant l'usure de l'outil diamanté. En ce qui concerne ce changement, on pense principalement qu'il s'agit du type V : la graphitisation.

En ce qui concerne la forme d'usure de type I, elle se produit généralement dans le tournage de certains matériaux tendres, tels que l'alliage de titane et l'aluminium. Pour la forme d'usure de type II, une plus grande attention sera accordée à certains matériaux durs, tels que le germanium et le silicium. Bien entendu, si des vibrations externes sont introduites dans le processus d'usinage, la forme d'usure de type II est également très étudiée [17].

II.3. Etude bibliographique sur l'optimisation des paramètres du tournage

La détermination des paramètres d'entrée optimaux des processus d'usinage joue un rôle essentiel dans l'obtention des valeurs des réponses les plus appropriées, tout en répondant aux exigences des fabricants et des utilisateurs.

Plusieurs chercheurs ont choisi les méthodes Multi-Criteria Decision Making [MCDM] pour identifier les combinaisons paramétriques les plus appropriées de différents processus d'usinage sur la base de données expérimentales [26].

Sur le tableau II.4. Sont listés plusieurs travaux de recherches sur l'optimisation du tournage de différents matériaux.

Tableaux II.4. Optimisation des paramètres du processus de tournage à l'aide de différentes méthodes MCDM [26]

S. No.	Auteurs	Méthode d'optimisation	Réponses étudiées
1	Palanisamy and Senthil [27]	TOPSIS	FC and SR
2	Ramesh et al. [28]	TOPSIS	SR and TW
3	Balaji et al. [29]	TOPSIS	FC and SR
4	Palanisamy and Selvaraj [30]	TOPSIS	SE, MRR, and Microhardness (MH)
5	Narayanan et al. [31]	TOPSIS	MRR and SR
6	Nipanikar et al. [32]	TOPSIS	SR and TW
7	Khan and Maity [33]	TOPSIS	SR, FC, TW, and temperature (T)
8	Bhardwaj et al. [34]	TOPSIS	SR, MRR, MT
9	Majumdera and Sahab [35]	TOPSIS	SR, PC, and tool vibration
10	Gok [36]	Fuzzy TOPSIS	SR and FC
11	Koyee et al. [37]	TOPSIS	SR and cutting force (FC)
12	Koyee et al. [38]	Fuzzy TOPSIS	FC, PC, TW, chip volume ratio
13	Khan and Maity [39]	Fuzzy TOPSIS	SR, FC, and TW
14	Rao [40]	Combined TOPSIS and AHP	TW, PC, and SR
15	Singaravel and Selvaraj [41]	Combined TOPSIS and AHP	MH, SR, and MRR
16	Abhang and Hameedullah [42]	Hybrid Taguchi and MCDM	SR and MRR

17	Parida and Routara [43]	Hybrid Taguchi and MCDM	MRR and SR
18	Lan [44]	Hybrid Taguchi and MCDM	SR, TW, and MRR
19	Singh et al. [45]	TOPSIS in the Taguchi method	SR and MRR
20	Balasubramaniyan and Selvaraj [46]	Hybrid Taguchi and TOPSIS	Circularity and cylindricity error
21	Thirumalai and Senthilkumaar [47]	NSGA II and TOPSIS	SR, Tool life (TL) FC, MRR, and PC
22	Asokan and Senthilkumaar [48]	NSGA II and TOPSIS	SR, TL, FC, MRR
23	Singaravel et al. [49]	MOORA and entropy method	SR, MH and MRR
24	Khan et al. [50]	Fuzzy MOORA	FC, SR, and TW
25	Maity and Pradhan [51]	MOORA coupled with Taguchi method	TW, SR, and chip reduction coefficient
26	Khan and Maity [52]	VIKOR method	FC, SR, and MRR
27	Kumar et al. [53]	Combined AHP and VIKOR	MRR, SR, and MT
28	Singaravel and Selvaraj [54]	AHP	SR, MH, and MRR

D'autre part, dans l'étude de **chakraborty** [55] plus de 120 articles de recherche (recherchés dans Sciencedirect, Scopus et Web of Science) sont passés en revue tout en explorant les applications de différentes techniques MCDM dans la résolution de problèmes d'optimisation paramétrique des processus de tournage, de perçage et de fraisage. Ce document d'analyse sert de base de connaissances aux ingénieurs et fabricants et chercheurs pour décider de l'optimisation des paramètres d'usinage et du plan de conception expérimentale le plus approprié (L9 de Taguchi, réseau orthogonal L9, L18 ou L27 de Taguchi) ; les matériaux d'ingénierie avancée difficiles à couper (composites, aluminium et titane et leurs alliages); les paramètres d'entrée pour les processus de tournage, de perçage et de fraisage (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les réponses correspondantes (taux d'enlèvement de matière et rugosité de surface).

Aussi, dans l'investigation de **Partha** [56] les performances de deux processus de fraisage en bout sont optimisées à l'aide de quatre nouveaux outils MCDM récemment développés, à savoir l'analyse comparative idéale-réelle multi-attributive (MAIRCA), la comparaison multi-attributive des zones d'approximation des frontières (MABAC), les alternatives de mesure et le classement selon la solution de compromis (MARCOS) et la solution de compromis (MARCOS) et la méthode de classement des alternatives en fonction de la distance par rapport à la solution idéale (CRADIS). Pour les deux exemples illustratifs, toutes les techniques MCDM adoptées identifient les mêmes combinaisons de paramètres de fraisage

en bout. Mais de meilleures valeurs de réponse sont prévues pour les combinaisons paramétriques optimales dérivées de la méthode de calcul de la moyenne des niveaux à l'aide des scores MCDM calculés.

Lors de l'étude de **Haoues** [57], seize expériences sur le processus de tournage ont été réalisées. Les paramètres d'entrée des expériences sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Après avoir mené les expériences, la rugosité de la surface et le taux d'enlèvement de matière (MRR) ont été déterminés. Pour déterminer l'expérience qui garantit simultanément la rugosité de surface minimale et le taux d'enlèvement de matière maximal, quatre méthodes de prise de décision multicritères ont été utilisées, notamment MAIRCA, EAMR, MARCOS et TOPSIS. Deux méthodes, l'Entropie et MEREC ont été utilisées pour déterminer les poids des critères. La combinaison de quatre méthodes de décision multicritères et de deux méthodes de détermination des poids a permis d'obtenir des résultats très satisfaisants. Les méthodes de détermination des poids ont permis de créer huit solutions de classement pour les expériences, ce qui constitue la nouveauté de cette étude. Un résultat étonnant a été obtenu. En effet, les huit solutions ont toutes déterminé la même meilleure expérience.

Tableaux II.5. Régime optimal des méthodes PSI, MABAC et MAIRCA pour deux matériaux [57]

	Vc	f	ap	Ra	Fz	PC	MRR
PSI							
PA66-GF30%	206	0.8	2	1.23	36.57	125.59	32.95
PA66	206	0.8	1	1.031	20.365	70.074	16.484
MABAC	206	0.8					
PA66-GF30%	206	0.8	0.5	1.13	14.75	50.65	8.24
PA66	206	0.8	0.5	1.03	12.80	44.04	8.24
MAIRCA	206	0.8					
PA66-GF30%	206	0.8	0.5	1.13	14.75	50.65	8.24
PA66	206	0.8	0.5	1.03	12.80	44.04	8.24

Les résultats de l'optimisation montrent que (Vc) et (f) restent les mêmes pour les trois méthodes, mais que les valeurs de (ap) varient pour la méthode PSI. En effet, l'obtention d'une grande valeur de (ap) par la méthode (PSI) a conduit à l'obtention d'une valeur maximale de MRR, ($MRR_{PA66-GF30\%} = 32.95 \text{ cm}^3/\text{min}$) et ($MRR_{PA66} = 16.484 \text{ cm}^3/\text{min}$). D'autre part, elle a conduit à une augmentation de (Fz et Pc) comme indiqué dans l'analyse ANOVA (Tableau II.5). En outre, nous constatons que les valeurs de (Ra) n'ont pas beaucoup changé, ce qui est attendu puisque l'étude ANOVA (tableau II.1) a révélé que le facteur (ap) n'a pratiquement aucun effet sur le critère (Ra).

Lors de l'étude de **Touggui** [58], l'acier inoxydable austénitique (AISI 316L ASS) est connu pour être un matériau très difficile à couper en raison de sa ténacité élevée, de son écrouissage combiné à la formation d'arêtes rapportées (BUE) et de sa mauvaise conductivité thermique. Afin d'améliorer son usinabilité, il semble important de mener des expériences permettant d'étudier les effets des paramètres de coupe sur les réponses du processus. Pour cela, les approches Taguchi et TOPSIS ont été appliquées pour déterminer une combinaison optimale de paramètres de coupe pendant le tournage à sec de l'AISI 316L ASS.

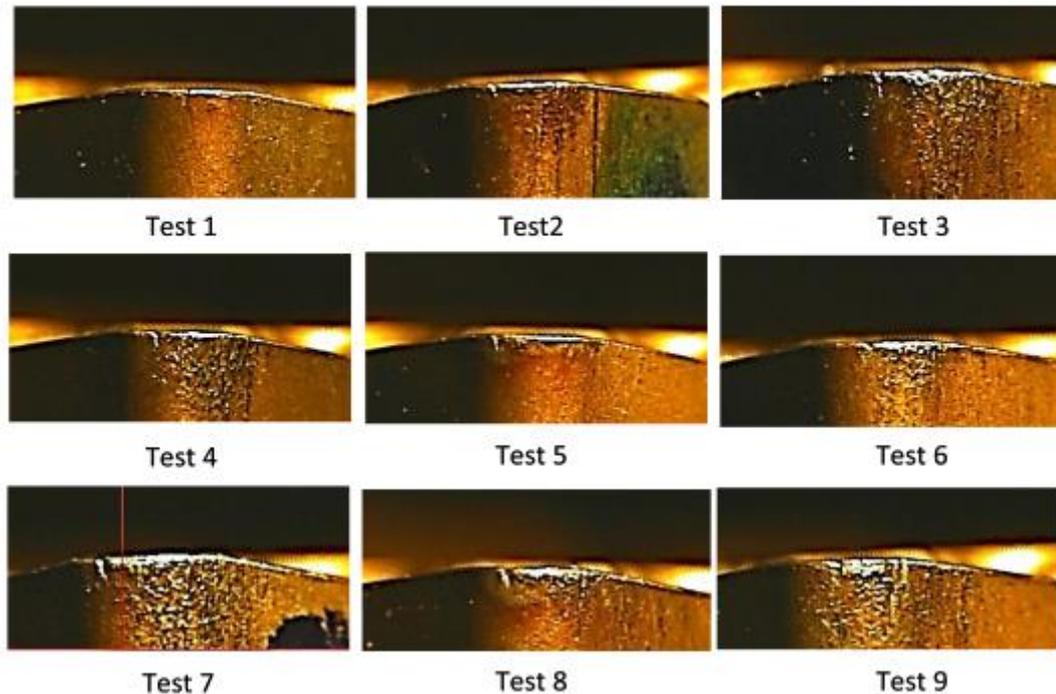


Figure II.5. Visualisation de l'usure des arêtes de coupe en fin d'usinage [58]

La vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), la profondeur de coupe (a_p) et le temps de coupe (t_c) ont été sélectionnés comme quatre paramètres d'entrée. L'usure en dépouille (VB), les efforts de coupe tangentielle (F_z), la rugosité de surface (R_a) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) ont été considérés comme les principales réponses du processus. Neuf essais de coupe ont été réalisés sur la base du réseau orthogonal L9 de Taguchi. Ainsi, afin de distinguer le paramètre de coupe le plus significatif, l'analyse de la variance (ANOVA) a été appliquée (Figure II.6) En fin de compte, dans le cas de l'approche Taguchi, les résultats montrent des combinaisons optimales en termes de (V_c , f , a_p et t_c) pour atteindre un minimum de VB , F_z et R_a et également pour atteindre la maximisation du MRR .

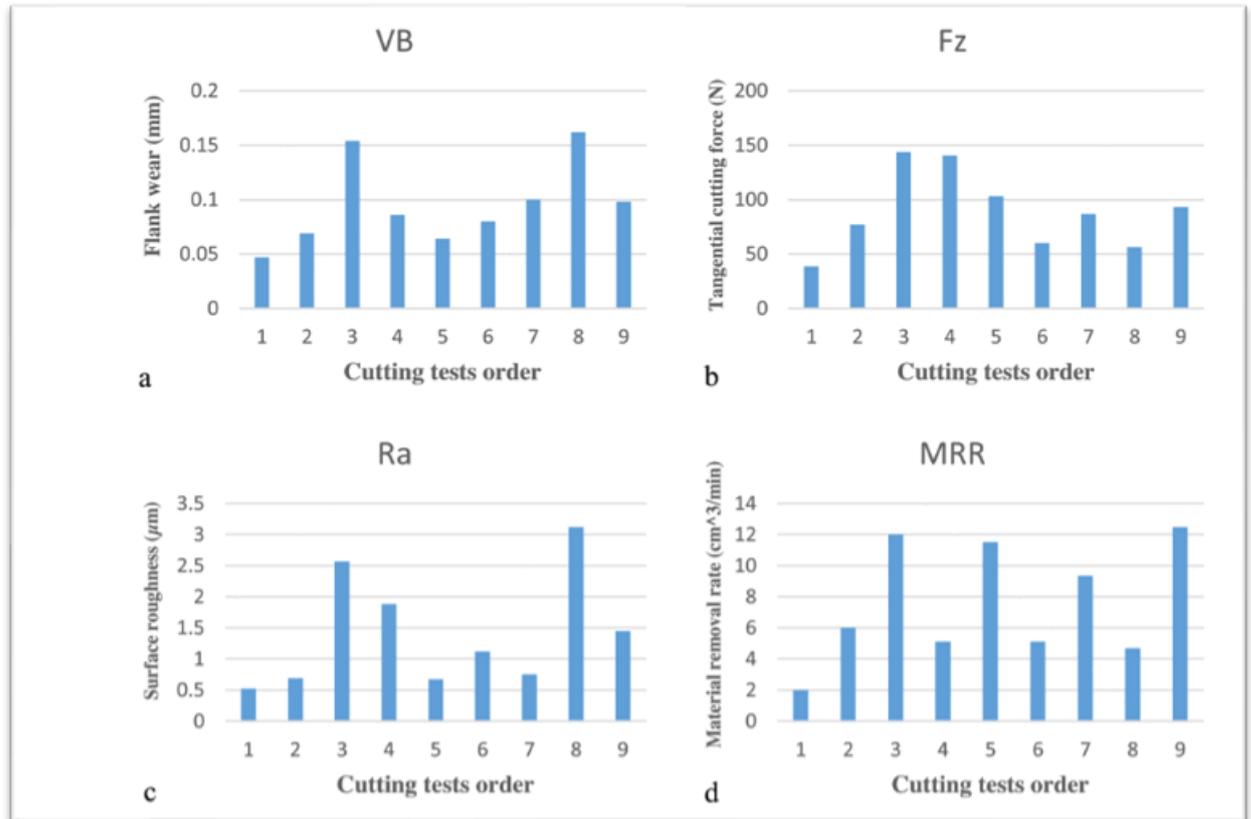


Figure II.6. Résultats expérimentaux des neuf essais de coupe [58]

En outre, l'approche TOPSIS a été exploitée et a donné des résultats qui indiquent une combinaison optimale des paramètres de coupe pour atteindre simultanément un minimum de VB, Fz et Ra et un maximum de MRR.

L'étude de **Hadjela** [59], est une étude expérimentale de l'usinage de l'acier allié AISI 4140 afin de trouver les conditions de coupe qui permettent d'obtenir les valeurs minimales de Ra, VB et de l'épaisseur de l'outil de coupe. Ra, 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 priorité et l'analyse par ordre de priorité. L'analyse des relations grises (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 coupe (a_p) ont été les paramètres de l'étude. La vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de coupe (a_p) étaient les paramètres d'entrée, avec quatre niveaux pour chaque paramètre de coupe. L'avance et la vitesse de coupe ont eu l'effet le plus important sur Ra et V_c .

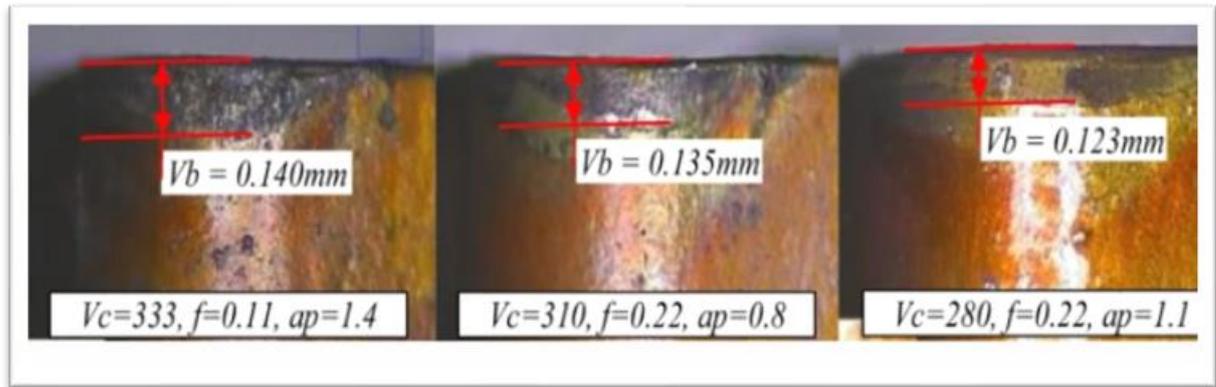


Figure II.7. Micrographie de l'usure des flancs (temps = 2 min) [59].

La figure II.7 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'augmentations de la vitesse de coupe. L'avance et la vitesse de coupe ont eu l'effet le plus important sur R_a et V_B , selon une analyse ANOVA. La profondeur de coupe 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 coupe devaient être respectivement de 250 m/min, 0,11 mm/tour et 1,4 mm, selon les résultats de l'optimisation.

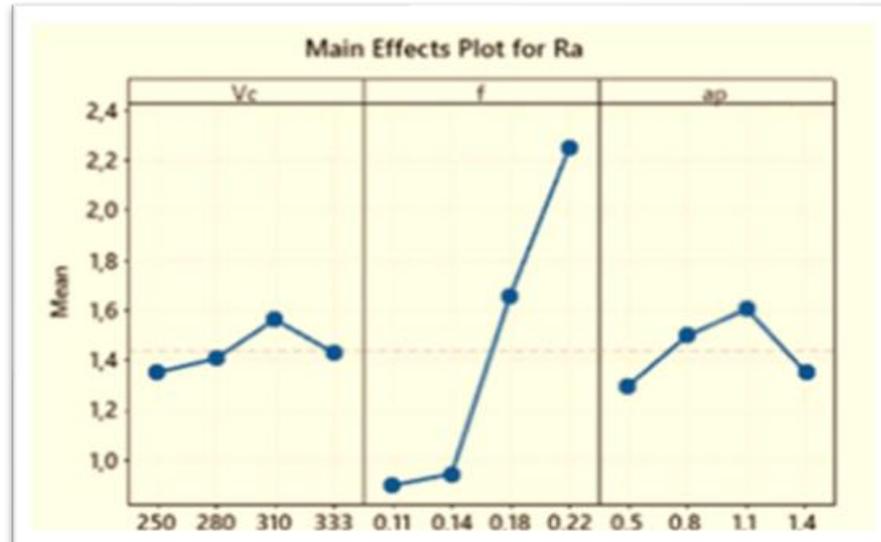


Figure II.8. a. Graphique des effets principaux pour R_a [59]

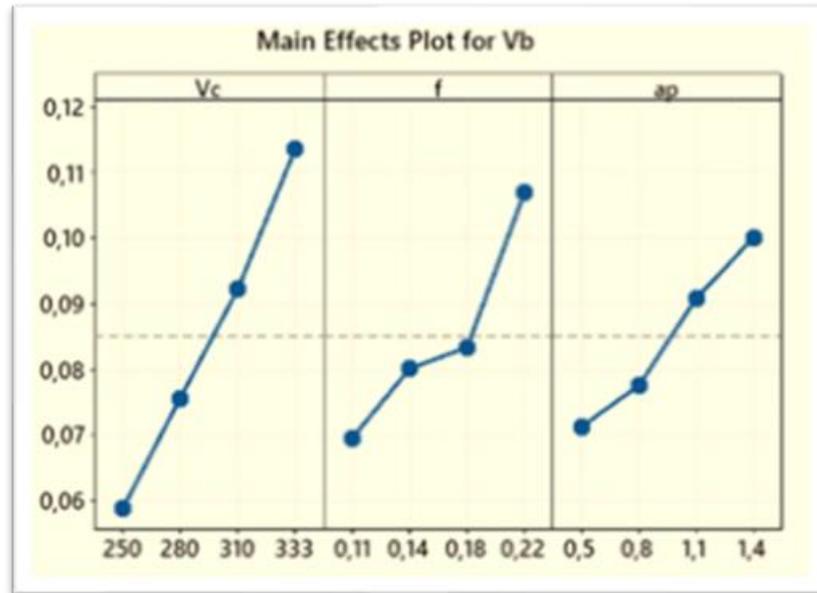


Figure II.8.b. Graphique des effets principaux pour VB [59]

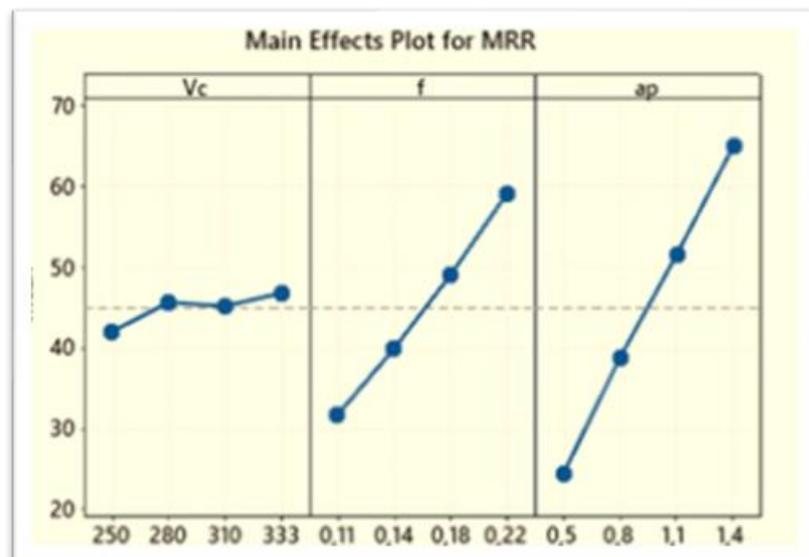


Figure II.8.c. Graphique des effets principaux pour MRR [59]

Les trois méthodes d'optimisation multi-objectifs, GRA, TOPSIS et MOORA, ont abouti à la même combinaison $Vc_1 f_1 ap_4$ correspondant au régime de coupe optimal ($Vc = 250$ m/min, $f = 0,11$ mm/rev, $ap = 1,4$ 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

$Ra = 0,763 \mu\text{m}$, $VB = 0,054$ mm et $MRR = 38,5 \text{ cm}^3/\text{min}$.

L'objectif du travail de recherche de **Tebassi** [60] est d'inspecter l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface (Ra), la composante de l'effort de coupe (Fy) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) en développant une formule de modélisation simple.

Pour atteindre cet objectif, V_c , f , et a_p sont choisis comme paramètres d'entrée. Le matériau de la pièce à usiner est l'Incone 1 718.

Comme montré dans la Figure.II.9.a les graphiques des effets des S/N_{ratio} de R_a montrent que l'avance est très significative. La Figure II.9.b du S/N_{ratios} de F_y indique que a_p a un grand effet par rapport aux autres paramètres de coupe.

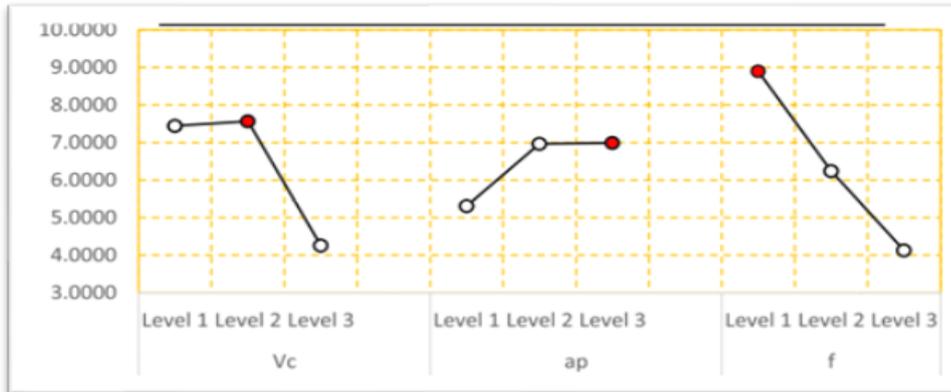


Figure II.9.a. Graphique de l'effet principal pour S/N_{ratio} à $R_a(a)$ [60]

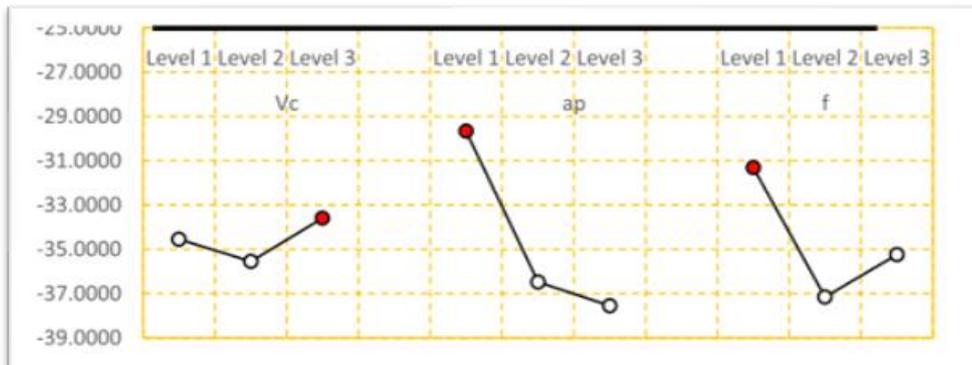


Figure II.9.b. Graphique de l'effet principal pour S/N_{ratio} à $F_y(b)$ [60]

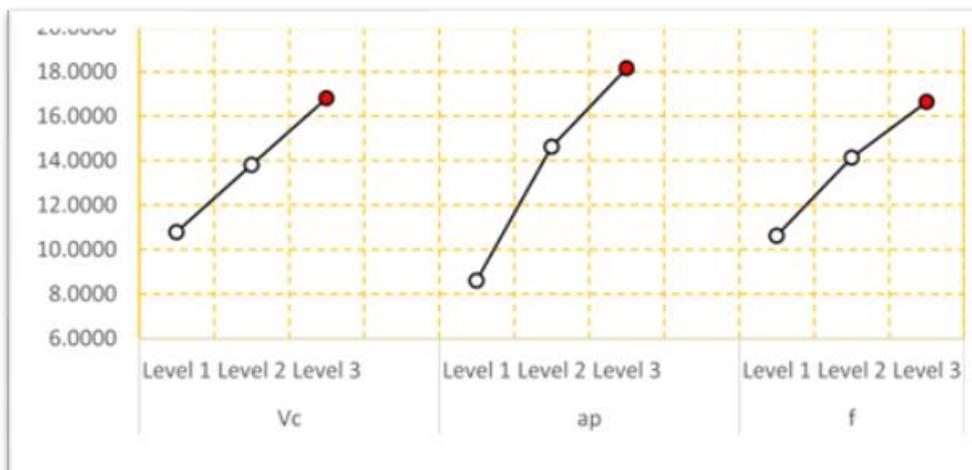


Figure II.9.c. Graphique de l'effet principal pour S/N_{ratio} à $MRR (c)$ [60]

Figure II.10. Montre l'évolution des catégories d'usure de l'outil en fonction de la vitesse de coupe. La profondeur de coupe et l'avance sont de 0,45 mm et 0,08 mm/tour. Dans cette figure, VB_{moy} , VB_{max} , VBN et VBC désignent respectivement l'usure moyenne en dépouille, l'usure maximale en dépouille, l'entaille et l'usure du cratère de l'outil. En outre, on observe que l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une augmentation de l'usure de l'outil. En effet, pour une vitesse de coupe de 108 m/min, VB_{moy} , VB_{max} , VBN et VBC sont respectivement de 0,118 mm, 0,142 mm, 0,13 mm et 0,181 mm comme le montre la figure 11a, a₁. Pour une vitesse de coupe de 168 m/min, leurs valeurs augmentent respectivement de 11, 8, 0,7 et 4 %, comme le montre la figure 1b, b₁. Ensuite, dans l'intervalle de vitesse de coupe de 168-220 m/min, l'évolution du critère d'usure de l'outil reste uniforme. À partir de la vitesse de coupe de 220-300 m/min, une augmentation du VBN d'environ 52 % est enregistrée, comme le montrent les figures 11d, d₁ et 11b.

Dans la Fig. 11d, d₁. Par conséquent, il est clairement démontré que la vitesse de coupe de 168 m/min impliquée dans le processus d'optimisation de désirabilité convient mieux à l'usinage de l'Inconel 718 que la vitesse de 220 m/min impliquée dans le processus d'optimisation de Grey-Taguchi. En ce qui concerne les résultats de l'usure de l'outil, on peut conclure que la vitesse de coupe de 168 m/min est meilleure que celle de 220 m/min en termes de critère d'usure de l'outil, qui représente un moyen principal d'évaluation de l'usinabilité.

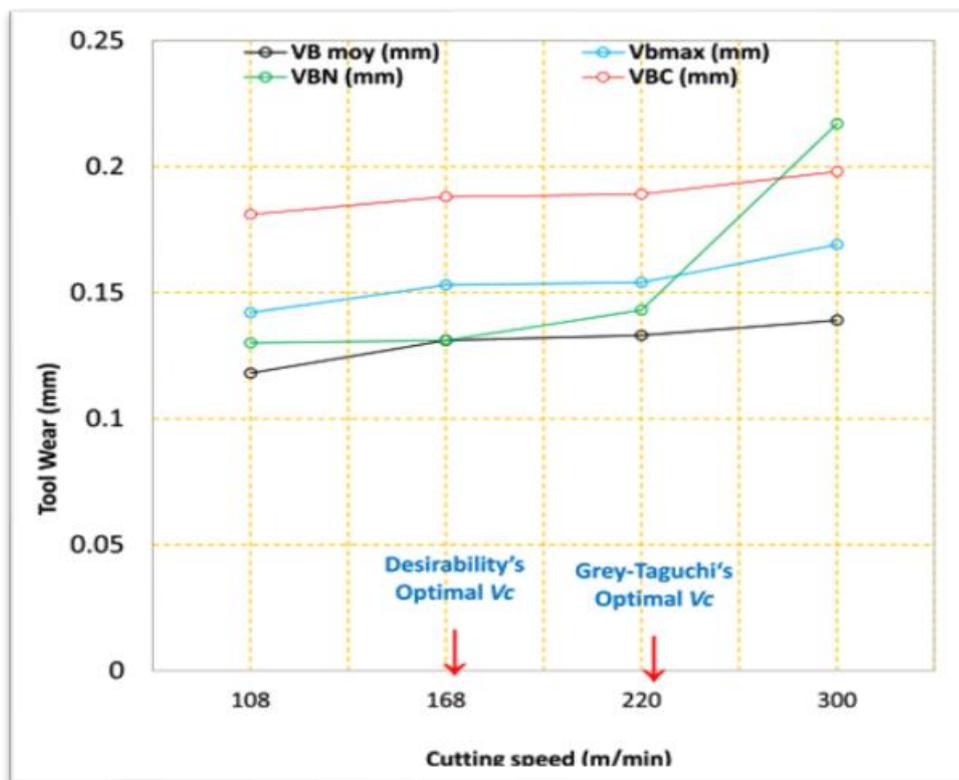


Figure II.11. Evolution de l'usure de l'outil en fonction de la vitesse de coupe [60]

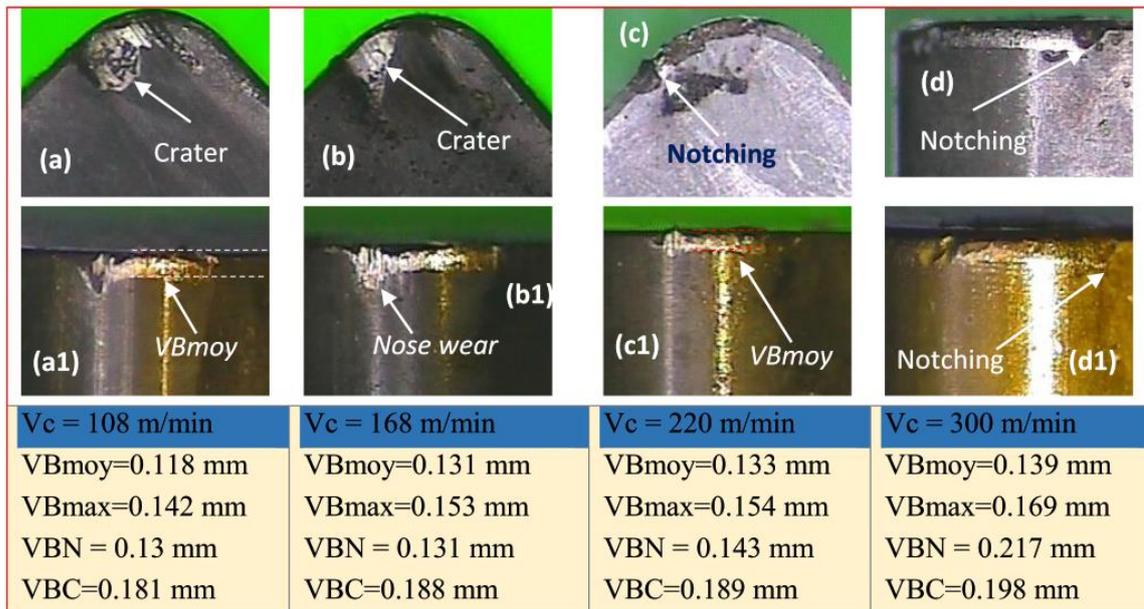


Figure II.12. Usure de l'outil en fonction de la vitesse de coupe, a,a1 108 m/min, b,b1 168 m/min, c,c1 220 m/min et d, d1 300 m/min[60]

II.3. Conclusion

L'optimisation du procédé de tournage nous permet d'aboutir à un régime de coupe optimal pour gagner en productivité, en cout et en qualité des pièces usinées. Pour cela, il faut maitriser plusieurs méthodes et approches d'optimisation pour les exploiter dans la recherche du régime optimale de notre couple outil/pièces à usiner.

III.1. Introduction

Dans ce chapitre est présenté le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, un banc d'essais comportant un tour, une plateforme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et un microscope et VISUAL 250 pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe.

Les essais d'usinage de l'acier Z40CDV5, nécessaires à la réalisation de notre projet, ont été effectués au laboratoire de coupe des métaux du département de génie mécanique à *l'université 08 Mai 1945 de Guelma*.

III.2. Matériels utilisés

III.2.1. Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer les essais est un tour parallèle de la société tchèque « **TOS TRENCIN** », modèle SN 40C, de puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure III-1). La fréquence de rotation disponibles sur le tour sont: (45 ; 63 ; 90 ; 125 ; 180 ; 250 ; 355 ; 500 ; 710 ; 1000 ; 1400 ; 2000) tr/min. Les avances disponibles sont :(0.08 ; 0.10; 0.11; 0.12; 0.14; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.24...0.8) mm/tr.



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

III.2.2. Le Matériau utilisé pour les essais d'usinage

C'est un acier au carbone allié de nuance est Z40CDV5. Cet acier qui offre une bonne résistance à l'abrasion à basse et à haute température, une bonne ténacité et une grande ductilité, ainsi qu'une résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique, et une excellente trempabilité a cœur, et stabilité dimensionnelle en cours de trempe.

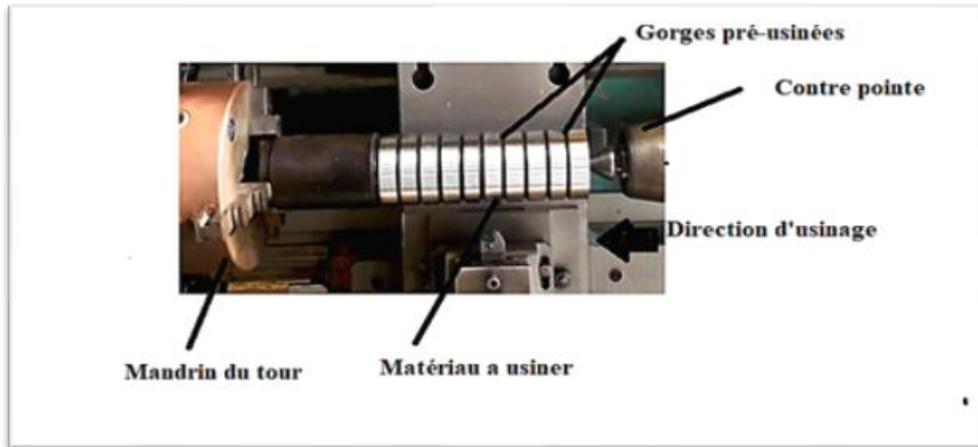


Figure III.2. Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais de rugosité, des efforts de coupe.

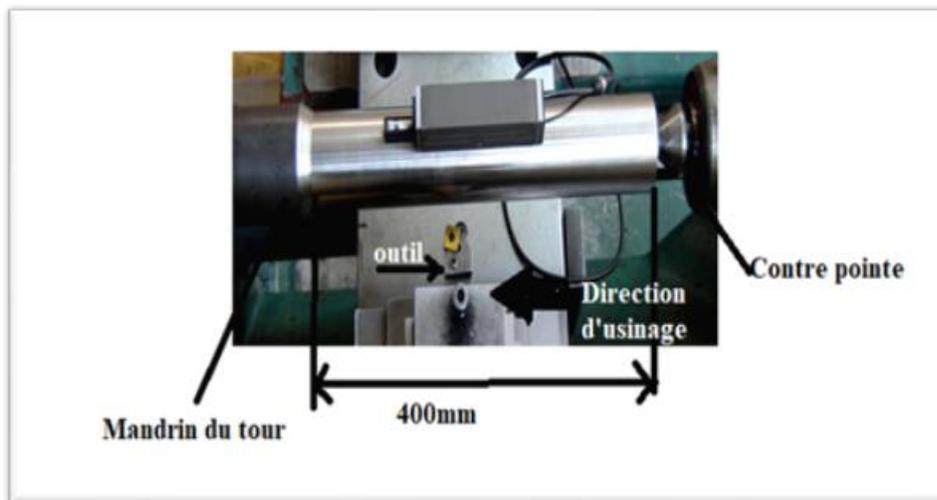


Figure III.3. Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage des essais d'usure.

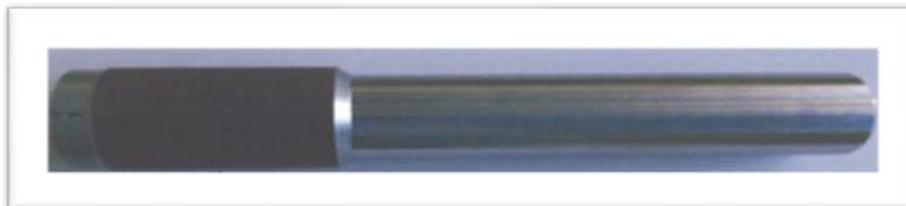


Figure III.4.a. Eprouvette utilisée pour les essais de longue durée



Figure III.4.b. Epreuve utilisée pour les essais de courte durée

On a utilisé des éprouvettes de diamètre 77mm et de longueur $L=400\text{mm}$ (figure III-4-a) pour les essais de longue durée (évolution de l'usure de l'outil et la rugosité en fonction du temps), et utilisée des éprouvettes qui ont les mêmes dimensions avec des paliers de 20mm de longueur (figure III-4-b) pour les essais de courte durée (efforts de coupe et rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe : $(V_c, f \text{ et } a_p)$).

➤ **Compositions chimiques**

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier Z40CDV5

Carbon (C)	Silicium (Si)	Manganèse (Mn)	Chrome (Cr)	Molybdène (Mo)	Vanadium
0.39	1.0	0.4	5.3	1.3	0.9

Les plaquettes sont amovibles de forme carrée (figure III-5), à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le (Tableau III.2)

Tableau III.2. Informations relatives aux plaquettes utilisées

Matériaux de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
Carbure revêtu	GC 1025	PVD	TiAlN	SNMG 12 04 08-PF
Carbure revêtu	GC 3215	CVD	Ti(C,N)/Al₂O₃/TiN	SNMG 12 04 08-KR
Carbure non revêtu	H10F			SNMG 12 04 08-23
Cermet revêtu	GC 1525	PVD	TiCN/TiN	SNMG 12 04 08-MI
Céramique	CC 650			SNGN 120408



Figure III.5. Plaquettes de coupe utilisées

a) Céramique CC650

Céramique mixte Al_2O_3 . Recommandée pour la finition avec des vitesses élevées des fontes grises et des fontes trempées en conditions stables.

b) Carbure NR H10F

Nuance carbure non revêtue a grain fin. Recommandée pour les superalliages réfractaires ou les alliages de titane avec de très faibles vitesses de coupe. Grande résistance aux chocs thermiques et à l'usure en entaille. Convient pour la coupe intermittente et les passes longues.

c) Carbure 3205

Nuance carbure à revêtement CVD épais et lisse, résistant à l'usure avec un substrat très dur. Elle est recommandée pour le tournage à grande vitesse des fontes grises.

d) Carbure 1025

Nuance carbure micro grain a revêtement PVD, recommandée pour l'obtention de tolérances serrées, d'un excellent état de surface ou d'une coupe vive en finition des aciers inoxydables. Grande résistance aux chocs thermiques, convient pour la coupe intermittente.

e) Cermet 1525

Nuance cermet a revêtement PVD. Excellente résistance à l'usure et bonne ténacité d'arête. Résistance au collage. Excellente pour la finition des aciers inoxydables en conditions favorables. Vitesses de coupe élevées et avances relativement faibles. $f_n \times a_p < 0,35mm^2$

Les plaquettes utilisées dans notre étude, sont fixées mécaniquement sur un porte-outil sur lesquels sont fixées les plaquettes mécaniquement par bride (PSBNR2525K12) et par trou central CSBNR2525 M12(figure III.6). Les portes outils ont la géométrie suivante $r^0=75$; $a^0=6$; $=-6$. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un élément de serrage dans le porte-outil.

Une cale-support vissée et rectifiée protège la plaquette et garantit un contact parfait de cette dernière avec la porte plaquette.



Figure III.6. Porte-plaquette

III.2.3. Appareillages de mesures utilisés

III.2.3.1 Mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure est du type VISUAL 250 est la réponse à une demande croissante de l'industrie pour des systèmes capables de mesurer des formes ou des matières hors d'atteinte des moyens tactiles. La nouvelle VISUAL 250 manuelle, compacte mais sans compromis quant à ses performances métrologiques, est à même de satisfaire la demande du marché dans le domaine de la mesure 2D. Sa conception mécanique est d'une grande robustesse, ce qui permet une utilisation de la machine aussi bien en atelier que dans le laboratoire de mesure.

Equipée de VISUAL 250 se révèle un moyen multitâche et multiutilisateur parfait pour la mesure sans contact. (Figure III-7).

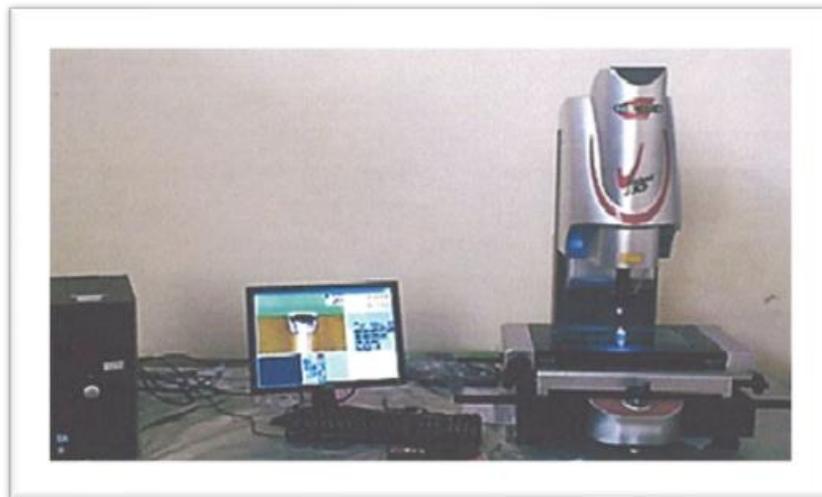


Figure III.7. VISUAL 250 pour la mesure de l'usure

III.2.3.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z), nous avons utilisé un rugosimètre(2D) surf test 201 (Mitutoyo)(figureIII.8).



Figure III.8. Mesure de la rugosité de la rugosimètre Surface 201 sans démontage de la pièce

Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant(palpeur), avec un rayon de pointe de 5 se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les cureurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.

III.2.3.3. Mesure des l'effort

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257 B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel (DYNOWARE) et enfin une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est animé du mouvement d'avance. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (figureIII.9).

La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (figureIII.10).

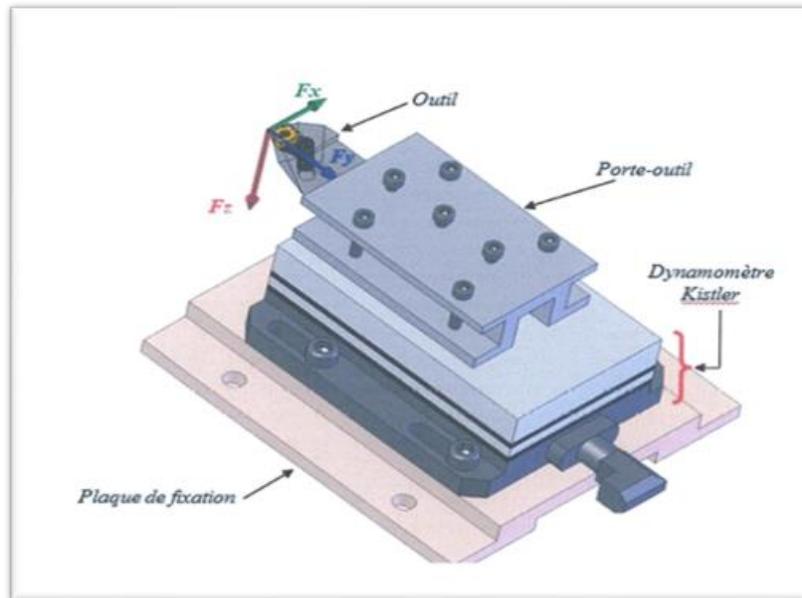


Figure III.9. Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

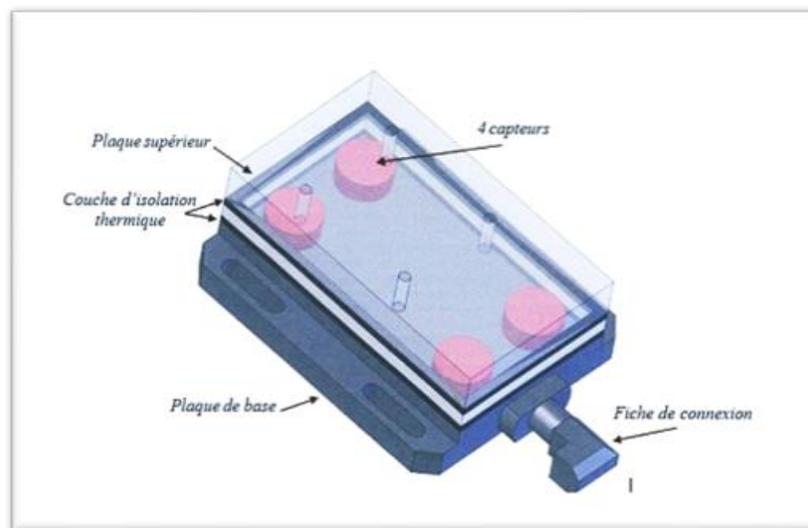


Figure III.10. Capteur d'effort de coupe KISTLER

Les efforts qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties par les capteurs piézo-électriques qui sont alors amplifiés par l'amplificateur des signaux.

Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE)

Analyse et traite ces signaux et les efforts produites lors du processus du tournage est alors directement exprimé en trois composantes. La (figure III.11) présente un exemple d'acquisition du

logiciel qui montre les profils des trois composantes des efforts de coupe (Force axiale : F_x , force radial : F_y et force tangentielle : F_z).

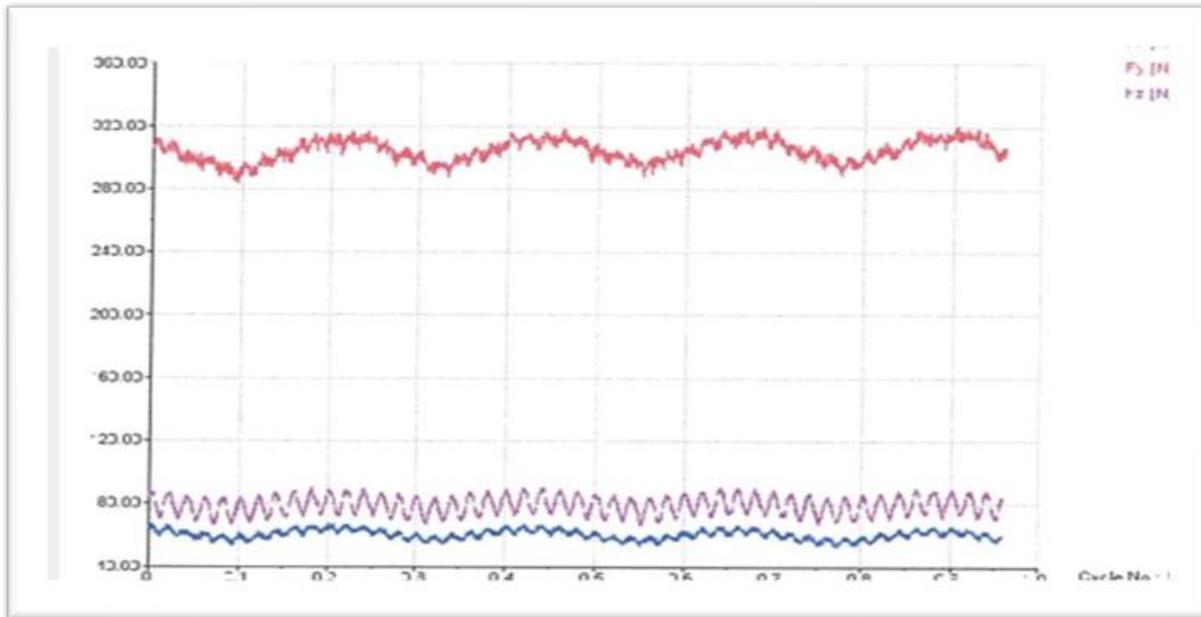


Figure III.11. Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »

En résumé la chaîne de mesure est composée de :

a) Dynamomètre à 3 composantes (9257 B) : le porte outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 (Figure III.12) donne les caractéristiques sont :

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée.
- Large gamme de mesure
- Bonne linéarité, sans hystérésis
- Faible interaction (<1%)
- Utilisation simple (prête à l'emploi)
- Construction compacte
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67

b) Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre)

c) Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;

d) Ordinateur personnel (PC)

e) traceur.

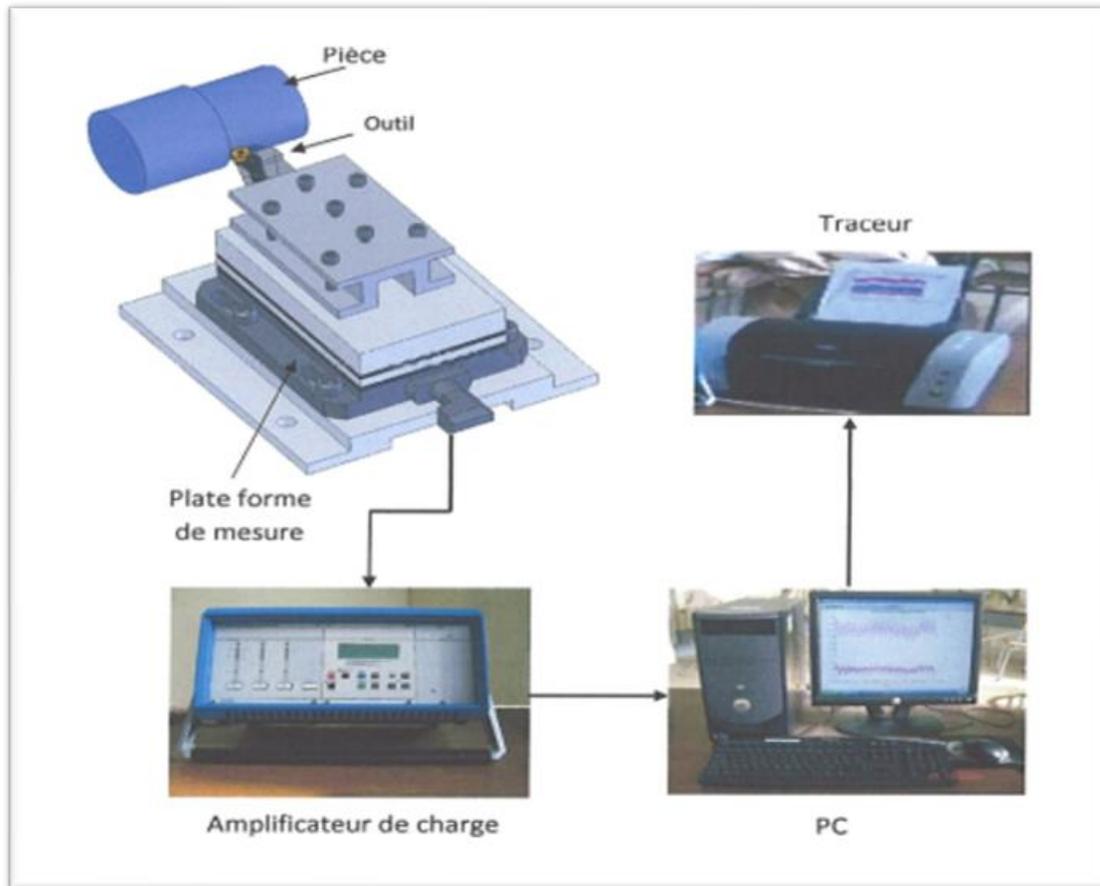


Figure III.12. Chaîne de mesure des efforts de coupe

III.2.3.4. Autres équipements

- Un chronomètre pour enregistrer le temps d'usinage
- Un pied à coulisse pour mesurer les dimensions de la pièce
- Un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés et les photos de l'usure.

III.3. Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (VC , f , a_p), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...ext). Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les (tableau III-3) Tous les essais ont été réalisés sans lubrification

Tableau III.3. Condition de coupe pour les essais de l'usure, la rugosité et l'effort en fonction des paramètres de coupe (essais Taguchi réduit).

Paramètres D'entrée	Les valeur	Paramètres de sortie
Vc(m/min)	170 ; 340	
f(mm/tr)	0.08	- Critères de rugosité - Effort de coupe - Usure admissible (VB)
Tu(s)	204 ; 108	
ap(mm)	0.2	

III.4. Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f , a_p), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ , ϵ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, usure admissible (VB), la rugosité, représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

III.4.1. Méthode de planification des expériences

III.4.1.1. Introduction

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe. Parmi ces derniers on peut citer : les paramètres du régime de coupe (V_c , f , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (r , α , γ , λ , χ , ϵ , etc...), ainsi que les conditions de coupe (rigidité de la machine, lubrification). On peut dire que tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, les efforts de coupe, la rugosité et usure admissible (VB) etc... représentent eux les paramètres de sortie. Dans le cas de notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivants :

- ✓ Les efforts de coupe en fonction des paramètres (V_c , f , a_p)
- ✓ La rugosité en fonction des paramètres (V_c , f , a_p)
- ✓ La pression de coupe en fonction des paramètres (V_c , f , a_p)

Considérant X_1 , X_2 , X_3 ..., X_n comme paramètres d'entrée et Y_1 , Y_2 , Y_3 ... Y_n comme paramètres de sortie.

L'influence d'un ou de plusieurs (X_1 , X_2 , X_3 , X_n) sur un paramètre Y [61], peut être obtenue en utilisant la méthode suivante ;

-Méthode multifactorielle.

➤ Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le Paramètre Y_j . C'est une relation qui a la forme :

$$Y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_i, x_n)$$

Pour notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (f, ap, Vc) sur la rugosité, l'effort, pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

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

Où : **N** : nombre d'essais ;

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

k : nombre de facteurs de base.

Dans notre cas nous avons trois facteurs de base ($K=3$) et chaque facteur à quatre niveaux de variation. I

Dans la coupe des métaux, les lois liant la sortie Y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée (X_1, X_2, \dots, X_n) sont en général de la forme :

$$Y = C X_1^{K_1} \cdot X_2^{K_2} \dots \dots X_n^{K_n} \dots \dots \dots (III.2)$$

Où C : est une constante tenant compte de l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation (III.2)

$K_1, K_2, K_3 \dots K_n$: sont des exposants qui reflètent respectivement les degrés d'influence de (X_1, X_2, \dots, X_n) sur Y [62].

III.5. Conclusion

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

IV.1. Introduction

En se basant sur l'étude bibliographique dans le premier chapitre traitant la question de l'usure des outils de coupe, on constate que les principaux paramètres technologiques, tels que la précision d'usinage, la qualité de l'état de surface, le prix du revient, la productivité de travail, etc. Sont en relation directe avec l'usure. Par conséquent, l'étude approfondie et continue de l'usure, (performances, est une tâche d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous présentons en premier temps une comparaison entre les performances en termes d'usure des différents types de matériaux de coupe tels que (GC1025, H10F, GC3205, GC1525 et CC650) en usinant l'acier Z40CDV5 à une basse vitesse de coupe $V_c=170\text{m/min}$. En deuxième temps, nous exposons une comparaison entre les performances en termes d'usure des cinq matériaux testés à une vitesse élevée $V_c=340\text{m/min}$, ainsi que les résultats de l'évolution des efforts de coupe et de la rugosité de surface en fonction du temps et de l'usure.

IV.2. Performances des matériaux de coupe à $V_c=170\text{m/min}$

a) Usure des plaquettes

Les (figures IV-1) mettent en évidence l'état d'usure des différentes nuances testés, à savoir les nuances de carbure métallique GC1025, H10F, GC3205, CG1525 et la céramique noire CC650, par la mesure des critères d'usure (V_c , VB , VB_{\max} , VN), ceci lors de l'usinage avec $f=0.08\text{mm/tr}$; L'analyse de cette figure montre que la nuance GC1025 présente une bonne résistance à l'usure par rapport aux autres nuances testées. D'après cette comparaison, on peut dire que la GC1025 est le matériau le plus adapté pour l'usinage de l'acier Z40CDV5 en termes d'usure à $V_c=170\text{m/min}$. la comparaison des ratios de l'usure VB des cinq matériaux de coupe, nous montre que le ratio (VB_{CC650}/VB_{GC1025}) est de 1.18, le ratio (VB_{GC3205}/VB_{GC1025}) augmente pour donner la valeur de 2.79, le ratio (VB_{H10F}/VB_{GC1025}) prend la valeur 4.19, en dernier lieu le ratio (VB_{CC650}/VB_{GC1025}) augmente jusqu'à une valeur maximale de 4.73.

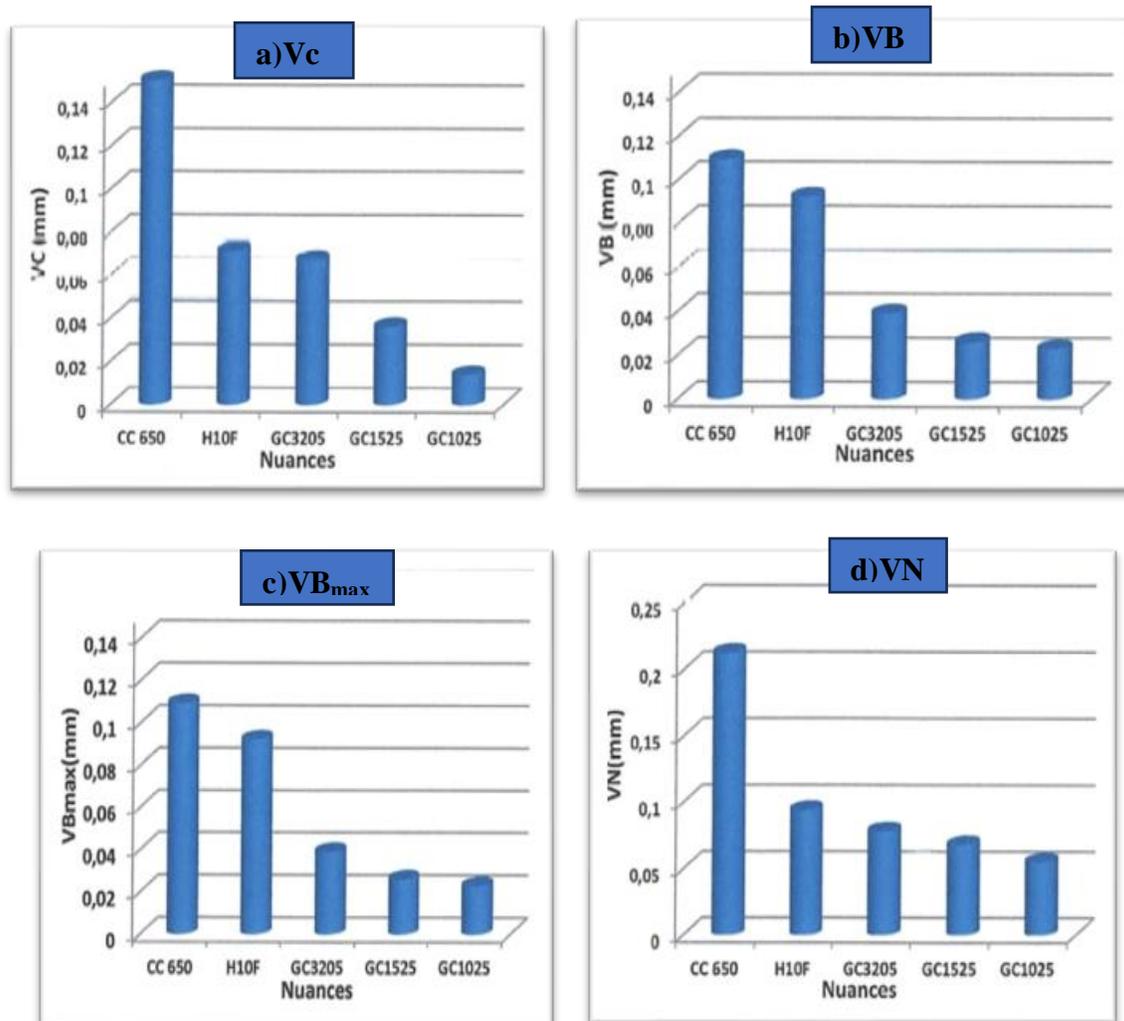


Figure.IV.1. Comparaison entre l'usure des différents matériaux a $V_c=170\text{m/min}$, $T_u=204\text{sec}$

b) Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage

les (figures IV-2) (a, b, c, d, e) présentent l'évolution des critères de rugosité (R_a , R_z , R_q , R_t , R_p , R_{3z}) en fonction du temps d'usinage pour les outils suivants : (a) GC1025, (b) H10F, (c) GC3205, (d) CG1525, e) CC650 ; a $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $V_c=170\text{min}$. On remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie que le temps d'usinage a un effet néfaste sur la rugosité.

Les courbes des critères de rugosité en fonction du temps d'usinage pour le carbure GC1025 (figure IV.2.a) montrent que pour un temps d'usinage variant de 9 à 204sec, les critères de rugosité (R_a , R_z , R_t , R_p , R_{3z}) augmentent respectivement de (40, 38, 38, 20, 47, 47)%.

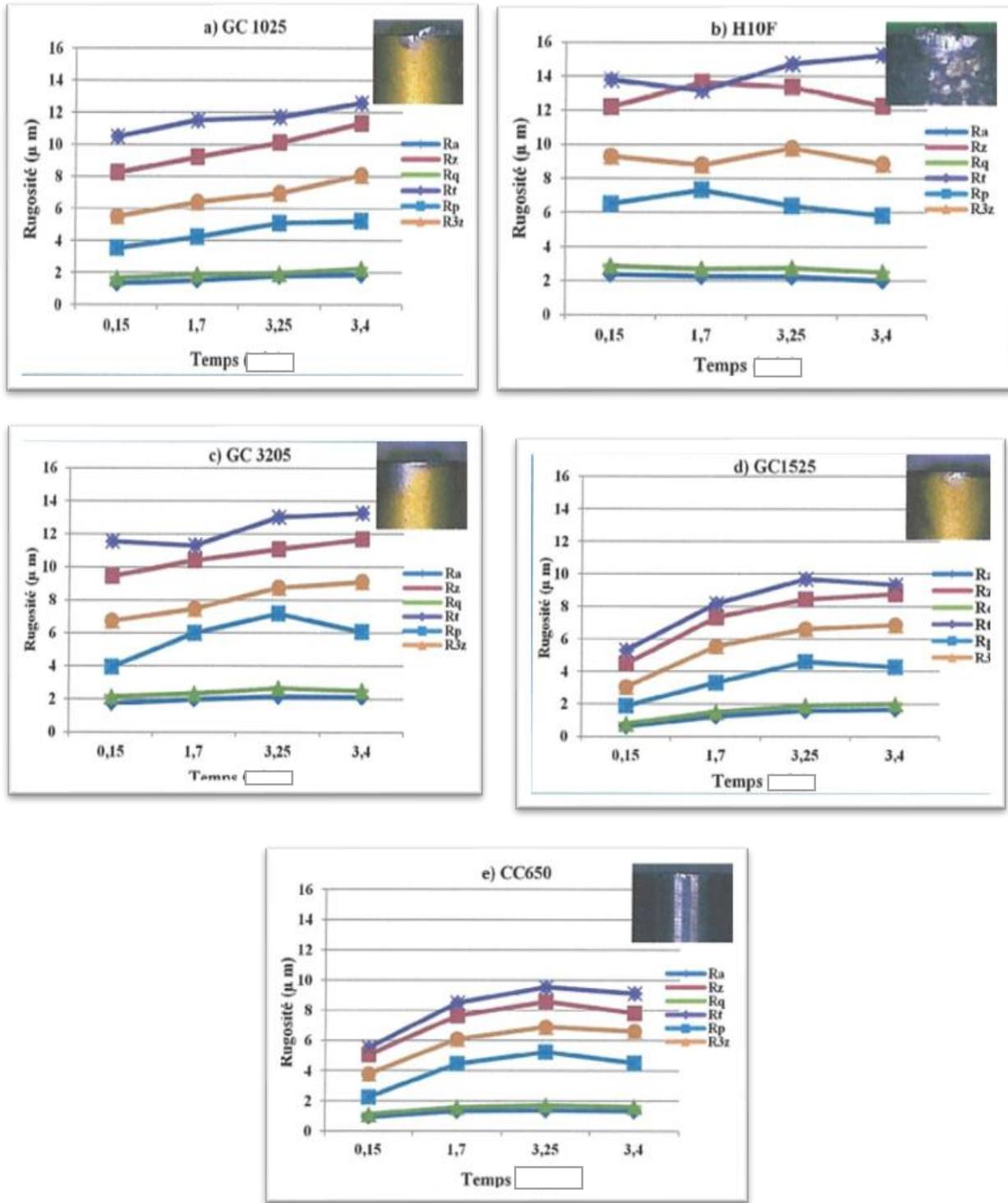


Figure.IV.2. Evolution de la rugosité en fonction de temps a $V_c=170\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$

Pour : a) GC1025, b) H10F, c) GC3205, d) GC1525, e)CC650.

Alors que pour le carbure non revêtu H10F (figure IV.2.b) l'évolution des différents critères de rugosité n'est pas stable. En effet après un temps d'usinage $T_u=9\text{sec}$, les critères de rugosité (R_a , R_z , R_q , R_t , R_p , R_{3z}) atteignent respectivement les valeurs de (2.25, 13.6, 2.71, 13.16, 7.32, 8.78) μm . A la fin de l'usinage, les critères de rugosité évoluent respectivement de (18.5, 0.40, 15.2, 9.32, 12.02, 5.20)%.

Ceci est probablement dû à l'apparition aléatoire du phénomène de l'arête rapportée. Le carbure GC3205 (IV.2.c) a l'usure $VB=0.039\text{ mm}$ et après un temps d'usinage $T_u=204\text{sec}$, les critères de rugosité (R_a , R_z , R_q , R_p , R_{3z}) atteignent respectivement les valeurs de (1.75, 9.46, 2.16, 11.55, 3.95, 6.76) μm . A la fin de l'usinage, les critères de rugosité augmentent jusqu'à les valeurs (2.11, 11.69, 2.52, 13.28, 6.09, 9.11) μm respectivement.

Les rugosités mesurées lors du chariotage par le cermet GC1525 pour les mêmes conditions de coupe sont illustrées dans la (figure IV.2.d). pour un temps d'usinage de 9sec, les critères de rugosité (R_a , R_z , R_q , R_p , R_{3z}) prennent les valeurs de (0.61, 4.46, 0.79, 5.31, 1.87, 3.04) μm respectivement la rugosité augmente de (171, 97, 154, 76, 128, 126)% à la fin d'usinage.

Alors que la céramique mixte CC650 (figure IV.2.e) les critères de rugosité (R_a , R_z , R_q , R_p , R_{3z}) augmentent de (43, 54, 44, 65, 100, 75)% respectivement à la fin d'usinage de 204sec.

La (figure IV.3) montre une comparaison entre les trois principaux critères de la rugosité (R_a , R_z , R_t) pour les cinq matériaux de coupe testés. L'analyse des résultats montre que la céramique CC650 donne les meilleures valeurs des critères de rugosité de surface, relativement aux autres nuances testées, suivie de la nuance de cermet GC1525, puis vient le carbure GC1025. Il est à noter que les critères les plus élevés ont été obtenus par la nuance de carbure non revêtu H10F, à cause de son usure importante.

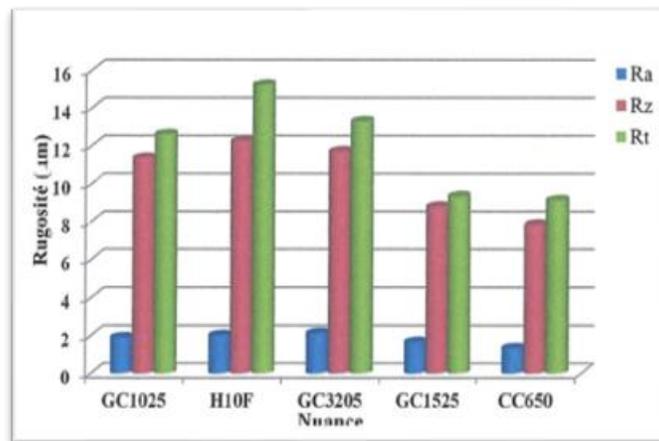


Figure.IV.3. Comparaison entre les rugosités de surface mesurées par les cinq nuances à $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=204\text{sec}$.

c) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps

la (figure IV.4) (a, b, c, d, e) illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage lors de l'usinage de l'acier Z40CDV5 avec les cinq matériaux de coupe :

a) GC1025, (b) H10F, (c) GC3205, (d) GC1525, (e) CC650 a $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et un temps d'usinage $T_u=204$ secondes.

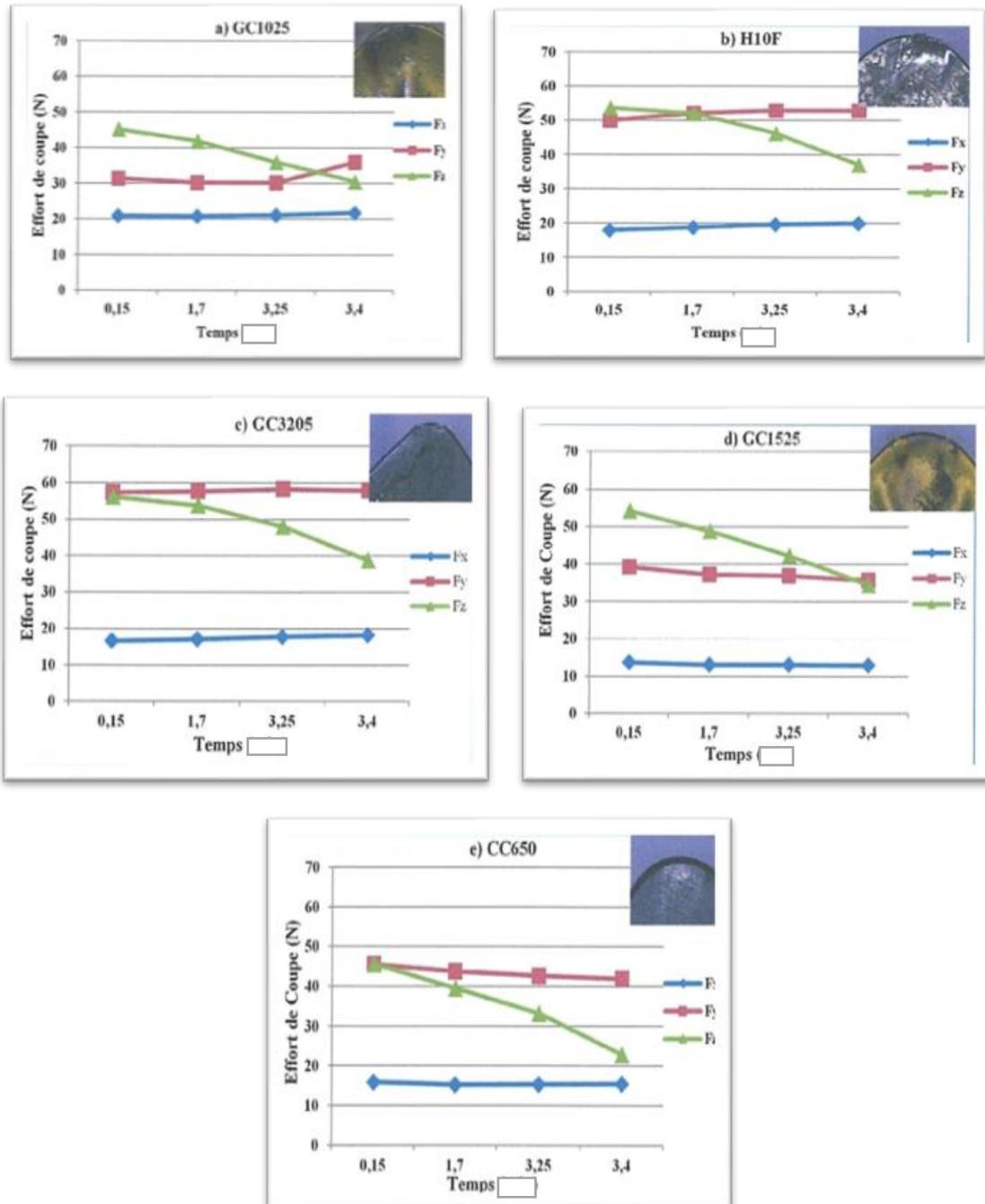


Figure.IV.4. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe a $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=204\text{sec}$.

L'analyse des essais montre que l'augmentation du temps d'usinage conduit à une augmentation de deux composantes (F_x , F_y) de l'effort. En examinant l'allure des courbes on remarque que dans l'intervalle du temps de 0.15 à 3.4min, les composantes (F_x , F_y) augmentent respectivement de (4.26 ; 14.56)% pour le GC1025, de (11.32 ; 5.63) % pour H10F, de (9.88 ; 1.08)% pour GC3205, et observe une diminution des efforts (F_x , F_y) pour les deux matériaux (GC1525, et CC650).

Sur la figure IV.5) sont représentés les résultats des trois composantes de l'effort de coupe à la fin de l'usinage. L'analyse des résultats montre clairement que l'usinage avec le GC1025 donne un effort radial faible par rapport aux autres matériaux. Suivi de la nuance la céramique noire CC650. Puis vient le carbure H10F. Il est à noter que les critères les plus élevés ont été obtenus par la nuance de carbure GC3205, à cause de son usure importante.

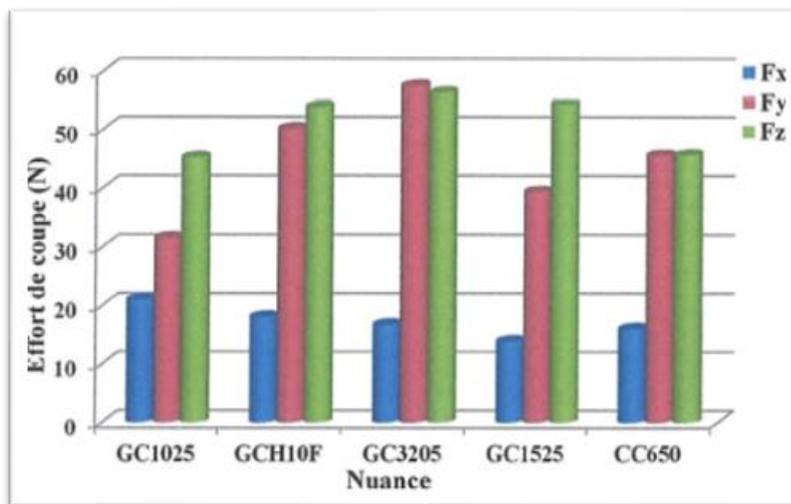


Figure.IV.5. Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés pour les cinq nuances à $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=204\text{sec}$.

d) Evolution de la Pression spécifique de coupe en fonction du temps

le but de cette partie est de déterminer l'évolution des pressions spécifiques de coupe en utilisant l'équation suivante :

$$K_c = F_z / (f \cdot a_p)$$

K_c : Pression de coupe [N/mm^2]

F_z : Effort tangentiel [N]

a_p : Profondeur de passe [mm]

La figure IV.6) montre une comparaison entre les pressions spécifiques au début d'usinage pour les cinq nuances de coupe K_c (N/mm^2) à ($V_c=150\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$)

sont de l'ordre de 2820.625 N/mm^2 pour le GC1025, 3356.875 N/mm^2 pour H10F, 3517.5 N/mm^2 pour GC3205, 3392.5 N/mm^2 pour GC1525 et 2842.5 N/mm^2 pour CC650.

D'après cette comparaison on observe que le matériau GC1025 résiste mieux aux pressions spécifiques par rapport aux autres matériaux testés.

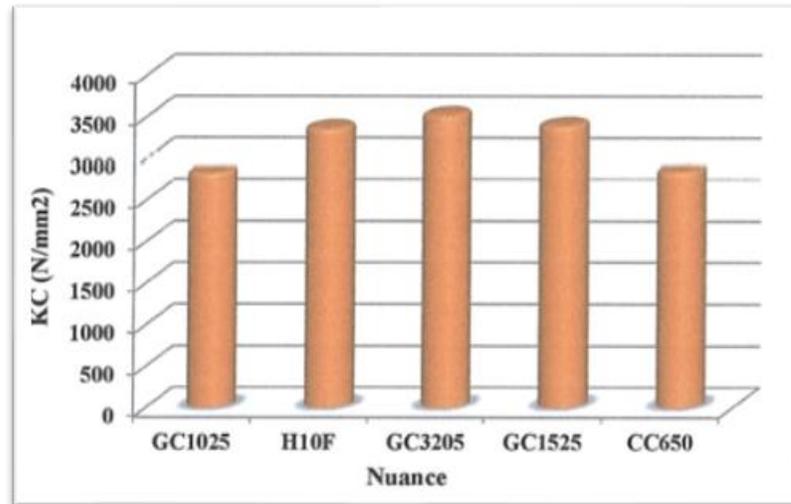


Figure.IV.6. Evolution des pressions spécifiques de coupe pour les cinq nuances de coupe a $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{sec}$

IV.3. Performances des matériaux de coupe $V_c=340\text{m/min}$

a) Usure des plaquettes d'outil

les (figure IV.7) mettent en évidence l'état d'usure des différentes nuances testés, a savoir les nuances de carbure métallique GC1025, H10F, GC3205, CG1525 et la céramique noire CC650, par la mesure des critères d'usure(V_C , V_B , V_{Bmax} , V_N), ceci lors de l'usinage avec

$f= 0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ et $V_c=340\text{m/min}$ et durant un temps d'usinage $T_u=108 \text{ S}$.

L'analyse de cette figure montre que la nuance GC1525 présente une bonne résistance a l'usure(V_C , V_B) par rapport autres nuances testées, par contre le céramique CC650 donne une bonne résistance pour l'usure V_{Bmax} et le carbure GC1025 pour l'usure V_N .

D'après cette comparaison, on peut dire que les nuances de coupe GC1525, CC650, sont les plus adaptées pour l'usinage de l'acier Z40CDV5 en termes d'usure a $V_c=340\text{m/min}$.

La comparaison des ratios de l'usure V_B des cinq matériaux de coupe, nous montre que le ratio $(V_{B_{GC1025}}/V_{B_{GC1525}})$ est de 0.011, le ratio $(V_{B_{CC650}}/V_{B_{GC1525}})$ augmente pour donner la valeur de 0.013, le ratio $(V_{B_{3205}}/V_{B_{GC1525}})$ prend la valeur de 0.052, en dernier lieu le ratio $(V_{B_{H10F}}/V_{B_{GC1525}})$ augment jusqu'à une valeur de 1.93.

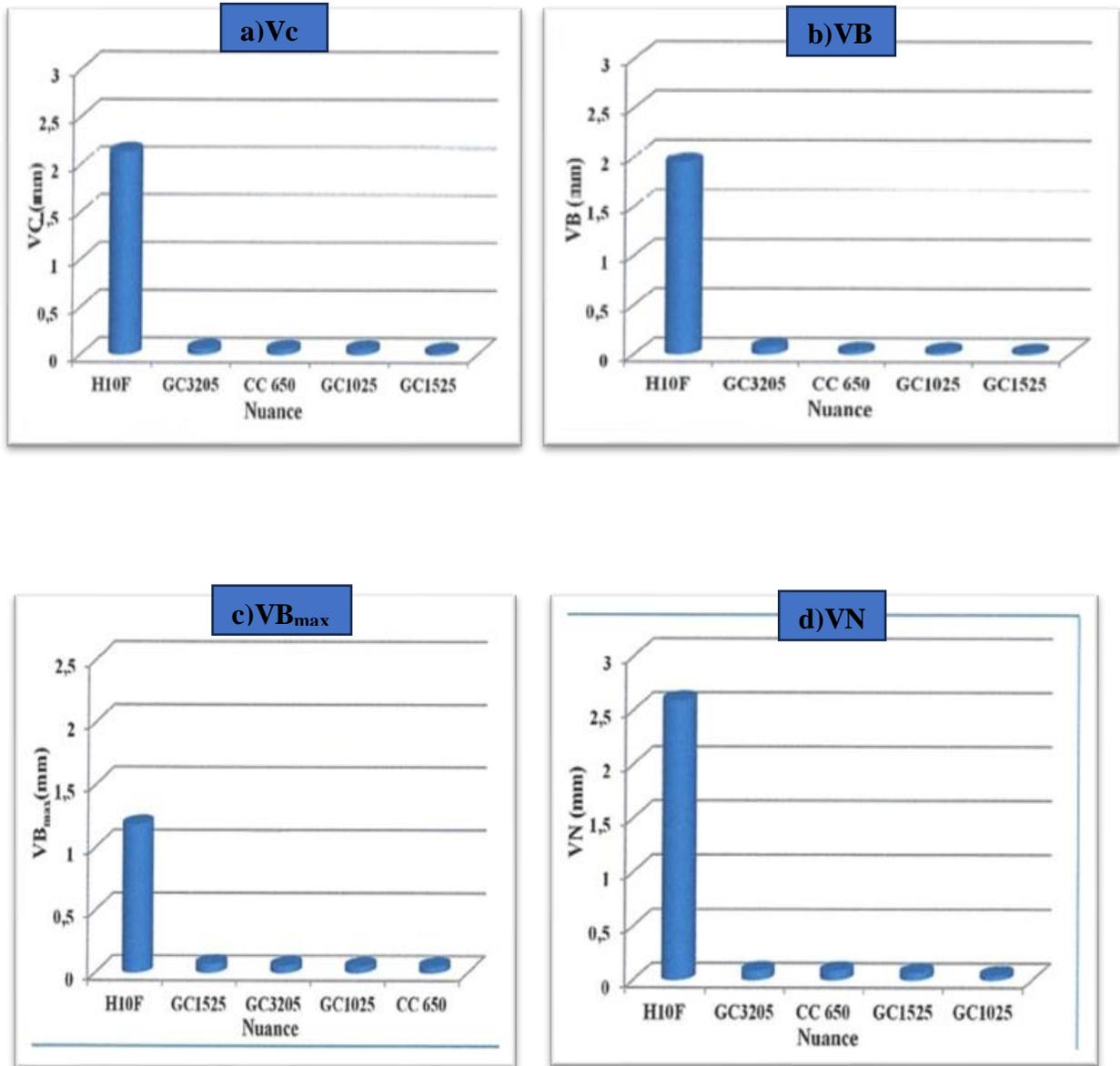


Figure.IV.7. Comparaison entre l'usure des différents matériaux a $V_c=340\text{m/min}$, $T_u=108\text{sec}$.

b) La rugosité de surface

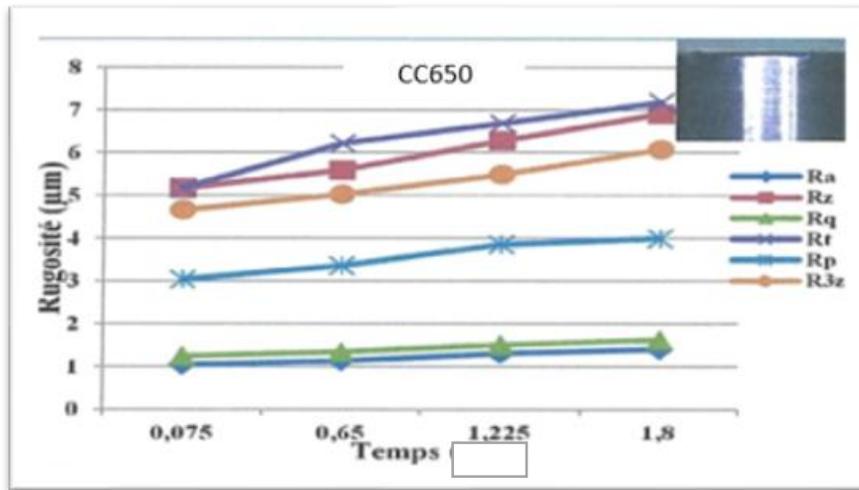


Figure.IV.8. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps pour la nuance de coupe CC650 ; a $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{sec}$.

L'analyse des résultats montre que l'augmentation du temps d'usinage conduit généralement à une augmentation des critères de rugosité pour toutes les nuances de coupe testées.

Les courbes des critères de rugosité en fonction du temps d'usinage pour le carbure GC1025 montrent que pour un temps d'usinage variant de 4.5 à 108, les sec, critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) augmentent respectivement de (35.63 ; 39.59 ; 36.36 ; 42.06, 24.4, 43.09)%.

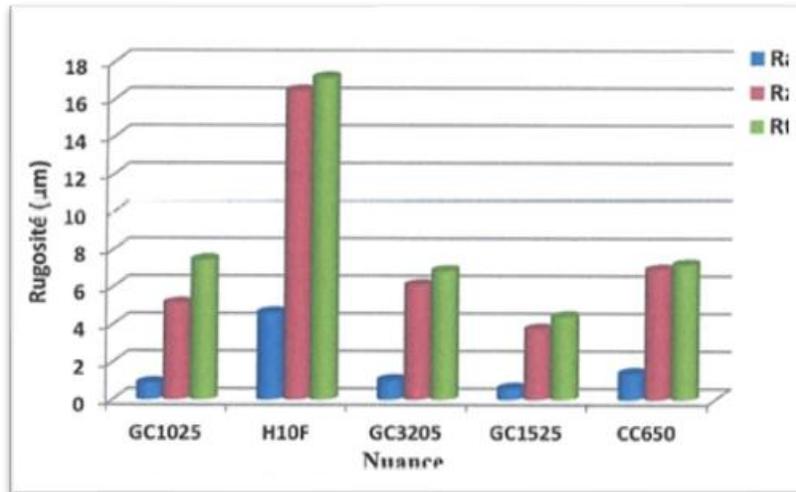
Alors que pour le carbure non revêtu H10F après un temps d'usinage $T_u=4.5\text{sec}$, les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) atteignent respectivement les valeurs de(0.89 ; 5.52 ; 1.07 ; 6.69 ; 3.16 ; 3.47) μm . A la fin de l'usinage, les critères de rugosité ont augmenté respectivement de(80.73 ; 66.46 ; 79.46 ; 60.96 ; 56.71 ; 75.93)%.

Alors que pour le carbure GC3205 après un temps d'usinage $T_u=4.5\text{sec}$, les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) atteignent respectivement les valeurs de(0.87 ; 5.7 ; 1.15 ; 6.19 ; 3.81 ; 5.14) μm . A la fin de l'usinage, les critères de rugosité augmentent respectivement de (14.70 ; 6.40 ; 9.50 ; 5.92 ; 4.99) %.

Lors de l'usinage avec la nuance de carbure GC1525 et pour un temps d'usinage de 1.8 min, les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) augmentent respectivement de (27.11 ; 22.78 ; 27.02 ; 25.62 ; 15.87 ; 30.83 ; 45.29) %.

Alors que pour la céramique mixte CC650 (figure IV.8) les critères de rugosité (Ra ; Rz ; Rq ; Rt ; Rp ; R3z) augmentent de (25 ; 25.32 ; 22.83 ; 27.85 ; 24 ; 23.85) % .respectivement à la fin d'usinage de 108sec. A titre d'exemple la figure IV.8. présente les différents critères de rugosité pour la nuance CC650.

La (figure IV.9) montre une comparaison des trois critères de la rugosité de surface (Ra, Rt et Rz) entre les cinq matériaux de coupe testés pour un temps d'usinage de 108sec, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{s}$.



FigureIV.9. Comparaison des rugosité de surface pour les cinq nuances à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.8\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{s}$

L'analyse des résultats montre que le GC1525 donne des rugosités de surface minimales suivie de la nuance de carbure GC1025, puis viens le carbure GC3205. Il est à noter que les critères les plus élevés ont été obtenus par la nuance de carbure non revêtu H10F, à cause de son usure importante.

c) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure

La (figure IV.10) (a, b, c, d, e) illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage lors de l'acier Z40CDV5 avec les cinq matériaux de coupe :

(a) GC1025, (b) H10F, (c) GC3205, (d) GC1525, (e) CC650 à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et un temps d'usinage $T_u=108\text{sec}$.

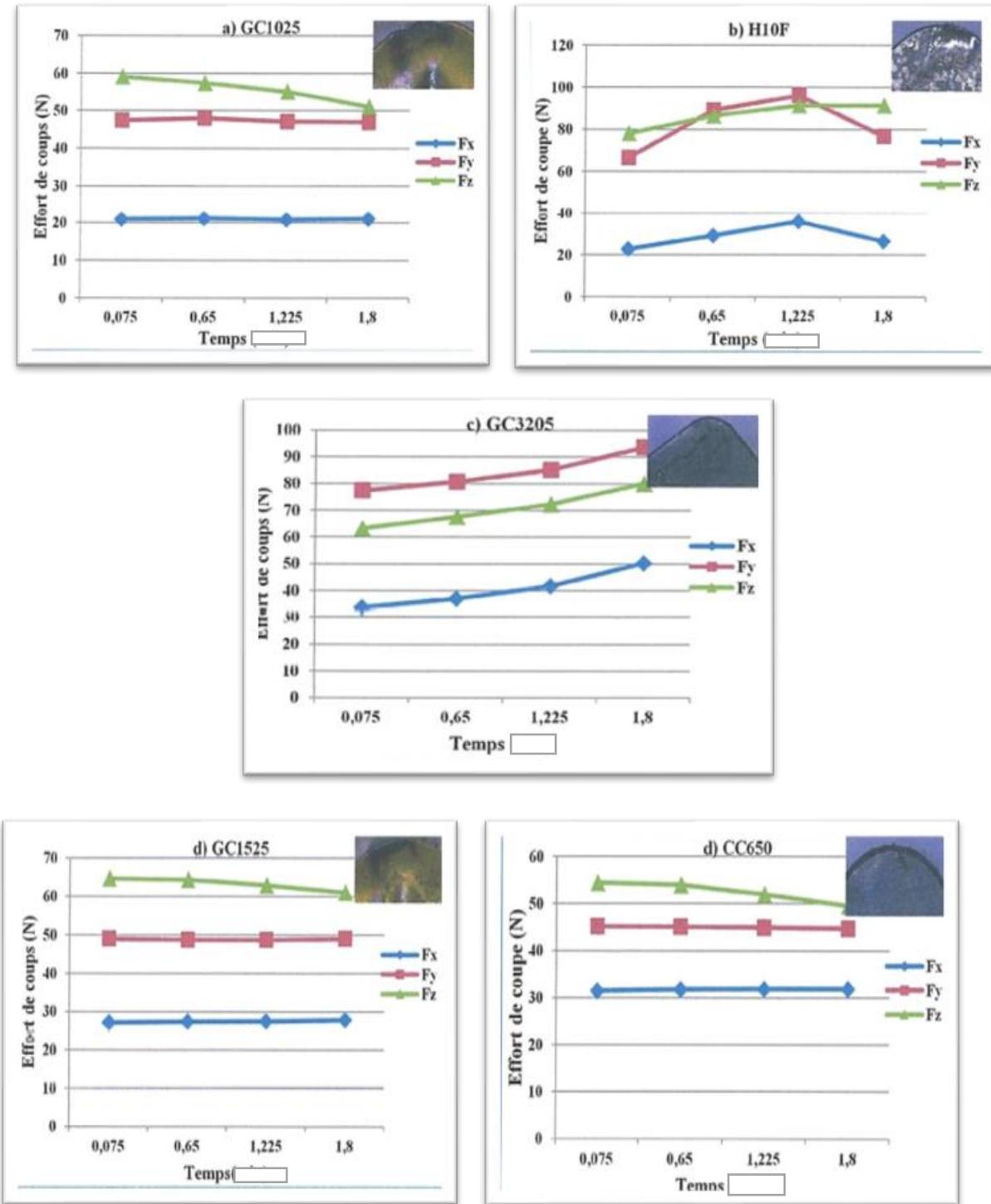


Figure. IV.10. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps à $V_c=340\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ pour : a) GC1025 ; b) H10F ; c) GC1525 ; e) CC650.

L'analyse des résultats montre qu'avec l'augmentation du temps d'usinage les composantes de l'effort de coupe sont stables ou présentent une légère augmentation, ceci est dû à une faible usure de ces plaquettes, à l'exception de la nuance de carbure H10F où l'état d'usure conduit à une perturbation de l'évolution des composantes de l'effort.

En examinant l'allure des courbes on remarque que dans l'intervalle du temps de 45 à 108 sec, les composantes (F_x , F_y) augmentent respectivement de (13.81 ; 13.21) % pour le H10F, de (32.77 ; 17.28)% pour GC3205, dans le même intervalle de temps F_x et F_y diminuent respectivement de (0.42 ; 98.86)%, reste le céramique CC650 et le carbure GC1025 sont presque stables. A la fin d'usinage la valeur maximale de l'usure V_c enregistrée est de 0.058mm pour le GC1025, 2.129mm pour H10F, 0.067mm pour GC3205, 0.036 pour GC1525 et 0.06mm pour CC650.

Sur la (figure IV.11) sont représentés les résultats des trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) à la fin de l'usinage. L'analyse des résultats montre clairement que l'usinage avec le céramique GC1025 donne un effort radial faible par rapport aux autres nuances testées suivi le carbure GC1025.

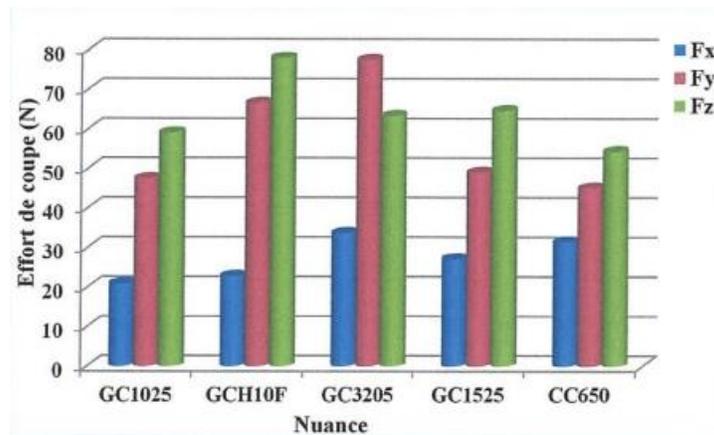


Figure IV.11. Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés pour les cinq nuances à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{sec}$.

d) Evolution de la pression spécifique de coupe en fonction du temps

Le but de cette partie est de déterminer l'évolution des pressions spécifiques de coupe obtenue par la formule suivante :

$$K_c = \frac{F_z}{f \cdot a_p}$$

La figure (IV.12) montre une comparaison entre les pressions spécifiques au début d'usinage pour les cinq nuances de coupe. $K_c(\text{N/mm}^2)$ à ($V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$) sont de l'ordre de 3693.75N/mm^2 pour GC1525 et 3400N/mm^2 pour CC650.

D'après cette comparaison on observe que le matériau CC650 résiste mieux aux pressions spécifiques par rapport aux autres matériaux testés.

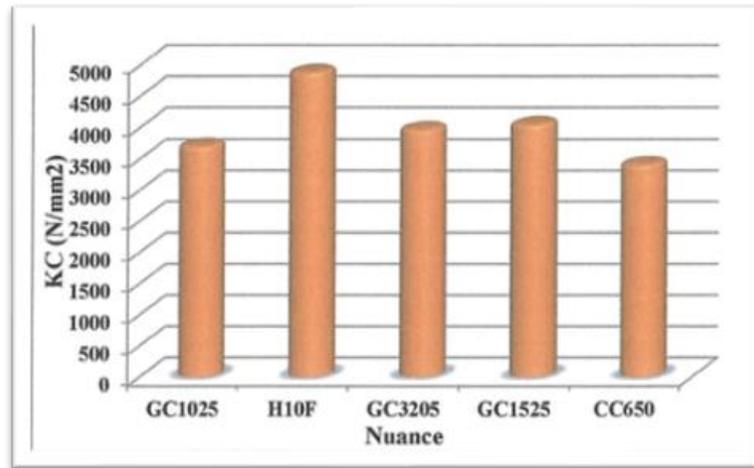


Figure IV.12. Evolution de les pressions spécifiques de coupe pour les cinq nuances de coupe à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=108\text{sec}$.

IV.4. Conclusion

Cette étude comparative des différents matériaux de coupe montre qu'en terme d'usure, pour la vitesse $V_c=170\text{ m/min}$ la nuance de carbure revêtu GC1025 présente des performances supérieures pour la vitesse élevée et $V_c=340\text{ m/min}$, le carbure GC1525 présente lui aussi de bonnes performances.

Alors qu'en termes de rugosité et d'efforts de coupe la nuance de céramique CC650 se montre la plus performante.

V.1. Introduction

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif principal est de chercher les conditions optimales d'usinage, qui permettent de réaliser un gain économique et technologiques. En effet, dans un souci de déterminer la combinaison optimale des conditions du régime de coupe qui permet d'obtenir un bon état de surface et de préserver l'état des outils de coupe pour minimiser les frais.

V.2. Résultats des essais

Dans cette étude un plan d'essai L9 de Taguchi est appliqué lors de tournage du Z40CDV5 avec cinq matériaux à outils à savoir GC1025 ; GC3215 ; H10F ; GC1525 ; CC650. Les paramètres de coupe considérés sont : (V_c , f et T_c et le matériau à outil) et les paramètres technologiques étudiés sont : (R_z , F_{tot} , MRR et VB). Les résultats des 9 essais sont présentés sur le tableau (V.1.L'optimisation multi-objective a été réalisée par les méthodes : TOPSIS et l'analyse relationnelle grise (GRA).

Tableau V.1. Résultats des essais

Essai	V_c (m/min)	f (mm/tr)	T_c (s)	R_z μm	F_{tot} (N)	VB (μm)	MRR (cm^2/min)
1	115	0,08	5	14,68	51,80	0,061	1,84
2	115	0,12	10	15,44	86,04	0,055	2,76
3	115	0,16	15	18,83	96,29	0,06	3,68
4	165	0,08	10	11,11	57,87	0,078	2,64
5	165	0,12	15	12,9	70,47	0,068	3,96
6	165	0,16	5	11,94	109,81	0,05	5,28
7	325	0,08	15	6,5	66,69	0,076	5,2
8	325	0,12	5	6,93	84,59	0,058	7,8
9	325	0,16	10	9,88	104,12	0,068	10,4

V.3. 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 là plus loin de la meilleure alternative, tout en se basant sur le calcul des « coefficients ou Facteurs de proximité » [63].

Dans notre étude l'objectif principal est d'identifier les paramètres de coupe optimaux, pour minimiser Rz, Ftot, 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 (V.1) est utilisée pour la normalisation de la matrice initiale :

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

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 V.2):

$$V_{ij} = n_{ij}w_j \dots\dots\dots V.2$$

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

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau (V.2).

Etape 3

Cette étape permet de déterminer les solutions positives et négatives idéales, qui sont indiquées dans le tableau 3 et ont été calculées à l'aide des équations (V.3) et (V.4), respectivement (voir tableau V.3.).

$$V^+ = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} \quad \text{solution positive ideal} \dots\dots\dots V.3$$

$$V^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} \quad \text{solution negative ideal} \dots\dots\dots V.4$$

Etape 4

La distance entre la solution positive idéale (la plus élevée) et la solution négative idéale (la plus basse). Les équations (V.5) et (V.6) sont utilisées pour calculer les deux distances euclidiennes pour chaque alternative. Le tableau V.4 présente les résultats.

$$S_i^+ = \{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2 \dots\dots\dots V.5$$

$$S_i^- = \{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2 \dots\dots\dots V.6$$

Les résultats du tableau (V.4) 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 le temps de coupe (T_c), est le régime numéro 8 du tableau (V.2). En effet, ce régime correspond à une vitesse de coupe $V_c = 325$ m/min, une avance $f = 0.12$ mm/tr et un temps de coupe $T_c = 5$ s. Les essais ont été réalisés en fixant la profondeur de passe à une valeur égale à ($a_p = 0.2$ 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 ($R_z = 6.93 \mu\text{m}$) des efforts modérés ($F_{\text{tot}} = 84.59\text{N}$) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur maximale du tableau ($\text{MRR} = 7.8 \text{cm}^3/\text{min}$). D'autre part, l'usure très acceptable ($VB = 0.058$), sachant que les valeurs des VB du tableau (V.3) sont comprises entre $VB_{\text{max}} = 0.078 \mu\text{m}$ et $VB_{\text{min}} = 0.05 \mu\text{m}$.

Tableau.V.2. Résultats des calculs après l'étape de la normalisation et la pondération

WRz = 0,25	WRz=0,25	WRz=0,25	WRz=0,25
0,097092669	0,051934946	0,078942461	0,027937073
0,102119265	0,086260675	0,071177629	0,041905609
0,124540528	0,096545893	0,077648323	0,055874145
0,073480896	0,058024599	0,10094282	0,040083626
0,085319852	0,070653469	0,088001432	0,060125439
0,078970468	0,110096891	0,064706936	0,080167252
0,042990623	0,066862497	0,098354542	0,078952597
0,045834618	0,084808237	0,075060045	0,118428895
0,065345747	0,104391692	0,088001432	0,157905194

Tableau V.3. Résultats des calculs de l'étape 3.

Essai	Rz+	Rz-	Fz+	Fz-	VB+	VB-	MRR+	MRR-
1	0,0541	-0,0274	0	-0,0582	0,01424	-0,022	-0,13	0
2	0,05913	-0,0224	0,03433	-0,0238	0,00647	-0,0298	-0,116	0,01397
3	0,08155	0	0,04461	-0,0136	0,01294	-0,0233	-0,102	0,02794
4	0,03049	-0,0511	0,00609	-0,0521	0,03624	0	-0,1178	0,01215
5	0,04233	-0,0392	0,01872	-0,0394	0,02329	-0,0129	-0,0978	0,03219
6	0,03598	-0,0456	0,05816	0	0	-0,0362	-0,0777	0,05223
7	0	-0,0815	0,01493	-0,0432	0,03365	-0,0026	-0,079	0,05102
8	0,00284	-0,0787	0,03287	-0,0253	0,01035	-0,0259	-0,0395	0,09049
9	0,02236	-0,0592	0,05246	-0,0057	0,02329	-0,0129	0	0,12997

Tableau V.4. Tableau des résultats de la méthode TOPSIS.

Essai	S+	S-	R	Rang
1	0,141497	0,067972	0,324497212	7
2	0,134804	0,046389	0,256020392	8
3	0,13863	0,038817	0,218751445	9
4	0,127129	0,073933	0,367714303	6
5	0,11066	0,065556	0,372021177	5
6	0,10354	0,078215	0,430333351	4
7	0,087112	0,105494	0,547717965	3
8	0,052481	0,125271	0,704749634	1
9	0,061596	0,143512	0,699689495	2

V.4. 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 [64]. Dans la procédure de GRA, les résultats expérimentaux de Rz, Ftot, VB et le MRR sont d'abord normalisés dans la plage comprise entre zéro 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 (V.7). Enfin le (GRG) est déterminé en faisant la moyenne des coefficients relationnels gris correspondant aux réponses sélectionnées à l'aide de l'équation (V.8).

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 est basée sur la normalisation de l'élément de décision de la matrice (x_{ij}) selon l'équation (V.7) pour le critère "p" afin de faire correspondre la valeur "1" à la valeur maximale de S/N.

$$G_i(p) = \frac{x_{ip} - \min(x_{ip})}{\max(x_{ip}) - \min(x_{ip})} \dots \dots \dots V.7$$

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 (Rz, Ftot, VB et MRR). La meilleure performance est obtenue pour une valeur maximale de S/N ; par conséquent, l'équation (V.5) est utilisée pour la normalisation.

Etape 2

L'équations (V.8) à (V.11) permettent de calculer le coefficient relationnel gris ($\phi_i(p)$), qui indiquent la relation entre les résultats calculés et expérimentaux

$$\phi_i(p) = \frac{\Delta_{min} + \epsilon \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(p) + \epsilon \Delta_{max}} \dots \dots \dots V.8$$

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 $G_0(p)$ et $G_i(p)$.

$$\Delta_{oi}(P) = \|G_0(P) - G_i(P)\| \dots \dots \dots V.9$$

$$\Delta_{min} = \min_{\forall i} \min_{\forall P} \| G_0(P) - G_i(P) \| \dots \dots \dots V.10$$

$$\Delta_{max} = \max_{\forall i} \max_{\forall P} \| G_0(P) - G_i(P) \| \dots \dots \dots V.11$$

Etape 3

L'équation (V.12) est utilisée pour calculer le gradient de relation grise (δ_i) à partir des résultats $\phi_i(p)$ afin d'exprimer le niveau de corrélation entre les séries ; les résultats calculés sont présentés dans le tableau V.5.

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n [\phi_i(p)] \dots \dots \dots V.12$$

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 $G(p)$, L'optimisation multi-objectifs est convertie en une optimisation mono-objective lorsque ε_i est calculé.

Les résultats du tableau (V.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 le temps de coupe (T_c), est le régime numéro 8 du tableau (V.1). En effet, ce régime est celui proposé par la méthode TOPSIS. Ce régime correspond à une vitesse de coupe $V_c = 325$ m/min, une avance $f = 0.12$ mm/tr et un temps de coupe $T_c = 5$ s. les essais ont été réalisés en fixant la profondeur de passe à une valeur égale à ($a_p = 0.2$ 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 ($R_z = 6.93 \mu m$) des efforts modérés ($F_{tot} = 84.59 N$) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur maximale du tableau ($MRR = 7.8 \text{ cm}^3/\text{min}$) D'autre part, l'usure très acceptable ($VB = 0.058$), sachant que les valeurs des VB du tableau (V.3) sont comprises entre $VB_{max} = 0.078 \mu m$ et $VB_{min} = 0.05 \mu m$.

Tableau.V.5. Résultats des calculs après de la normalisation et la pondération.

WRz=0,25	WRz=0,25	WRz=0,25	WRz=0,25
0,336577453	1	0,607142857	0
0,274939173	0,409824951	0,821428571	0,107476636
0	0,232987366	0,642857143	0,214953271
0,626115166	0,89529832	0	0,093457944
0,480940795	0,678165459	0,357142857	0,247663551
0,558799676	0	1	0,401869159
1	0,743345048	0,071428571	0,392523364
0,96512571	0,434797251	0,714285714	0,696261682
0,725871857	0,09809162	0,357142857	1

Tableau.V.6. Tableau des résultats de la méthode GRA.

Essai	GRC				GRG	Rang
	Rz	Ftot	VB	MRR		
1	0,4298	1	0,56	0,3333	0,5808	4
2	0,4081	0,4586	0,7368	0,3591	0,4907	7
3	0,3333	0,3946	0,5833	0,3891	0,4251	9
4	0,5722	0,8269	0,3333	0,3555	0,522	6
5	0,4906	0,6084	0,4375	0,3993	0,4839	8
6	0,5312	0,3333	1	0,4553	0,58	5
7	1	0,6608	0,35	0,4515	0,6156	2
8	0,9348	0,4694	0,6364	0,6221	0,6657	1
9	0,6459	0,3567	0,4375	1	0,61	3

V.5. Conclusion

Les méthodes d'optimisations multi-objectives ont permis de déterminer la combinaison optimale des paramètres du régime de coupe qui permette l'obtention d'un bon compromis entre les quatre réponses considérées (R_z , VB , F_{tot} et MRR).

Les résultats des deux méthodes sont semblables. En effet, le régime élu par les deux méthodes correspond à une vitesse de coupe $V_c = 325$ m/min, une avance $f = 0.12$ mm/tr et un temps de coupe $T_c = 5$ s. Les essais ont été réalisés en fixant la profondeur de passe à une valeur égale à ($a_p = 0.2$ 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 ($R_z = 6.93 \mu m$) des efforts modérés ($F_{tot} = 84.59$ N) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur maximale du tableau ($MRR = 7.8$ cm³/min) D'autre part, l'usure très acceptable ($VB = 0.058$), sachant que les valeurs des VB du tableau (V.3) sont comprises entre $VB_{max} = 0.078 \mu m$ et $VB_{min} = 0.05 \mu m$.

Conclusion générale

Ce travail est une étude expérimentale dédiée à déterminer et investiguer l'effet des conditions de coupe lors du tournage du Z40 CDV5. Dans ce cadre, une optimisation multi-objective est réalisée en utilisant deux méthodes MCDM pour déterminer les conditions de coupe optimales qui permettent d'obtenir les valeurs désirées des réponses considérées.

Les résultats trouvés ont permis de conclure que ;

- ✓ L'optimisation du procédé de tournage nous permet d'aboutir à un régime de coupe optimal pour gagner en productivité, en cout et en qualité des pièces usinées. Pour cela, il faut maîtriser plusieurs méthodes et approches d'optimisation pour les exploiter dans la recherche du régime optimal de notre couple outil/pièces à usiner.
- ✓ Cette étude comparative des différents matériaux de coupe montre qu'en termes d'usure, pour les deux vitesses, la nuance de carbure revêtu GC1025 présente des performances supérieures à celle des autres matériaux testés, sauf pour la vitesse élevée, le carbure GC1525 présente lui aussi de bonnes performances. Alors qu'en termes de rugosité et d'efforts de coupe la nuance de céramique CC650 se montre la plus performante.
- ✓ Les méthodes d'optimisations multi-objectives ont permis de déterminer la combinaison optimale des paramètres du régime de coupe qui permette l'obtention d'un bon compromis entre les quatre réponses considérées (R_z , VB , F_{tot} et MRR).
- ✓ Les résultats des deux méthodes sont semblables. En effet, le régime élu par les deux méthodes correspond à une vitesse de coupe $V_c = 325$ m/min, une avance $f = 0.12$ mm/tr et un temps de coupe $T_c = 5$ s. les essais ont été réalisés en fixant la profondeur de passe à une valeur égale à ($a_p = 0.2$ 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 ($R_z = 6.93 \mu m$) des efforts modérés ($F_{tot} = 84.59 N$) et un taux d'enlèvement de matière très élevé proche de la valeur maximale du tableau ($MRR = 7.8 cm^3/min$) D'autre part, l'usure très acceptable ($VB = 0.058$), sachant que les valeurs des VB du tableau (V.3) sont comprises entre $VB_{max} = 0.078 \mu m$ et $VB_{min} = 0.05 \mu m$.

Référence Bibliographique

- [1] Bartarya, G., & Choudhury, S. K. (2012). State of the art in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 53(1), 1-14.
- [2] 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).
- [3] Bourdet, P. (2004). *La coupe des métaux*. ENSET.
- [4] 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.
- [5] HAMADI BILLEL. Etude des revêtements dure et applications sur outil de coupe. Thèse de magister. Université Mentouri Constantine .2010.
- [6] ACHOUR Ali, Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement. Thèse de Doctorat, Université Mentouri-Constantine.2006.
- [6] Achour, A. (2017). Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement.
- [7] Yang, W. P., & Tarng, Y. S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of materials processing technology*, 84(1-3), 122-129.
- [8] Zerti, A., Yallese, M. A., Zerti, O., Nouioua, M., & Khettabi, R. (2019). Prediction of machining performance using RSM and ANN models in hard turning of martensitic stainless steel AISI 420.
- [9] ZEMITI, S. (2022). Application des méthodes MCDM pour l'optimisation de l'usinage d'un acier fortement allié traité.
- [10] Bouyedda, M. (2012). Etude des performances des matériaux de coupe-application aux plaquettes de l'EPE.
- [11] DJAZOULI, A. *L'influence des paramètres de coupe sur la rugosité* (Doctoral dissertation).

- [12] Yallese, M. A., Boulanouar, L., & Chaoui, K. (2004). Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique. *Mécanique & Industries*, 5(4), 355-368.
- [13] Hadjou, M., & Drid, S. (2022). *Influence des paramètres d'usinage sur l'effort de coupe et l'état de surface en tournage* (Doctoral dissertation, Université Abderahmene Mira. Bejaia).
- [14] Suresh, R., Joshi, A. G., & Manjiaiah, M. (2021). Experimental investigation on tool wear in AISI H13 die steel turning using RSM and ANN methods.
- [15] Kuntoğlu, M., & Sağlam, H. (2019). Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning.
- [16] Kumar, R., Kumar, A., Kant, L., Prasad, A., Bhoi, S., Meena, C. S., ... & Ghosh, A. (2023). Experimental and RSM-Based Process-Parameters Optimisation for Turning Operation of EN36B Steel.
- [17] Wang, J., Zhang, G., Chen, N., Zhou, M., & Chen, Y. (2021). A review of tool wear mechanism and suppression method in diamond turning of ferrous materials.
- [18] Moriwaki T (1995) Experimental analysis of ultraprecision machining. *Int J Japan Soc Prec Eng* 29(4):287–290
- [19] Pramanik A, Neo KS, Rahman M, Li XP, Sawa M, Maeda Y (2008) Ultraprecision turning of electroless nickel: effects of crystal orientation and origin of diamond tools. *Int J Adv Manuf Technol* 43(7-8):681–689.
- [20] Uddin AS, Seah KHW, Rahman M, Li XP, Liu K (2007) Performance of single crystal diamond tools in ductile mode cutting of silicon. *J Mater Process Technol* 185(1-3):24–30.
- [21] Pramanik A, Neo KS, Rahman A, Li XP, Sawa M, Maeda Y (2003) Cutting performance of diamond tools during ultraprecision turning of electroless-nickel plated die materials. *J Mater Process Technol* 140(1-3):308–313.
- [22] Lee et al, Lee YJ, Hao L, Luder J, Chaudhari A, Wang SY, Manzhos S, Wang H (2019) Micromachining of ferrous metal with an ion implanted diamond cutting tool. *Carbon*.
- [23] Zou L, Yin JC, Huang Y, Zhou M (2018) Essential causes for tool wear of single crystal diamond in ultra-precision cutting of ferrous metals. *Diam Relat Mater* 86:29–40.
- [24] Zhang XQ, Huang R, Liu K, Kumar AS, Deng H (2018) Suppression of diamond tool wear in machining of tungsten carbide by combining ultrasonic vibration and electrochemical processing. *Ceram Int* 44(4):4142–4153.
- [25] Shamoto E, Suzuki N (2014) Ultrasonic vibration diamond cutting and ultrasonic elliptical vibration cutting, pp 405–454.

- [26] Sadati, N., Chinnam, R. B., & Nezhad, M. Z. (2018). Observational data-driven modeling and optimization of manufacturing processes. *Expert Systems with Applications*, 93, 456-464.
- [27] D. Palanisamy, P. Senthil, Optimization on turning parameters of 15-5PH stainless steel using Taguchi based grey approach and TOPSIS. *Arch. Mech. Eng.* 63, 397–412 (2016)
- [28] Ramesh, S., Viswanathan, R., & Ambika, S. (2016). Measurement and optimization of surface roughness and tool wear via grey relational analysis, TOPSIS and RSA techniques. *Measurement*, 78, 63-72.
- [29] V. Balaji, S. Ravi, P.N. Chandran, Optimization on cryogenic CO2 machining parameters of AISI D2 steel using Taguchi based grey relational approach and TOPSIS (2018)
- [30] A. Palanisamy, T. Selvaraj, Optimization of turning parameters for surface integrity properties on incoloy 800H superalloy using cryogenically treated multi-layer CVD coated tool. *Surf. Rev. Lett.* 26(02), 1850139 (2019)
- [31] N.S. Narayanan, N. Baskar, M. Ganesan, M.P. Jenarathanan, S. Praveen, Evaluation and optimization of surface roughness and metal removal rate through RSM, GRA, and TOPSIS techniques in turning PTFE polymers, in *Advances in Manufacturing Technology* (Springer, Singapore, 2019), pp. 595–605
- [32] S. Nipanikar, V. Sargade, R. Guttedar, Optimization of process parameters through GRA, TOPSIS and RSA models. *Int. J. Ind. Eng. Comput.* 9, 137–154 (2018)
- [33] A. Khan, K. Maity, Application of MCDM-based TOPSIS method for the selection of optimal process parameter in turning of pure titanium. *Benchmark.: Int. J.* 24, 2009–2021 (2017)
- [34] V. Bhardwaj, M.K. Gaur, V. Chaturvedi, S. Agrawal, optimization of machining parameters for nylon 6 composite in CNC lathe using PCA-based TOPSIS. *Int. J. Manuf. Mater. Process.* 4, 36–47 (2018)
- [35] H. Majumder, A. Saha, Application of MCDM based hybrid optimization tool during turning of ASTM A588. *Decis. Sci. Lett.* 7, 143–156 (2018)
- [36] A. Gok, A new approach to minimization of the surface roughness and cutting force via fuzzy TOPSIS, multi-objective grey design and RSA. *Measurement* 70, 100–109 (2012)
- [37] R.D. Koyee, R. Eisseler, S. Schmauder, Application of Taguchi coupled fuzzy multi attribute decision making (FMADM) for optimizing surface quality in turning austenitic and duplex stainless steels. *Measurement* 58, 375–386 (2014)
- [38] R.D. Koyee, U. Heisel, R. Eisseler, S. Schmauder, Modeling and optimization of turning duplex stainless steels. *J. Manuf. Process.* 16, 451–467 (2014)

- [39] A. Khan, K. Maity, Application potential of combined fuzzy-TOPSIS approach in minimization of surface roughness, cutting force and tool wear during machining of CP-Ti grade II. *Soft. Comput.* 23, 6667–6678 (2019)
- [40] R.V. Rao, Machinability evaluation of work materials using a combined multiple attribute decision-making method. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 28, 221–227 (2006)
- [41] B. Singaravel, T. Selvaraj, Optimization of machining parameters in turning operation using combined TOPSIS and AHP method. *Tehnicki Vjesnik* 22, 1475–1480 (2015)
- [42] L.B. Abhang, M. Hameedullah, Selection of lubricant using combined multiple attribute decision making method. *Adv. Prod. Manage.* 7, 39–50 (2012)
- [43] A.K. Parida, B.C. Routara, Multiresponse optimization of process parameters in turning of GFRP using TOPSIS method. *Int. Scholar. Res. Not.* 1–10 (2014)
- [44] T.S. Lan, Taguchi optimization of multi-objective CNC machining using TOPSIS. *Inf. Technol. J.* 8, 917–922 (2012)
- [45] A. Singh, S. Datta, S.S. Mahapatra, Application of TOPSIS in the Taguchi method for optimal machining parameter selection. *J. Manuf. Sci. Prod.* 11, 49–60 (2011)
- [46] S. Balasubramaniyan, T. Selvaraj, Application of integrated Taguchi and TOPSIS method for optimization of process parameters for dimensional accuracy in turning of EN25 steel. *J. Chin. Inst. Eng.* 40, 267–274 (2017)
- [47] R. Thirumalai, J.S. Senthilkumaar, Multi-criteria decision making in the selection of machining parameters for Inconel 718. *J. Mech. Sci. Tech.* 27, 1109–1116 (2013)
- [48] P. Asokan, J.S. Senthilkumaar, Intelligent selection of machining parameters in turning of Inconel-718 using multi objective optimization coupled with MADM. *Int. J. Mach. Mach. Mater.* 8, 209–225 (2010)
- [49] B. Singaravel, T. Selvaraj, S. Vinodh, Multi-objective optimization of turning parameters using the combined MOORA and entropy method. *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.* 40, 101–111 (2016)
Application of MCDM Methods for Process Parameter Optimization ... 207
- [50] A. Khan, K. Maity, D. Jhodkar, An integrated fuzzy-MOORA method for the selection of optimal parametric combination in turning of commercially pure titanium, in *Optimization of Manufacturing Processes* (Springer, Cham, 2020), pp. 163–184
- [51] K. Maity, S. Pradhan, December. Optimization of titanium grade 5 alloy using dry machining by MOORA coupled with Taguchi method, in *Proceedings of 6th International & 27th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR-2016)* (College of Engineering, Pune, Maharashtra, India)

- [52] A. Khan, K. Maity, A novel MCDM approach for simultaneous optimization of some correlated machining parameters in turning of CP-titanium grade 2. *Int. J. Eng. Res. Afr.* 22, 94–111 (2016)
- [53] R. Kumar, R. Kumar, S. Gaurav, C. Saurabh, Optimization of process parameters during CNC turning by using AHP & VIKOR method. *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2, 3478–3480 (2013)
- [54] B. Singaravel, T. Selvaraj, Multi criteria optimisation using analytic hierarchy process in turning operation. *IJMMM* 19, 218–229 (2017)
- [55] Chakraborty, S., & Chakraborty, S. (2022). A scoping review on the applications of MCDM techniques for parametric optimization of machining processes.
- [56] Das, P. P., & Chakraborty, S. (2023). A comparative analysis on optimization of end milling processes using multi-criteria decision-making methods.
- [57] Haoues, S., Yallese, M. A., Belhadi, S., Chihaoui, S., & Uysal, A. (2023). Modeling and optimization in turning of PA66-GF30% and PA66 using multi-criteria decision-making (PSI, MABAC, and MAIRCA) methods: a comparative study. Touggui, Y., Belhadi, S., Mechraoui, S. E., Uysal, A., Yallese, M. A., & Temmar, M. (2020). Multi-objective optimization of turning parameters for targeting surface roughness and maximizing material removal rate in dry turning of AISI 316L with PVD-coated cermet insert.
- [58] Touggui, Y., Belhadi, S., Mabrouki, T., Temmar, M., & Yallese, M. A. (2020). Dry turning optimization of austenitic stainless steel 316L based on Taguchi and TOPSIS approaches. *Matériaux & Techniques*, 108(4), 401.
- [59] 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.
- [60] Tebassi, H., Yallese, M. A., & Belhadi, S. (2023). Optimization and Machinability Assessment at the Optimal Solutions Across Taguchi OA, GRA, and BBD: An Overall View.
- [61] ROUAIGUIA Mohammed, Etude expérimentale de l'endommagement des plaquettes en carbure métallique.
- [62] ZEMITI, S. (2022). Application des méthodes MCDM pour l'optimisation de l'usinage d'un acier fortement allié traité.
- [63] TOUGGUI, Youssef, BELHADI, Salim, MABROUKI, Tarek, et al. Dry turning optimization of austenitic stainless steel 316L based on Taguchi and TOPSIS approaches. *Matériaux & Techniques*, 2020, vol. 108, no 4, p. 401.
- [64] Jacques Goupy, Lee Creighton, Introduction aux plans d'expériences, Dunod, 2006, 3eme édition Paris.

