

M/531. 646

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



Mémoire de fin D'études
Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Conception et Production Industrielle

Présenté par : ROUAIGUIA Mohammed

=====

Etude expérimentale de l'endommagement des plaquettes
en carbure métallique

=====

Sous la Direction de :

Dr. Belhadi salim

Année universitaire 2011/2012

13/2905

Remercîment

Remerciement

Je remercie dieu de ma avoir donné la force et le courage Ainsi que la volonté d'effectuer mon projet de fin cycle.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à docteur BELHADI SALIM qui a su diriger ce mémoire avec intérêt et compétences, et qui a su me conseiller tout au long de cette période.

J'adresse aussi mes vif remerciements à yellese med athmane leur soutien pour réaliser se travaille.

Je remercie mes Enseignant et nos Techniciens du Département de Génie mécanique, et surtout Aziz et Mimed pour leurs services appréciables.

J'exprime mes gratitudes et mes remerciements à mes parents et toute ma famille pour leurs encouragements.

Dédicace

A mon Père

A ma Mère

A mon Frère

A ma Sœur

A mes Amis

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Etude et analyse bibliographique	
I.I. Généralité sur la coupe des métaux	2
I.I.1. Définition de la coupe.....	2
I.I.2. Principe de la coupe des métaux.....	2
I.I.3. Formation du copeau	4
I.I.3.1. Définition.....	4
I.I.3.2. Les types de copeaux	5
I.I.3.3. Diagramme de brise- copeaux.....	6
I.I.4. Les matériaux des outils de coupe	6
I.I.4.1. Le choix des matériaux de coupe	6
I.4.2. Les outils de coupe en tournage dur	8
I.4.3. Les matériaux des outils	8
I.4.4. Propriétés physiques de quelques matériaux de coupe.....	11
I.I.5. Usure des outils	11
I.I.5.1. Définition	11
I.I.5.2. Critères d'usure	12
I.I.5.3. Différentes formes d'usure des outils	13
I.I.5.4. Différents modes d'usure	14
I.II: Etat de l'art.....	19
I.II.1. Usure des carbures revêtus et non revêtus lors du tournage d'un acier.....	19
I.II.2. Mécanismes d'usure et performances du revêtement d'outil TiAlN PVD lors de l'usinage de l'acier AISI 4140.....	21
I.II.3. Mécanismes d'usure d'un carbure revêtu (TiN) et d'un cermet non revêtu dans une application UGV.....	24
I.II.4. Influence des condition d'usinage sur les efforts de coupe.....	26
Chapitre II : Procédure expérimentale	
II.1 Introduction.....	30

II.2. Matériels utilisés.....	30
II.2.1. Machine-outil.....	30
II.2.2. Le matériau utilisé pour les essais d'usinage.....	31
II.2.3. Plaquettes de coupe utilisée.....	32
II.2.4. Porte plaquettes.....	33
II.2.5. Appareillages de mesures utilisé.....	34
II.3. Conditions de coupe.....	39
II.4. Planification des expériences.....	40
II.4.1. Méthode de planification des expériences	40
II.5. Conclusion.....	42
Chapitre III : Etude des performances de différentes nuances de coupe	
III.1. Introduction.....	43
III.2. Performances des matériaux de coupe a $V_c=170m/min$.....	43
III.3. Performances des matériaux de coupe à $V_c=340m/min$.....	50
Conclusion.....	58
Chapitre IV: Etude de l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité et les efforts de coupe	
IV.1 Introduction.....	59
IV.2 Evolution de la rugosité, des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage (9essais).....	59
IV.2.1. Analyse des effets des facteurs et des interactions sur R_a.....	60
IV.2.2. Analyse des effets des facteurs et des interactions sur R_z.....	64
IV.2.3. Analyse des effets des facteurs et des interactions sur R_t	67
IV.2.4. Analyse des effets des facteurs et des interactions sur F_x.....	71
IV.2.5. Analyse des effets des facteurs et des interactions sur F_y.....	74
IV.2.6. Analyse des effets des facteurs et des interactions sur F_z.....	78
Conclusion.....	81
IV.3. Analyse de variance de l'évolution du critère de rugosité et des efforts de coupe (27 essais)	82

IV.3.1. Modèle de la rugosité R_a en fonction des paramètres de coupe.....	84
IV.3.2. Modèles de la rugosité R_z en fonction des paramètres de coupe.....	87
IV.3.3. Modèles de la rugosité R_t en fonction des paramètres de coupe.....	92
IV.3.4. Modèles de l'effort axial F_x en fonction des paramètres de coupe.....	95
IV.3.5. Modèles de l'effort de coupe F_y en fonction des paramètres de coupe...	98
IV.3.6. Modèles de l'effort de coupe F_z en fonction des paramètres de coupe...	101
Conclusion.....	104
Conclusion générale.....	106
Référence	

Introduction

Introduction

Introduction

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, du procédé de coupe. Tous ces facteurs ont pour corollaire une production importante de chaleur qui induit une usure accélérée de l'outil de coupe. Pour diminuer le niveau de température de l'outil, les fluides de coupe sont généralement utilisés. Cependant, leur utilisation engendre d'autres contraintes comme le traitement des fluides usagés et des copeaux d'une part et les conséquences sur la santé des opérateurs et sur l'environnement d'autre part. Il faut également noter que le coût des fluides de coupe est élevé et que pour les grandes vitesses de coupe, la lubrification n'a pas d'effet significatif sur les conditions de frottement aux interfaces outil/matière. Ce dernier point est lié au fait que les niveaux de température et de chargement mécanique qui se développent au niveau de ces interfaces sont plus élevés. Ces raisons fondamentales ont motivé le recours à l'usinage sans lubrification.

Notre travail s'inscrit dans ce cadre, en effet il consiste en une campagne expérimentale de l'usinage 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.

Dans le premier chapitre, tous nos efforts ont été consacrés à l'étude bibliographique qui concerne le tournage, les phénomènes physiques régissant le processus de coupe et l'état d'art sur les différents travaux de recherche réalisés en tournage.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe.

Introduction

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté en premier temps une comparaison entre les performances en terme d'usure des différents types de matériaux de coupe tels que (GC1025, H10F, GC3205, GC1525 et CC650) en usinant l'acier Z40CDV5 à deux différentes vitesses de coupe (basse 170m/min et élevée 340m/min). Nous avons exposé également les résultats de l'évolution des efforts de coupe et la dégradation de la qualité de la surface de la pièce, sous l'effet de l'usure de ces cinq matériaux. Ensuite l'étude a été focalisée sur l'usure de l'outil GC1025.

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté une étude statistique des résultats qui repose sur la méthodologie de surface de réponse et une analyse de la variance (ANOVA) afin de déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles ont permis d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et le temps d'usinage) et les paramètres étudiés (effort de coupe, rugosité de surface).

L'étude expérimentale du comportement des matériaux de coupe et en particulier le carbure GC1025 lors du tournage de l'acier fortement allié Z40CDV5 nous a permis de mettre en évidence quelques aspects du problème de la coupe et les phénomènes physiques qui y sont liés.

Chapitre I

ÉTUDE ET ANALYSE

BIBLIOGRAPHIQUE

I.I. Généralité sur la coupe des métaux

I.I.1. Définition de la coupe:

Afin de mieux situer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux intervient dans un ensemble de procédés d'élaboration de pièces, par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion notable du matériau brut. Cet enlèvement est alors réalisé par l'action d'un outil possédant un ou plusieurs tranchants de section convexe animé d'un mouvement relatif à la pièce appropriée. Une machine outil fournit à la fois la puissance mécanique nécessaire et réalise le contrôle du mouvement relatif. Cet ensemble constitue un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue cinématique, dynamique.

En résumé, l'usinage par enlèvement de copeaux désigne l'ensemble des technique commande,... etc. Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leur forme, adaptée à une Opération d'usinage, et leur matière. La partie active, le plus souvent amovible (alors appelée plaquette (figure I-1) est maintenue sur le corps d'outil par un moyen de fixation approprié. Qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant. [1]



Figure (I.1): Les plaquettes [2]

I.I.2. Principe de la coupe des métaux

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler les paramètres de la coupe où, il

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe (figure I-2), comme le montre la figure suivante :

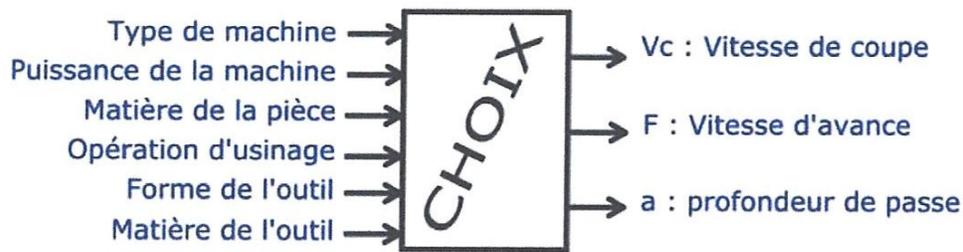


Figure (I.2): Les choix des paramètres de coupe [3]

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve dans la majorité des cas, dans la configuration suivante (figure I-3) :

- Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau.
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil [3].

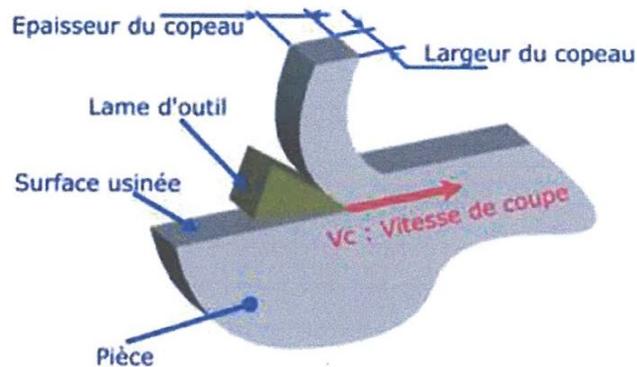


Figure (I.3): Configuration de la coupe [3]

Un examen plus approfondi du mécanisme de la coupe nous conduit à observer qu'il procède grâce à trois mouvements principaux perpendiculaires entre eux (figure I-4).

Mouvement de coupe « MC » : C'est un mouvement qui participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de travail.

Mouvement d'avance « Ma » : C'est le mouvement qui a pour but de décaler latéralement une quantité a ; dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.

Mouvement de pénétration « Mp » : C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe.

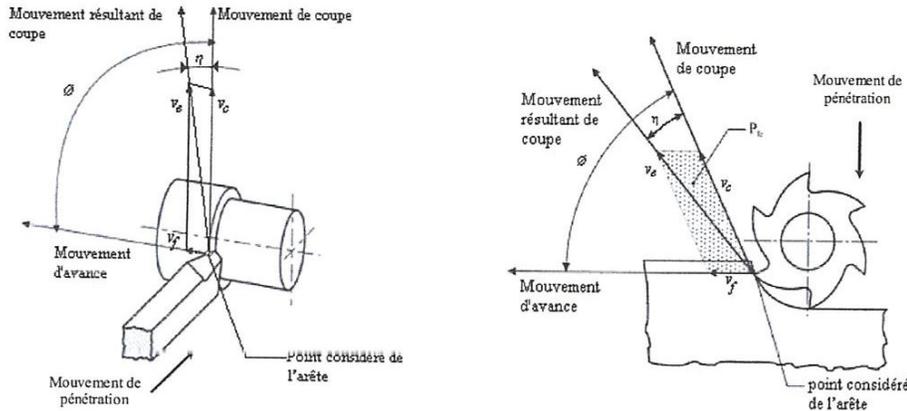


Figure (I.4): Les mouvements de coupe [4]

I.1.3. Formation du copeau :

I.1.3.1. Définition:

On appelle la zone de coupe l'endroit où la surépaisseur d'usinage se transforme en copeau. Dans cette zone, l'état des contraintes et des déformations du matériau usiné est très complexe et il dépend des conditions de coupe. Le métal est comprimé lorsqu'il s'approche de la zone de cisaillement de l'outil et devient plastique après avoir dépassé la limite d'élasticité (Figure I-5). [5]

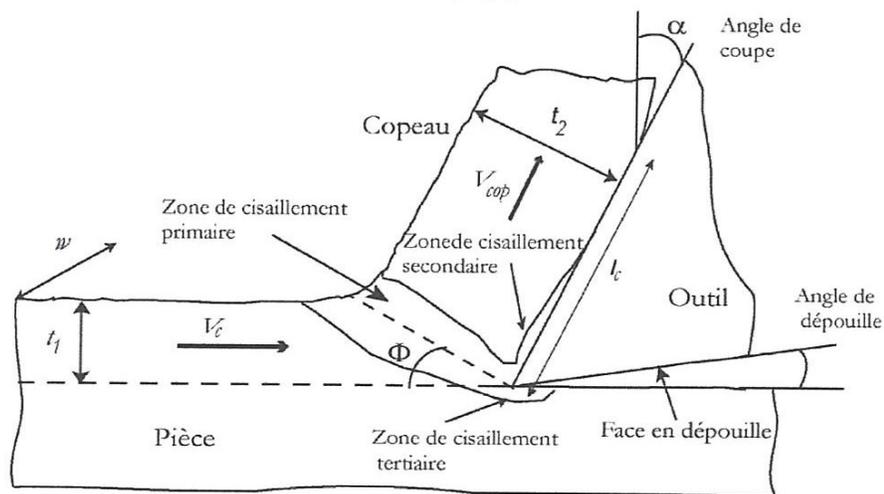


Figure (I.5): Principales zones de déformation. [6]

I.I.3.2. Les types de copeaux :

Les opérations de coupe des métaux produisent trois types principaux de copeaux :

- a) copeau élémentaire.
- b) copeau discontinu et fragmenté.
- c) copeau continu avec bords réguliers ou fragmentés.

a) Les copeaux élémentaires : sont surtout obtenus lors de l'usinage des métaux cassants, comme la fonte grise. Le matériau casse le long du plan de clivage, qui remplace dans ce cas le plan de cisaillement. La formation des copeaux élémentaires est accompagnée de perturbations des forces de coupe. Il est donc difficile d'obtenir un bon fini de surface usinée. Ces copeaux sont peu encombrants et faciles à évacuer.

b) Les copeaux discontinus : sont obtenus lors de l'usinage des métaux durs de faible conductivité thermique comme les aciers fortement alliés ou les alliages de titane. La zone qui s'approche de l'arête tranchante est comprimée et pendant son glissement le long de la face coupante de l'outil, l'intensité de l'effort augmente jusqu'à ce que l'effort de cisaillement dans le plan de cisaillement atteigne la valeur maximum où la rupture se produit.

c) Les copeaux continus : sont obtenus lors de l'usinage des matériaux ductiles tels que les aciers, le laiton et l'aluminium. Le métal est comprimé lorsqu'il s'approche de l'arête tranchante de l'outil et devient plastique après avoir dépassé la limite élastique. Le métal passant dans le plan de cisaillement s'écoule suivant un copeau continu qui présente du côté du glissement en contact avec la face de l'outil une zone fortement comprimée, ayant une surface lisse et brunie. Dans ce cas les variations des forces de coupe sont relativement faibles et le fini de surface obtenu est le meilleur. Ces copeaux sont les plus difficiles à évacuer et les plus encombrants. [5]

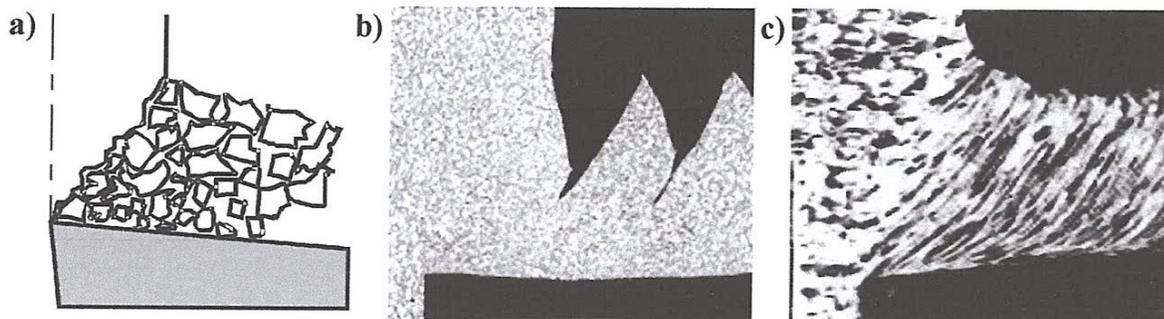


Figure (I.6): Types de copeaux : a) élémentaires; b) discontinus; c) continus.

I.I.3.3. Diagramme de brise- coupeaux

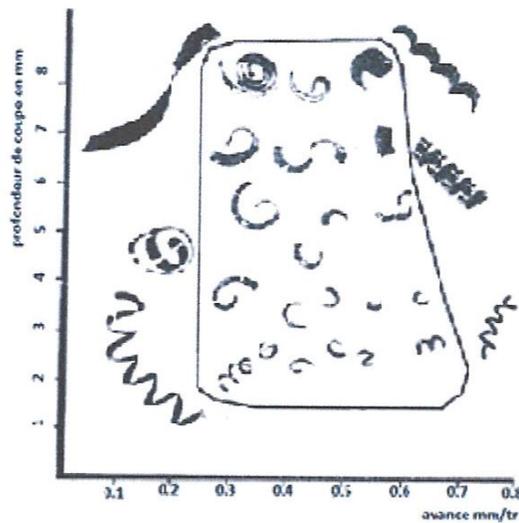


Figure (I.7): exemple de diagramme de brise coupeaux [7]

L'illustration ci-dessus donne les diverses formes de copeaux obtenues avec différents combinaisons d'avances et de profondeurs de passe. Le matériau usiné un acier de dureté HB de 240 avec une vitesse de coupe 90m/min. [7]

I.I.4. Les matériaux des outils de coupe :

I.I.4.1. Le choix des matériaux de coupe :

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 des matériaux à outil de coupe ne peut pas être surestimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe.

Pour choisir un outil de coupe convenable, il faut prendre en compte plusieurs facteurs comme : la nature de l'opération de coupe (ébauche ou finition, précision demandée, coupe continue ou intermittente), la forme et la matière de la pièce (structure, dureté, résistance, état de couche superficielle, affinité chimique, inclusions), le type de machine-outil (puissance, rigidité, capacité), les conditions de

coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe), l'état de surface demandé (rugosité, contraintes résiduelles) et les coûts associés à cette opération. Étant donné le nombre de facteurs à considérer et la difficulté de les définir précisément, le choix d'un outil de coupe devient un problème très complexe. [9]

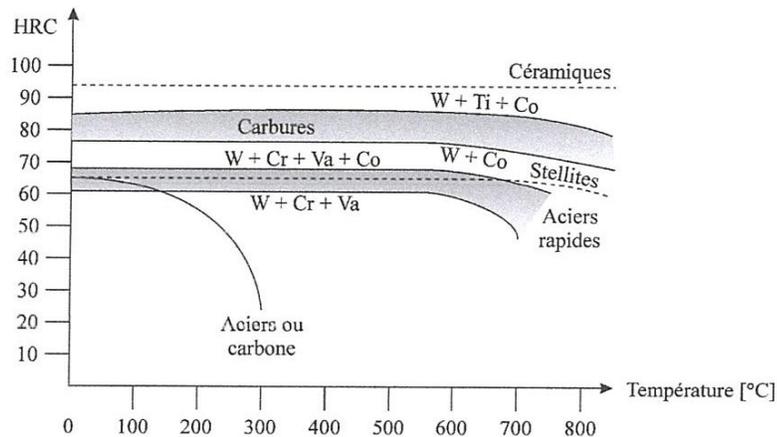


Figure (I.8): Diagramme de Saint-Clair. Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe. [9]

Plusieurs matériaux conservant cette dureté à des températures de plus en plus élevées ont été successivement introduits. Toutefois, aucun n'a totalement supplanté les précédents, restés avantageux dans certains domaines.

La (figure I-9) présente à titre indicatif les différents domaines d'utilisation des matériaux à outil. On peut observer ici que la majeure partie du domaine des applications est couverte par les carbures qui peuvent être appliqués pour une très large gamme de vitesses de coupe et d'avances. Certains matériaux comme les céramiques peuvent être appliqués seulement pour la gamme des vitesses élevées et la gamme des avances assez restreintes. La figure I-9 est représentative pour des conditions normales d'utilisation de ces outils en opération d'ébauche des aciers et des fontes [9].

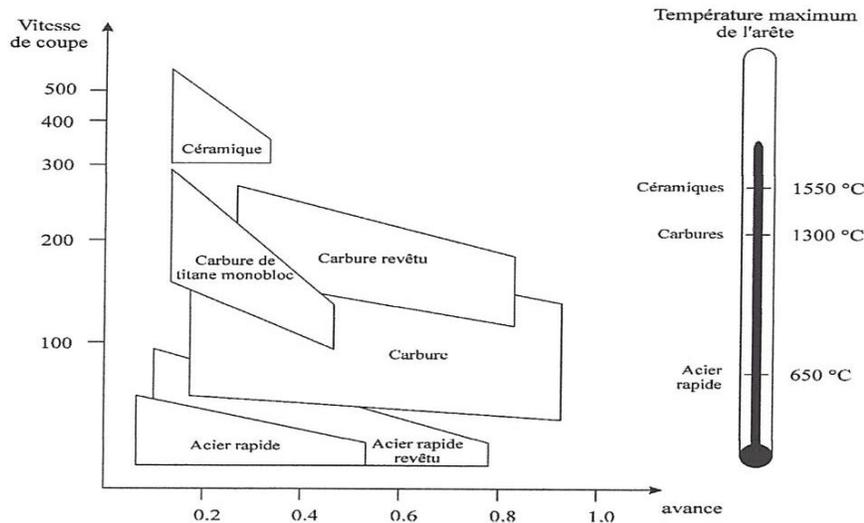


Figure (1.9) : Domaines d'utilisation des divers types de matériaux à outils de coupe

I.I.4.2. Les outils de coupe en tournage dur :

Le tournage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux Coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de Cette technologie.

Les conditions optimales d'usinage pour un couple outil-matière donné ne sont pas faciles à déterminer. Elles doivent être établies par une série de tests rigoureux dans la suite et dans un premier temps, les matériaux des outils sont présentés pour une exploitation pour le tournage des matériaux durs.[1]

I.I.4.3. Les matériaux des outils :

a) Aciers rapides (au tungstène trempé) :

Par aciers "rapides" il faut entendre "aciers à coupe rapide". On effet, ces aciers comportent généralement une quantité importante de Tungstène (W) de cobalt (K) et de chrome (C) additionnée à l'alliage de base afin d'améliorer la dureté et la résistance à l'usure (acier comportant 0.9 à 1.5% de carbone), ils sont austenisés entre 1250°C et 1300°C et subissent un revenu à une température de l'ordre de 600°C. Par suite ils peuvent travailler facilement à une température de 500°C sans que l'arête tranchante soit détériorée. Si réchauffement n'est pas à craindre jusqu'à cette température, ils

peuvent travailler plus vite, d'où leur terminologie. Bien que leurs performances soient relativement faibles, ils sont encore utilisés dans différents domaines.

Une révolution importante semble se dessiner avec l'introduction sur le marché des outils à aciers rapides revêtus d'une couche de nitrure de titane dont la dureté (HRC = 80) permet une meilleure résistance à l'usure et à la corrosion. [9]

b) 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 4000kg/cm² 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 soudage ou par des moyens mécaniques. [8]

c) Céramiques :

Les céramiques sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. [10]

Elles sont comme les carbures, des matériaux obtenus par frittage. Mais les carbures métalliques sont remplacés ici par des éléments à base d'alumine pure (Al₂O₃) c'est la solution la plus ancienne sous forme de poudre Al₂O₃ 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. [8]

d) Cermets :

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, Mo₂C, 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. [10]

I.I.4. Propriétés physiques de quelques matériaux de coupe : [10]

Propriété	Masse volumique (kg. m ⁻³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la rupture en flexion (Mpa)	Dureté Vickers (HV30)	Coefficient de dilatation linéique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Conductivité thermique à 20°C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Ténacité K _{1c} (MPa)
Aciers rapide							
HS 6-5-2	8160	217		800 à 920	12,5	19	
HS 2-9-1-S	8000	217		950 à 1100	12	19	
Carbures métalliques							
WC + CoK10	14800 à 15000	630 à 650	1500 à 1600	1600 à 1800	5,5	80	13
WC + TiC + Ta (Nb)C + Co..... P10	10000 à 11500	530 à 550	1000 à 1500	1500 à 1700	6	35	10
Céramiques							
Alumine Al ₂ O ₃	3900	400	400 à 600	2400	8	25 à 30	4 à 6
Alumine + zircone Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	4100	365	600 à 800	1700	9 à 10	15 à 25	5 à 7
Alumine + Whiskers SiC Al ₂ O ₃ +SiC	3700	390	700 à 900	1800 à 2000	7 à 8	35	6 à 9
Alumine + carbure de Ti Al ₂ O ₃ +TiC	4200	410	700 à 900	2200 à 2600	8 à 8,5	25 à 30	5 à 7
Nitrure de silicium Si ₃ N ₄	3200	310	800 à 1000	1500 à 1600	3	20 à 30	5 à 7
Cermets							
TiCN + MO ₂ C+WC+VC+TaC + NbC + (Ni,Co)	6000 à 8000	390	1500 à 2000	1500 à 1700	7 à 8	18	
Diamants							
Diamant naturel monocristal	3520	1140	(I)	> 9000	3,1	600 à 1600	3 à 4
Diamant synthétique ... PCD polycristallin(2)	3560	920	920	5000 à 8000	3,6 à 6	560	8 à 9
Nitrure de bore cubique CBN polycristallin(2)	3100	680	570	2500 à 4000	5	80 à 120	6

I.I.5. Usure des outils :

I.I.5.1. Définition :

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

La majeure partie de cet travail est consacrée à l'usure des outils de coupe. L'usure ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps. Si certaines formes d'usure sont relativement régulières, d'autres au contraire connaissent des sauts très brutaux, dans des rapports pouvant aller parfois de 1 à 100 000 ou plus, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies.

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification. [1]

I.1.5.2. Critères d'usure :

Les critères usuellement utilisés pour des outils en carbures et, notamment, ceux recommandés par la norme en vigueur concernant l'usure des outils de coupe la norme, NFE 66 505, se rangent en deux catégories décrites ci-dessous. [1]

a) Les critères directs :

Ils sont basés sur l'évolution de l'usure :

- Critère d'usure frontale, caractérisé par une largeur limite VB limite de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil,
- Critère de cratérisation, défini par la valeur limite de la profondeur du cratère KT limite, ou par la valeur limite du rapport de cratérisation KT/KM , ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation.
- Critère de "mort d'outil", utilisé principalement pour les outils en acier rapide,
- Critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesurée par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs,
- Critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées, actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers. [1]

b) Les critères indirects :

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil. Par exemple :

- Les efforts et le travail spécifique de coupe,
- La rugosité de la surface usinée,
- La température à la pointe de l'outil. [1]

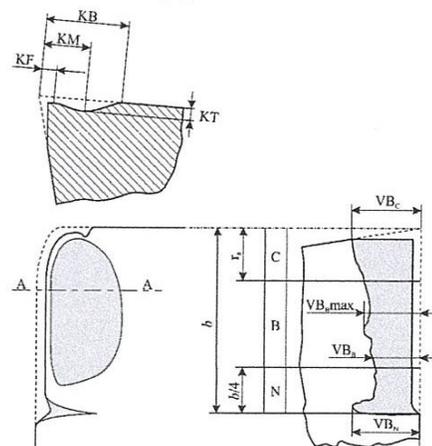


Figure (I.10) : Principaux critères d'usure des outils lors du tournage [5]

I.I.5.3. Différentes formes d'usure des outils :

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.

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 forces de coupe et par conséquent les vibrations augmentent avec le degré de l'usure en dépouille. La température de l'arête, donc les risques de déformations plastiques, croissent également avec cette usure. D'une usure en dépouille concentrée sur le rayon du bec.

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.

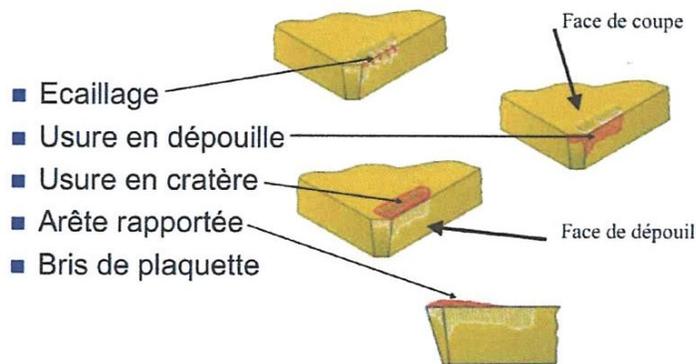


Figure (I.11) : Différentes formes d'usure des outils. [10]

I.1.5.4. Différents modes d'usure

L'usure de l'outil est un processus physico-chimique très complexe. Si l'on compare le mécanisme d'usure de l'outil et le mécanisme d'usure des éléments des machines (pièces mécaniques) en service, on remarque une très grande différence. Les conditions régnant dans l'interface outil-copeau et celles régnant entre deux surfaces de pièces en service sont complètement différentes. Par rapport à la surface de la pièce en service, la face de coupe de l'outil non seulement subit l'influence d'une température et d'une pression beaucoup plus élevées, mais aussi le contact se produit en quasi-absence de graissage. De plus, la surface des copeaux dans l'interface outil-copeau est en constant renouvellement, c'est-à-dire que la surface du copeau est beaucoup plus active chimiquement et mécaniquement (les sommets de rugosité sont d'habitude beaucoup plus vifs). Tous ces facteurs font que les conditions de frottements dans ces deux cas sont quasiment incomparables. Les facteurs provoquant l'usure de l'outil peuvent être de nature : mécanique, thermique, chimique ou abrasive. La (figure I-11) montre l'emplacement de l'influence de ces différents facteurs.

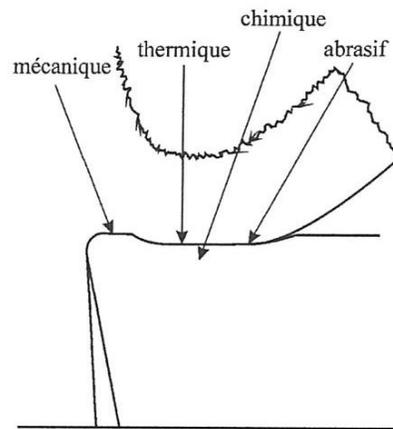


Figure (I.12) - Emplacement de l'influence des différents facteurs

En plus des composantes statiques des contraintes mécaniques, il existe de fortes composantes dynamiques dues à la formation de copeau et aux caractères intermittents de certains procédés comme le fraisage.

Les facteurs cités avant impliquent plusieurs mécanismes d'usure dans l'interface outil-copeau :

- usure par abrasion (facteurs abrasifs)
- usure par diffusion (facteurs chimiques)
- usure par oxydation (facteurs chimiques)
- usure par fatigue statique ou dynamique (facteurs mécaniques)
- usure par adhérence (facteurs mécaniques et thermiques)

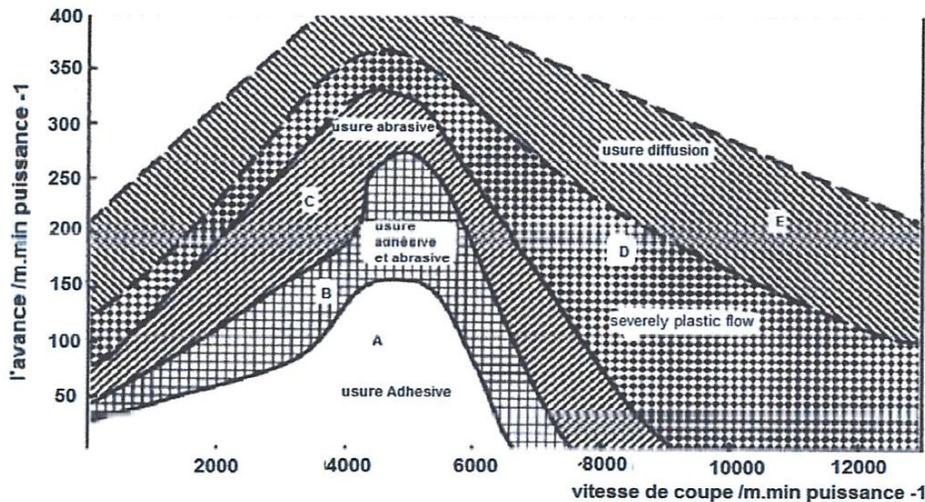


Figure (I.13) : Carte de l'usure d'un outil en acier rapide dans le cas du perçage à sec d'un alliage d'aluminium AlSi9Cu3 [6]

Pour de faibles vitesses de coupe, le mécanisme d'usure dominant est l'adhésion. Toutefois, en augmentant légèrement la vitesse, ce dernier perd de son importance et laisse la place à l'usure par abrasion. Pendant l'usinage à grande vitesse, apparaissent d'autres mécanismes tels que l'usure par diffusion, fluage et oxydation. Ceci impose, pour une vitesse de coupe donnée, le choix de différents types de matériaux à outil en fonction de leur résistance à ces différents facteurs d'usure. La (figure I-14) présente quant à elle la sensibilité de différents matériaux à outil à l'augmentation de la vitesse de coupe (et indirectement de la température) dans la zone de coupe.

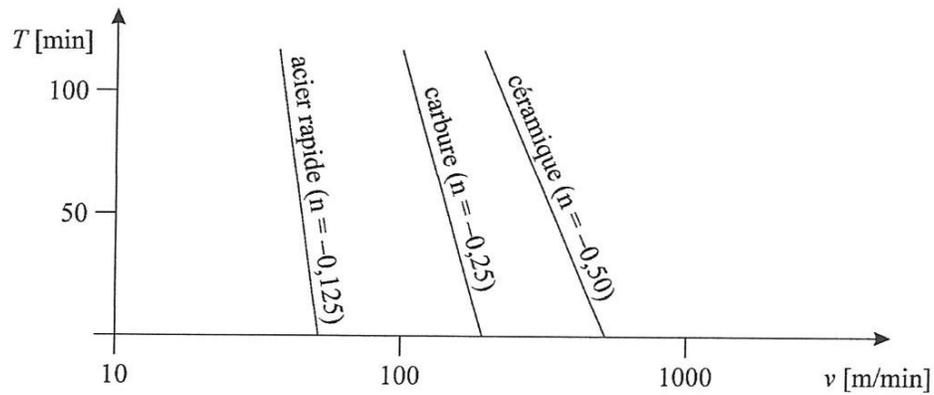


Figure (I.14) : Sensibilité des matériaux de coupe à l'augmentation de la vitesse de coupe[5]

Ce qui découle de la (figure I-14) est que l'acier rapide est un matériau très sensible à l'augmentation de la vitesse (pente très élevée). Une légère augmentation de la vitesse provoque une chute brusque de la durée utile de l'outil. Les carbures et les céramiques, quant à eux, ont une sensibilité moins élevée.

a) Usure par abrasion :

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

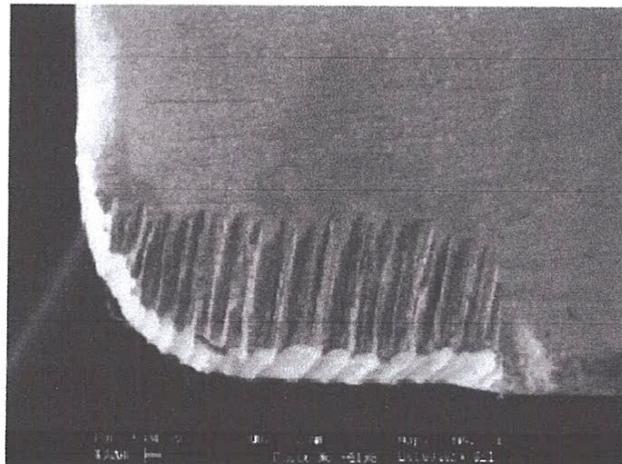


Figure (I.15): Usure par abrasion (a) sur la face de coupe après usinage [6]

b) Usure par érosion :

L'usure par érosion est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre la surface d'un solide. Ce mécanisme d'usure dépend des propriétés des matériaux en présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact et de la taille de la particule. [1]

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. En effet, ce mode d'usure peut être entretenu lorsque les surfaces en frottement ne sont en contact que sur une partie de leurs surfaces de contact apparentes, soit à cause de l'état de surface des faces d'attaque et en dépouille, soit à cause de vibrations, soit à cause de la présence d'arête rapportée.

L'usure par adhésion diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'à une vitesse critique au delà de laquelle se poursuit une usure par diffusion. [10]



Figure (I.16) : Phase d'usure par adhésion [1]

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. [1]

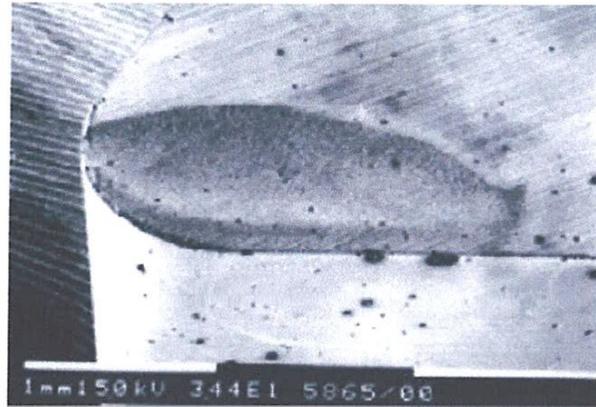


Figure (I.17) : Cratère formé par usure par diffusion sur une plaquette carbure [1]

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. [10]

Chapitre II

PROCEDURE

EXPERIMENTALE

I.II. Etat de l'art

I.II.1. Usure des carbures revêtus et non revêtus lors du tournage d'un acier [11]

Dans leur articles *Che Haron* et all. ont fixé comme objectif de décrire le comportement à l'usure de ces outils en se basant sur des données de mesure de l'usure en dépouille. Les essais d'usinage ont été réalisées avec et sans lubrification à différentes vitesses de coupe, tandis que l'avance et la profondeur de passe ont été maintenus constantes.

Le matériau de la pièce est l'acier faiblement allié 95MnCrW 1. Présenté sous forme de pièces cylindriques de $D=100$ mm et $L=33$ mm. La valeur moyenne des mesures de dureté est de 23 HRC. La composition chimique du matériau : 0,95% de C, 0,3% de Si, 1,2% de Mn, 0,5% de Cr, 0,5% de W, 0,1% de V

Les plaquettes utilisées sont de désignation ISO de VBMT 16 04 08. Elles sont fournies par kenametal, dont les nuances sont :

KC 9025 pour le carbure revêtu ($TiCN + Al_2O_3 + TiN$), et K 313 pour le carbure non revêtu. Le porte-plaquette est désigné par : SVJBR 2525 MI6.

L'usinage est réalisé avec et sans lubrification avec une avance par tour de $f=0,16$ mm/tr et une profondeur de passe $a_p=1$ mm. Basé sur la norme ISO 3685 quatre vitesses de coupe sont utilisées :

Outils en carbure revêtu : $V_c = 200, 250, 300$ et 350 m/min,

Outils en carbure non revêtus : $V_c = 75, 100, 125$ et 150 m/min.

Les Résultats trouvés sont comme suit :

- l'évolution de l'usure en dépouille des carbures revêtus et non revêtus en fonction du temps d'usinage .et il à constater que l'évolution de l'usure se fait en 3 étapes : usure initiale, suivie de l'usure normale et finalement l'usure accélérée.
- Il a été constaté que l'usure en dépouille des outils en carbure revêtues et non revêtues est régulière.
- Dans le cas des plaquettes en carbure revêtu, VB max apparaît sur l'arête au niveau du rayon, alors que pour le carbure non revêtu elle apparaît à 0,4-0,7 mm de l'arête de coupe.

• à une vitesse de coupe de 200 m/min, la progression de l'usure est relativement lente et le temps de coupe enregistrée pour atteindre la limite d'usure était significativement plus long que pour les autres vitesses. Bien que le temps de coupe était inférieur à celui réalisé par le carbure revêtu, le comportement de l'usure en dépouille des outils en carbure non revêtus à une vitesse de coupe de 75 m / min était similaire à l'utilisation des outils en carbure revêtu à 200 m/min.

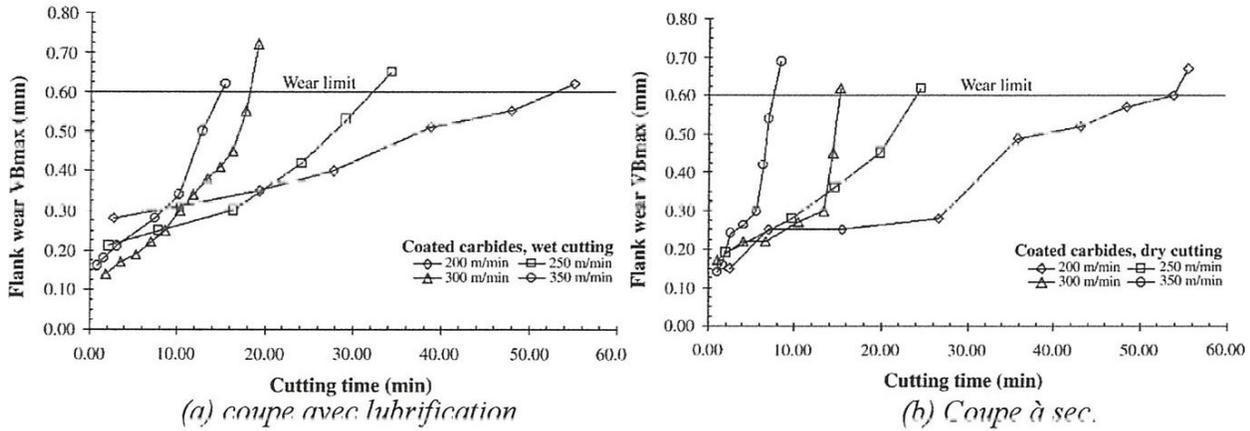


Figure (I.18): Courbes usure en dépouille pour les outils en carbure revêtus.

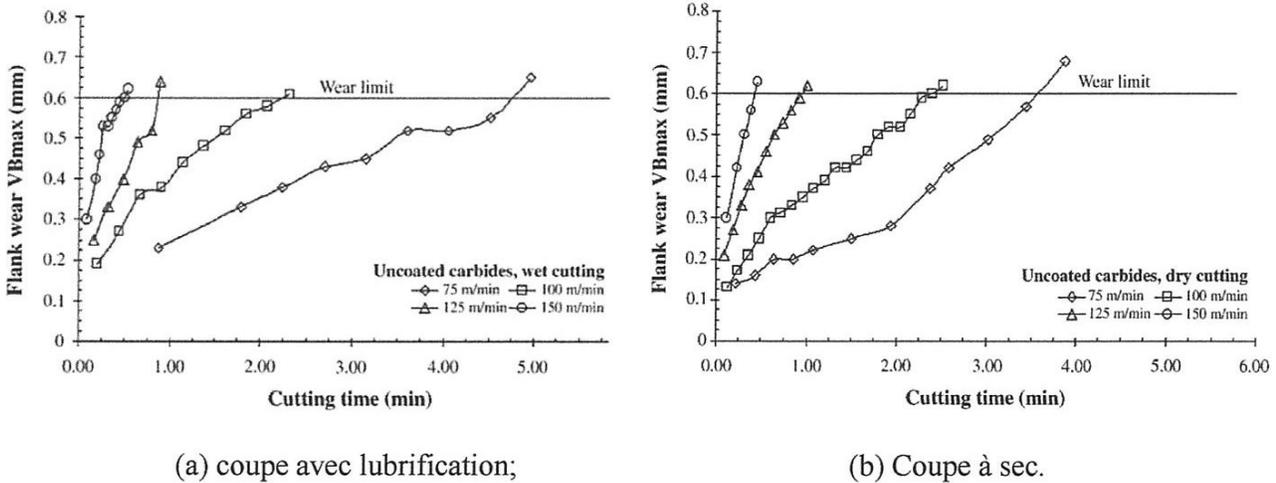


Figure (I.19) : Courbes usure en dépouille pour les outils en carbure non revêtus.

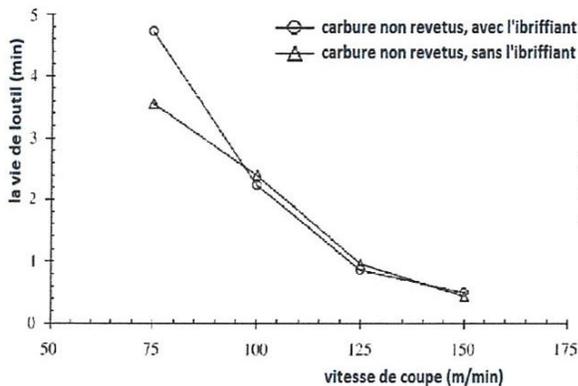
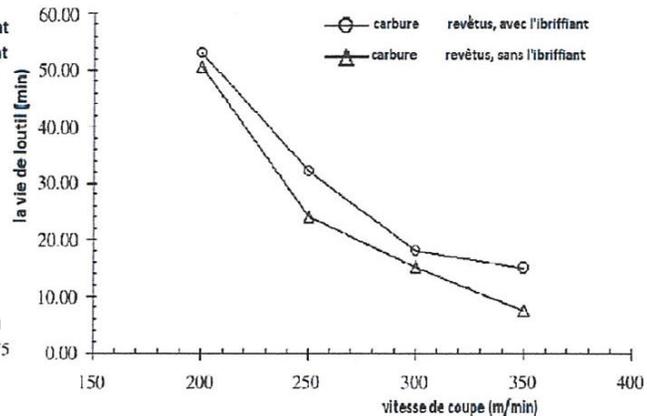


Figure (I.20) : Courbes de vie des outils pour les carbures non revêtus



Figure(I.21) : Courbes de vie des outils pour le carbure revêtus

Ils sont constatés que les outils revêtus de carbure étaient supérieurs aux outils en carbure non revêtus et leur flanc l'usure a progressé sans à-coup. En reliant les opérations d'usinage et les courbes de vie des outils obtenus en utilisant les données d'usure des flancs, le comportement de l'usure revêtus et non revêtus outils en carbure a été décrit.

I.II.2. Mécanismes d'usure et performances du revêtement d'outil TiAlN PVD lors de l'usinage de l'acier AISI 4140[12]

Dans leur article Khrais et Lin[12] on investigué l'étude de l'influence tribologique des revêtements TiAlN-PVD sur l'usure des plaquettes carbure cimenté ainsi que le comportement à l'usure des outils revêtus lors de l'usinage à sec et avec lubrification. Des essais on concerné l'usinage de barres laminées à chaud d'acier, SAE 4140 d'un diamètre $D=150$ mm, et de longueur $L=620$ mm

La composition chimique du matériau est la suivante :

Carbone 0.4%, Manganèse 0.91%, Phosphores 0.017%, Sulfure 0.02%, Silicone 0.24%, Nickel 0.10%, Tin 0.008%, Aluminum 0.030%, Vanadium 0.002%, Calcium 0.0064%, Moly 0.2%, Copper 0.12%.

Des plaquettes de carbure cimentées avec 6% de cobalt de KENAMETAL ont été employées dans les essais de chariotage, dont la désignation ISOVBMT 160408

Résultats:

•Les résultats de durée de vie d'outil revêtu par du TiAlN, avec et sans lubrification sont récapitulés dans figure 22.

•Ces résultats montrent qu'il n'y avait pas d'effet positif de la lubrification sur la durée de vie de l'outil à des vitesses de coupe élevées.

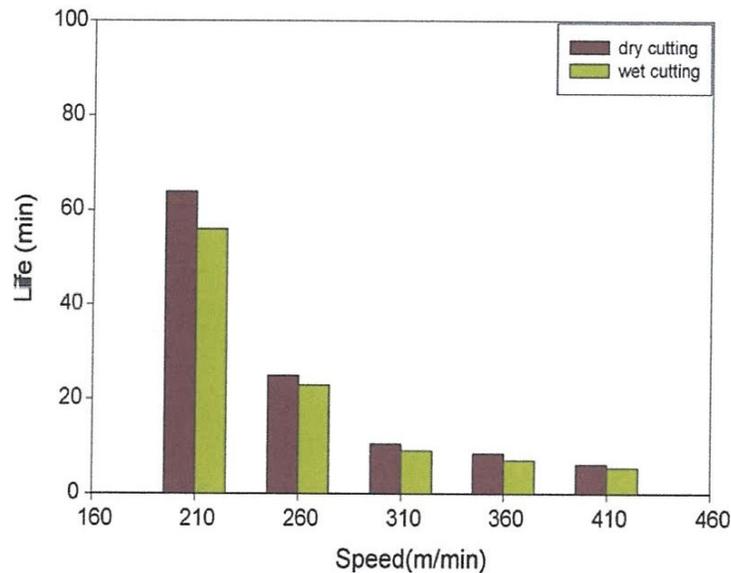


Figure (I.22) : Durée de vie d'outil à grande vitesse, avec et sans lubrification.

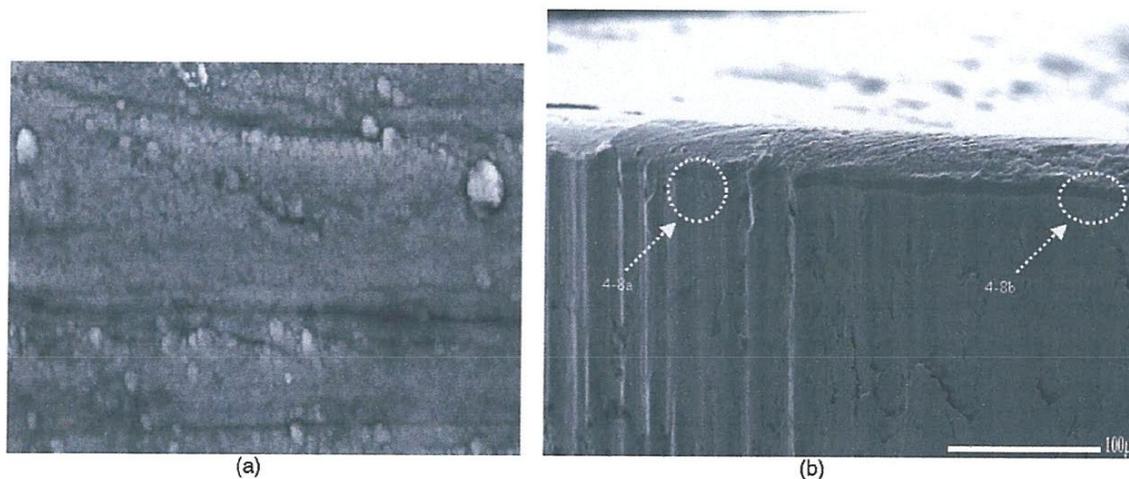


Figure (I.23) : -a- micrographie SEM à 410 m/min -b- micro fatigue à partir de Mécanismes de micro-usure lors de l'usinage à sec

Mécanisme micro-usure lors (Figure I-23) (a) et (b) ont été pris pour la vitesse de coupe de 410 m/min, ce qui a montré l'ébrèchement de bord et les micro-fissures thermiques à grande et petite échelle. La température dans la zone de contact copeau-outil (zone de cisaillement secondaire) est proportionnelle à la vitesse de coupe. Par

conséquent, à grande vitesse de coupe il résulte une température de coupe élevée. En outre, en raison de l'utilisation de la lubrification, le choc thermique a lieu au niveau du revêtement dû à sa faible dilatation thermique.

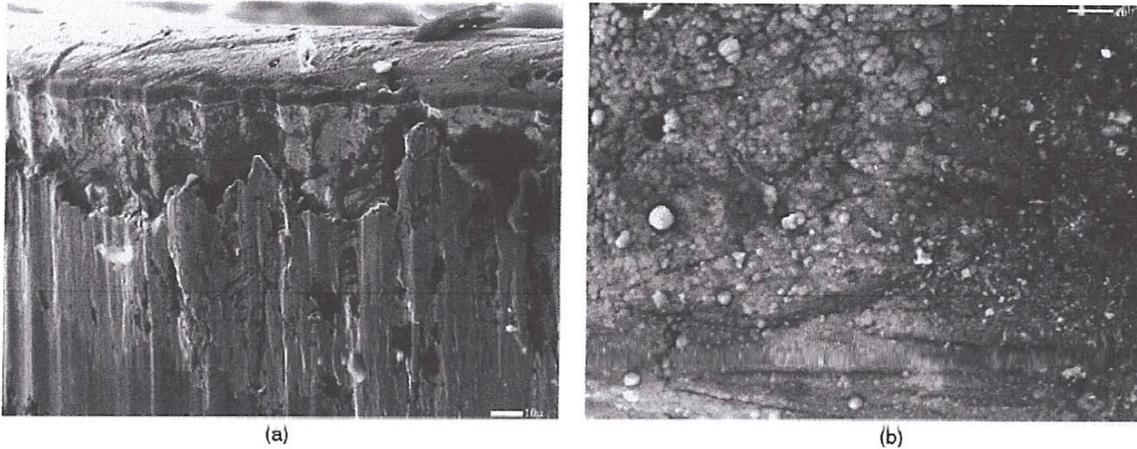


Figure (I.24) : -a- image SEM à 410 m/min, -b- image SEM qui montre des micro-fissures thermiques.

Les principales conclusions de ce travail sont résumées par :

- Les essais expérimentaux ont indiqué que la vitesse maxi pour les plaquettes en carbure revêtu de TiAlN était $V_c = 410$ m/min, puisque toute augmentation de la vitesse de coupe conduit à une mort prématurée de l'outil.
- Des Micro-abrasion et de micro-fatigue étaient le mécanisme d'usure dominant à grande vitesse de coupe (310-410 m/min) lors de l'usinage à sec.
- Le mécanisme d'usure par Microfissures thermiques était le type dominant lors de l'usinage avec lubrification, suivi par l'usure par micro-fatigue.
- L'usinage à sec est meilleur que celui avec lubrification pour les plaquettes revêtues par TiAlN à vitesse de coupe élevée (autour 200-400 m/min).
- comportements à l'usure des plaquettes testées passe par 3 périodes, usure d'usage de flanc des insertions examinées ont procédé à travers trois niveaux connus de l'évolution de l'usure.

I.II.3. Mécanismes d'usure d'un carbure revêtu (TiN) et d'un cermet non revêtu dans une application UGV [13]

J.A. Ghani, et al , ont fait une étude sur Le mécanisme de l'usure du carbure revêtu par TiN de et d'outils cermets non revêtus en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) lors du fraisage de semi-finition et finition à haute vitesse de coupe. Un microscope optique et un microscope électronique à balayage (MEB) ont permis de prendre des photographies des plaquettes après certaine longueur de coupe ainsi que le mécanisme d'usure à la fin de vie de l'outil.

Les outils utilisés sont, le carbure P10 (TiN) revêtu et le cermet P20 non revêtu. La Composition chimique de l'outil carbure par volume(%) est : WC = 82.6, Co= 16.4, TaC= 1.1 . alors que la Composition chimique d'outil cermet par volume (%) est : Ni= 6 ,Co =8.9, Wc= 8.4, TaC= 5.3, NaC= 1.7, TiC =35.4, TiN =32.1, Mo2O= 3.8, L'usinage est réalisé à sec, Il s'agit de l'usinage de l'acier à outils AISI H13 traité thermiquement à HRC50. La pièce à usiner a été préparée sous forme de parallélépipèdes (100 mm x 100 mm x 100 mm), dont la Composition chimique par poids est donnée comme suit : %C= 0.37 , Si= 0.9, Mn= 0.46, P= 0.014, S= 0.02 , Ni =0.11, Cr= 5.34, Cu= 0.4, Mo= 1.25, V =1

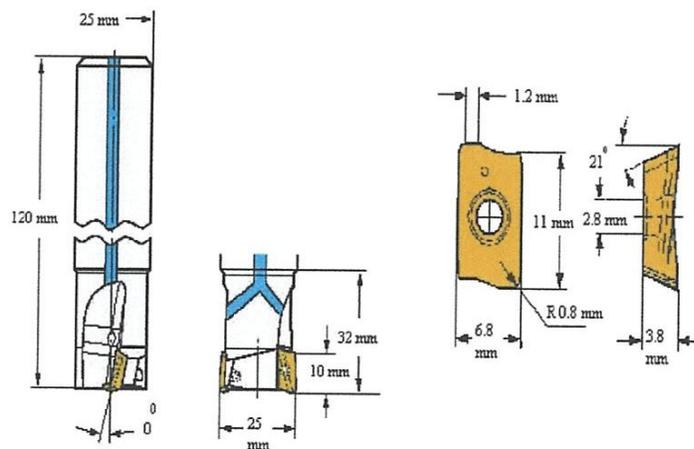
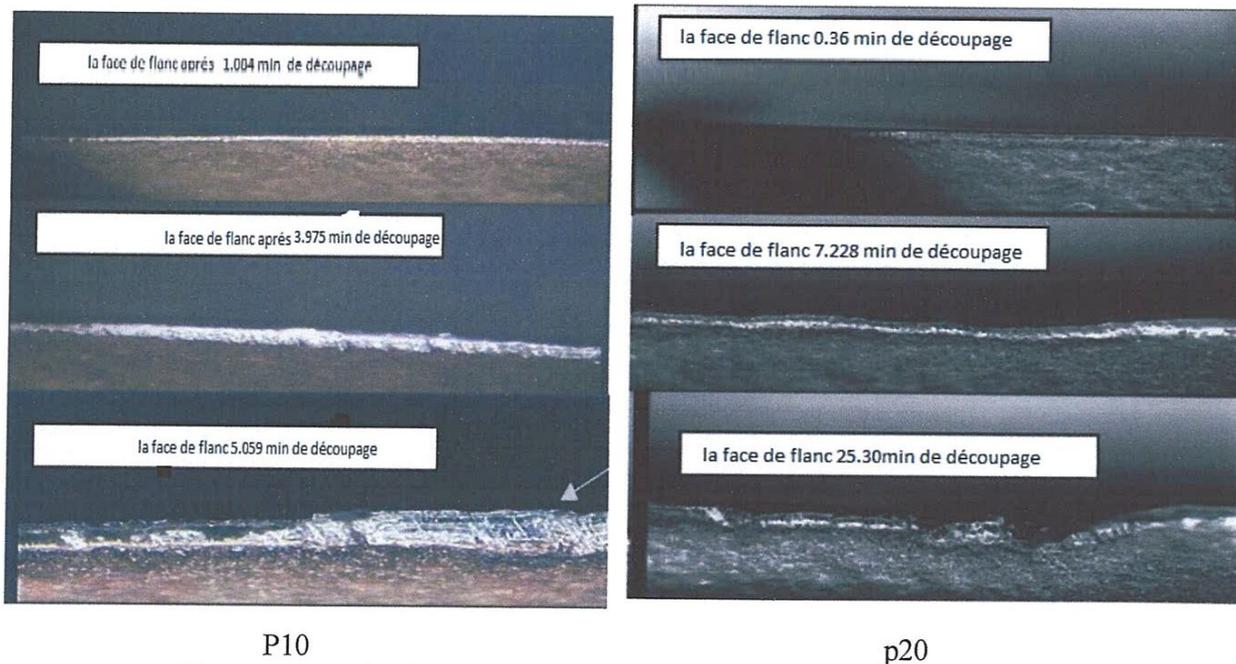


Figure (I.25) : Ensemble d'outils de coupe avec une géométrie d'insertion détaillée.

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

- Lors de l'usinage de l'acier à outil durci AISI H13, la durée de vie des outils P10 est plus grande que celle des outils P20

- Pour de faibles profondeurs de coupe et vitesses de coupe, la durée de vie de l'outil est améliorée.
- Pour les deux nuances de coupe utilisées (P10 et P20), le mécanisme d'usure est principalement contrôlé par l'usure sur la face de dépouille pour toutes les gammes de vitesse de coupe. Cependant l'effritement sur la face de coupe à grande vitesse de coupe est observé.
- un d'ébrèchement uniforme de l'arête de coupe et a été observé, dans zone de l'usure en dépouille, à basse vitesse de coupe et avance (244m/min, 0.1 mm/dent), ceci pour les deux outils testés.
- Une rupture fragile a été observée pour l'outil P10, tandis que pour l'outil P20, des ruptures fragiles et ductiles sont observées à la fois, sur l'arête de l'outil à une échelle microscopique.



P10 P20
Figure (I.26): Morphologie usure sur le face de flanc de l'essai p10 et p20.

- des traces de diffusion de certains éléments de la pièce (Fe, Mn et V), sont trouvées sur la zone usée de l'outil comme le montre l'analyse EDAX figure 27
- Un élément dur de Ti, qui a été dissout à partir du revêtement TiN lors de

l'opération de coupe, a également été trouvé dans la zone d'usure pour la plus faible vitesse de coupe et la section maximale du copeau.

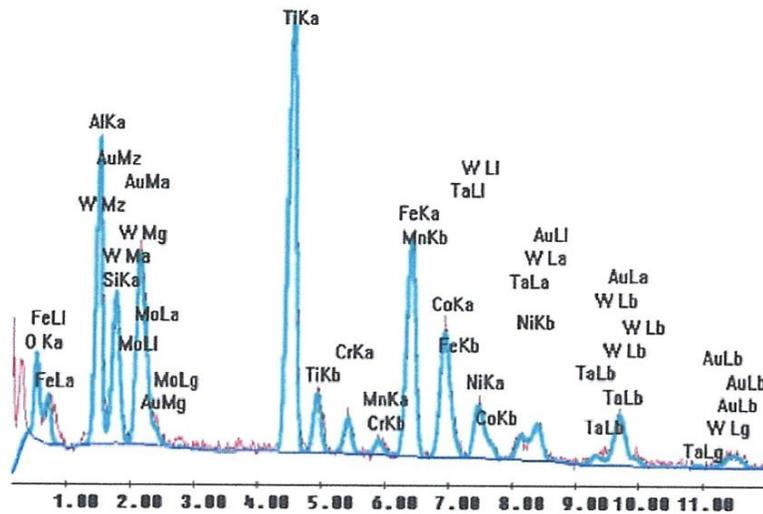


Figure (I.27) : analyse de SEM et EDAX des outils P20

I.II.4. Influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe [14]

M.A. YALLESE, L. et al. [14] ont fait une étude théorique et expérimentale sur l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) sur les efforts de coupe ainsi que l'influence de l'usure en dépouille de la partie active de l'outil sur l'évolution des efforts de coupe lors de l'usinage d'un acier à roulement trempé 100Cr6 avec un outil en nitrure de bore cubique CBN 7020.

Ils choisissent des éprouvettes rondes en acier traité de nuance 100Cr6, $D=80$ mm et de $L=250$ mm. Sa composition chimique est donnée comme suit : 1,05%C ; 0,38%Mn ; 0,21%Si ; 0,03%P ; 0,009%S ; 0,028%Cu ; 1,41%Cr ; 0,21%Ni. Un tour de marque TOS TRENCIN, modèle SN40, $P=6,6$ kW. Les plaquettes de coupe utilisées sont amovibles et de forme carrée avec inserts CBN en coin ayant la désignation SNGA 12 04 08 et la composition chimique (57%CBN+ 35%TiCN+ 8% autres). Le porte outil est de désignation PSBNR2525K12 avec une géométrie angles suivants: $\chi_r = 75^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$ et les conditions de coupe suivantes : $0,08 \leq f \leq 0,24$ mm/tr ; $0,1 \leq a_p \leq 1$ mm et $60 \leq V_c \leq 350$ m/min.

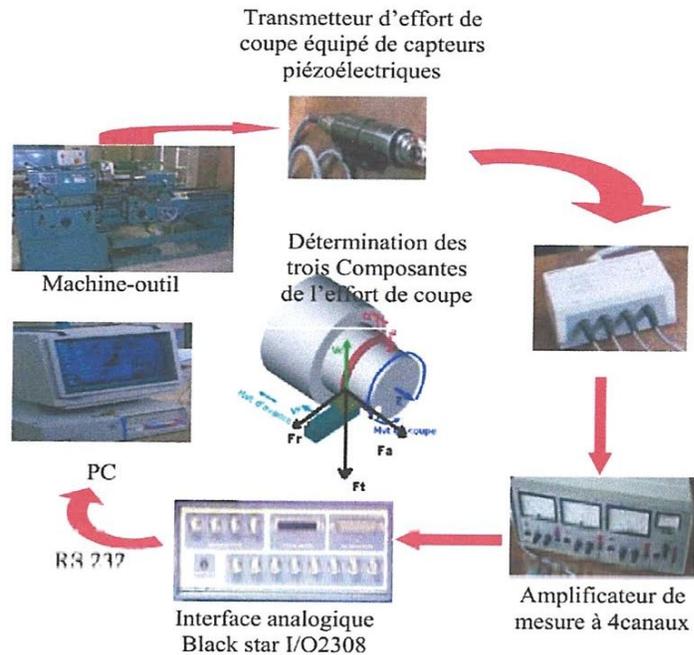


Figure (I.28): Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

a) Evolution des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe

* Pour le modèle de **l'influence de la vitesse de coupe**, que les efforts diminuent jusqu'à 180 m/min, au-delà de cette limite, ils se stabilisent légèrement. Et une augmentation de la vitesse de 180 à 280 m/min, conduit à une diminution de (11,6% ; 9,47% ; 7,18%)

* pour **Influence de l'avance**, une augmentation des efforts avec augmentation de l'avance. Et L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 mm/tr, conduit à une élévation de (Fr, Fa, Fv) successivement de (50%, 65%, 77%) .

* Pour l'influence de **la profondeur de passe**, augmentation des efforts de coupe avec l'augmentation de la profondeur de passe. Au- de la valeur de $a_p=0,4$ mm pour (Fv) et 0,6 mm pour (Fa), L'effort tangentiel et axial dépassent l'effort radial.

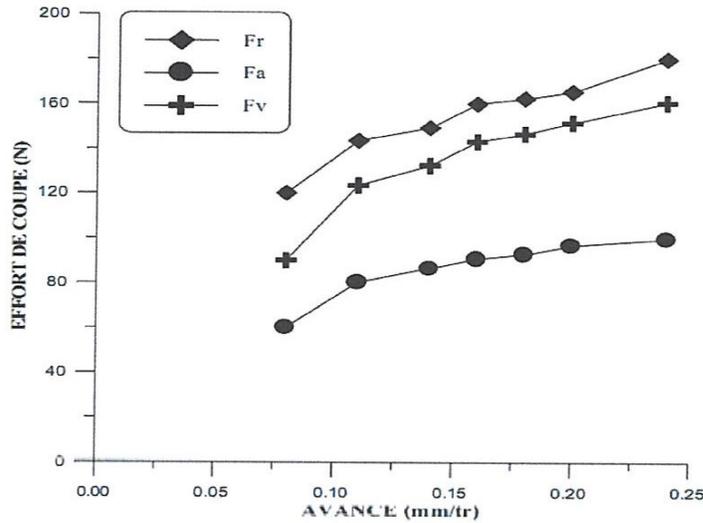


Figure (I.29) : Influence de l'avance, $V_c=120m/min$, $ap=0.2mm/tr$.

b) Evolution des efforts spécifiques en fonction des conditions de coupe

* Pour l'influence de la vitesse de coupe, l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution des pressions de coupe.

* pour l'influence de l'avance, l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution des pressions de coupe. Avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0,24 mm/tr les pressions chutent successivement de (50% ; 44,8% ; 40,5%)

* Pour l'influence de la profondeur de passe, Et une faibles valeurs de la profondeur de passe on enregistre des pressions élevées ($ap = 0,1mm$; $K_{cr} = 9000N/mm^2$).

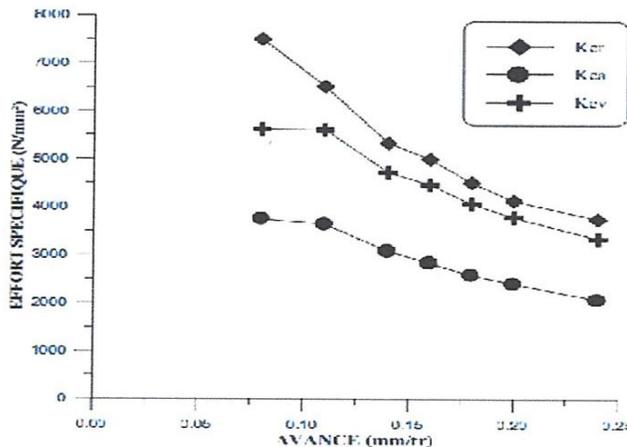


Figure (I.30): Influence de l'avance, $V_c=120m/min$; $ap=0.2mm/tr$

c) Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure :

- Avec les conditions de coupe utilisées, l'effort principal est l'effort de coupe radial suivi par l'effort axial, par contre l'effort tangentiel est moins sensible à l'augmentation de l'usure.
- Après 1 min de travail, l'usure VB atteint la valeur de 0,19 mm, on enregistre des efforts de (373,358, 234). Au-delà de l'usure admissible $[VB] = 0,3$ mm et après 2 min de travail les efforts augmentent de (44,8% ; 26,5% ; 12,4%).
- l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à la diminution des efforts de coupe, alors que l'augmentation de la section du copeau ($f \times a_p$) contribue à l'accroissement des efforts.
- la plus grande influence est réservée à la profondeur de passe suivie par l'avance, par contre la vitesse de coupe a une influence relativement faible.
- L'augmentation de l'usure du matériau de coupe induit une augmentation des efforts de coupe et cela pour les deux vitesses testées.
- Avec les conditions de coupe utilisées, l'effort principal est l'effort de coupe radial suivi par l'effort axial, par contre l'effort tangentiel est moins sensible à l'augmentation de l'usure.

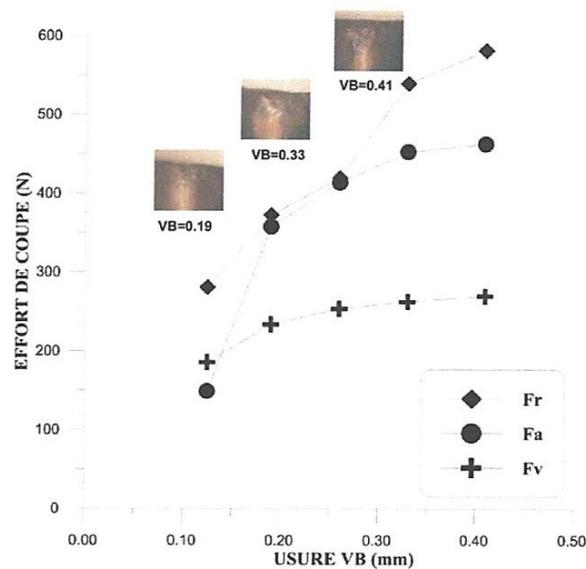


Figure (I.31) : Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure $V_c = 350$ m/min; $a_p = 0,5$ mm
 $f = 0,08$ mm/tr.

Chapitre II

PROCEDURE

EXPERIMENTALE

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter 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**

II.2. Matériels utilisés

II.2.1. Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40C, de puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure II-1).

Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont: (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min.

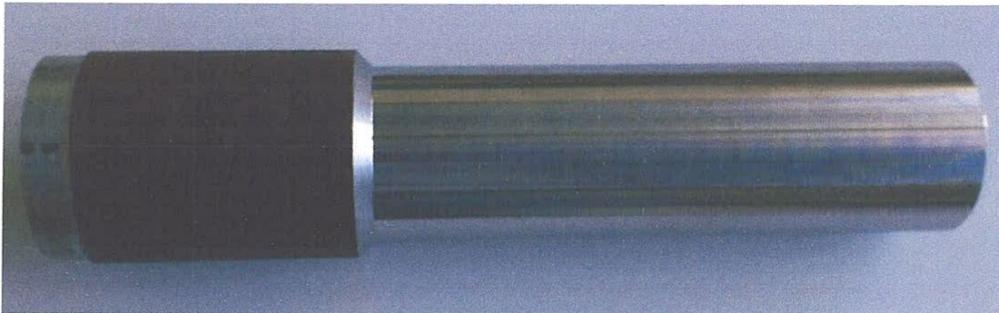
❖ Les avances disponibles sont: (0.08; 0.10; 0.11; 0.12; 0.14; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.24... 0.8) mm/tr.



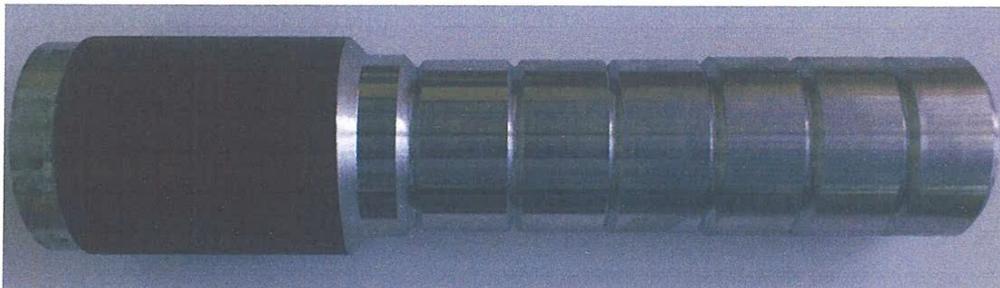
Figure (II.1): Tour parallèle modèle SN 40C

II.2.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage

C'est un acier allié sa nuance est Z40CDV5 . Cet acier offre une bonne résistance à l'abrasion tant à basse qu'à haute température et Bonne ténacité et ductilité , aptitude, uniforme, à l'usinage et au polissage, ainsi qu'une résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique, et Excellente trempabilité à cœur, et stabilité dimensionnelle en cours de trempe.



a) Epreuve utilisée pour les essais de longue durée



b) Epreuve utilisée pour les essais de courte durée

Figure (II.2): Epreuves pour différents essais

on a utilisé des éprouvettes de diamètre $\Phi = 77\text{mm}$ et de longueur $L = 400\text{mm}$ (figure II-2-a) pour les essais de longue durée (évolution de l'usure de l'outil et la rugosité en fonction du temps), et utilisé des éprouvettes qui ont les mêmes dimensions avec des paliers de 20mm de longueur (figure II-2-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

Carbone (C)	Silicium (Si)	Manganese (Mn)	Chrome (Cr)	Molybdène (MO)	Vanadium (V)
0.39	1.0	0.4	5.3	1.3	0.9

Tableau (II.1) Composition chimique de l'acier Z40CDV5.

II.2.3 Plaquettes de coupe utilisés

Les plaquettes sont amovibles de forme carrée (figure II-3), à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le (tableau II-2)

Matériaux de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
Carbure revêtu	GC 1025	PVD	TiAlN	SNMG 12 04 08-PF
	GC 3215	CVD	Ti(C,N)/Al ₂ O ₃ /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-MF
Céramique	CC 650	----	----	SNGN 120408

Tableau (II.2) : Informations relatives aux plaquettes utilisées



Figure (II.3): Plaquettes de coupe utilisées

a) Céramique CC650 :

Céramique mixte Al₂O₃. 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 à 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 micrograin à 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 à 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. $f_n \times a_p < 0,35 \text{ mm}^2$

II.2.4 Porte plaquettes

Les plaquettes utilisées dans notre étude, sont fixées mécaniquement sur un porte-outils sur lesquels sont fixées les plaquettes mécaniquement par bride (PSBNR2525K12) et par trou central CSBNR2525 M12 (figure II.4). Les portes outils ont la géométrie suivante $\chi = 75^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$; $\lambda = -6^\circ$. 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 (II.4): Porte- plaquette

II.2.5 Appareillages de mesures utilisés

II.2.5.1 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 Gage – le logiciel qui requiert moins d'un demi-jour de formation la VISUAL 250 se révèle un moyen multitâche et multiutilisateur parfait pour la mesure sans contact. (figure II-5).



Figure (II.5):VISUAL 250 pour la mesure de l'usure

II.2.5.2 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) (figure II.6).

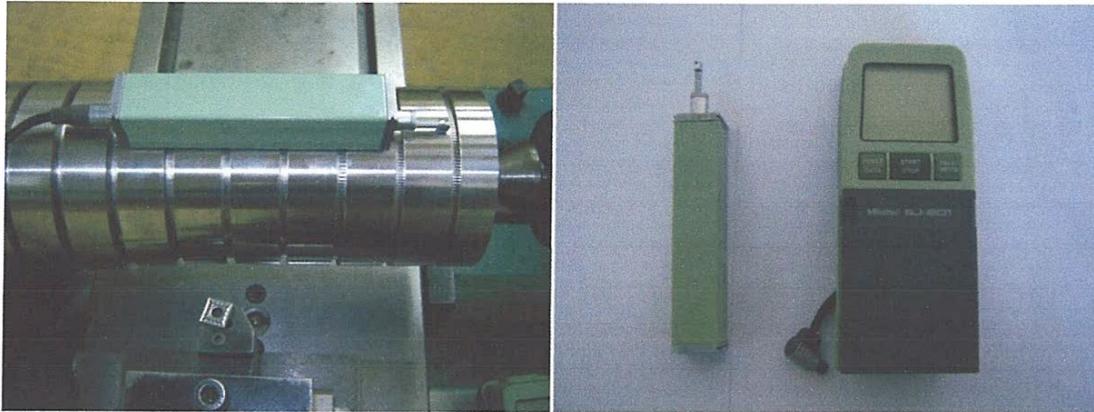


Figure (II.6): Mesure de la rugosité et Rugosimètre Surf test 201 sans démontage de la pièce.

Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs 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.

II.2.5.3 Mesure de Les 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 (figure II.7). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (figure II.8).

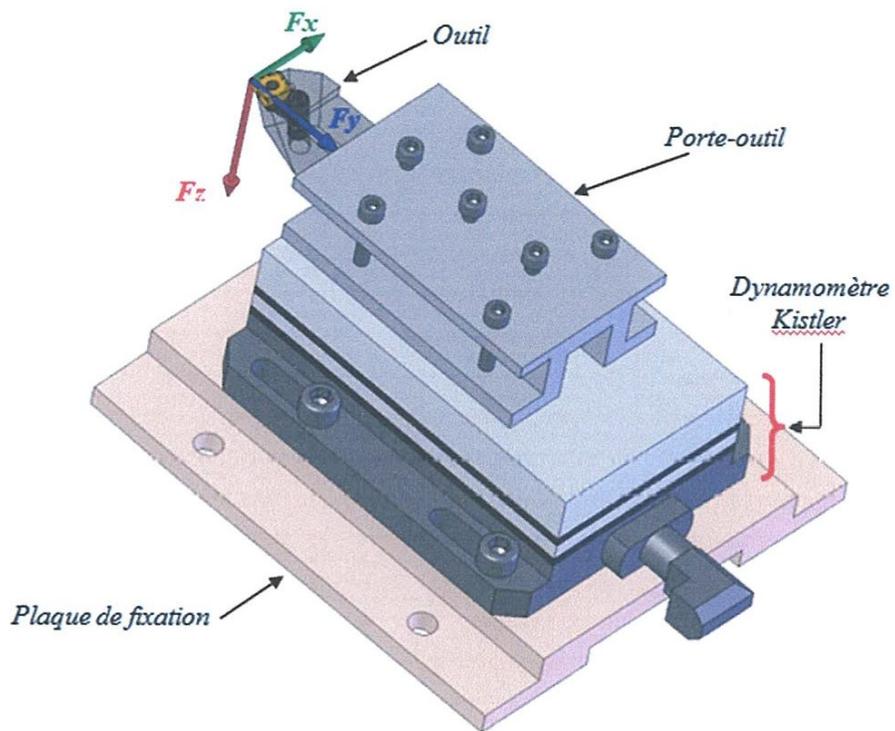


Figure (II.7): Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

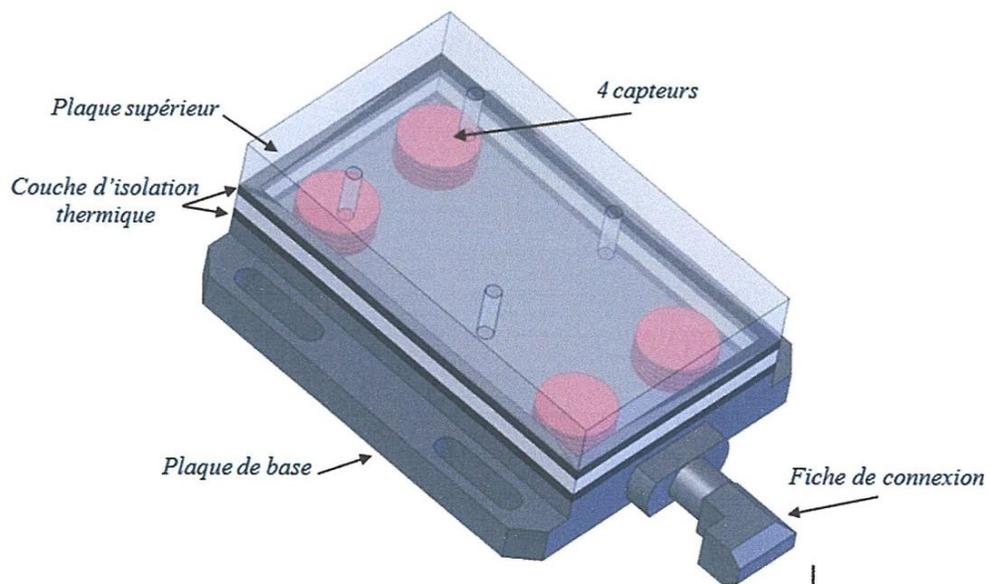


Figure (II.8): Capteur d'effort de coupe KISTLER

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties par les capteurs piézo-électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (*DYNOWARE*) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimé en trois composantes. La (figure II.9) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes des efforts de coupe (Force axiale: F_x , Force radiale: F_y et Force tangentielle: F_z).

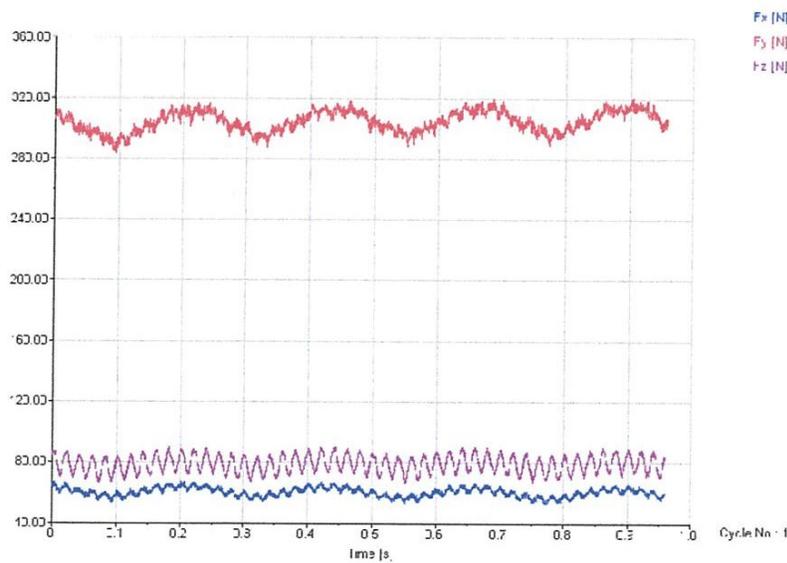


Figure (II.9): Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE

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 II.10) donne les caractéristique sont :

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée
- Large gamme de mesure
- Bonne linéarité, sans hystérésis
- Faible interaction (<1%)
- Utilisation simple (prêt 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.

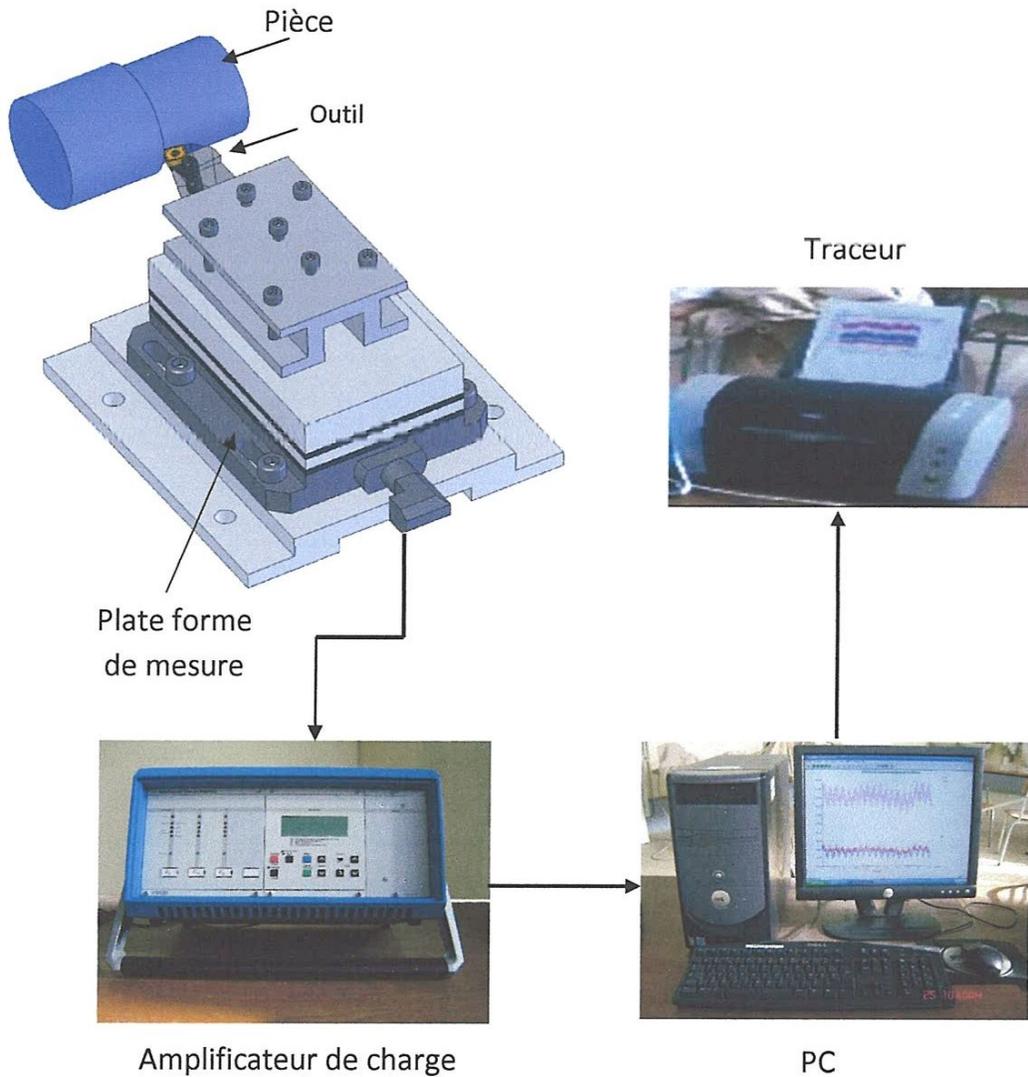


Figure (II.10): Chaîne de mesure des efforts de coupe

II.2.5.4 Autres équipements

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

II.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 (V_c , 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...). Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les (tableaux II-3 et II-4 et II-5) Tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

Les paramètres	Valeurs	Les paramètres	Valeurs
f (mm/tr)	0.08	V_c (m/min)	170 ; 340
a_p (mm)	0.2		

Tableau (II.3) : Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité (essais courte durée).

Les paramètres d'entrée		Paramètres de sortie
V_c (m/min)	115 ; 165 ; 325	<ul style="list-style-type: none"> - Critères de rugosité - Efforts de coupe - Usure VB
f (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 0.16	
T_u	5 ; 10 ; 15	

Tableau (II.4) Conditions de coupe pour les essais de la rugosité et l'effort en fonction des paramètre de coupe (essais taguchi réduit).

Les paramètres d'entrée		Paramètres de sortie
V_c (m/min)	145, 200, 280	<ul style="list-style-type: none"> - Critères de rugosité - Efforts de coupe
f (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 0.16	
a_p	0.15, 0.3, 0.45	

Tableau (II.5) Conditions de coupe pour les essais de la rugosité et l'effort en fonction des paramètre de coupe (essais taguchi complète).

II.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_r), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité,... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

II.4.1. Méthode de planification des expériences

II.4.1.1. Introduction

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe. Parmi ces derniers on peut citer : les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (r , α , β , γ , ϵ_r , 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, représentent eux les paramètres de sortie. Il est sur qu'en ce qui concerne notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous 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 puissance 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 facteurs (X_1 , X_2 , X_3 , ..., X_n) sur un paramètre Y [22], peut être obtenue en utilisant les méthodes suivantes:

- Méthode multifactorielle.
- Méthode unifactorielle.

✓ **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 :

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

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

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

Où, N : nombre d'essais

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

k : nombre de facteurs de base.

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

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 :

$$Y = C X_1^{k_1} X_2^{k_2} \dots X_n^{k_n} \dots \dots \dots (II.2)$$

Où C : est une constante tenant compte de l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation (II.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 [23].

II.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.

Chapitre III

ETUDE DES PERFORMANCES DE DIFFERENTES NUANCES DE COUPE

III.1 Introduction

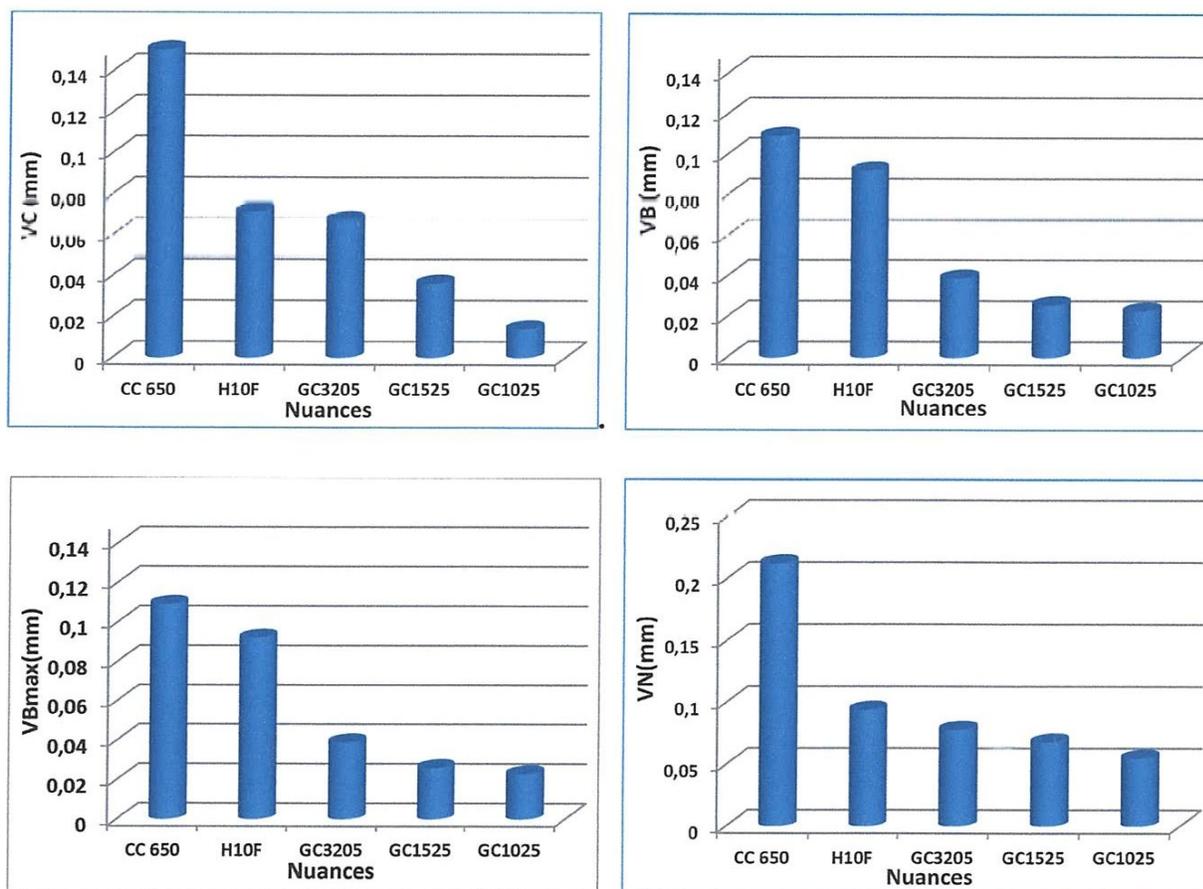
En se basant sur l'étude bibliographique dans le premier chapitre traitant la question de l'usure des outils de coupe, on constate que les principaux paramètres technologiques, tels que la précision d'usinage, la qualité de l'état de surface, le prix du revient, la productivité de travail, ... etc., sont en relation directe avec l'usure. Par conséquent, l'étude approfondie et continue de l'usure, notamment lors de l'usinage des aciers Z40CDV5 avec des matériaux à outils de hautes 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 $V_c=170\text{m/min}$. Nous exposons également les résultats de l'évolution des efforts de coupe et la dégradation de la qualité de la surface de la pièce, sous l'effet de l'usure de ces cinq matériaux à outil à $V_c=170\text{m/min}$. 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.

III.2 Performances des matériaux de coupe a $V_c=170\text{m/min}$ **a) Usure des plaquettes d'outil :**

Les (figures III-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 , 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 $V_c=170\text{m/min}$ et durant un temps d'usinage $T_u=204\text{ S}$.

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 V_B des cinq

matériaux de coupe, nous montre que le ratio (VB_{GC1525}/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.

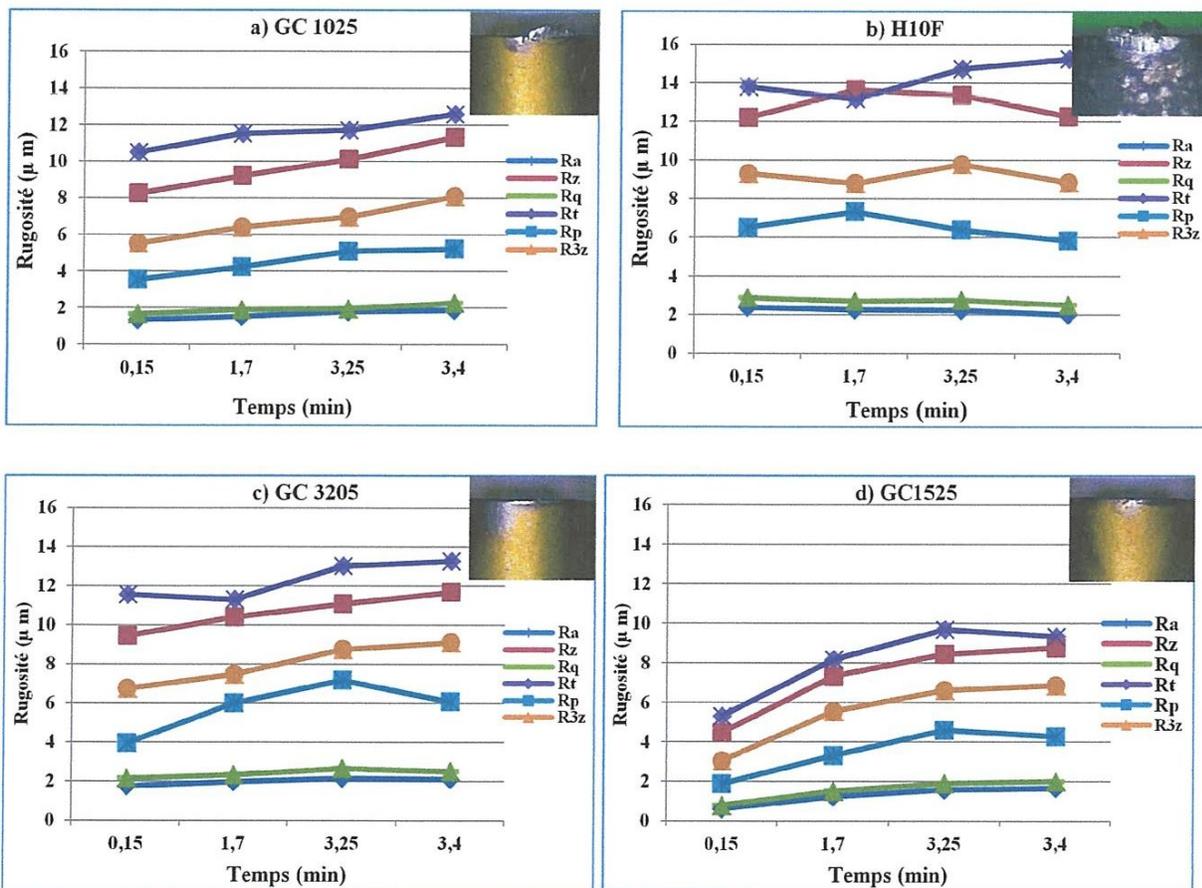


Figure(III.1): Comparaison entre l'usure des différents matériaux à $V_c=170m/min$, $T_u=3.4min$

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

Les (figures III-2) (a, b, c, d, e) présentent l'évolution des critères de rugosité (Ra, Rz , Rq, Rt, Rp, R3z) en fonction du temps d'usinage pour les outils suivants: (a) GC1025, (b) H10F, (c) GC3205, (d) CG1525 et (e) CC650 à $f=0.08mm/tr$; $ap=0.2mm$ et $Vc=170/min$. 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 III-02-a) montrent que pour un temps d'usinage variant de 0.15 à 3.4 minutes, les critères de rugosité (Ra, Rz , Rq, Rt, Rp, R3z) augmentent respectivement de (40, 38, 38, 20, 47, 47) %.



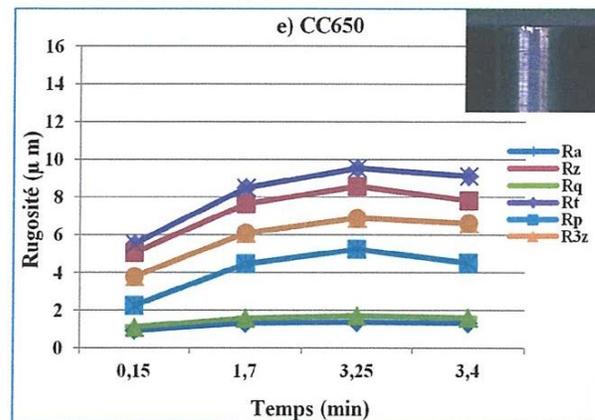


Figure (III.2): Evolution de la rugosité en fonction du temps à $V_c=170\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ pour : a) GC1025 ; b) H10F ; c) GC3205 ; d) GC1525 ; e) CC650.

Alors que pour le carbure non revêtu H10F (figure III-2-b) l'évolution des différents critères de rugosité n'est pas stable. En effet après un temps d'usinage $T_u=0.15\text{min}$, les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) atteignent respectivement les valeurs de (2.25, 13.63, 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 (III-02-c) à l'usure $VB=0.039\text{ mm}$ et après un temps d'usinage $T_u=3.4\text{min}$, les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) 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 1525 pour les mêmes conditions de coupe sont illustrées dans la (figure III-2-d). Pour un temps d'usinage de 0.15min, les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) prennent les valeurs de (0.61, 4.46, 0.79, 5.31, 1.87, 3.04) μm respectivement la rugosité augmentent de (171, 97, 154, 76, 128, 126)% a la fin d'usinage.

Alors que pour la céramique mixte CC650 (figure III-2-e) les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) augmentent de (43, 54, 44, 65, 100, 75)% respectivement à la fin d'usinage de 3.4 min.

La (figure III-3) montre une comparaison entre les trois principaux critères de la rugosité (Ra, Rz, Rt) 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 viens la 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.

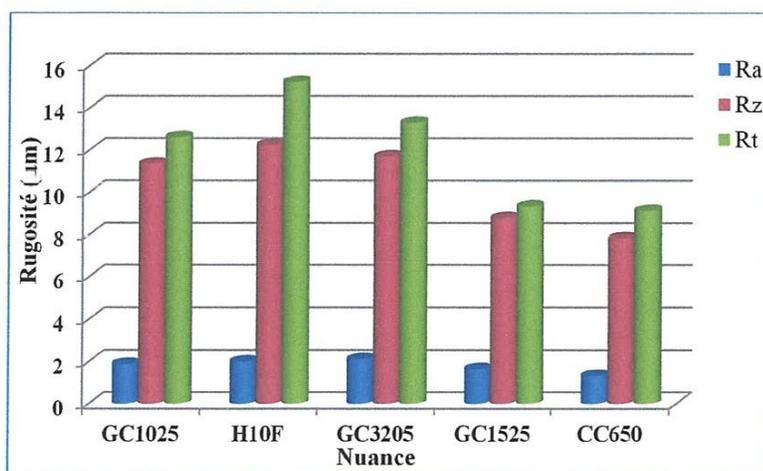


Figure (III.3): Comparaison entre les rugosités de surface mesurées par les cinq nuances à $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $ap=0.2\text{mm}$ et $Tu=3.4\text{min}$.

c) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps

La (figure III-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 et (e) CC650 à $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $ap=0.2\text{mm}$ et un temps d'usinage $Tu=3.4\text{secondes}$.

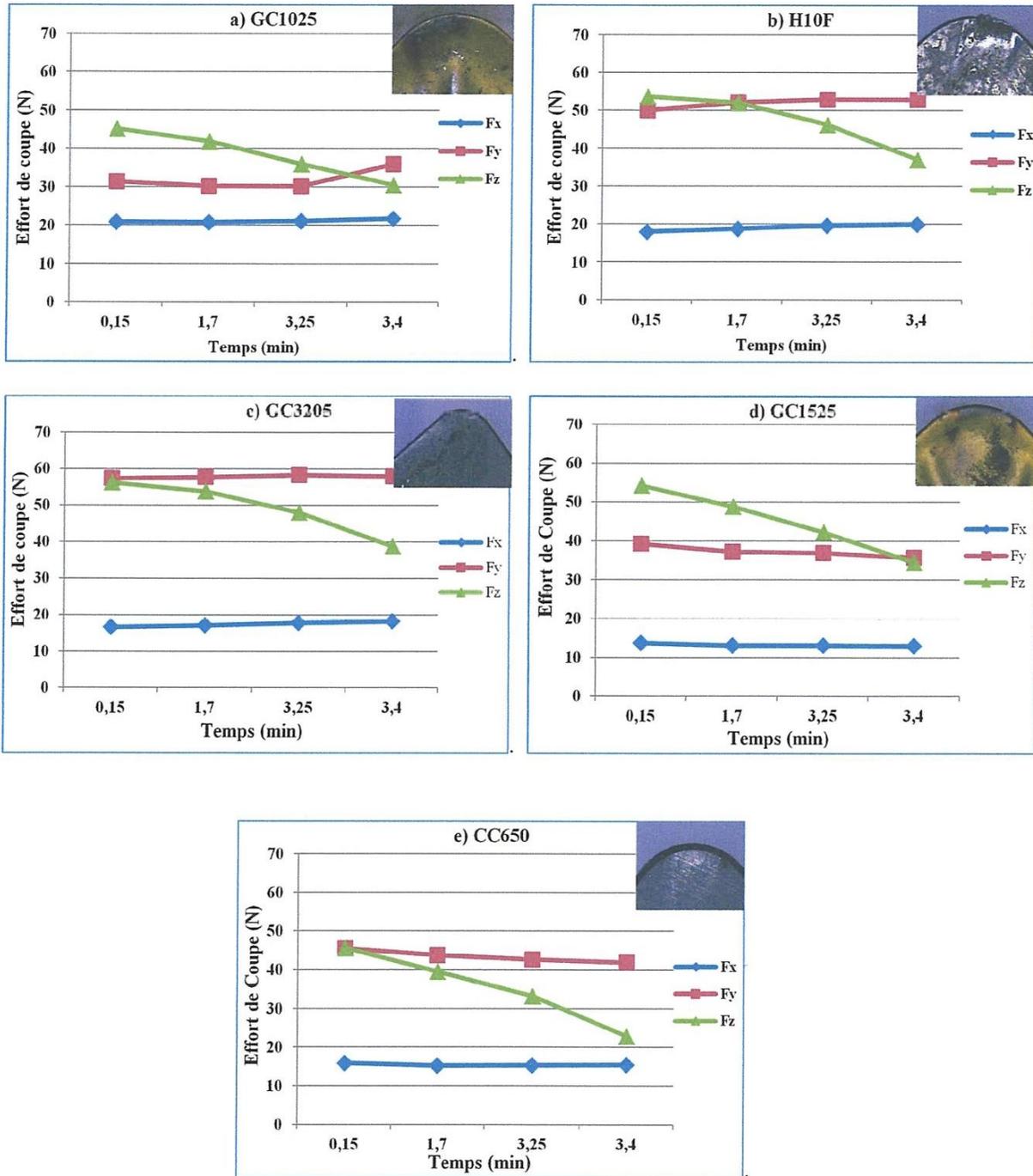


Figure (III.4) : Evolution des efforts de coupe en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe à $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=3.4\text{min}$

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 3.4 min., les composantes (F_x, F_y) augmentent respectivement de (4,26 ; 14,56)% pour le GC 1025, 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 III.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.

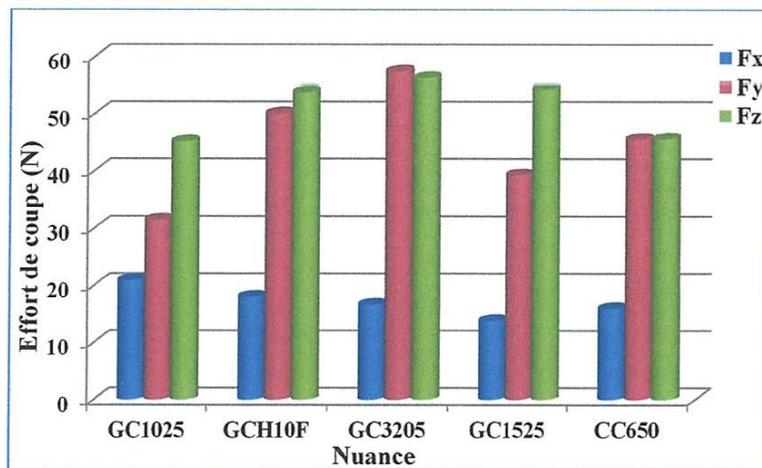


Figure (III.5) : Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés pour les cinq nuances à $V_c=170\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p 0.2\text{mm}$ et $T_u=3.4\text{min}$.

d) Evolution du coefficient 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]

f : Avance [mm/tr] ;

a_p : Profondeur de passe [mm]

La (figure III-6) montre une comparaison entre les pressions spécifique au le début d'usinage pour les cinq nuances de coupe. $K_c(N/mm^2)$ à ($V_c= 150m/mn$, $f=0.08mm/tr$, $a_p=0.2mm$) 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 comparaisant on observe que le matériau GC1025 résiste mieux aux pressions spécifiques par rapport aux autres matériaux testés.

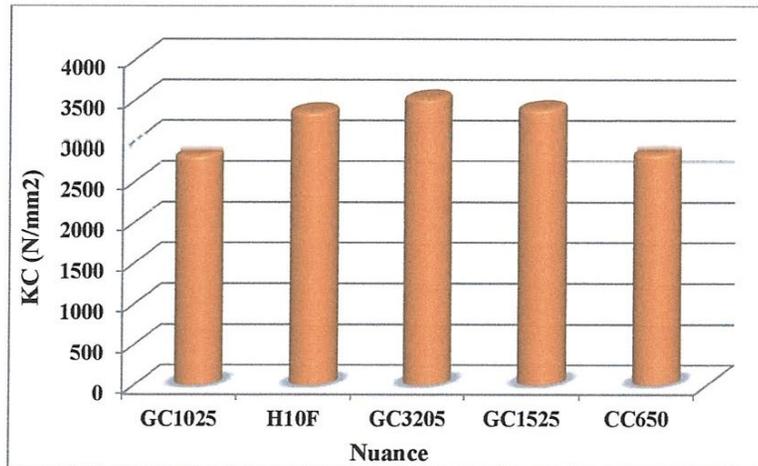


Figure (III.6) : Evolution des pressions spécifiques de coupe pour les cinq nuances de coupe à $V_c=170m/min$, $f=0.08mm/tr$, $a_p=0.2mm$ et $T_u=108sec$

III.3. Performances des matériaux de coupe à $V_c=340m/min$

a) Usure des plaquettes d'outil

Les (figures III-7) 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 , 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 à l'usure (VC, VB) par rapport aux autres nuances testées, par contre le céramique CC650 donne une bonne résistance pour l'usure VB_{\max} et le carbure 1025 pour l'usure VN. 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 à $V_c=340\text{m/min}$. La comparaison des ratios de l'usure VB des cinq matériaux de coupe, nous montre que le ratio $(VB_{GC1025} / VB_{GC1525})$ est de 0.011, le ratio $(VB_{CC650} / VB_{GC1525})$ augmente pour donner la valeur de 0.013, le ratio $(VB_{3205} / VB_{GC1525})$ prend la valeur de 0.052, en dernier lieu le ratio $(VB_{H10F} / VB_{GC1525})$ augmente jusqu'à une valeur de 1.93.

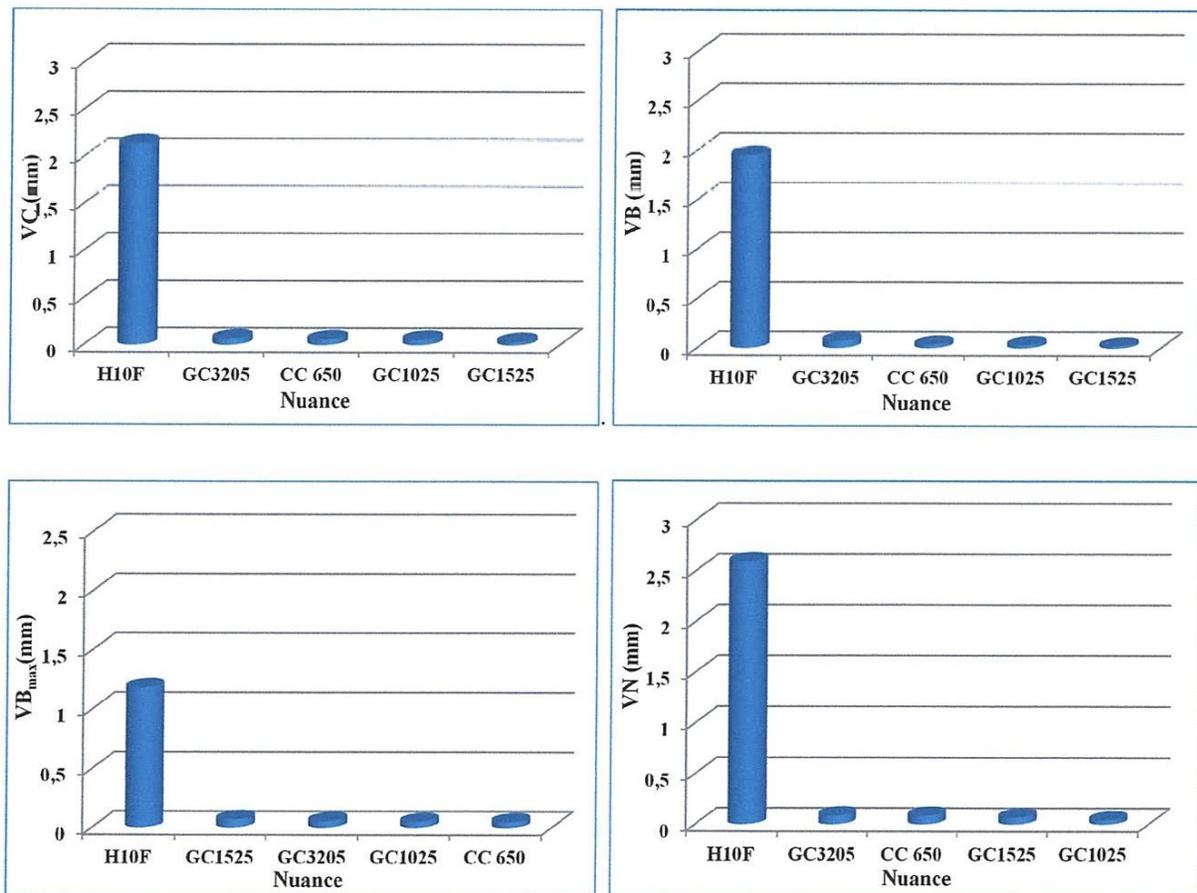


Figure (III.7): Comparaison entre l'usure des différents matériaux à $V_c=340\text{ m/min}$, $T_u=1.8\text{min}$

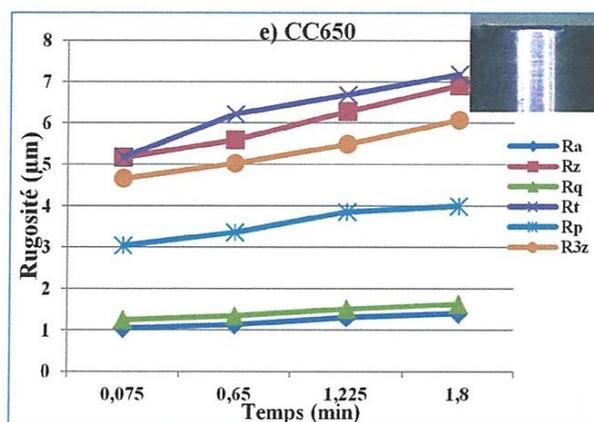


Figure (III.8): Evolution des efforts de coupe en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $T_u=1.8\text{min}$.

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 (figure III-8-a) montrent que pour un temps d'usinage variant de 0.075 à 1.8 minutes, les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) augmentent respectivement de (35.63; 39.59; 36.36; 42.06; 24.4; 43.09)%.

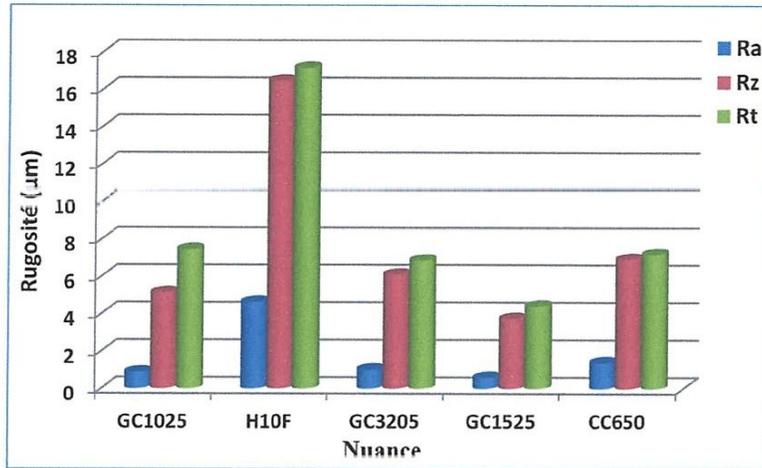
Alors que pour le carbure non revêtu H10F (figure III-8-b) après un temps d'usinage $T_u=0.75\text{min}$, les critères de rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, R3z) atteignent respectivement les valeurs de (0.89; 5.52; 1.07; 6.69; 3.16; 3.47) μm . A la fin de l'usinage, les critères de rugosité ont augmenté respectivement de (80.73; 66.46; 79.46; 60.96; 56.71; 75.93) %.

Le carbure GC3205 (figure III-8-c) à après un temps d'usinage $T_u=0.075\text{min}$, 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; 9.44; 9.50; 5.92; 4.99)%.

Lors de l'usinage avec la nuance de carbure GC1525 (figure III-8-d) 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 III-8-e) les critères de rugosité (R_a , R_z , R_q , R_t , R_p , R_{3z}) augmentent de (25; 25.32; 22.83; 27.85; 24; 23.85)% respectivement à la fin d'usinage de 1.8 min.

La (figure III-9) montre une comparaison des trois critères de la rugosité de surface (R_a , R_t et R_z) entre les cinq matériaux de coupe testés pour un temps d'usinage de 1.8min.



Figure(III.9) : Comparaison des rugosités de surface pour les cinq nuances à $V_c=340m/min$, $f=0.08mm/tr$; ap 0.2mm et $T_u=108s$.

L'analyse des résultats montre que le GC1525 donne des rugosités de surface minimales suivie de la nuance de carbure GC1025, puis vient 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 III-10) (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 et (e) CC650 à $V_c=340m/min$, $f=0.08mm/tr$, $ap=0.2mm$ et un temps d'usinage $T_u=1.8$ minute.

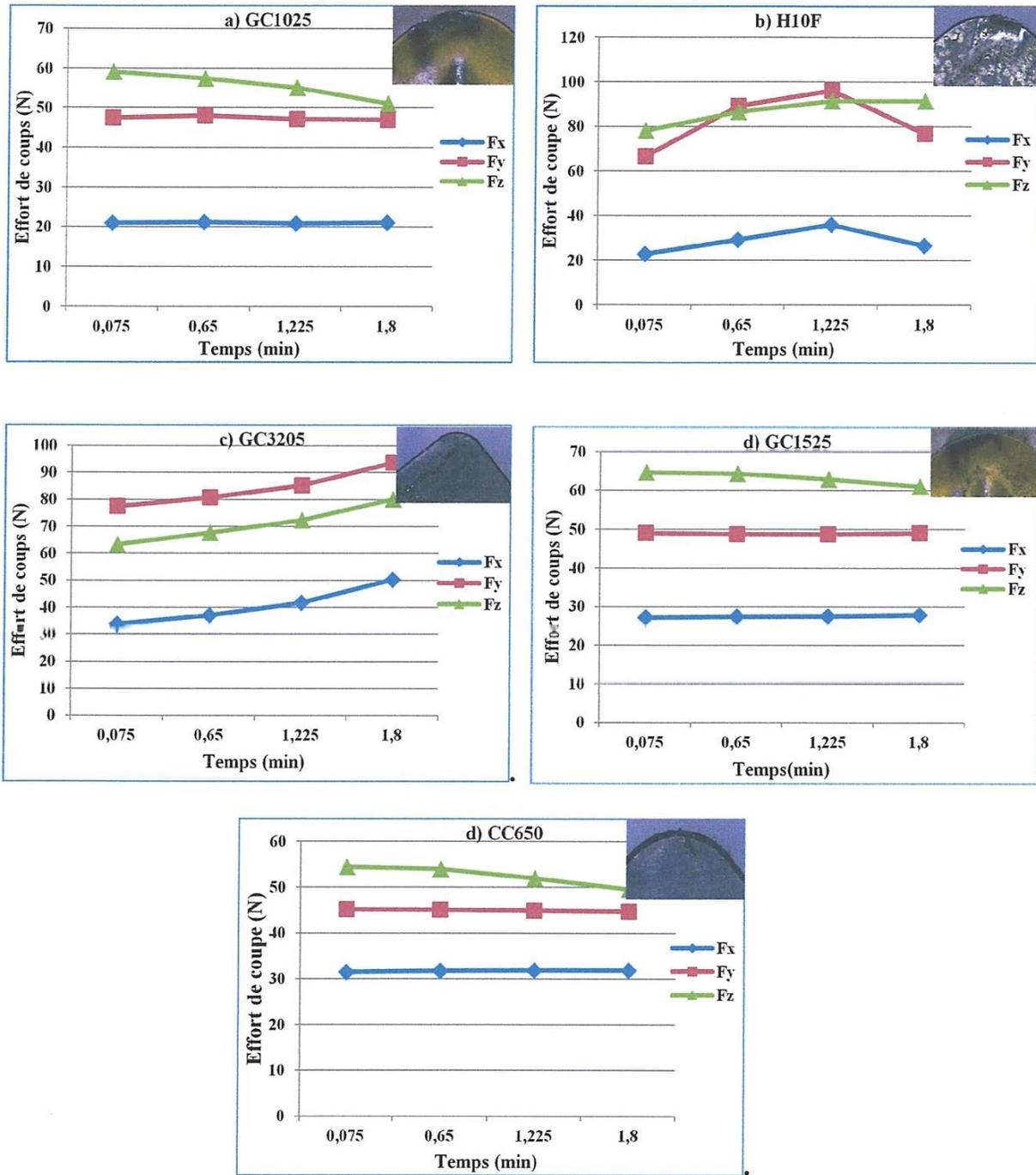


Figure (III.10): Evolution des efforts de coupe en fonction du temps à $V_c=340\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ pour : a) GC1025 ; b) H10F ; c) GC3205 ; d) GC1525 ; e) CC650.

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 0.75 à 1.8 minute, les composantes (F_x , F_y) augmente 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 diminuer 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 III-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 CC1025 donne un effort radial faible par rapport aux autres nuances testées suivi le carbure GC1025.

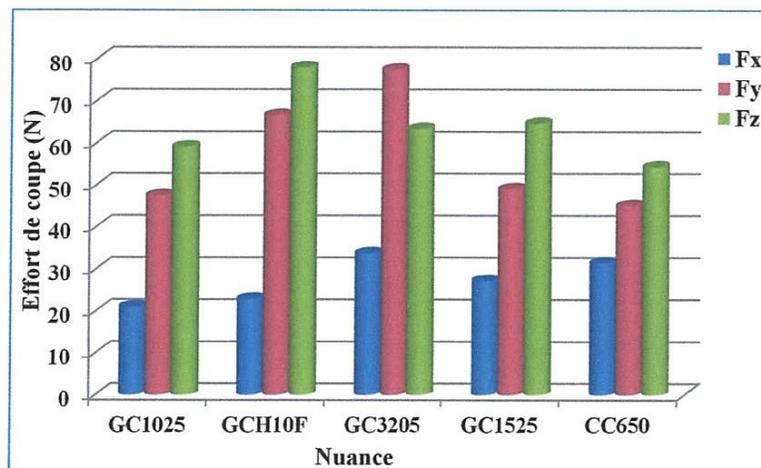


Figure (III.11) : Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés pour les cinq nuances à $V_c=340\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p 0.2\text{mm}$ et $T_u=1.8\text{minute}$.

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 obtenu par la formule suivante :

$$Kc = \frac{Fz}{f \cdot ap}$$

La (figure III-12) montre une comparaison entre les pressions spécifique au début d'usinage pour les cinq nuances de coupe. $Kc(N/mm^2)$ à ($Vc= 340m/mn$, $f=0.08mm/tr$, $ap=0.2mm$) sont de l'ordre de $3693,75N/mm^2$ pour le GC1025, $4874,375N/mm^2$ pour H10F, $3961,25N/mm^2$ pour GC3205, $4040,625N/mm^2$ pour GC1525 et $3400 N/mm^2$ pour CC650.

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

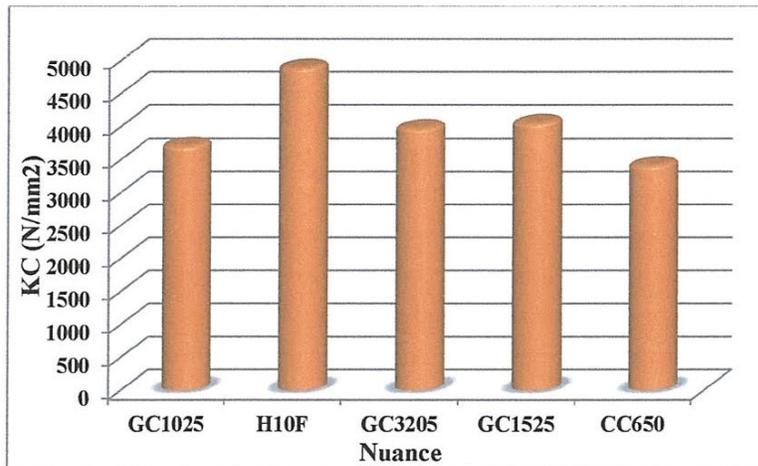


Figure (III.12) : Evolution de les pressions spécifiques de coupe pour les cinq nuances de coupe à

$Vc=340m/min$, $f=0.08mm/tr$, $ap=0.2mm$ et $Tu=1.8min$

Conclusion

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.

Chapitre IV

ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR LA RUGOSITE ET LES EFFORTS DE COUPE

IV.1 Introduction

Dans l'industrie moderne, le produit fini impose plusieurs critères résumés dans le terme (intégrité des surfaces) et d'autres critères concernent l'outil de coupe utilisé, représentés par la productivité maximale, l'usure minimale et les efforts de coupe faibles. Cette partie est consacrée à la détermination des modèles mathématiques représentatifs des différents phénomènes étudiés lors de l'usinage de l'acier Z40CDV5. La nuance de coupe retenue pour la suite des essais a été choisie pour les performances qu'elle présente et son coût relativement bas, il s'agit en l'occurrence de la nuance de carbure non revêtu GC1025.

Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p , et T_u) et les paramètres technologiques étudiés (les efforts de coupe, la rugosité et l'usure en dépouille V_B ... etc.). Vu que la prise en compte du facteur temps d'usinage (T_u) mène à la réalisation d'essais qui consomment beaucoup de temps et de matière, nous avons opté pour la réalisation d'une première série d'essais avec un plan de taguchi réduit, en effet 9 essais seulement permettent d'étudier l'influence de trois facteurs à trois niveaux (Tableau II-4) à savoir (V_c , f et T_u) sur les critères de rugosité et les composantes de l'effort de coupe. Une deuxième série d'essais a été réalisée avec un plan de taguchi complet (27 essais) pour étudier l'influence des éléments (V_c , f et a_p) sur les critères de rugosité et les composantes de l'effort de coupe (Tableau II-5), les résultats obtenus ont permis non seulement l'écriture des différents modèles mathématiques mais aussi ils ont permis de réaliser une étude d'analyse de variance ANOVA.

IV.2 Evolution de la rugosité, des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage (9 essais)

Dans le but d'élaborer des modèles statistiques de la rugosité de surface et des efforts de coupe et de l'usure en dépouille en fonction des paramètres du régime de coupe, nous avons réalisé une série d'expériences composées de 9 essais (plan taguchi réduit). Les essais sont réalisés par le nuances carbure revêtu GC1025.

Les résultats de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe et l'usure en dépouille pour le carbure revêtu GC1025 sont mentionnés dans le (tableau IV-1).

Ordre Essai	Vc	f	T	Ra	Rz	Rt	Fx	Fy	Fz	VB
1	115	0.08	5	2.76	14.68	17.92	11.22	26.14	43.29	0.061
2	115	0.12	10	2.81	15.44	17.43	18.22	45.22	70.89	0.055
3	115	0.16	15	3.39	18.83	21.57	21.19	51.71	78.42	0.060
4	165	0.08	10	2.04	11.11	2.8	10.13	39.59	40.98	0.078
5	165	0.12	15	2.42	12.9	14.47	10.45	38.41	58.15	0.068
6	165	0.16	5	2.17	11.94	13.44	25.01	55.04	91.67	0.050
7	325	0.08	15	1.41	6.5	6.88	25	42.93	44.49	0.076
8	325	0.12	5	1.39	6.93	7.29	21.29	43.1	69.6	0.058
9	325	0.16	10	1.87	9.88	10.64	21.29	61.2	81.5	0.068

Tableau (IV.1): Résultats de la rugosité, des efforts de coupe et de l'usure, cas du plan de taguchi réduit.

IV.2.1 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Ra

Le (tableau IV-2) montre les coefficients de régression estimés pour Ra et les valeurs de la probabilité P qui indique la signification des facteurs et des interactions.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,9672	0,66912	7,42346	0,018
VC	-0,0052	0,00285	-1,81845	0,211
f	-11,1685	4,75902	-2,34681	0,143
Tu	-0,3190	0,09116	-3,50001	0,073
VC*f	-0,0228	0,02130	-1,07174	0,396
VC*Tu	0,0003	0,00017	1,99959	0,184
f*Tu	2,2701	0,53096	4,27555	0,051

Tableau (IV.2) : Analyse de régression de Ra

a) Modèle généralisé

Le (modèle IV-1) qui décrit la variation de Ra en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$Ra = 4,96715 - 0,00517792 VC - 11,1685 f - 0,319049 Tu - 0,0228293 VC*f + 0,000340747 VC*Tu + 2,27014 f*Tu \dots \dots \dots (IV-1)$$

$R^2 = 98,90\%$

b) Effets principaux pour Ra

La (figure IV-1) montre le graphique les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage sur le critère de rugosité Ra.

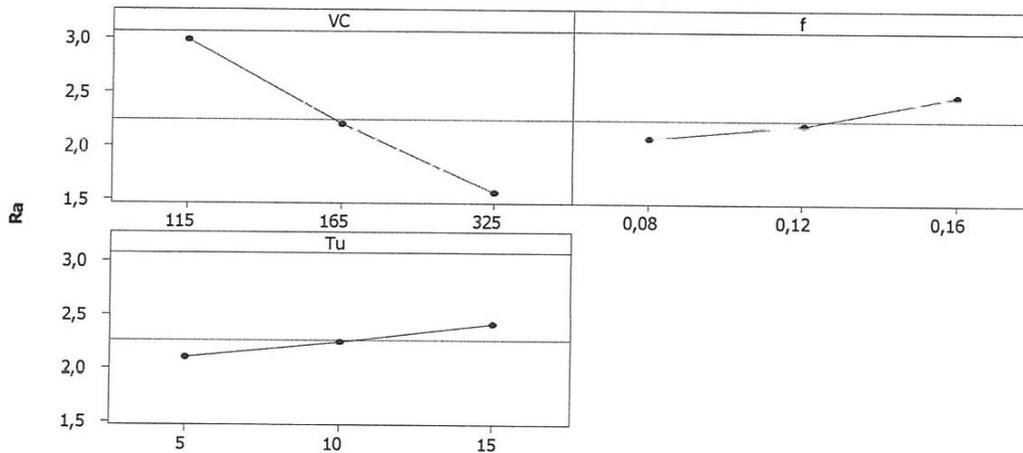


Figure (IV.1) : Graphique des effets principaux pour Ra

La (figureIV-1) montre que seule la vitesse de coupe a un effet significatif sur le critère de rugosité Ra. En effet, on remarque que la pente du paramètre Vc est plus grande par rapport à la pente de l'avance et celle du temps d'usinage.

Le calcul des effets principaux permet aussi de déterminer le modèle puissance de Ra :

$$Ra = e^{4,323} \cdot VC^{-0,618} \cdot f^{0,256} \cdot Tu^{0,102} \dots \dots \dots (IV-2)$$

Avec $R^2=0,94$

L'analyse des exposants du (modèle IV-2) confirme que l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à la diminution du critère de rugosité Ra, puisque l'exposant de Vc dans le modèle est négatif. L'augmentation de l'avance et du temps d'usinage mène à une détérioration de l'état de surface et que le facteur Vc possède la plus grande influence sur le paramètre Ra.

c) Matrice de diagrammes d'interactions pour Ra

On utilise la matrice de diagrammes d'interactions pour visualiser l'effet des interactions sur la réponse. La (figure IV-2) montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Ra en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage.

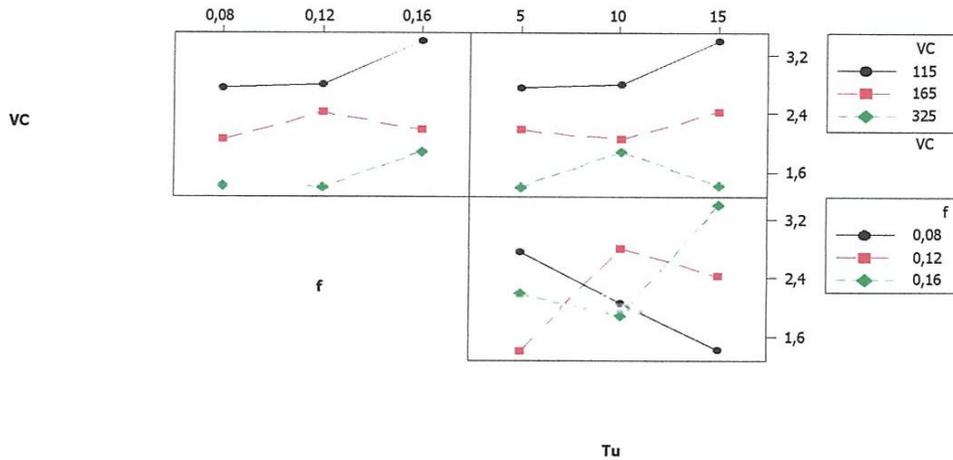


Figure (IV.2) : Matrice de diagrammes d'interactions pour Ra

On a remarqué que pour les trois interactions $Vc*f$, $Vc*Tu$ et $f*Tu$ les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction certains entre eux.

d) Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité Ra en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la (figure IV-3). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur le critère de rugosité Ra.

IV.2.2 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rz

Le (tableau IV-3) montre les coefficients de régression estimés pour Rz et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	26,4441	3,8439	6,87947	0,020
VC	-0,0331	0,0164	-2,02621	0,180
f	-56,1638	27,3395	-2,05431	0,176
Tu	-1,6061	0,5237	-3,06695	0,092
VC*f	-0,0924	0,1224	-0,75525	0,529
VC*Tu	0,0016	0,0010	1,58748	0,253
f*Tu	11,8053	3,0502	3,87028	0,061

Tableau (IV.3) : Analyse de régression de Rz

a) Modèle généralisé

Le (modèle IV-3) qui décrit la variation de Rz en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$Rz = 26,4441 - 0,0331446 VC - 56,1638 f - 1,60608 Tu - 0,09242 VC*f + 0,00155408 VC*Tu + 11,8053 f*Tu \dots \dots \dots (IV-3)$$

$$R^2 = 98,99\%$$

b) Effets principaux pour Rz

La (figure IV-4) montre le graphique les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage sur le critère de rugosité Rz.

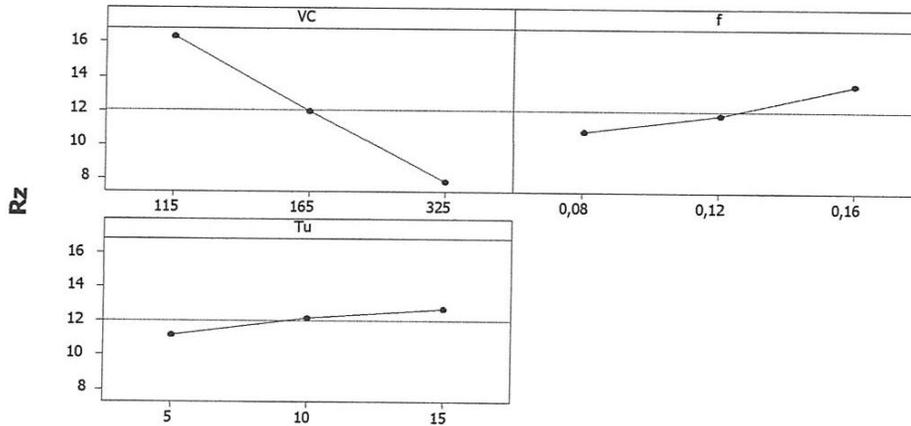


Figure (IV.4): Graphique des effets principaux pour Rz

La (figure IV-4) montre que seule la vitesse de coupe a un effet significatif sur le critère de rugosité Rz. En effet, on remarque que la pente du paramètre Vc est plus grande par rapport à la pente de la vitesse de l'avance et celle du temps de l'usinage.

Le calcul des effets principaux permet aussi de déterminer le modèle puissance de Rz:

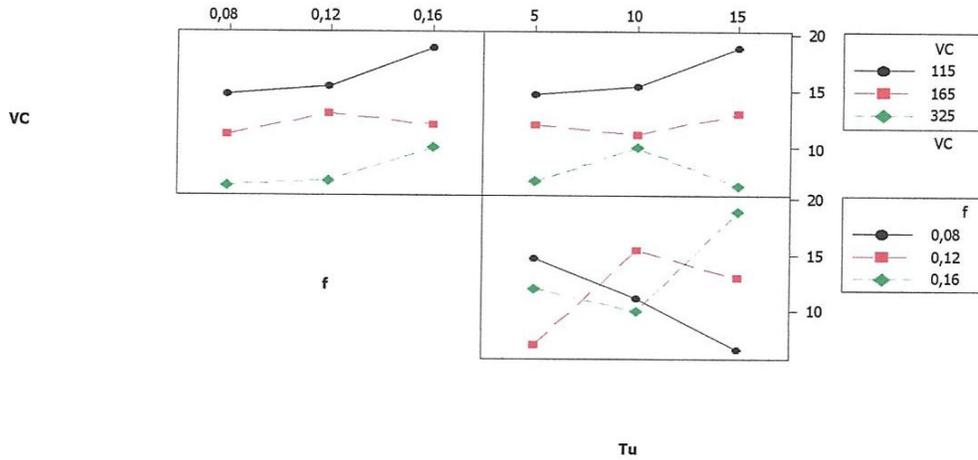
$$R_z = e^{6.725} \cdot V_c^{-0.717} \cdot f^{0.346} \cdot T_u^{0,088} \dots\dots\dots (IV-4)$$

R²=0.95

Nous remarquons de ce (modèle IV-4) que le facteur le plus influent dans ce cas est la vitesse de coupe, son augmentation permet d'améliorer le critère de rugosité Rz. L'augmentation de l'avance et du temps d'usinage mène à une détérioration de l'état de surface

c) Matrice de diagrammes d'interactions pour Rz

La (figure IV-5) montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Rz en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage.

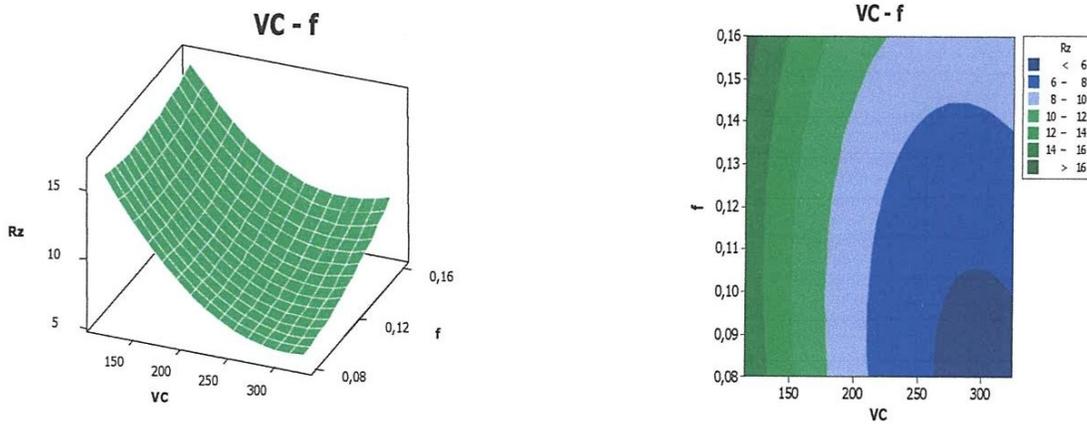


Figure(IV.5): Matrice de diagrammes d'interactions pour Rz

On remarque que pour les trois de l'interaction, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance

d) Evolution de la rugosité Rz en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité Rz en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la (figureIV-6). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps de l'usinage sur le critère de rugosité Rz.



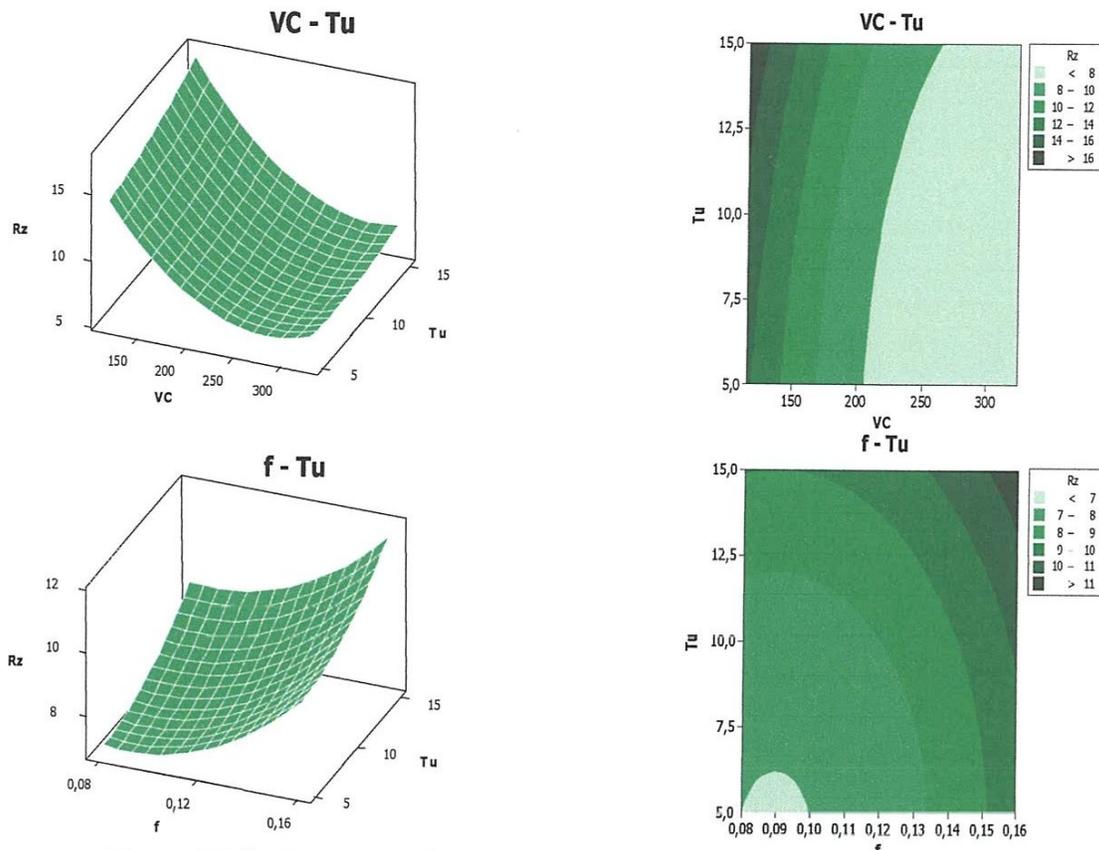


Figure (IV.6) : Diagramme de surface pour Rz en fonction de Vc, f et Tu

Les (figures IV-6) montrent que la rugosité Rz est très affectée par la vitesse de coupe suivie du temps d'usinage et en dernier lieu de l'avance. Avec la diminution de la vitesse de coupe la rugosité Rz.

IV.2.3 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rt

Le (tableau IV-4) montre les coefficients de régression estimés pour Rt et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	37,6442	24,242	1,55287	0,261
VC	-0,0128	0,103	-0,12397	0,913
f	-52,0511	172,417	-0,30189	0,791
Tu	-5,0110	3,303	-1,51731	0,268
VC*f	-0,6415	0,772	-0,83129	0,493
VC*Tu	0,0069	0,006	1,12449	0,378
f*Tu	29,4239	19,236	1,52960	0,266

Tableau (IV.4) : Analyse de régression de Rt

a) Modèle généralisé

Le (modèleIV-5) qui décrit la variation de R_t en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$R_t = 37,6442 - 0,0127892 VC - 52,0511 f - 5,01098 Tu - 0,641527 VC*f + 0,00694241 VC*Tu + 29,4239 f*Tu \dots \dots \dots (IV-5)$$

$R^2 = 82,75\%$

b) Effets principaux pour R_t

La (figure IV-7) montre le graphique les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage sur le critère de rugosité R_t .

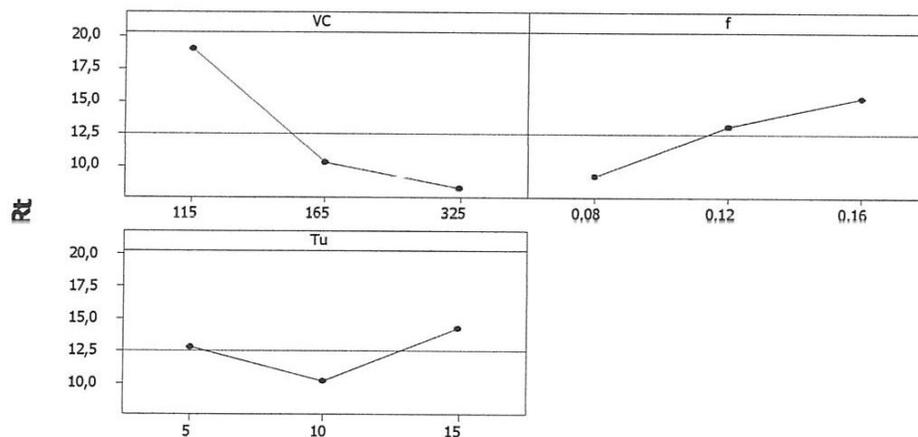


Figure (IV.7): Graphique des effets principaux pour R_t

La (figure IV-7) montre que la vitesse de coupe a un effet significatif sur le critère de rugosité R_t . En effet, on remarque que la pente du paramètre Vc est plus grande par rapport à la pente de l'avance et celle du temps de l'usinage.

Le calcul des effets principaux permet aussi de déterminer le modèle puissance de R_t :

$$R_t = e^{8,416} \cdot VC^{-0.71} \cdot f^{1.074} \cdot Tu^{-0.008} \dots \dots \dots (IV-6)$$

Avec $R^2=0,63$

Le (modèle IV-6) montre que le facteur le plus influent sur le critère de rugosité R_t dans ce cas est l'avance (f), son augmentation mène à une détérioration de l'état de surface. L'augmentation de la vitesse de coupe V_c permet d'améliorer le critère de rugosité R_t . Le modèle montre aussi que dans ce cas l'influence du temps d'usinage sur R_t est négligeable.

c) Matrice de diagrammes d'interactions pour R_t

La (figure IV-8) montre la matrice de diagrammes d'interactions pour R_t en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage.

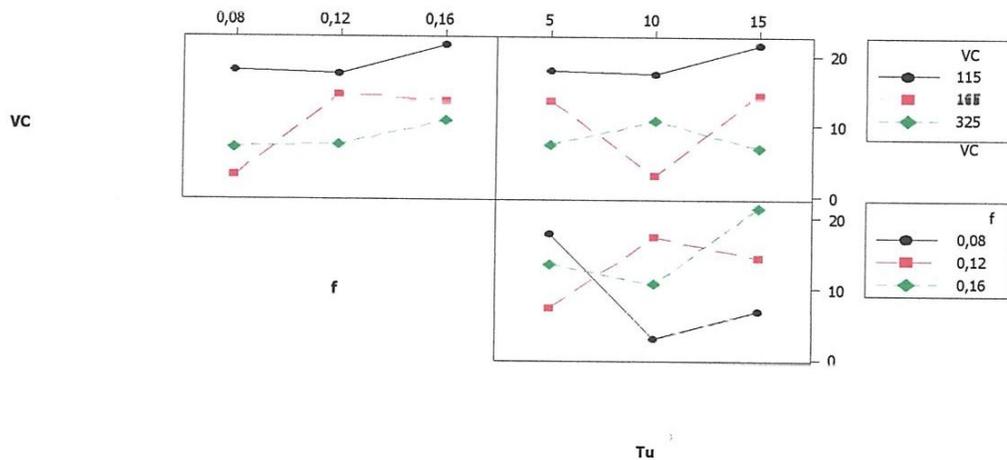
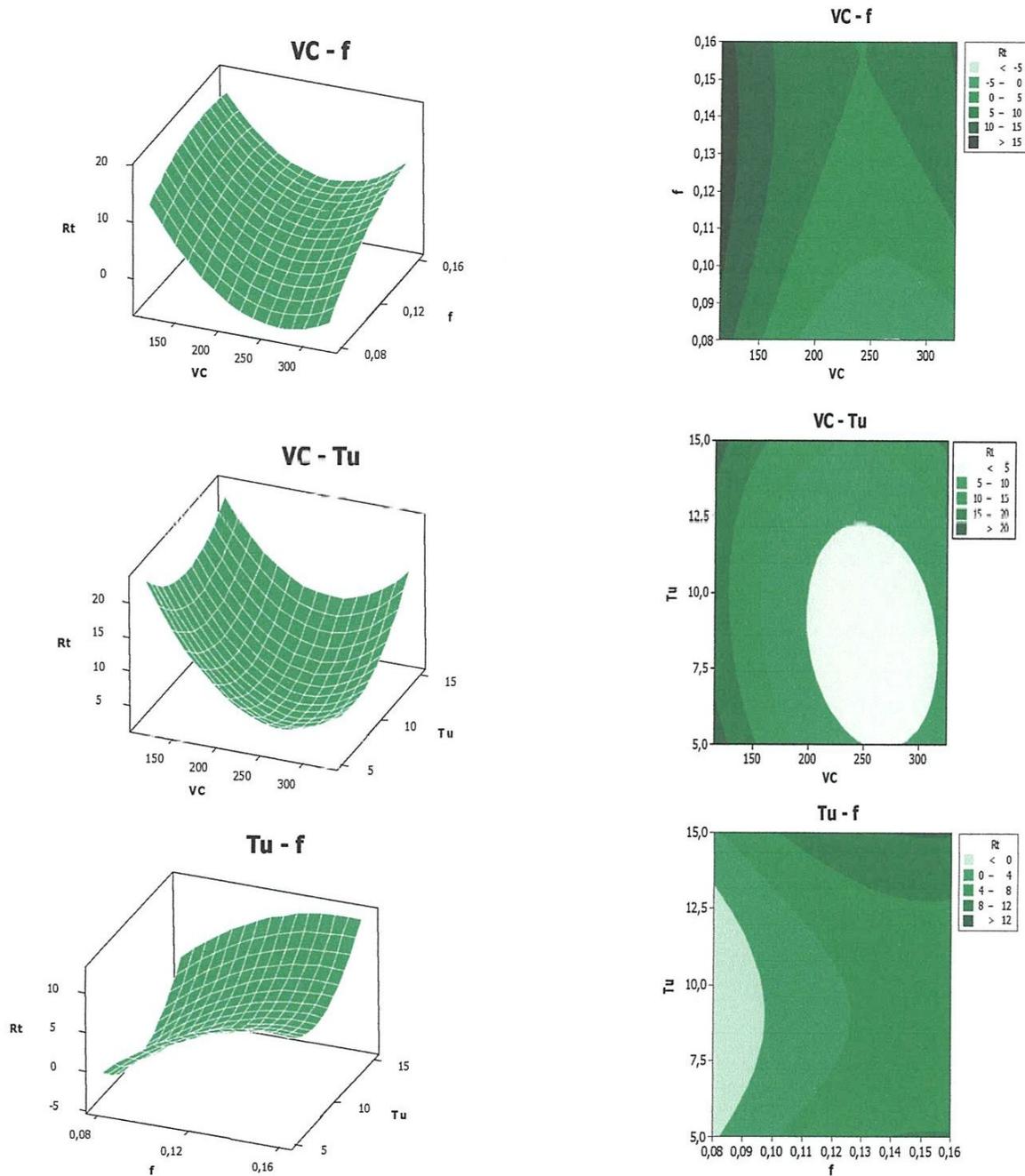


Figure (IV.8): Matrice de diagrammes d'interactions pour R_t

On remarque que pour les trois de l'interaction, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance

d) Evolution de la rugosité R_t en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse de R_t en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la (figure IV-9). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur R_t .



Figure(IV.9) : Diagramme de surface pour R_t en fonction de V_c , f et T_u

A partir de la (figureIV-9), nous pouvons remarquer que la rugosité s'affecte légèrement avec la diminution de la vitesse de coupe. Contrairement à l'avance qui influe d'une manière forte sur R_t .

IV.2.4 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fx

Le (tableau IV-5) montre les coefficients de régression estimés pour Fx et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-10,416	15,039	-0,69257	0,560
VC	0,144	0,064	2,24724	0,154
f	330,792	106,966	3,09249	0,091
Tu	-2,863	2,049	-1,39737	0,297
VC*f	-1,438	0,479	-3,00394	0,095
VC*Tu	0,007	0,004	1,73010	0,220
f*Tu	8,323	11,934	0,69738	0,558

Tableau (IV.5) : Analyse de régression de Fx

a) Modèle généralisé

Le (modèle IV-7) qui décrit la variation de Fx en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$F_x = -10,4159 + 0,143825 VC + 330,792 f - 2,86305 Tu - 1,43821 VC*f + \\ 0,00662684 VC*Tu + 8,32265 f*Tu \dots \dots \dots (IV-7)$$

Avec $R^2 = 93.31\%$

b) Effets principaux pour Fx

La (figure IV-10) montre le graphique les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage sur Fx.

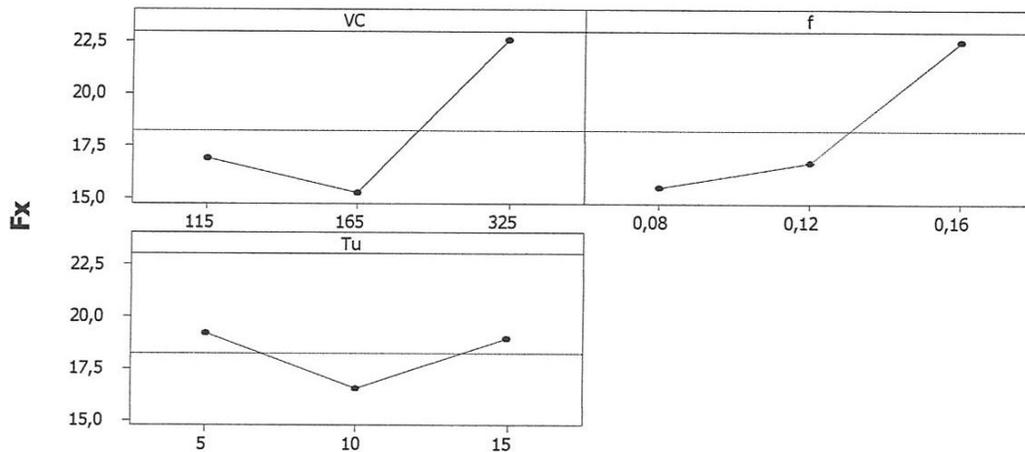


Figure (IV.10) : Graphique des effets principaux pour Fx

La (figure IV-10) montre que seule l'avance a un effet significatif sur la composante Fx. En effet, on remarque que la pente du paramètre f est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle du temps de l'usinage.

Le calcul des effets principaux permet aussi de déterminer le modèle puissance de Fx:

$$F_x = e^{2,435} \cdot V_C^{0,36} \cdot f^{0,638} \cdot T_u^{-0,042} \dots\dots\dots (IV-8)$$

Avec $R^2=0,37$

On a remarqué donne le (modèle IV-8) que le facteur le plus influent dans ce cas est l'avance, son augmentation permet de détériorer le critère de l'effort Fx.

c) Matrice de diagrammes d'interactions pour Fx

La (figure IV-11) montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Fx en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage.

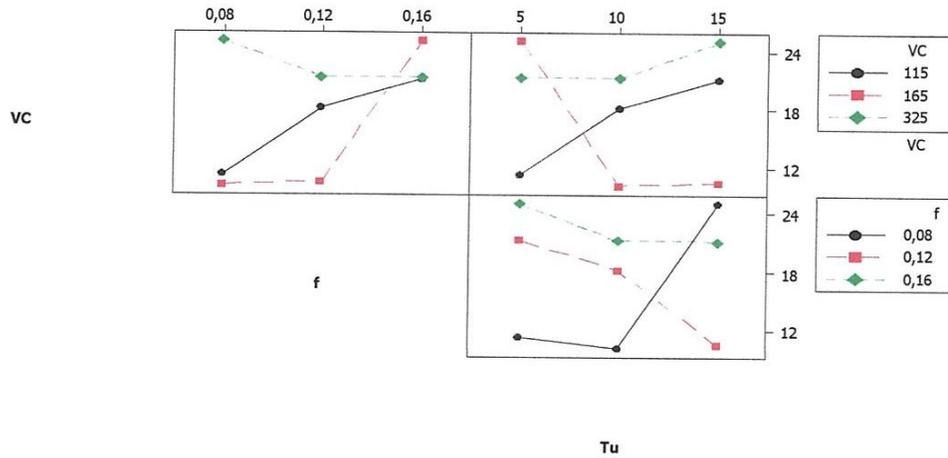
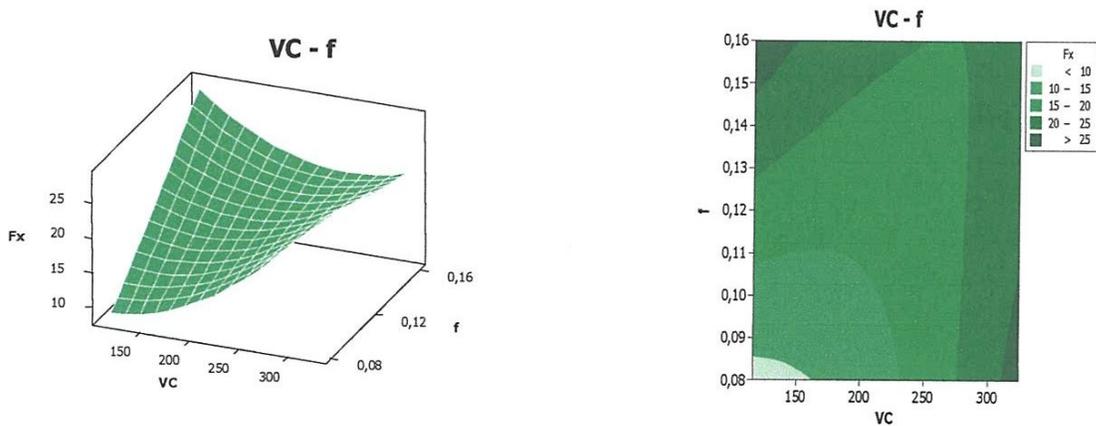


Figure (IV.11); Matrice de diagrammes d'interactions pour F_x

On remarque que pour les trois de l'interaction, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance

d) Evolution de F_x en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère d'effort de coupe F_x en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la (figure IV-12). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur F_x .



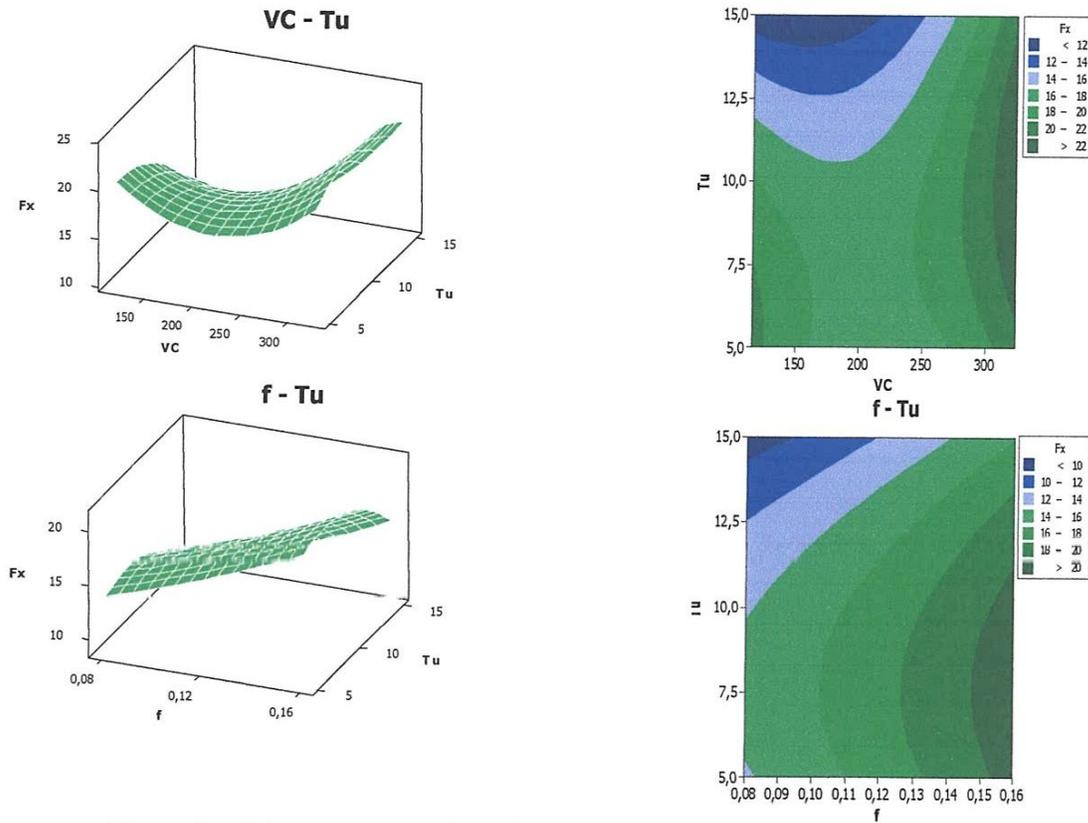


Figure (IV-12) : Diagramme de surface pour l'x en fonction de Vc, f et Tu

Nous déduisons de ce modèle que le facteur le plus influent dans ce cas est l'avance, son augmentation permet de détériorer le critère de l'effort Fx. aussi la vitesse de coupe une facteur influent pour les effort de coupe.

IV.2.5 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fy

Le (tableau IV-6) montre les coefficients de régression estimés pour Fy et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-4,793	34,645	-0,13836	0,903
VC	-0,033	0,147	-0,22603	0,842
f	376,799	246,406	1,52918	0,266
Tu	2,103	4,720	0,44566	0,699
VC*f	0,296	1,103	0,26841	0,814
VC*Tu	0,002	0,009	0,24015	0,833
f*Tu	-17,798	27,491	-0,64740	0,584

Tableau (IV.6) : Analyse de régression de Fy

a) Modèle généralisé

Le (modèle IV-9) qui décrit la variation de F_y en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$F_y = -4,7935 - 0,0333241 VC + 376,799 f + 2,10339 Tu + 0,29603 VC*f + 0,00211893 VC*Tu - 17,7979 f*Tu \dots \dots \dots (IV-9)$$

$R^2 = 89,72\%$

b) Effets principaux pour F_y

La (figure IV-13) montre le graphique les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage sur F_y .

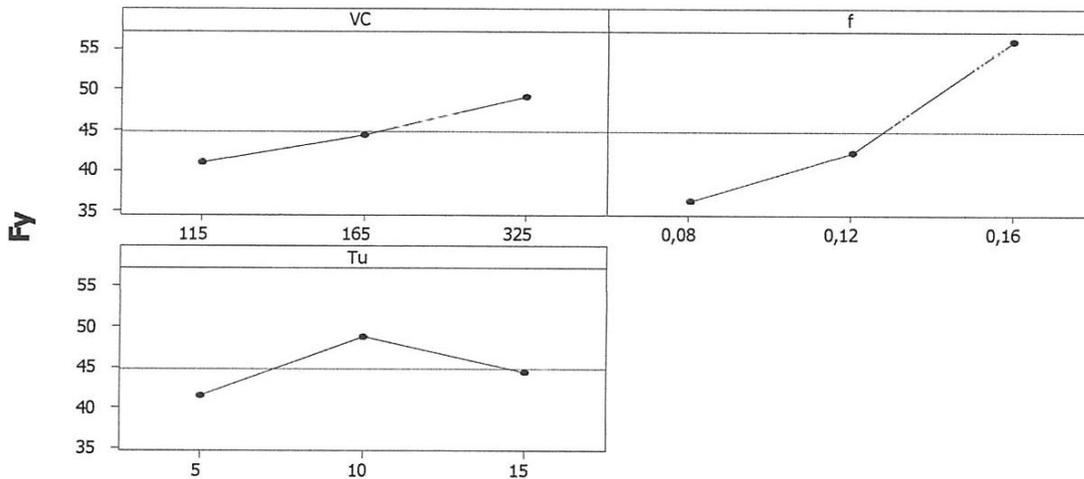


Figure (IV.13): Graphique des effets principaux pour F_y

La (figureIV-13) montre que l'avance a l'effet le plus significatif sur la composante F_y suivi de la vitesse de coupe. En effet, on remarque que la pente du paramètre f est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle du temps d'usinage.

Le calcul des effets principaux permet aussi de déterminer le modèle puissance de F_y :

$$F_y = e^{3.309} \cdot VC^{0,191} \cdot f^{0,642} \cdot Tu^{0,115} \dots \dots \dots (IV-10)$$

Avec $R^2=0,79$

On remarque de ce (modèle IV-10) que l'augmentation de l'avance contribue à la diminution des efforts de coupe, suivie par la vitesse de coupe, alors que l'augmentation de la section du copeau contribue à l'accroissement d'effort F_y .

c) Matrice de diagrammes d'interactions pour F_y

La (figure IV-14) montre la matrice de diagrammes d'interactions pour F_y en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage.

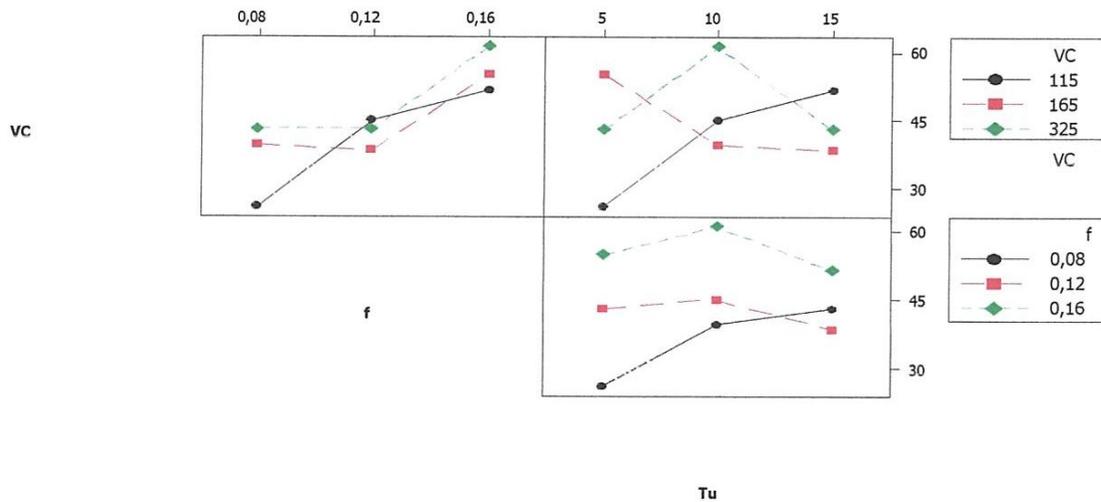


Figure (IV.14) : Matrice de diagrammes d'interactions pour F_y

d) Evolution de F_y en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse de F_y en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la graphique (figure IV-15). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur F_y .

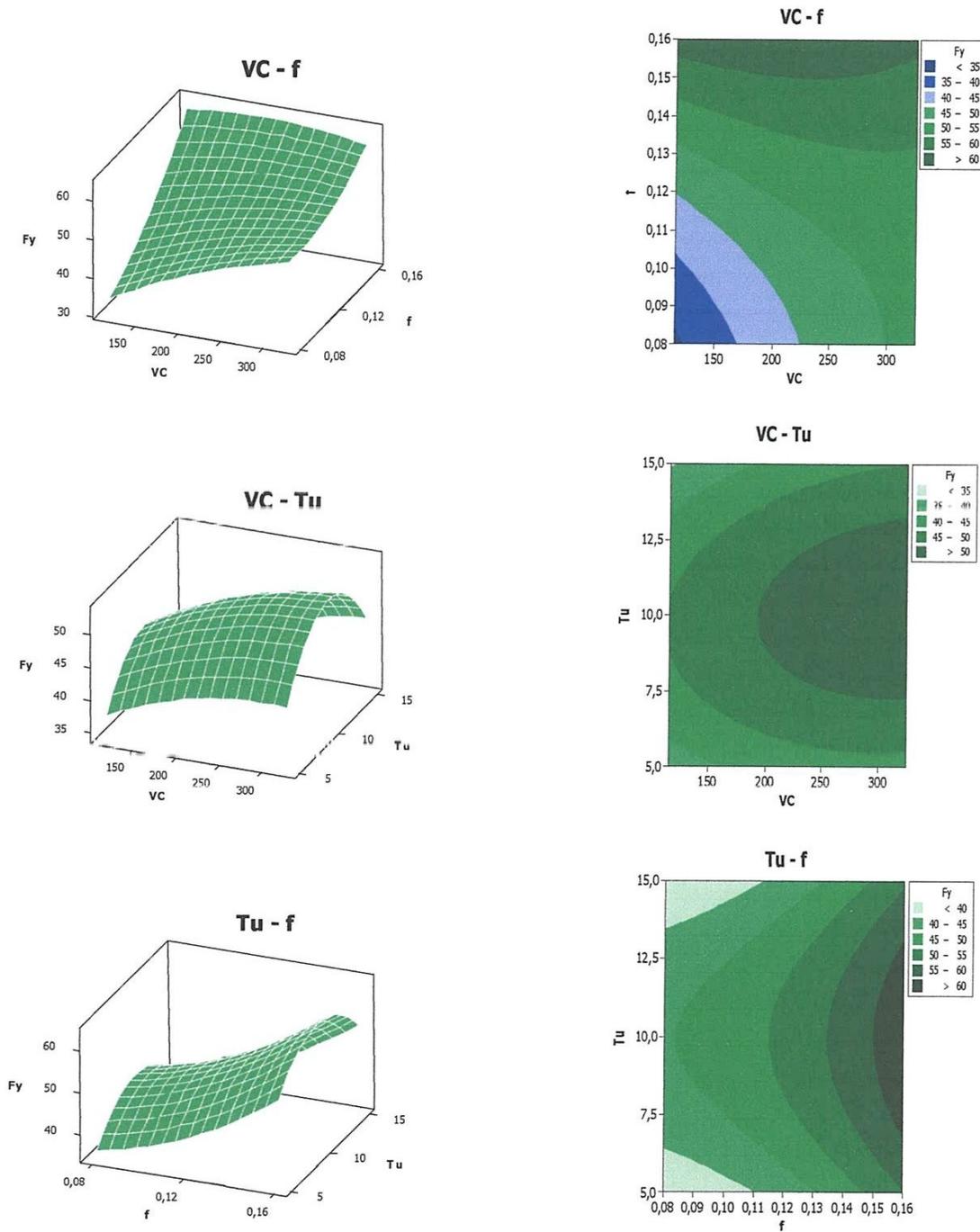


Figure (IV.15): Diagramme de surface pour F_y en fonction de Vc , f et Tu

La surface de réponse présentée sur la (figure IV-15) montre que la pente du temps d'usinage est plus supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort radial suivi de l'avance et en dernier lieu de la vitesse de coupe.

IV.2.6 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fz

Le (tableau IV-7) montre les coefficients de régression estimés pour Fz et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-20,278	24,232	-0,83684	0,491
VC	0,071	0,103	0,69084	0,561
f	783,869	172,344	4,54827	0,045
Tu	1,079	3,301	0,32693	0,775
VC*f	-0,578	0,771	-0,74909	0,532
VC*Tu	-0,001	0,006	-0,11933	0,916
f*Tu	-15,953	19,228	-0,82967	0,494

Tableau (IV.7) : Analyse de régression de Fz

a) Modèle généralisé

Le (modèle IV-11) qui décrit la variation de Fz en fonction des tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$Fz = -20,2778 + 0,0712385 VC + 783,869 f + 1,07924 Tu - 0,577854 VC*f -$$

$$0,000736411 VC*Tu - 15,9532 f*Tu \dots \dots \dots (IV-11)$$

$$R^2 = 93,96\%$$

b) Effets principaux pour Fz

La (figure IV-17) montre le graphique les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage sur Fz.

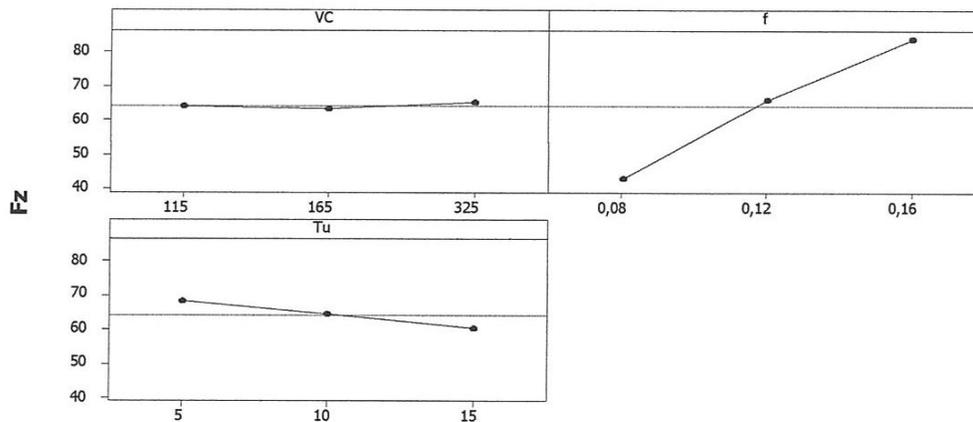


Figure (IV.16): Graphique des effets principaux pour Fz

Donne la (figure IV-16) montre que seule l'avance a un effet significatif sur la composante Fz. En effet, on remarque que la pente du paramètre f est plus grande que l'autre paramètre (f, Tu).

Le calcul des effets principaux permet aussi de déterminer le modèle puissance de Fz :

$$F_z = e^{6,304} \cdot V_c^{0,022} \cdot f^{0,97} \cdot T_u^{-0,091} \dots\dots\dots (IV-12)$$

Avec $R^2=0,96$

Nous remarquons donc ce (modèle IV-12) que le facteur le plus influent dans ce cas est l'avance, son augmentation permet de détériorer le critère de l'effort Fx.

c) Matrice de diagrammes d'interactions pour Fz

La (figure IV-17) montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Fz en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

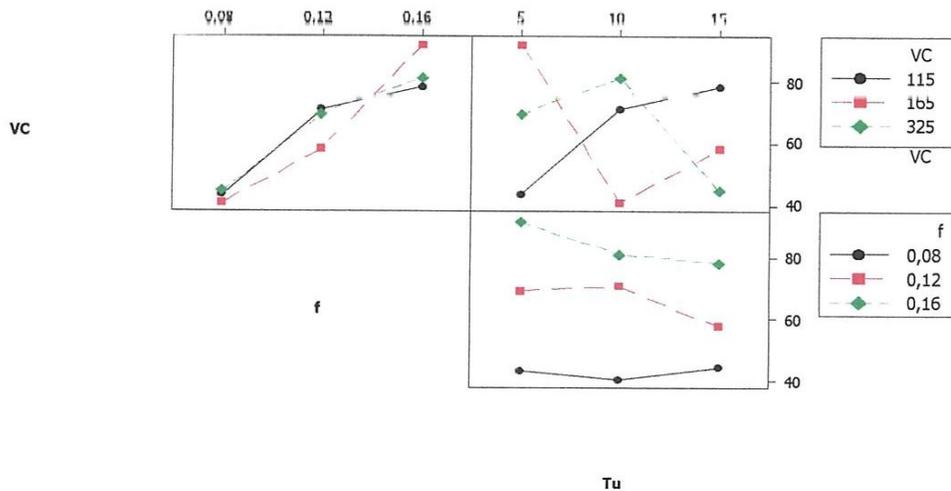


Figure. (IV.17) : Matrice de diagrammes d'interactions pour Fz

On remarque que toutes les lignes ne sont pas parallèles. Donc il existe des interactions entre la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance

d) Evolution de Fz en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse de Fz en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la (figure IV-18). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur Fz.

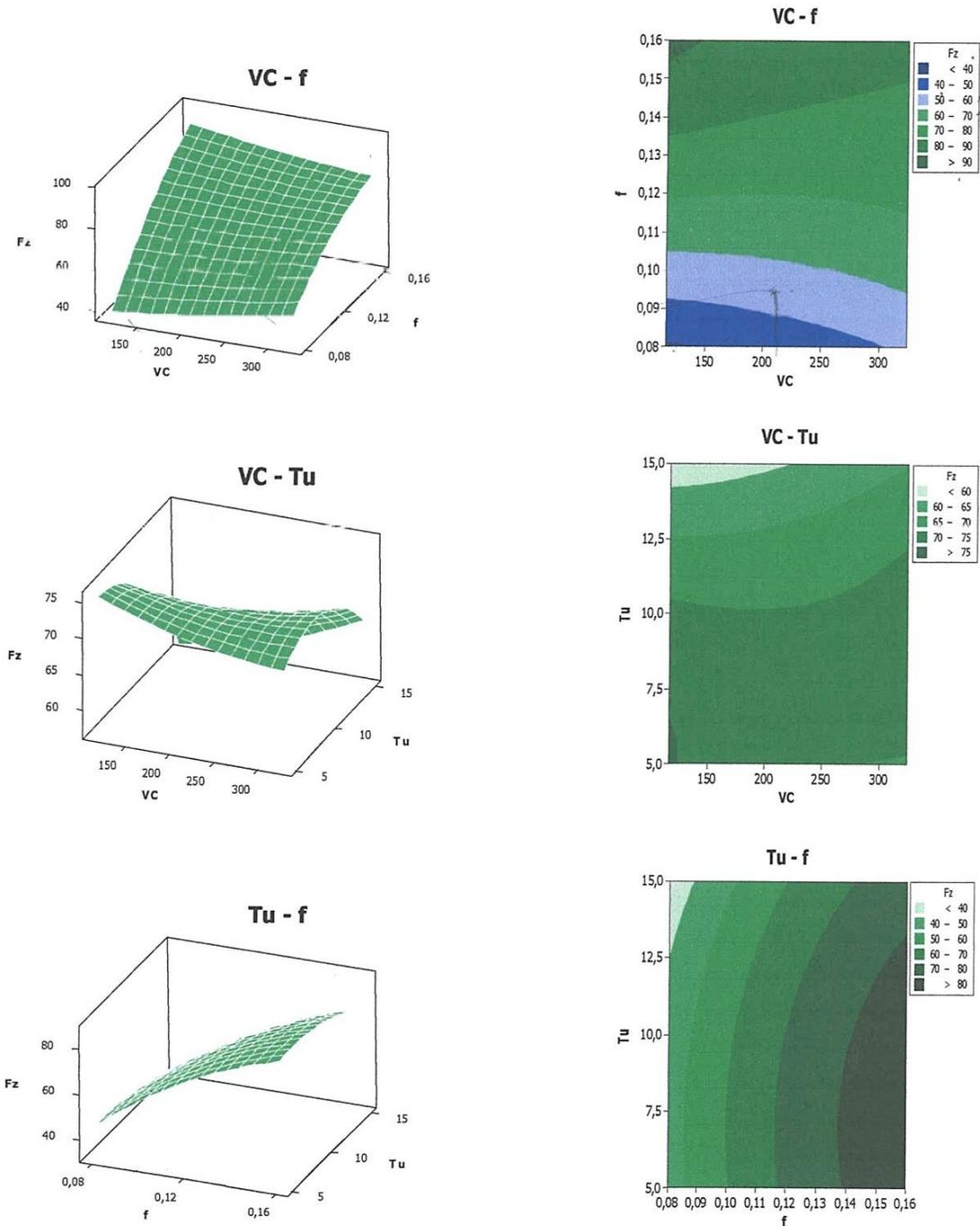


Figure (IV.18) : Diagramme de surface pour Fz en fonction de Vc, f et Tu

On remarque pour l'évolution de l'effort tangentiel en fonction de (V_c , f et T_u) (figure IV-18) illustre que cet effort est plus affecté par le temps d'usinage.

Conclusion

Cette partie nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les paramètres d'une opération d'usinage (rugosité et efforts de coupe) et les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance et temps d'usinage) lors de l'usinage de l'acier Z40CDV5 avec le carbure revêtu GC1025 comme matériau de coupe. Les résultats de cette partie ont conduit aux conclusions suivantes :

L'analyse des modèles obtenus des différents critères de la rugosité pour le matériau de coupe testé, montre que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une diminution des critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) de surface et d'ailleurs dans ces conditions c'est le paramètre le plus influent suivi de l'avance.

Par contre, l'analyse des modèles obtenus pour les différentes composantes de l'effort de coupe, montre que l'avance est le paramètre le plus influent suivie de la vitesse de coupe

Le tracé des droites des effets principaux ainsi que l'examen des modèles puissance, permettent de confirmer ces constatations.

IV.3 Analyse de variance de l'évolution des critères de rugosité et des efforts de coupe

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles représentatifs des paramètres étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (V_c , f , et ap) et les paramètres technologiques (rugosité de surface et effort de coupe) lors de l'usinage de l'acier fortement allié Z40CDV5 avec un outil de coupe en carbure GC1025. Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe (V_c , f , ap) sur la rugosité de la surface et les efforts de coupe, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur varie à trois niveaux (3^3). Dans cette recherche, le tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} est adopté comme conception expérimentale. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe. Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau (II-4). Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RSM), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « **MINITAB 16** ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le tableau (IV.8). Ces résultats vont nous servir pour la détermination des modèles mathématiques qui expriment la relation entre les paramètres d'entrées (V_c , f , ap) et les paramètres de sorties (critères de rugosité R_a , R_t , R_z ; les composantes de l'effort de coupe F_x , F_y , F_z). L'intérêt de cette modélisation est de faire des prédictions.

Chacun des 27 essais a été réalisé avec une nouvelle arête de coupe.

N°	Vc	f	ap	Ra	Rt	Rz	Fx	Fy	Fz
1	145	0.08	0.15	2.01	12.68	11.08	18.13	29.74	44.9
2	145	0.08	0.3	1.59	10.47	9.19	19.9	48.84	56.3
3	145	0.08	0.45	1.44	10.30	8.62	34.22	53.72	89.68
4	145	0.12	0.15	1.48	9.76	8.51	9.72	31.85	43.74
5	145	0.12	0.3	1.21	7.98	7.20	33.24	57.57	110.31
6	145	0.12	0.45	1.21	9.17	7.74	43.99	76.09	130.68
7	145	0.16	0.15	1.76	10.66	9.66	9.7	54.46	54.22
8	145	0.16	0.3	1.61	9.97	9.00	39.72	78.98	121.52
9	145	0.16	0.45	1.65	10.48	9.43	57.1	90.96	173.15
10	200	0.08	0.15	1.13	7.49	6.81	17.97	28.2	46.54
11	200	0.08	0.3	1.12	7.56	6.88	22.38	43.16	77.99
12	200	0.08	0.45	0.91	6.48	5.87	36.68	64.53	104.81
13	200	0.12	0.15	1.19	7.59	6.77	9.6	40.26	57
14	200	0.12	0.3	1.24	6.92	6.32	21.79	66.51	104.7
15	200	0.12	0.45	1.25	6.93	6.56	53.47	72.74	143.36
16	200	0.16	0.15	1.53	8.29	7.97	5.43	43.25	72.71
17	200	0.16	0.3	1.56	8.42	7.51	22.43	70.67	112.06
18	200	0.16	0.45	1.60	8.30	7.41	57.02	92.46	176.66
19	280	0.08	0.15	0.68	4.94	4.36	18.18	29.6	36.93
20	280	0.08	0.3	0.74	4.84	4.29	22.1	58.32	81.35
21	280	0.08	0.45	0.77	5.44	4.65	37.11	71.83	83.8
22	280	0.12	0.15	1.13	5.05	4.75	14.72	37.88	51.51
23	280	0.12	0.3	1.26	5.84	5.40	27.51	61.7	99.18
24	280	0.12	0.45	1.36	6.16	5.64	39.32	67.18	129.03
25	280	0.16	0.15	1.53	7.89	7.24	11.39	44.67	71.34
26	280	0.16	0.3	1.57	7.28	6.86	31.97	62.14	111.7
27	280	0.16	0.45	1.72	7.65	7.16	50.79	78.56	164.24

Tableau (IV.8) : Résultats de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe (Le tableau orthogonal standard de Taguchi L_{27} ; $N=3^3$).

IV.3.1 Modèle de la rugosité Ra en fonction des paramètres de coupe

a) Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra

Les résultats présentés dans le (tableau IV-9) (ANOVA) sont analysés par le logiciel MINITAB16. En appliquant l'analyse de la variance, nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0.05$), on constate que les facteurs de base (f et Vc) et l'interaction de la vitesse de coupe avec l'avance ont un impact significatif sur Ra, par contre la profondeur de coupe et l'interaction $f*ap$ n'ont pas un effet significatif puisque ses valeurs de la probabilité P est supérieur à 0,05.

Dans ce cas l'avance est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 37,45%.

Coefficients de régression estimés pour Ra		Analyse des variances pour Ra						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Vc (m/min)	-0,015648	Vc (m/min)	2	0,61992	0,30996	113,71	0,000	22.18
f (mm/tr)	-14,462	f (mm/tr)	2	1,01679	0,52339	192,01	0,000	37.45
ap (mm)	-4,061	ap (mm)	2	0,02121	0,01060	3,89	0,066	0.75
Vc*f	0,08002	Vc*f	4	0,80668	0,20167	73,98	0,000	28.86
Vc*ap	0,011750	Vc*ap	4	0,20659	0,05165	18,95	0,000	7.39
f*ap	11,806	f*ap	4	0,07193	0,01798	6,60	0,012	2.57
Constante	4,3964	Erreur	8	0,02181	0,00273			
Coefficient de détermination R ² = 53,5 %		Total	26	2,79492				

Tableau (IV. 9): Résultats de l'analyse de la variance pour Ra

b) Analyse de régression

L'équation (IV-13) la relation entre la rugosité Ra avec tous les facteurs principaux considérés et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Ra = 4,3964 - 0,015648vc - 14,462f - 4,061ap + 0,08002 vc*f + 0,011750 vc*ap + 11,806*f*ap \dots \dots \dots (IV-13)$$

Ou R²= 53,5 %

c) Effets principaux pour Ra

La (figure IV-19) montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Ra.

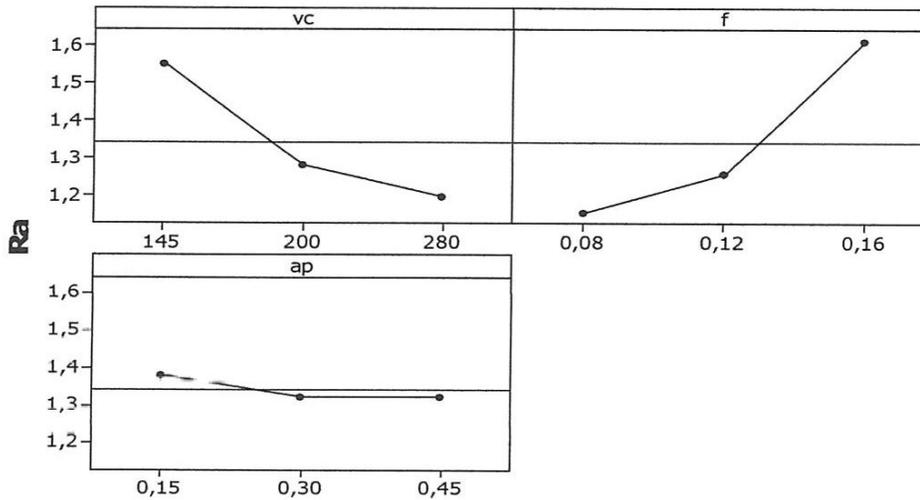


Figure (IV.19) : Graphique des effets principaux pour Ra

L'avance a un effet significatif sur la composante Ra. En effet, on remarque bien que la pente du paramètre de l'avance (f) est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe, il est donc le facteur le plus influent sur la rugosité Ra suivie par l'avance.

d) Diagramme des interactions pour Ra

La (figure IV-20) présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. Ce diagramme montre l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur. On remarque que pour le cas des interactions $Vc*ap$ et $ap*f$, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la vitesse de coupe et la profondeur de passe, la profondeur de passe et l'avance.

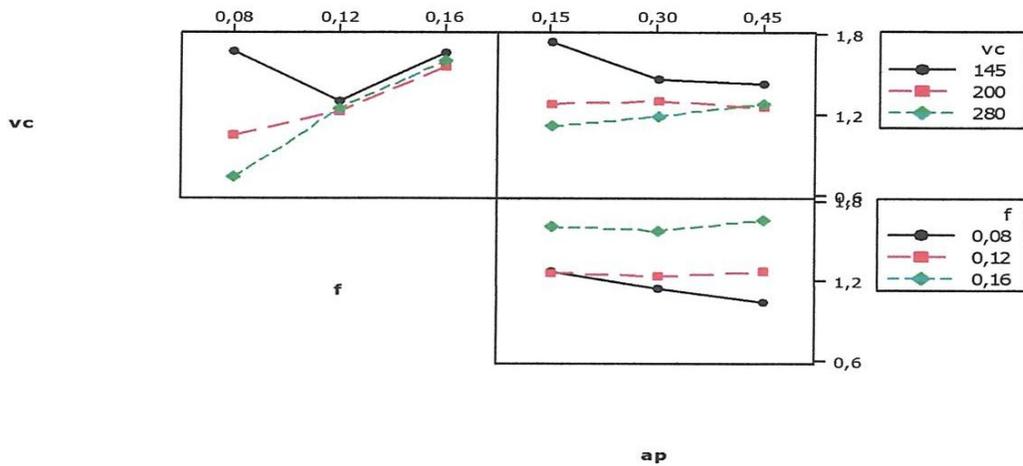
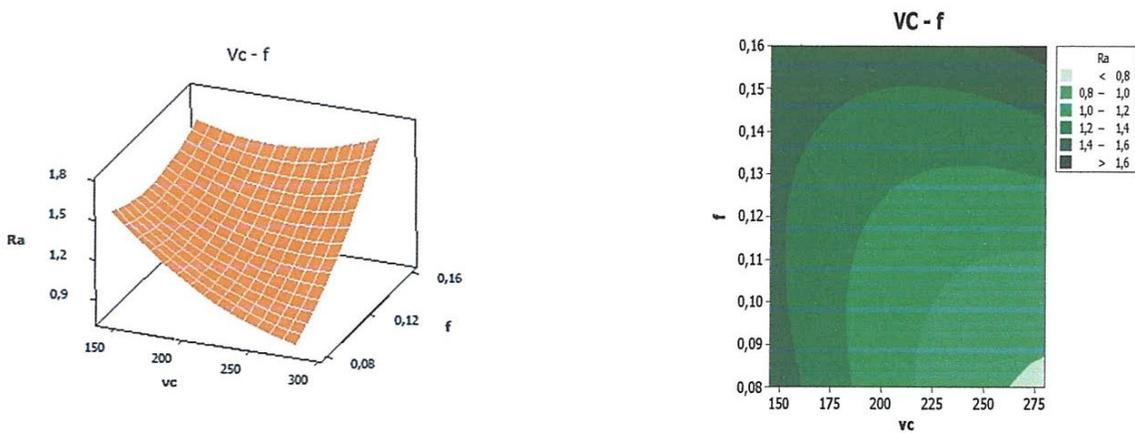
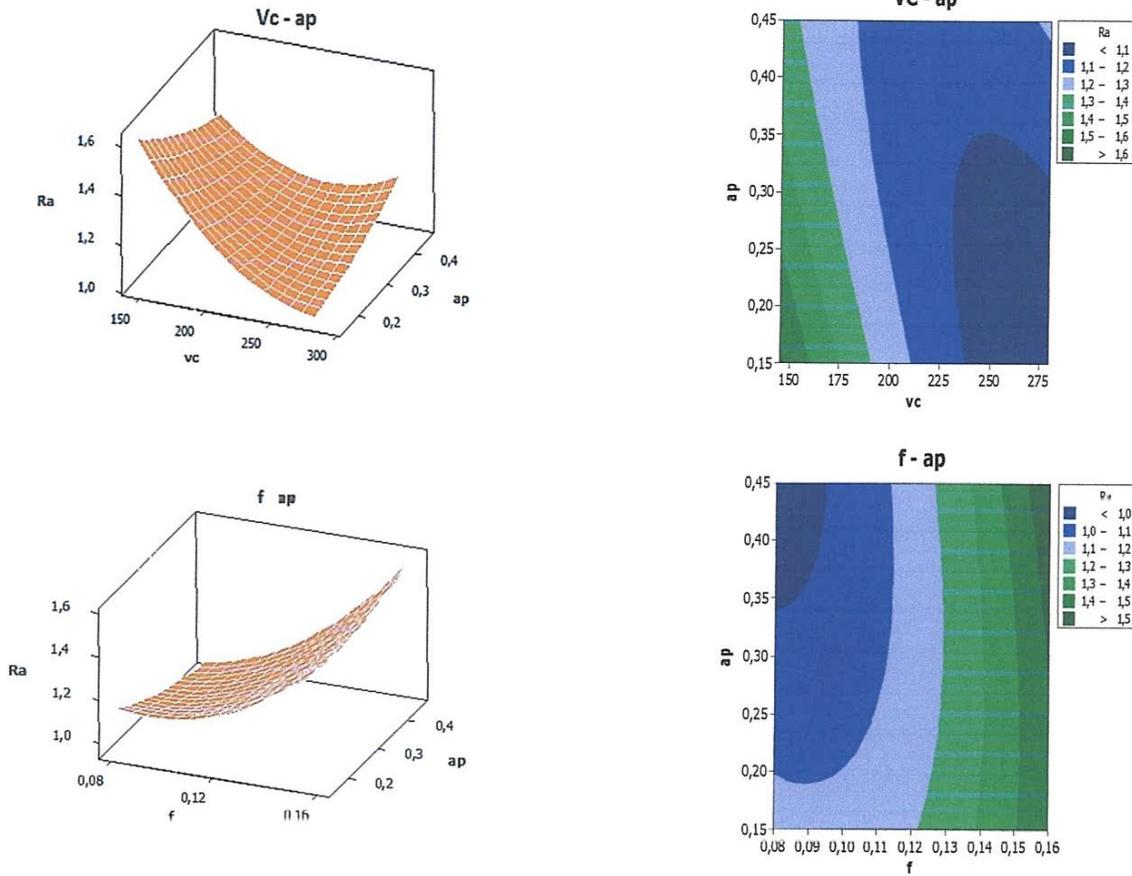


Figure (IV.20): Graphe des interactions pour Ra

e) Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe

La (figure IV-21) illustre la réponse de la rugosité (Ra) en fonction de (Vc, f, ap) et les graphes de contour. Ces graphes permettent de visualiser la surface de réponse (Ra), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.





Figure(IV.21) La surface de réponse de la rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc, f, ap et les graphes de contour

L'évolution de rugosité (figure IV-21) illustre que cet rugosité est plus affecté par la L'avance. Suivi la vitesse de coupe affecte considérablement pour la rugosité .

IV.3.2 Modèles de la rugosité Rz en fonction des paramètres de coupe

a) Analyse de la variance (ANOVA) pour Rz

L'analyse de variance ANOVA présentée au (tableau IV-10) montre que la vitesse de coupe et l'avance des effets significatifs sur la variation des critères de la rugosité Rz, Par contre les valeurs de la profondeur de passe sont supérieures à 0,05. On remarque aussi que les différentes interactions n'ont pas d'effet significatif. La vitesse de coupe a un effet important, car elle présente un pourcentage de contribution de 67.04%.

Coefficients de régression estimés pour Rz		Analyse des variances pour Rz						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Vc (m/min)	-0,06763	Vc (m/min)	2	51,0688	25,5344	159,24	0,000	67.04
f (mm/tr)	-50,65	f (mm/tr)	2	10,9793	5,4897	34,24	0,000	14.40
ap (mm)	-13,082	ap (mm)	2	1,3704	0,6852	4,27	0,005	1.79
Vc*f	0,26826	Vc*f	4	8,2251	2,0563	12,82	0,051	10.79
Vc*ap	0,03764	Vc*ap	4	2,3494	0,5873	3,66	0,056	3.08
f*ap	31,11	f*ap	4	0,8982	0,2245	1,40	0,317	1.17
Constante	21,057	Erreur	8	1,2828	0,1603			
Coefficient de détermination R ² = 72,3 %		Total	26	76,1740				

Tableau IV.10 : Résultats de l'analyse de la variance pour Rz.

b) Analyse de régression

L'équation (IV-14) de régression qui suit, exprime le modèle la rugosité Rz avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Rz = 21,057 - 0,06763vc - 50,65f - 3,082ap + 0,26826vc*f + 0,03764vc*ap + 31,11f*ap \dots \dots \dots (IV-14)$$

Ou R²= 72,3 %

c) Effets principaux pour Rz

La (figure IV-22) montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Rz.

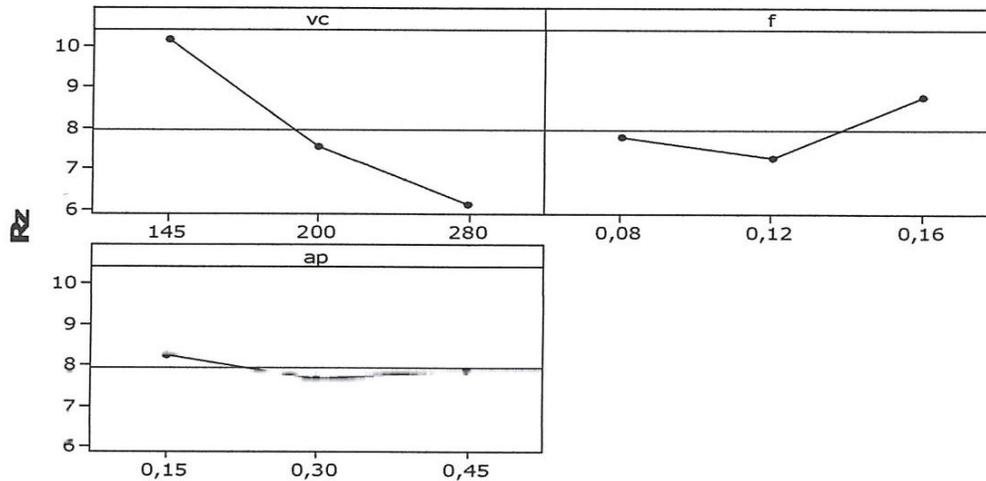


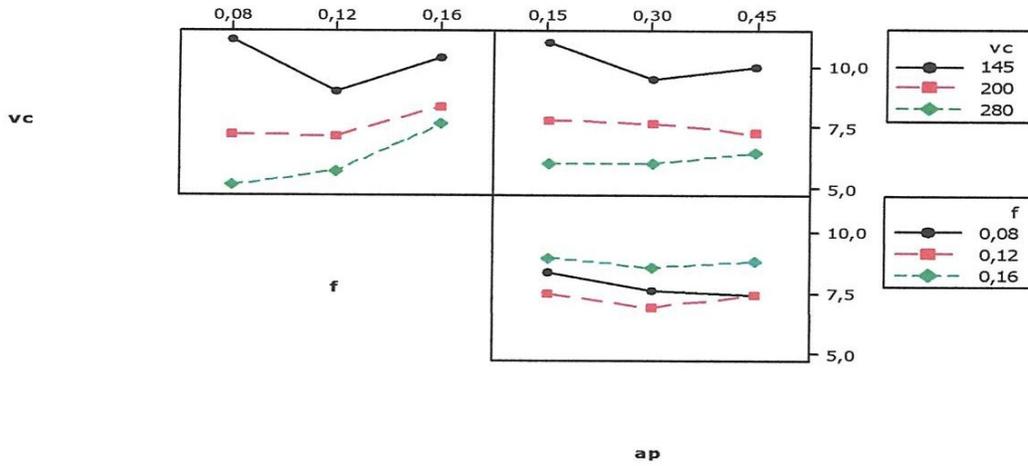
Figure (IV.22) : Graphique des effets principaux pour Rz

La vitesse de coupe a un effet significatif sur la composante Rz. On remarque bien sur la (figure IV-22) que la pente du paramètre de La vitesse de coupe Vc est plus grande que la pente de l'avance et celle de la profondeur de passe, il est donc le facteur le plus influent sur la rugosité Rz.

d) Diagramme d'interaction pour Rz

Le diagramme des interactions nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. Le diagramme (figure IV-23) montre l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur.

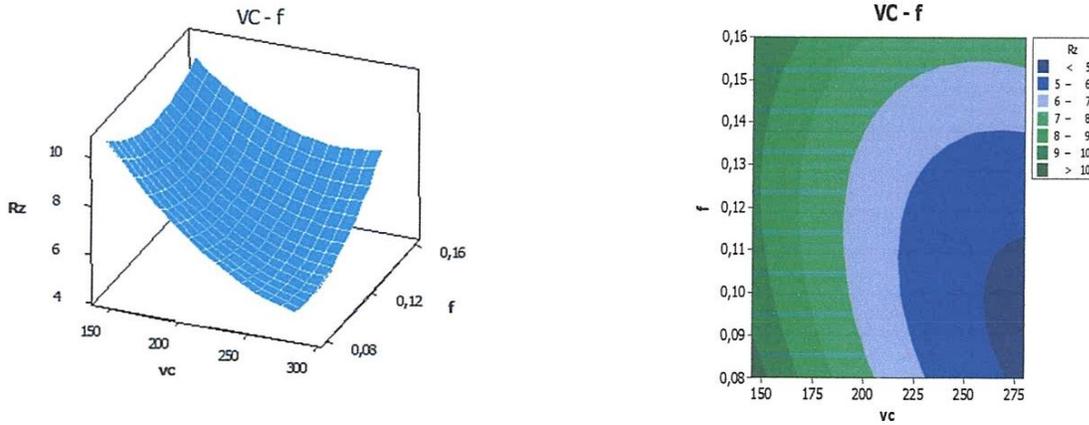
On remarque que la pente de l'interaction $Vc*f$ est plus grande que les autres interactions. Cela est en accord avec les résultats du (tableau IV-4) où la contribution est de 10.79%



Figure(IV.23): Graphe des interactions pour Rz

e) Evolution de la rugosité Rz en fonction des paramètres du régime de coupe

La (figure IV-24) illustre la surface de réponse du critère de rugosité (Rz) en fonction de (V_c , f , ap) et les graphes de contour. Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (Rz), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



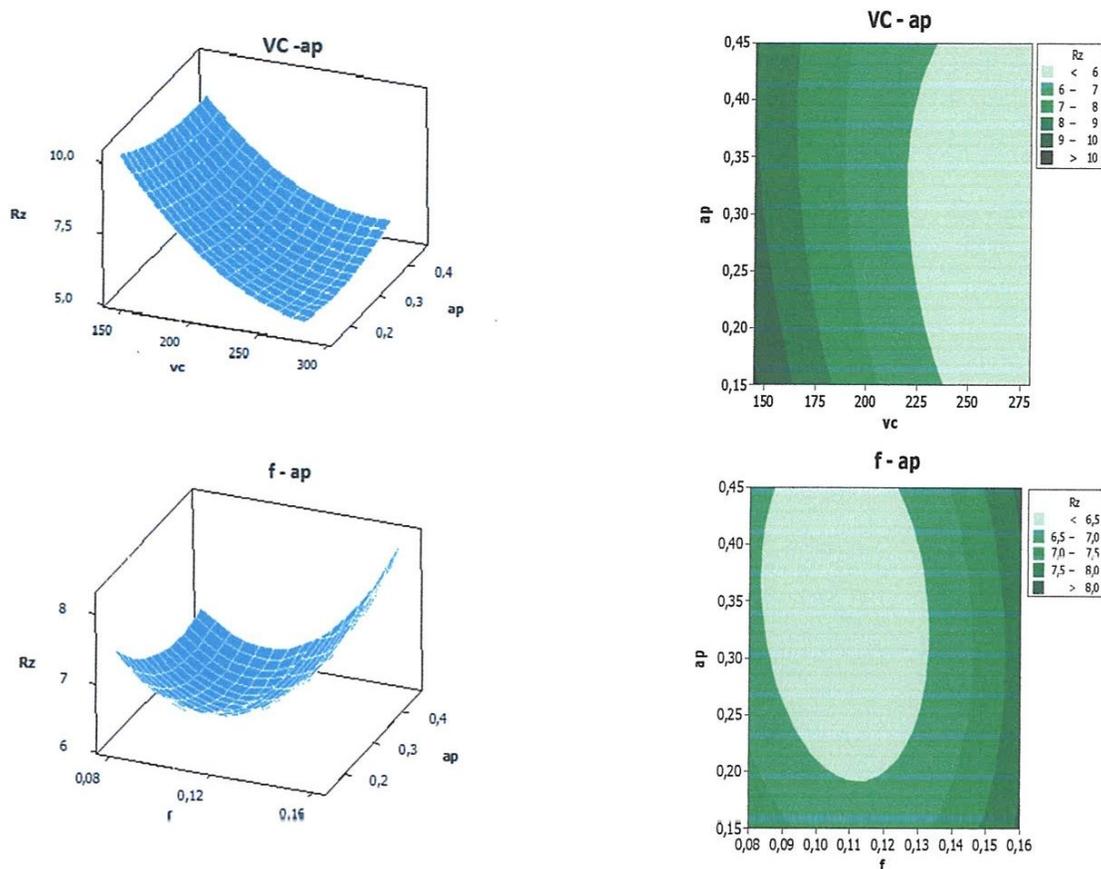


Figure (IV.24): La surface de réponse de la rugosité de surface (R_z) en fonction de V_c , f , ap et les graphes de contour

Les (figures IV-24) montrent que la rugosité R_z est très affectée par l'avance suivie la vitesse de coupe et la profondeur de passe en dernier lieu. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe la rugosité R_z s'accroît à cause de l'usure en dépouille de l'outil.

IV.3.3 Modèles de la rugosité R_t en fonction des paramètres de coupe

a) Analyse de la variance (ANOVA) pour R_t

L'analyse de variance ANOVA présentée au (tableau IV-11) montre que la profondeur de passe n'a pas un effet significatif sur la variation du critère de la rugosité R_t , car les valeurs trouvées de P sont supérieures à 5%. Par contre la valeur de la vitesse de coupe et l'avance et l'interaction $vc*f$ est inférieure à 0,05. On remarque aussi les autres interactions n'ont pas d'effet significatif. Le pourcentage de contribution de la vitesse de coupe est 72,91, il présente un effet important.

Coefficients de régression estimés pour Rt		Analyse des variances pour Rt						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Vc (m/min)	-0,07635	Vc (m/min)	2	75,6088	37,8044	152,11	0,000	72.91
f (mm/tr)	-60,72	f (mm/tr)	2	10,4726	5,2363	21,07	0,001	10.09
ap (mm)	-13,231	ap (mm)	2	1,4887	0,7444	3,00	0,107	1.43
Vc*f	0,3001	Vc*f	4	10,0999	2,5250	10,16	0,003	9.74
Vc*ap	0,03755	Vc*ap	4	3,1897	0,7974	3,21	0,075	3.07
f*ap	34,44	f*ap	4	0,8438	0,2109	0,85	0,532	0.81
Constante	24,018	Erreur	8	1,9882	0,2485			
Coefficient de détermination $R^2 = 72,3 \%$		Total	26	103,6917				

Tableau(IV.11) : Résultats de l'analyse de la variance pour Rt

b) Analyse de régression

L'équation (IV-15) de régression qui suit, exprime le modèle la rugosité Rt avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Rt = 24,018 - 0,07635vc - 60,72f - 13,231ap + 0,3001vc*f + 0,03755 vc*ap + 34,44f*ap \dots \dots \dots (IV-15)$$

Ou $R^2 = 72,3 \%$

c) Effets principaux pour Rt

La (figure IV-25) montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Rt

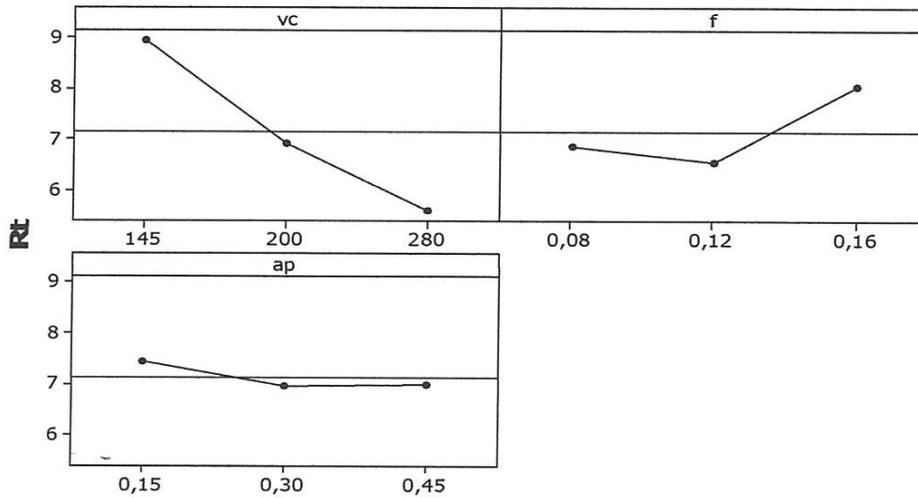


Figure (IV.25) : Graphique des effets principaux pour Rt

La vitesse de coupe a un effet significatif sur la composante Rz. On remarque bien sur la(figure IV-25) que la pente du paramètre de La vitesse de coupe Vc est plus grande que la pente de l'avance et celle de la profondeur de passe, il est donc le facteur le plus influent sur la rugosité Rz.

d) Diagramme des interactions pour Rt

La (figure IV-26) présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $Vc*f$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 9.74% suivant le (tableau IV-11).

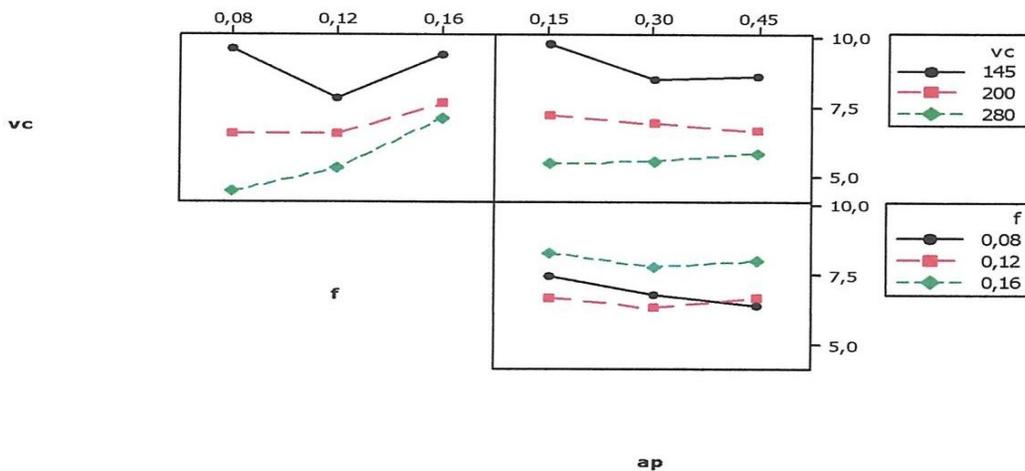
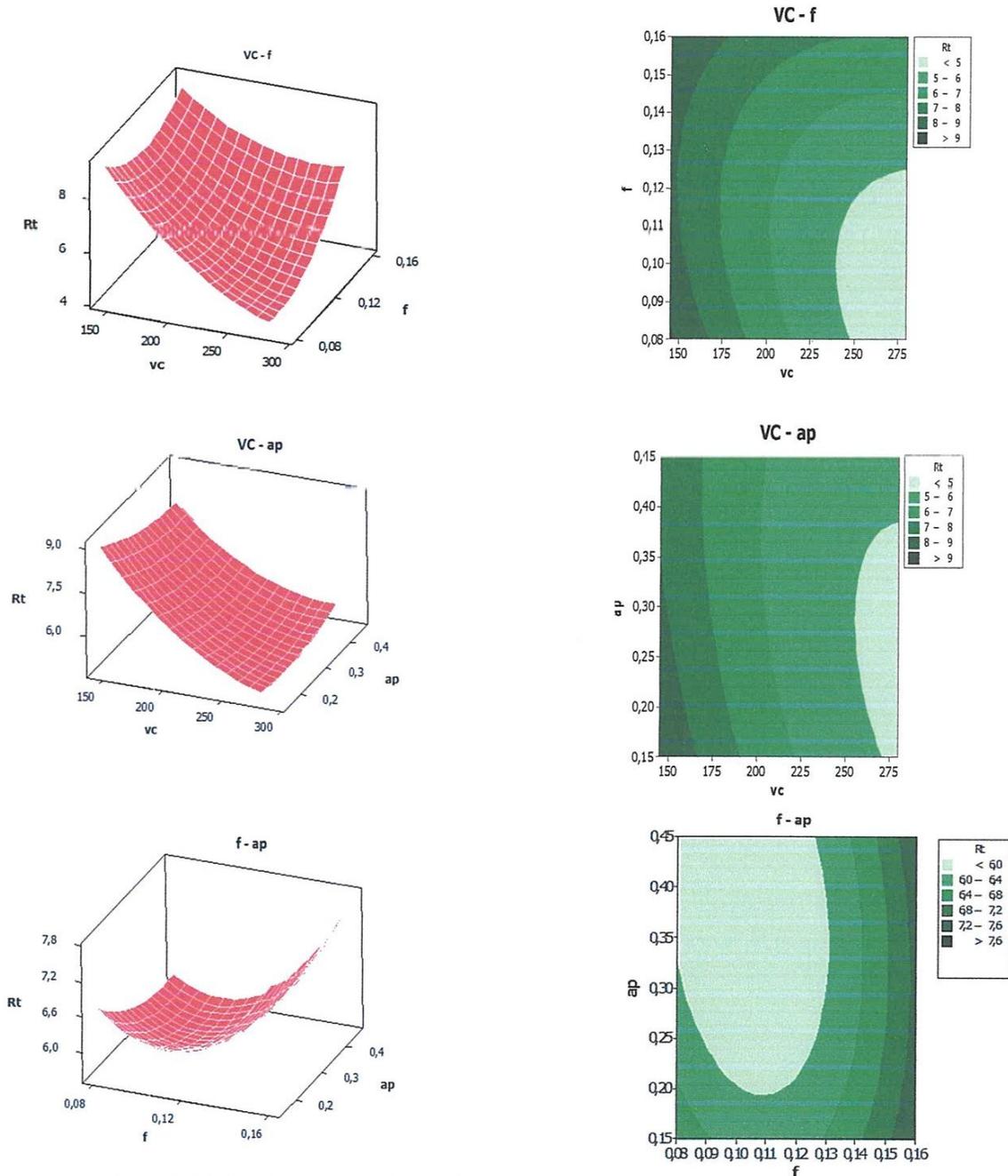


Figure (IV.26): Graphe des interactions pour Rt

e) Evolution de la rugosité R_t en fonction des paramètres du régime de coupe

La (figure IV-27) illustre la surface de réponse du critère de rugosité (R_t) en fonction de (V_c, f, a_p) et les graphes de contour. La présentation en 3D montre que la pente de l'avance est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'usure VB.



Figure(IV.27) : Diagramme de surface pour R_t en fonction de V_c, f et T_u

IV.3.4 Modèles de l'effort axial Fx en fonction des paramètres de coupe

a) Analyse de la variance (ANOVA) pour Fx

Le (tableau IV-12) présente l'analyse de variance ANOVA pour la composante de l'effort axial Fx. On remarque que la profondeur de passe a un effet significatif puisque P est inférieur à 0,05. Sa contribution est de 79.98%, l'interaction f^*ap a aussi un effet significatif avec une contribution de 10.42%. Par contre la vitesse de coupe et les autres interactions n'ont pas un effet significatif sur l'effort axial puisque la valeur de P est supérieure à 0,05.

Coefficients de régression estimés pour Fx		Analyse des variances pour Fx						
Terme	Coef	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
V_c (m/min)	0,09051	V_c (m/min)	2	20,69	10,34	0,70	0,523	0.34
f (mm/tr)	-173,5	f (mm/tr)	2	193,16	96,58	6,57	0,021	3.17
ap (mm)	-1,76	ap (mm)	2	4863,52	2431,76	165,41	0,000	79.98
V_c*f	-0,4678	V_c*f	4	68,33	17,08	1,16	0,395	1.12
V_c*ap	-0,1446	V_c*ap	4	183,64	45,91	3,12	0,080	3.02
$f*ap$	1175,8	$f*ap$	4	633,70	158,43	10,78	0,003	10.42
Constante	9,25	Erreur	8	117,61	14,70			
Coefficient de détermination		Total	26	6080,65				

Tableau (IV.12) : Résultats de l'analyse de la variance pour Fx

b) Analyse de régression

L'équation (IV-16) de régression qui suit, exprime le modèle de l'effort axial Fx avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$F_x = 9,25 + 0,09051v_c - 173,5f - 1,76ap - 0,4678v_c*f - 0,1446v_c*ap + 1175,8f*ap \dots \dots \dots (IV-16)$$

Ou $R^2=82,7 \%$

c) Effets principaux pour Fx

La (figure IV-28) illustre les effets principaux des paramètres de coupe sur l'effort axial. On remarque que Fx s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. L'effet de la profondeur de passe est supérieur car sa pente est plus grande. Donc la paramètre le plus influence sur l'effort axiale la profondeur de passe.

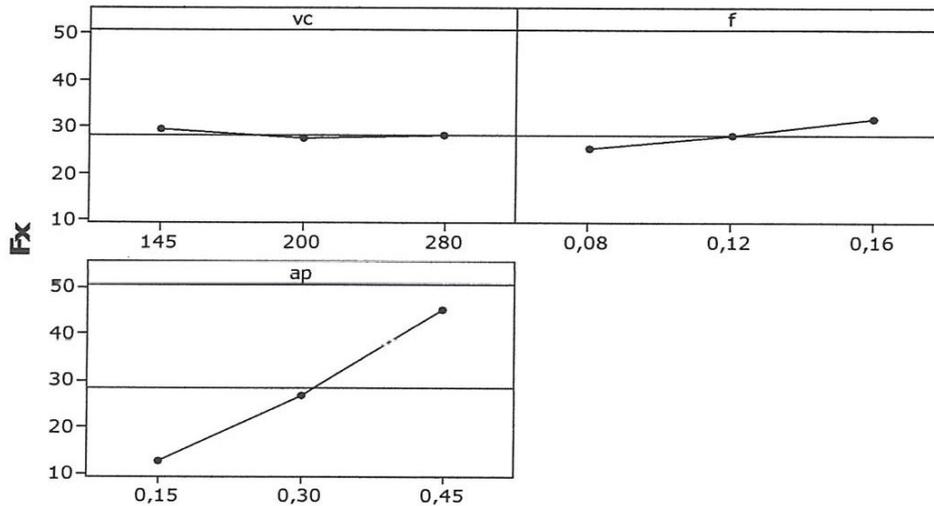


Figure (IV.28) : Graphique des effets principaux pour Fx

d) Diagramme des interactions pour Fx

La (figure IV-29) présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $f*ap$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 10.42% suivant le (tableau IV-12).

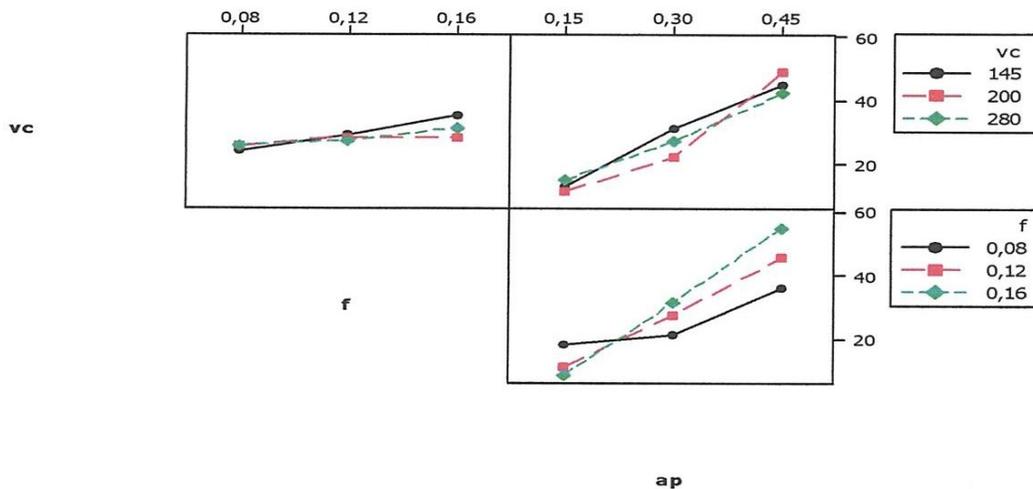


Figure (IV.29): Graphe des interactions pour Fx

e) Evolution de l'effort F_x en fonction des paramètres du régime de coupe

La (figure IV-30) montre l'effet de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur l'effort axial F_x . Elle illustre l'effet significatif des paramètres de coupe. On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance et la profondeur de passe l'effort axial augmente.

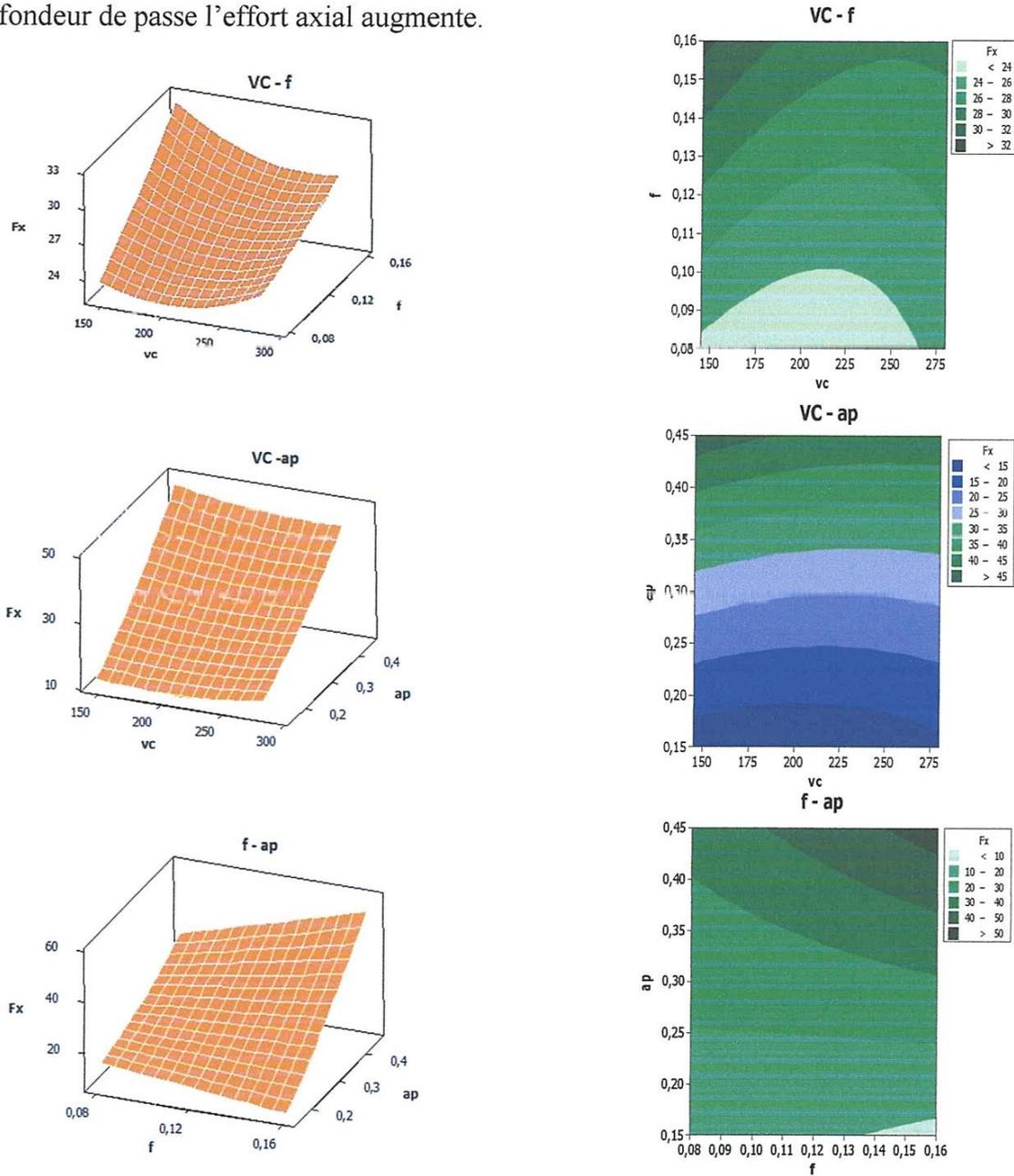


Figure (IV.30): Surface de réponse de l'effort de coupe (F_x) en fonction de V_c , f , ap et graphe de contour.

IV.3.5 Modèles de l'effort de coupe F_y en fonction des paramètres de coupea) Analyse de la variance (ANOVA) pour F_y

Le (tableau IV-13) présente l'analyse de la variance ANOVA pour la composante radiale F_y . On remarque que la profondeur de passe a un impact significatif puisque la valeur de la probabilité P est inférieure à 0.05 avec une contribution de 68.93%, aussi avec l'avance. Les autres paramètres et leurs interactions ne présentent pas une influence significative sur l'effort F_y car P-value > 0,05.

Coefficients de régression estimés pour F_y		Analyse des variances pour F_y						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
V_c (m/min)	0,24201	V_c (m/min)	2	1,59	3,19	0,11	0,893	0.008
f (mm/tr)	622,1	f (mm/tr)	2	1975,75	987,87	29,73	0,000	22.23
ap (mm)	94,63	ap (mm)	2	6125,48	3062,74	92,19	0,000	68.93
V_c*f	-2,0725	V_c*f	4	435,22	108,81	3,28	0,072	4.89
V_c*ap	-0,0073	V_c*ap	4	27,06	6,77	0,20	0,929	0.30
$f*ap$	236,9	$f*ap$	4	49,61	12,40	0,37	0,822	0.55
Constante	-52,09	Erreur	8	265,78	33,22			
Coefficient de détermination $R^2= 89,5\%$		Total	26	8886,50				

Tableau (IV.13) : Résultats de l'analyse de la variance pour F_y

b) Analyse de régression

Le (modèle IV-17) qui décrit la variation de l'effort radial en fonction de tous les facteurs peut être écrit de la façon suivante :

$$F_y = -52,09 + 0,24201v_c + 622,1f + 94,63a_p - 2,0725v_c*f - 0,0073v_c*a_p + 236,9f*a_p \dots \dots \dots (IV-17)$$

Ou $R^2= 89,5\%$

c) Effets principaux pour F_y

La (figure IV-31) montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort radial F_y . On remarque que F_y s'élève avec l'augmentation de l'avance. Alors l'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande à celle de l'avance et de la vitesse de coupe.

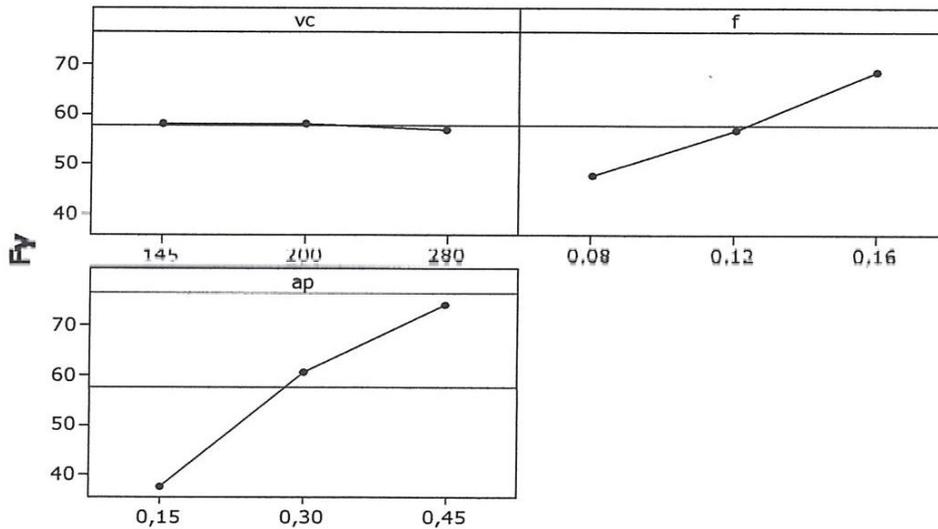


Figure (IV.31) : Graphique des effets principaux pour F_y

d) Diagramme des interactions pour F_y

La (figure IV-32) présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $VC*f$ est supérieure que les deux autres interactions avec une contribution de 4.89% suivant le (tableau IV-13).

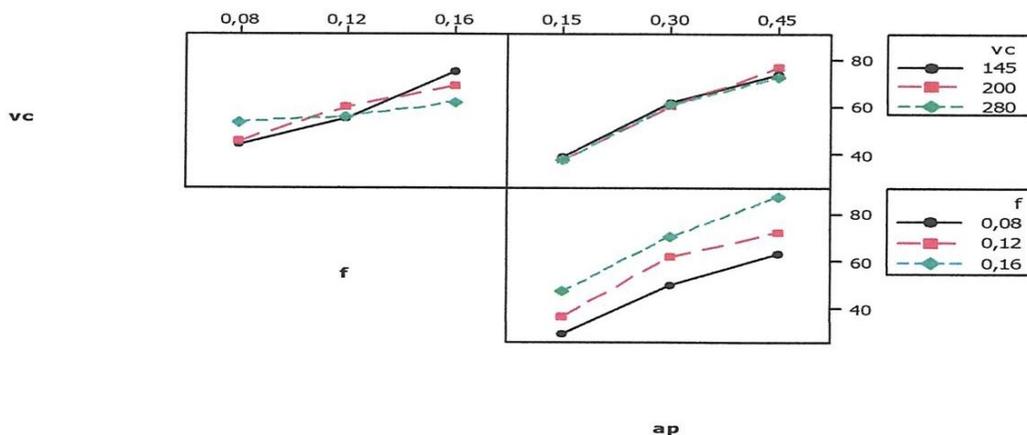


Figure (IV.32): Graphe des interactions pour F_y

e) Evolution de l'effort F_y en fonction des paramètres du régime de coupe

La (figure IV-33) illustre la surface de réponse du critère (F_y) en fonction de (V_c , f , a_p) et les graphes de contour. Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (F_y) et les conditions d'exploitation souhaitables.

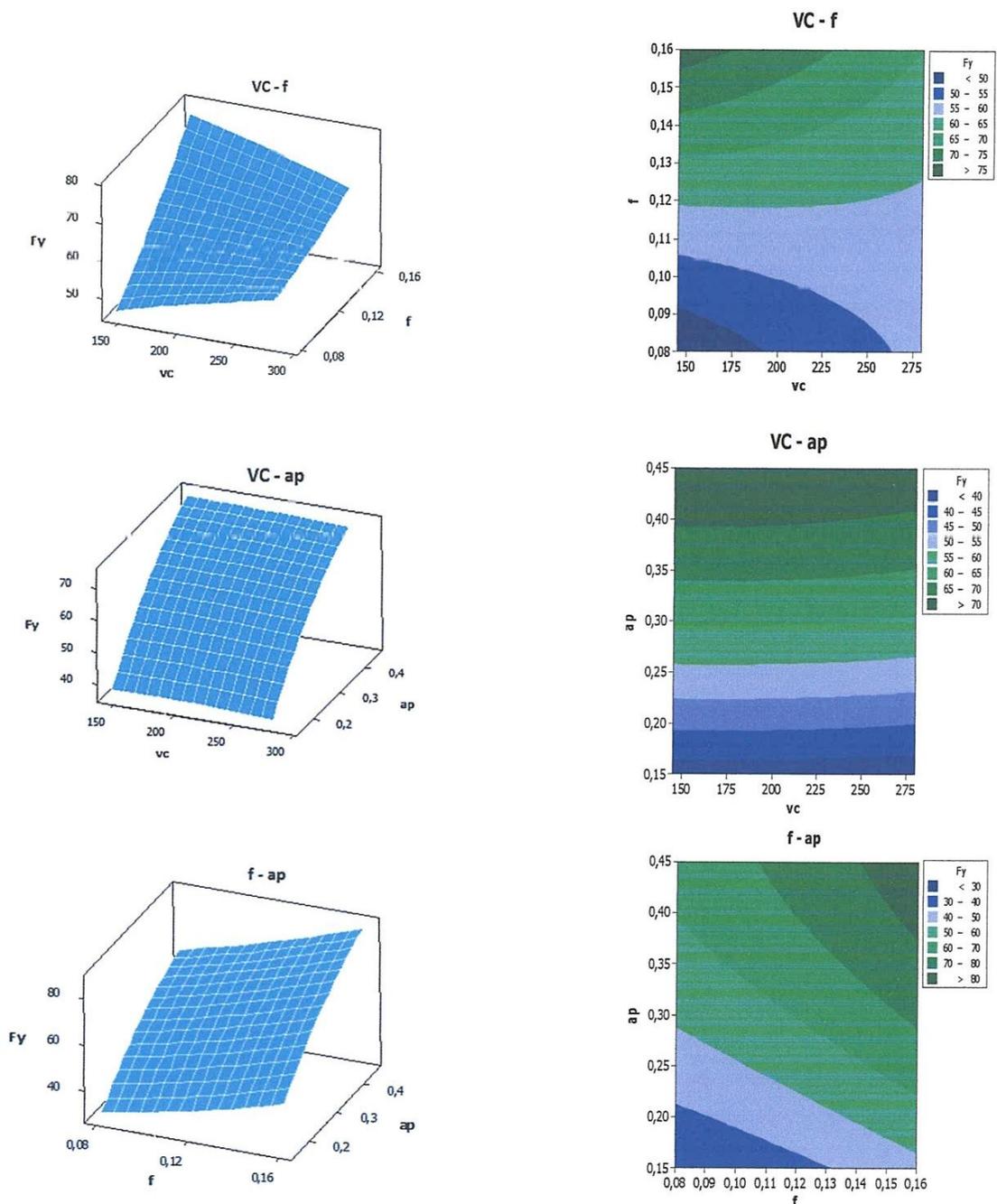


Figure (IV.33): Surface de réponse de l'effort de coupe (F_y) en fonction de V_c , f , a_p et les graphes de contour.

La présentation en 3D (figure IV-33) montre que la pente de la profondeur de passe est plus supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort axiale suivi de l'avance et en dernier lieu de la vitesse de coupe.

IV.3.6 Modèles de l'effort de coupe F_z en fonction des paramètres de coupe

a) Analyse de la variance (ANOVA) pour F_z

L'analyse de variance ANOVA présentée au (tableau IV-14) pour la composante de l'effort tangentiel F_z montre que la profondeur de passe a un grand effet significatif, sa contribution est de 66.44% sur la variation de cette composante, suivie par l'avance avec une contribution de 24.58%. Par contre la vitesse de coupe n'a pas un effet significatif sur l'effort tangentiel puisque la valeur de P est supérieure à 0,05. L'interaction $f*ap$ influe aussi sur l'effort tangentiel avec une contribution de 5.98%.

Coefficients de régression estimés pour F_z		Analyse des variances pour F_z						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
V_c (m/min)	0,1207	V_c (m/min)	2	354,2	177,1	2,23	0,170	0.82
f (mm/tr)	-20,4	f (mm/tr)	2	10591,7	5295,9	66,71	0,000	24.58
ap (mm)	48,56	ap (mm)	2	28629,0	14314,5	180,31	0,000	66.44
V_c*f	-0,3174	V_c*f	4	66,7	16,7	0,21	0,926	0.15
V_c*ap	-0,2861	V_c*ap	4	231,5	57,9	0,73	0,597	0.53
$f*ap$	2303,6	$f*ap$	4	2578,1	644,5	8,12	0,006	5.98
Constante	0,04	Erreur	8	635,1	79,4			
Coefficient de détermination $R^2= 90,6\%$		Total	26	43086,4				

Tableau (IV.14) : Résultats de l'analyse de la variance pour F_z

b) Analyse de régression

Le (modèle IV-18) qui décrit la variation de l'effort tangentiel en fonction de tous les facteurs significatifs peut être écrit de la façon suivante :

Modèle complet :

$$F_z = 0,04 + 0,1207vc - 20,4f + 48,56ap - 0,3174vc*f - 0,2861vc*ap + 2303,6f*ap \dots \dots \dots (IV-18)$$

Ou $R^2 = 90,6\%$

c) Effets principaux pour Fz

La (figure IV-34) montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort tangentiel Fz. On remarque que Fz s'élève avec l'augmentation de la profondeur de passe. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande.

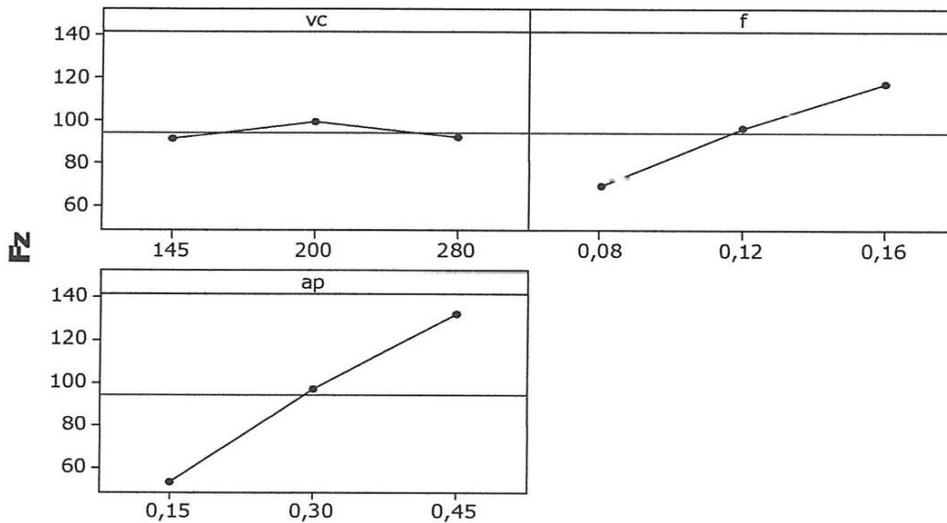
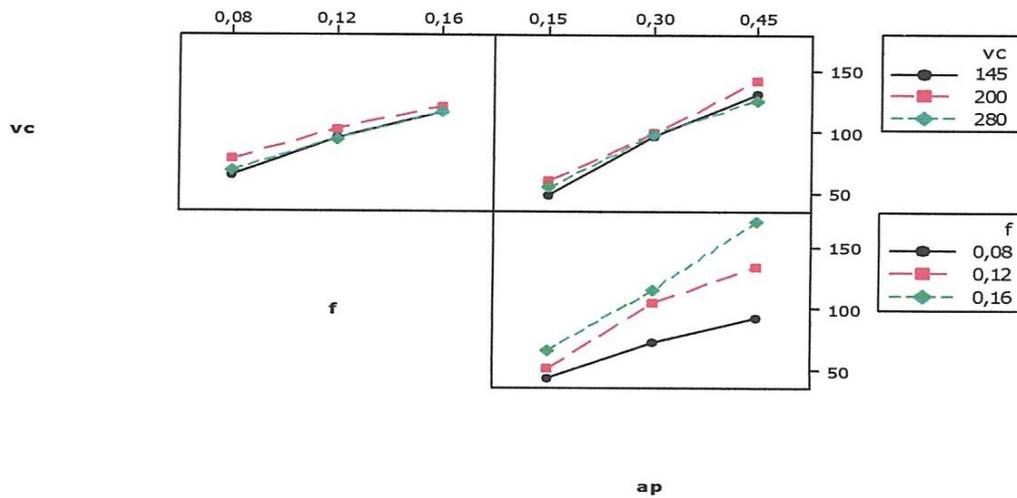


Figure (IV.34) : Graphique des effets principaux pour Fz

L'analyse détaillée de surface de réponse de l'effort tangentiel (Fz) trouvé (figure IV-34), confirme que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à la diminution de l'effort tangentiel. La variation de la profondeur de passe conduit à une croissance de l'effort tangentiel. On constate alors que l'effort augmente avec l'augmentation la profondeur de passe.

d) Diagramme des interactions pour Fz

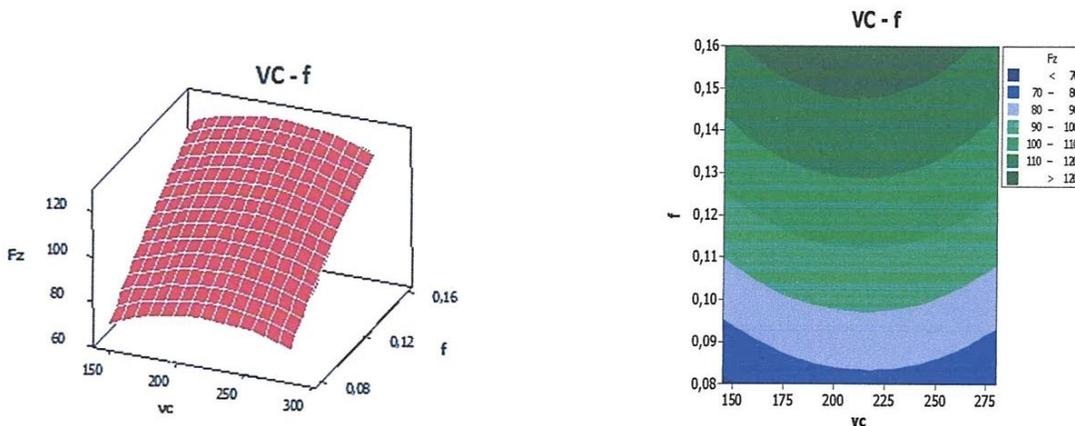


Figure(IV.3): Graphe des interactions pour Fz

Le diagramme des interactions nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. Le diagramme (figure IV-35) montre l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur. L'analyse des résultats montre que l'interaction $f*ap$ est supérieure que les deux autres interactions avec une contribution de 5.98% suivie par l'interaction $Vc*ap$ avec une contribution de 0.53% d'après le tableau (IV.14).

e) Evolution de l'effort Fz en fonction des paramètres du régime de coupe

Le graphe de contour montre la relation entre une variable de réponse (Fz) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation (figure IV-36).



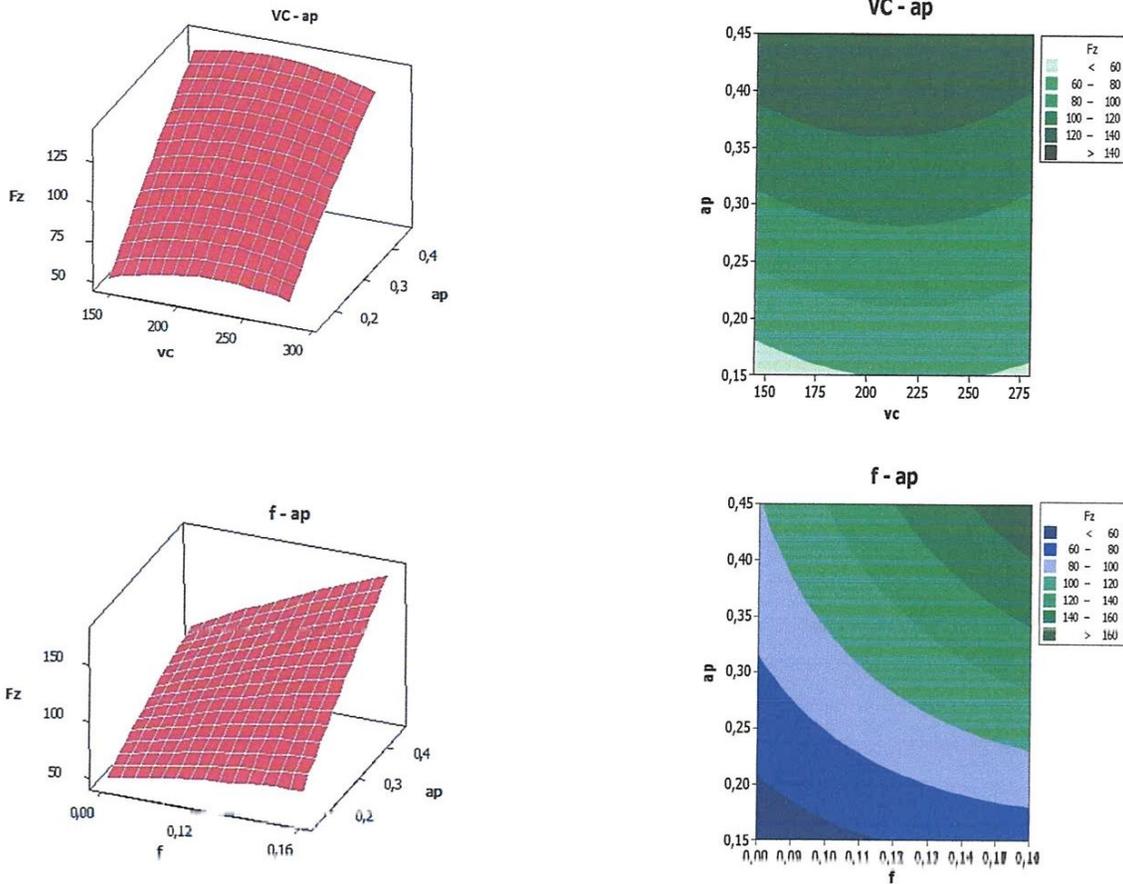


Figure (IV.36): Surface de réponse de l'effort de coupe (F_z) en fonction de V_c , f , a_p et les graphes de contour

L'évolution de l'effort tangentiel en fonction de (f) et (a_p) (figure IV-36) illustre que cet effort est plus affecté par la profondeur de passe. L'avance affecte considérablement l'effort tangentiel comme le montre le graphe des effets (figure IV-36).

Conclusions

L'adoption d'un plan factoriel complet L_{27} , pour l'étude de l'influence des éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p) sur les critères de rugosité et les efforts de coupe, nous a permis de quantifier le degrés d'influence des différents éléments considérés. En effet les résultats obtenus ont conduit aux conclusions suivantes :

- Pour les conditions de coupe testées, l'analyse ANOVA montre que la vitesse de coupe est le paramètre le plus influent sur les différents critères de la rugosité (R_a , R_t , R_z) avec une contribution de (22.18; 67.04 ; 72.61)% respectivement. Cette analyse permet

aussi de dire que l'avance possède une influence significative ($P=0.000$). Tandis que pour la profondeur de passe, l'analyse montre que l'influence de ce facteur est négligeable.

- L'analyse des résultats des efforts de coupe (F_x ; F_y ; F_z) montre que parmi ces facteurs (V_c , f et a_p), la profondeur de passe est le facteur plus influent avec une contribution de (79.98; 68.93 ; 66.44)% respectivement, suivi de l'avance par tour qui possède une influence non négligeable. Par ailleurs l'analyse des droites des effets principaux permet de conclure que l'influence du facteur vitesse de coupe est négligeable.

Conclusion générale

La deuxième série réalisée avec un plan de taguchi complet nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Dans les conditions d'usinage adoptées, la vitesse de coupe est le paramètre le plus influent sur la rugosité, suivie de l'avance par tour qui possède une influence non négligeable, en fin la profondeur de passe n'a presque pas d'influence sur la rugosité de surface.
- Les différents modèles des efforts de coupe indiquent que la profondeur de passe reste le facteur qui influe énormément sur les différentes composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z), sa contribution dépasse 79.98% pour F_x , 68.93% pour F_y et 66.44% pour F_z .
- La détermination des modèles mathématiques représentatifs de l'évolution des critères de rugosité et des composantes de l'effort de coupe, ont permis de quantifier le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les différents paramètres technologiques. Ces modèles représentent aussi un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent la détermination des conditions d'usinage optimales et l'élaboration des abaques permettant le choix d'un régime de coupe.

Nomenclatures

Nomenclature

ANOVA	Analyse de la variance.
a_p	Profondeur de passe (mm).
V_c	Vitesse de coupe (m/min).
f	Avance par tour (mm/tr).
F_x	Effort de coupe axial (N).
F_y	Effort de coupe radial (N).
F_z	Effort de coupe tangentiel (N).
R_a	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
R_t	Rugosité totale (μm).
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
T_u	Temps de coupe.
VB	Hauteur de l'usure en dépouille (mm).
VN	Usure en taille (mm)



Références

Références

- λ [1] **HAMADI BILLEL**. Etude des revêtements dure et applications sur outil de coupe. Thèse de magister. Université mentouri Constantine.2010.
- [2] **Graham T. Smith**, handbook cutting tool technology ,University Southampton U. K., 2008.
- [3] **Alexandre Toumine**, « Cours d'usinage », Groupe conception production, INSA de Lyon, France.
- [4] **E. Ferkous** « Amélioration des propriétés mécaniques des outils de coupe par dépôt des couches de Nitrure de Titane dopé au fer», Thèse de doctorat d'état, Département de Génie Mécanique, Juin 2004.
- [5] Marek **Balazinski**, « Fabrication *mécanique* avancée , , **MEC 4530** », Ecole Polytechnique de Monreale, **CAN**
- [6] **Gautier LIST**, étude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-CO , par la caractérisation de l'interface outil-coupeau, Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Bordeaux.2004.
- [7] **Y. Schoefs, S. Fournier, J. C. Leon** « Productique mécanique » Edition Delagrave, 1994,France.
- λ [8] **ACHOUR Ali**, étude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revetment, Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine.2006.
- [9] **P. BOURDET**. La coupe des métaux, Dpt G. Mécanique, ESN Cachane,2004
- [10] **S.BENSAADA**, coupe des métaux Ed. Univ. Européennes.
- [11] **C.H. Che Haron** , Wear of coated and uncoated carbides in turning tool steel, Journal of Materials Processing Technology.2001.
- [12] **Samir K**, Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel, Department of Mechanical Engineering, The University of Akron, Akron.2005.
- [13] **J.A. Gani**, wear mechanisme of TiN coated and undaoted cermrets tools at higt cutting speed application, journal of matériels processing technology 153-154-(2004) 1067 -1073

[14] **M.A. YALLESE.** des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100Cr6(60HRC) avec le CBN , laboratoire mécanique et structure (LMC) université de guelma.2007.

5