

17/3/11 6/15

**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 : BOUYEDDA Mohammed



***Etude des performances des matériaux de coupe – Application aux plaquettes de l'E.P.E***



Sous la Direction de :

**Pr. Yelles M.A**

**Année universitaire 2011/2012**

# Remerciement

*À la fin de ce projet nous tenons à remercier  
Le bon Dieu qui nous a donné la patience, le courage d'achever ce travail  
malgré toutes les difficultés de ce projet.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur : Pr. Yalèse. M. A*

*Qui a géré avec compétence, et efficacité le déroulement*

*De notre travail et qui nous a bien orienté,*

*Pour son aide précieuse et ses conseils*

*Judicieux.*

*Nous tenons également à remercier*

❖ *Toutes les personnes qui ont contribué à notre formation et en  
particulier Dr. Belhadi. S*

❖ *Toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin  
tout le long de ce travail.*

BOUYEDDA Mohammed



# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	01
<b>Chapitre I- Etude bibliographique sur la coupe des métaux</b>	
I-1 Généralité sur la coupe des métaux	02
I-1.1 Introduction sur la coupe des métaux	02
I-1.2 Définition de l'usinabilité	02
I-1.3 Critère d'évaluation l'usinabilité	02
I-2 Matériaux de coupe	03
I-2.1 Introduction	03
I-2.2 Matériaux d'outillage et exigence principale de l'outil de coupe	03
I-2.3 Classification des matériaux des outils de coupe	04
I-2.3.1 Aciers au carbone	04
I-2.3.2 Aciers rapides (au tungstène trempé)	04
I-2.3.3 Alliages spéciaux	05
I-2.3.4 Nitrure de bore cubique polycristallin, CBN (BN)	07
I-2.3.5 Diamant	08
I-2.4 Évolution des matériaux des outils de coupe	08
I-2.5 Revêtement pour outils coupants	10
I-2.5.1 Fonction d'un revêtement en usinage	10
I-2.5.2 Propriétés des revêtements	10
I-2.5.3 Types de revêtements	11
I-3 Endommagement des outils de coupe	14
I-3.1 L'usure des outils	14
I-3.2 Usure des arêtes de coupe	15
I-4 Rugosité des surfaces usinées	17
I-4.1 Rugosité	17
I-4.2 Défauts de surface	19
I-5 Les efforts de coupe	20
I-5.1 Généralités	20
I-5.2 Intérêt de mesure des efforts de coupe	21
I-5.3 Influence des différents facteurs sur l'effort de coupe	21
I-6 Travaux de recherche en usinage avec différents types d'outil de coupe	23
I-7 Conclusion	28
<b>Chapitre II- Procédure expérimentale</b>	
II-1 Introduction	29
II-2 Matériels utilisés	29
II-3 Planification des expériences	37
II-4 Conclusion	39



## Chapitre III- Comportement des matériaux de coupe face à l'acier XC48

III.1 Introduction	40
III-2 Essais réalisés	40
III-3 Performances des matériaux de coupe	40
III-3.1 Les performances des matériaux de coupe à $V_c=150\text{m/min}$	40
III-3.1.1 Evolution de l'usure	40
III-3.1.2 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps	41
III-3.1.3 Evolution du Pression spécifique de coupe en fonction du temps	43
III-3.1.4 Evolution de la rugosité en fonction du temps	44
III-3.2 Les performances des matériaux de coupe à $V_c=300\text{m/min}$	45
III-3.2.1 Evolution de l'usure	45
III-3.2.2 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps	46
III-3.2.3 Evolution de la pression spécifique de coupe en fonction du temps	47
III-3.2.4 Evolution de la rugosité en fonction du temps	48
III-4 Conclusion partielle	50

## Chapitre IV- Application de la méthodologie de surface de réponse pour la prédiction des modèles mathématiques

IV-1 Introduction	51
IV-2 Plan de Taguchi pour le cas du carbure GC1025	51
IV-2.1 Evolution de la rugosité, des efforts de coupe et de l'usure en dépouille en fonction des paramètres d'usinage	51
IV-2.1.1 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $R_a$	52
IV-2.1.2 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $R_z$	54
IV-2.1.3 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $R_t$	57
IV-2.1.4 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $F_x$	60
IV-2.1.5 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $F_y$	63
IV-2.1.6 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $F_z$	66
IV-2.1.7 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $VB$	69
IV-3 Modélisation de la rugosité et des efforts de coupe pour un plan de 27 essais	72
IV-3.1 Résultats avec l'outil carbure GC1025	72
IV-3.2 Modèle de la rugosité $R_a$ en fonction des paramètres de coupe	73
IV-3.3 Modèles de la rugosité $R_z$ en fonction des paramètres de coupe	77
IV-3.4 Modèles de la rugosité $R_t$ en fonction des paramètres de coupe	80
IV-3.5 Modèles de l'effort axial $F_x$ en fonction des paramètres de coupe	83
IV-3.6 Modèles de l'effort de coupe $F_y$ en fonction des paramètres de coupe	86
IV-3.7 Modèles de l'effort de coupe $F_z$ en fonction des paramètres de coupe	89
IV.4 Conclusion	92
<b>Conclusion générale</b>	93
<b>Perspectives</b>	94
<b>Nomenclature</b>	95
<b>Références bibliographiques</b>	96



# *Introduction générale*

Depuis toujours, le fabricant essaye dans les stratégies d'optimisation des processus d'usinage actuellement préconisées visent à l'augmentation de la productivité, de la qualité de surface, ou à réduire les coûts par plusieurs voies, recherche du débit optimal d'enlèvement de matière, amélioration de la précision de l'usinage, réduction du nombre d'opérations (traitement thermique et rectification finale par exemple) et recherche d'une plus grande fiabilité au niveau des propriétés d'usage des pièces usinées.

Il est important d'utiliser un matériau de coupe et une géométrie de plaquette adaptée à la matière à usiner pour obtenir un processus d'usinage productif et exempt de problèmes. D'autres paramètres, tels que les conditions de coupe, la trajectoire d'outil, etc. doivent aussi être pris en compte pour obtenir de bons résultats.

La première chapitre est consacrée une revue bibliographique sur la coupe des métaux. Dans cette partie, nous avons présentés une introduction sur la coupe des métaux qui comporte la définition de l'usinabilité et son évaluation, suivie par les matériaux de coupe et leur classification, ainsi que les revêtements pour outils coupants. Dans le point qui suit nous avons définie l'endommagement et l'usure. La fin de cette étude est réservée à un résumé de cinq articles sur la coupe des métaux.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini une méthodologie de travail qui repose sur la planification des expériences. Nous avons présenté les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisés.

Dans le troisième chapitre, nous présentons en premier temps une comparaison entre les performances en termes d'usure des différents types de matériaux de coupe (les carbures revêtu GC1025 et GC3205, le carbure non revêtu H10F, le cermet revêtu GC1525 et la céramique CC650) en usinant l'acier XC48 à deux vitesses de coupe  $V_c=150\text{m/min}$  et  $V_c=300\text{m/min}$ . 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.

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté une étude statistique (analyse de variance, régression générale, interactions) basée sur la méthodologie de surface de réponse et cela dans le but de déterminer des modèles mathématiques qui permet à la prédiction de la rugosité, des efforts de coupe ainsi que l'usure et cela en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $T_u$ ) pour une plan réduit de 9 essais et des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ , et  $a_p$ ) pour une plan complète de 27 essais, lors de usinage de l'acier XC48 par le matériau de coupe le carbure revêtu GC1025

En dernier lieu, nous avons présenté une conclusion générale, suivi par une liste des références bibliographiques.

Chapitre I  
Etude bibliographique sur  
les performances des matériaux de coupe

## **I-1 Généralité sur la coupe des métaux**

### **I-1.1 Introduction sur la coupe des métaux**

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage...) en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes.

Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage.

### **I-1.2 Définition de l'usinabilité**

L'usinabilité est la capacité d'un matériau M1 à être usiné par un matériau usinant M2. Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif de l'usineur. L'usinabilité peut être évaluée à partir d'une combinaison des paramètres suivants :

- L'évolution des efforts de coupe et de la puissance consommée
- Le débit copeaux
- La durée de vie des outils
- La productivité
- L'intégrité de surfaces

La notion d'usinabilité dépend donc d'un critère choisi par l'usineur mais reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût et/ou à la meilleure qualité pièce [1].

### **I-1.3 Critère d'évaluation l'usinabilité**

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont: [2]

- ❖ la durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps ;
- ❖ les conditions de coupe ;
- ❖ les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- ❖ le fractionnement du copeau ;
- ❖ l'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité ;
- ❖ la productivité.



## I-2 Matériaux de coupe

### I-2.1 Introduction

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu.

Dans le courant du XXe siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces [3].



#### Domaines

Les matériaux de coupe sont des composants élaborés et utilisés pour des outils de coupe destinés à l'usinage mécanique.

- Outils de coupe fixes : monoblocs, à pastilles brasées, à pastilles montées, ils sont généralement utilisés en tournage mécanique et en fraisage.
- Outils de coupe tournants : ce sont les forets hélicoïdaux, alésoir-machine, fraise à deux tailles [4].

### I-2.2 Matériaux d'outillage et exigence principale de l'outil de coupe

Les performances des machines outils dépendent étroitement de celles des outils de coupe qu'elles actionnent et des conditions d'utilisation des outils. Pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'user, ainsi la matière qui la constitue doit être plus dure que celle de la pièce à usiner. Comme la dureté d'un métal et sa résistance varient en sens inverse, on doit prendre des précautions particulières pour avoir une partie active, sur laquelle se forme les copeaux, très durs et un corps résilient et résistant à la flexion et la torsion. D'où l'idée de constituer un outil en deux parties.

- L'une (active) en matériau dur avec ou sans traitement thermique.
- L'autre (passive) sur laquelle est rapportée la partie active, soit par plaquette montée mécaniquement ou par soudo-brasage, soit par soudage électrique par rapprochement, soit par

sertissage. La partie active de l'outil servant à couper la matière doit posséder les qualités suivantes:

- Résistance élevée aux sollicitations (résistance aux chocs, à la traction, compression etc....).
- Dureté élevée des faces de coupe et de dépouille (des surfaces dont l'intersection forme l'arête coupante) pour pouvoir pénétrer dans le métal usiné.
- Faible rugosité ( $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ ) des faces de coupe et de dépouille. Conservation de la dureté à des températures élevées (500 à 900°C) pour limiter les effets de l'usure sur les faces de coupe et de dépouille.

Depuis 1900 beaucoup de travaux ont été réalisés dans le domaine de coupe des métaux et plusieurs matériaux à outils ont été successivement introduits dont les performances sont de plus en plus élevées en ce qui concerne la dureté des matériaux susceptibles d'être usinés et les vitesses de coupe utilisables.

### **I-2.3 Classification des matériaux des outils de coupe**

Une classification des matériaux par ordre de dureté croissant peut être établie comme suit:

#### **I-2.3.1 Aciers au carbone**

##### *a) Aciers au carbone trempé*

Ce sont les aciers de désignation XC et dont la teneur en carbone dépasse 0,6% (XC82, XC100) qui présentent une dureté à froid de 60 HRC. Leur vitesse de coupe est très faible, car un échauffement supérieur à 250°C leur fait perdre leur tenue (dureté).

Ces aciers acquièrent toute leur dureté par une trempe à l'eau après un chauffage à 750°C environ. Donc ces outils sont fabriqués d'une seule pièce (acier catégorie dur et extra dur). Ces aciers sont employés dans l'industrie uniquement pour les outils à faible vitesse de coupe (tarauds, filière, alésoirs, pour le travail à main).

##### *b) Aciers au carbone alliés*

On sait que le chrome et le molybdène permettent au carbone d'obtenir son maximum de dureté. Ce sont donc ces éléments que l'on retrouvera dans la composition des aciers alliés pour outils. Ils seront utilisés dans les mêmes conditions que les aciers XC mais permettront la coupe de matériaux plus durs.

#### **I-2.3.2 Aciers rapides (au tungstène trempé)**

Par aciers "rapides" il faut entendre "aciers à coupe rapide". On effectue, 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 austénisés 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 leur performances soient relativement faibles, ils sont encore utilisés dans différents domaines, tels que:

- Outils à tranchants multiples (fraise, taraud, forêt).



- Outils de forme complexe.
- Outils à tranchant unique utilisés pour la fabrication des outillages.

Il est nécessaire de choisir une nuance d'acier rapide adaptée aux travaux à réaliser. 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 corrosion.

Z: allie, W: tungstène, K: cobalt, C: chrome, V: vanadium, D: molybdène

Les aciers rapides sont chers et ils sont utilisés sous la forme de plaquettes. Les aciers rapides non revêtus ne sont pas recommandés pour usiner les matériaux dont la dureté est supérieure à HR30.

On distingue:

**-Les aciers rapides ordinaires (A.R.O)** a deux composants : C: 0,6 à 0,7% W: 14à16%, température de trempe 1150 à 1200°C, ils conservent toute leur dureté Jusqu'à 400°C.-L.es aciers rapides supérieurs (A.R.S) au moins trois composants : C: 0,65à0, 75% W:18%, Cr:4%, Mo: 0,7% température de trempe 1200 à 1250°C, ils conservent toute leur dureté jusqu'à 500°C.

**-Les aciers rapides extra supérieurs (A.R.E.S)** adjonction de cobalt. C: 0,65à0, 85%, W:20%, Cr: 4à 5%, Mo:1%, Va: 1% Co: 11à15%, température de trempe: 1300 à 1320°C, ils conservent toute leur dureté jusqu'à 600°C.

### I-2.3.3 Alliages spéciaux

Ces matériaux ne contiennent pas de fer: ce ne sont donc pas des aciers. Ils ne subissent pas de traitements thermiques et ne se forgent pas. Leur dureté provient de leur élaboration et parmi eux on peut citer :

- Les stellites
- Les carbures métalliques
- Les céramiques

#### a. *Les stellites*

Ce sont des alliages de cobalt (55%), Chrome (33%), tungstène (10%), carbone (2%), point de fusion 1280°C. Leur dureté est comparable à celle des aciers trempés, elle ne diminue qu'après réchauffage à 700°C. Ils autorisent donc des vitesses de coupe plus élevées que les aciers rapides.

Ils sont sensibles aux brusques changements de températures, Aussi faut-il travailler sous arrosage constant et non intermittent. Ils ne conviennent pas pour la coupe des matériaux tendres.

#### b. *Les Carbures métalliques*

Pour permettre une coupe encore plus rapide, les outils en aciers au carbone ou en acier allié sont remplacés par des alliages métalliques élaborés par frittage de carbures très durs. Les carbures métalliques sont des agglomérés de poudre de cobalt, de carbures de tungstène, de tantale, et de bore.

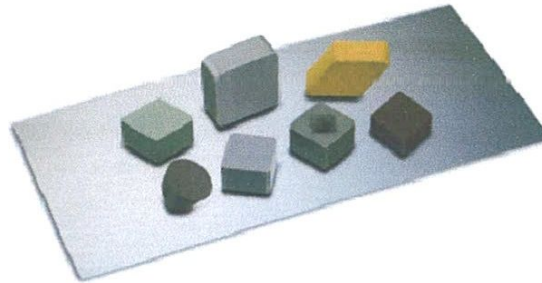


Le mélange des carbures et de la poudre de cobalt est comprimé à  $4000\text{kg/cm}^2$  dans un moule ensuite cuit en atmosphère d'hydrogène à  $850^\circ\text{C}$ , puis chauffé à  $1500^\circ\text{C}$ . A cette température, le cobalt seul fond et sert de liant. Ce mode d'obtention est appelé frittage.

La dureté des carbures métalliques est voisine de celle du diamant et ils la conservent jusqu'à  $1000^\circ\text{C}$ . Ils permettent de travailler quatre à huit fois plus vite qu'avec des aciers rapides mais sont sensibles aux brusques variations de températures.

### c. Les Céramiques

Les céramiques (figure I-1) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques [5].



Ils sont comme les carbures, des matériaux obtenus par frittage. Mais les carbures métalliques sont remplacés ici par des éléments à base d'alumine pure ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) c'est la solution la plus ancienne sous forme de poudre  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; avec utilisation comme liant l'oxyde de chrome.

La solution la plus récente utilise une poudre à base de nitrure de bore. Donc c'est un corps très dur 60 HRC ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et 72 HRC (à base de nitrure de bore).

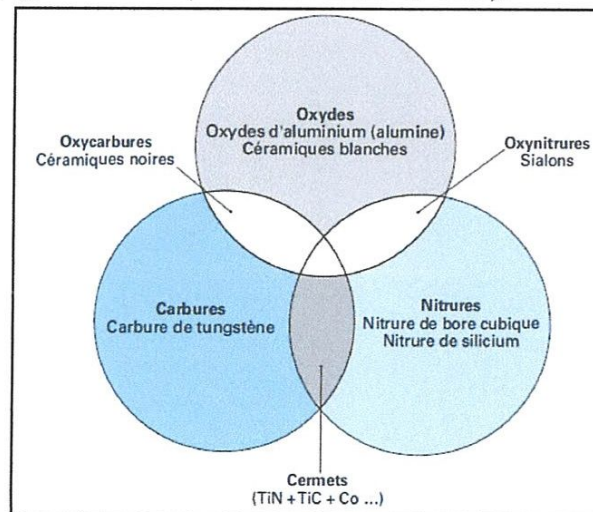


Figure I-1 : Céramiques

### ✓ Applications

Les nuances céramiques conviennent à une grande variété d'applications et de matières. Les applications les plus courantes sont le tournage à grande vitesse, mais ces nuances conviennent aussi à l'usinage de gorges et au fraisage. Les propriétés spécifiques des nuances

céramiques autorisent une productivité élevée si elles sont appliquées correctement. Les applications et la mise en œuvre des nuances céramiques à bon escient sont des critères importants pour la réussite. Les limites générales des céramiques incluent la résistance aux chocs thermiques et la ténacité.

✓ **Quelques propriétés:**

- 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 exemple :

- 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.

#### I-2.3.4 Nitrure de bore cubique polycristallin, CBN (BN)

✓ **Définition et propriétés**

Le nitrure de bore cubique polycristallin, ou CBN, est un matériau avec une excellente résistance à chaud. Il peut être utilisé à très grande vitesse de coupe. Il possède aussi une bonne résistance aux chocs thermiques et une ténacité élevée.

Les nuances CBN modernes sont des matériaux composites à base de céramique avec une teneur en CBN de 40 à 65 %. Le liant céramique augmente la résistance à l'usure du CBN qui serait sujet à l'usure chimique autrement. Un autre groupe de nuances est constitué par les nuances à forte teneur en CBN, de l'ordre de 85 à 100 %. Ces nuances peuvent contenir un liant métallique pour améliorer leur ténacité.

Les plaquettes CBN ont un insert CBN brasé sur une plaquette en carbure cémenté figure I-2. La technologie Safe-Lok™ assure la stabilité des inserts CBN sur les plaquettes négatives [6].

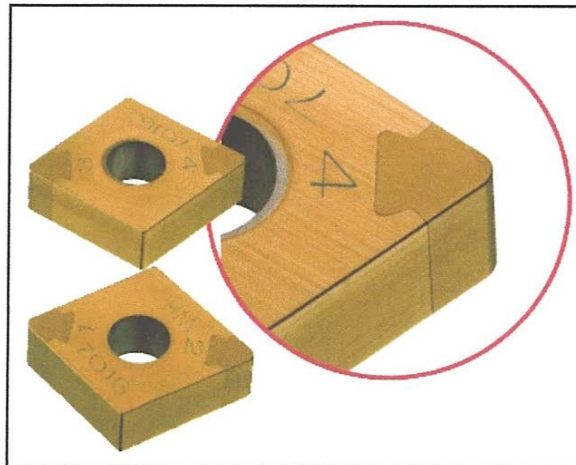


Figure I-2: plaquette en carbure cémenté

### ✓ Applications

Les nuances CBN sont très utilisées pour le tournage de finition des aciers trempés d'une dureté supérieure à 45 HRC. Pour les matières d'une dureté supérieure à 55 HRC, le CBN est le seul matériau de coupe capable de remplacer les méthodes traditionnelles de rectification. Dans les aciers plus doux, d'une dureté inférieure à 45 HRC, la résistance à l'usure du CBN est moins bonne en raison de la présence d'une plus grande quantité de ferrite dans la matière.

Le CBN s'utilise aussi pour l'ébauche des fontes grises à grande vitesse, tant en tournage qu'en fraisage.

#### I-2.3.5 Diamant

D'origine naturelle ou synthétique c'est le matériau le plus dur. Son prix d'achat élevé en limite l'utilisation. On utilise dans l'industrie des diamants généralement impropres à la bijouterie (types noirs).

Le diamant se présente sous deux formes:

- Poudre collée sur un support en fonte pour les meules destinées à l'affûtage des outils des carbures.

- Grain serti ou brasé sur un corps pour les outils tranchants réservés à des travaux de finition. Exemple comparatif: finition d'un alésage de piston.

- Outil carbure: 2000 pièces entre deux affûtages, rugosité obtenue  $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ .

- Outil diamant: 5000 pièces entre deux affûtages, rugosité obtenue  $R_a = 0.4 \mu\text{m}$

L'outil diamant trouve surtout son emploi à très grandes vitesses sur les matériaux ductiles que durs. Travail de finition du cuivre, bronze, aluminium pour obtenir un beau poli de la surface le diamant peut usiner tous les métaux quelque soit leur dureté.



#### I-2.4 Évolution des matériaux des outils de coupe

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans : figures I-3 et I-4 [7].



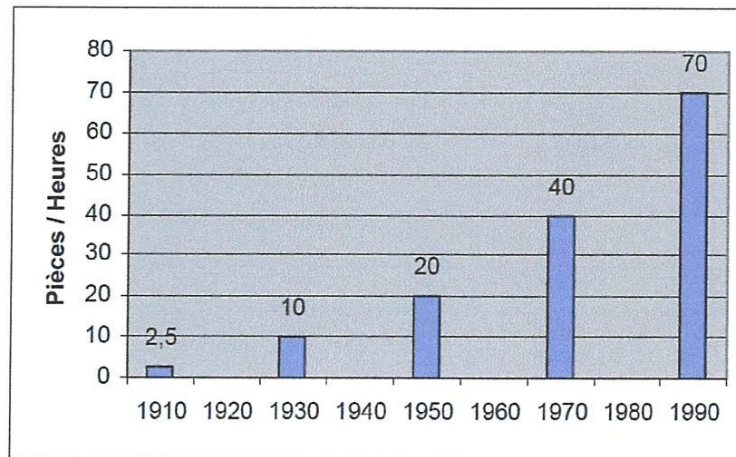


Figure I-3 : Augmentation de la productivité en usinage Acier

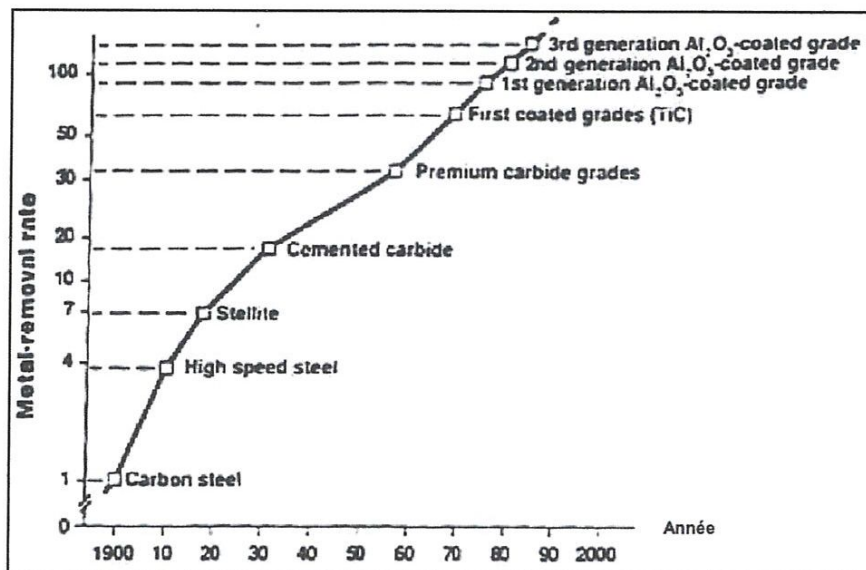


Figure I-4 : Augmentation de la productivité due à l'évolution des matériaux des outils de coupe

Répartition des matériaux utilisés comme matériaux de coupe : Figure I-5.

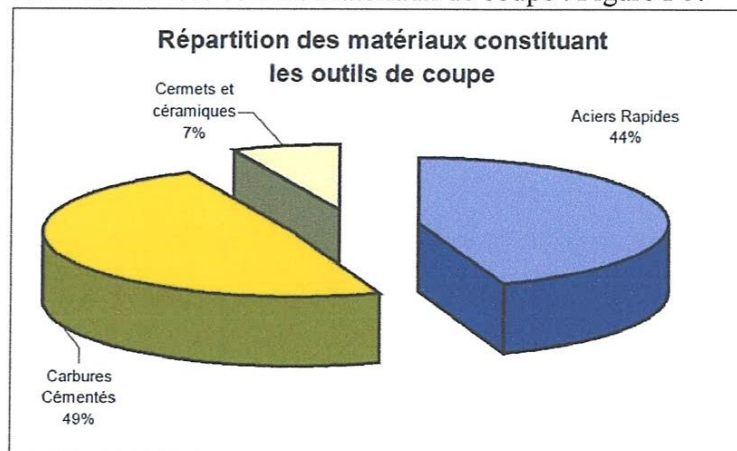


Figure I-5 : Répartition des matériaux constituant les outils de coupe

### I-2.5 Revêtement pour outils coupants

Depuis plus de dix ans, l'utilisation d'outils coupants non-revêtus en usinage tend à disparaître au profit d'outils revêtus. Cette tendance, d'abord instaurée en tournage, est peu à peu généralisée pour tous les outils coupants (fraisage, taillage et perçage) et ce, quelque que soit le matériau substrat (acier rapide ou carbure) [8].

Les revêtements d'outils sont donc principalement conçus pour les protéger contre les nombreuses agressions thermiques et mécaniques auxquelles il est soumis lors d'une opération d'usinage, surtout à grande vitesse, et par conséquent, pour limiter les quatre phénomènes d'usure que sont:

- L'adhésion entre usinant et usiné ;
- L'abrasion de l'usinant par des particules dures provenant de l'usiné ;
- L'oxydation de l'usinant ;
- La diffusion de matière de l'usinant vers l'usiné ;

Comme nous pouvons le voir sur la figure I-6, le rôle recherché pour le revêtement est complexe. Il doit à la fois protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), faire office de barrière thermique, résister à la fissuration et tout ceci grâce à un dépôt d'épaisseur très faible.

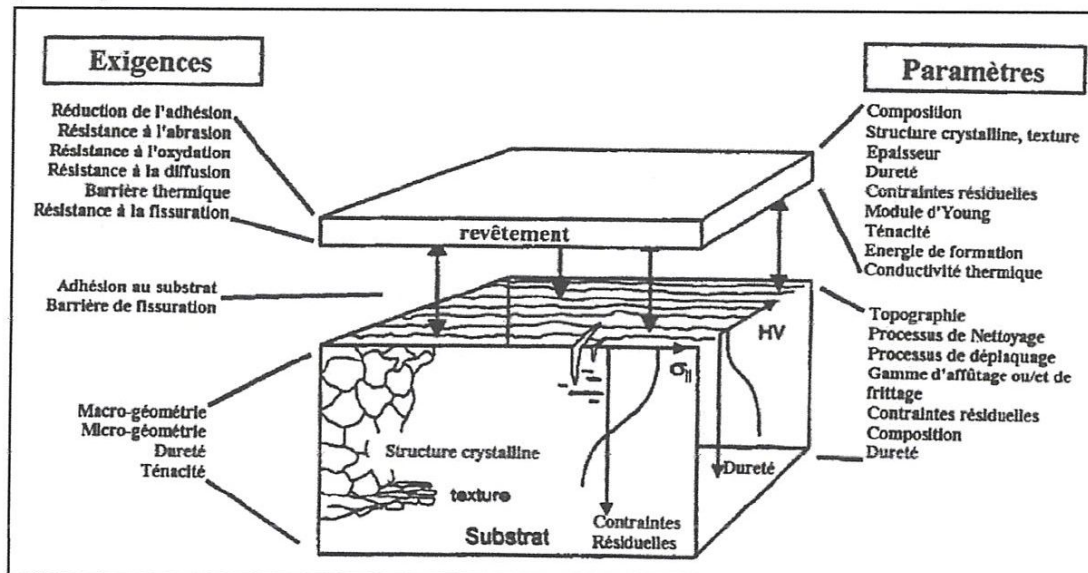


Figure I-6 : représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences

#### I-2.5.1 Fonction d'un revêtement en usinage

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage. Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre [9].

#### I-2.5.2 Propriétés des revêtements

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent en définitif se traduire par des objectifs opérationnels, en lien avec des propriétés physiques quantifiables et/ou



qualifiables. Ainsi, il est possible de demander au système substrat + revêtement de répondre au cahier des charges suivant :

- ❖ Une ténacité élevée ;
- ❖ Une parfaite adhésion sur le substrat ;
- ❖ Une grande résistance à la formation et à la progression des fissures ;
- ❖ Une dureté élevée ;
- ❖ Une inertie chimique élevée ;
- ❖ Une faible conductivité et diffusivité thermiques ;
- ❖ Une haute résistance à l'oxydation ;
- ❖ Une épaisseur adéquate ;
- ❖ Une fonction barrière de diffusion.

Sachant que ces propriétés doivent être conservées à la plus haute température possible, en lien avec les sollicitations thermiques de l'opération d'usinage visée.

### I-2.5.3 Types de revêtements

Les revêtements déposés industriellement peuvent se décomposer en 2 familles distinctes : les revêtements déposés par voie physique (Physical Vapor Deposition: PVD) et les revêtements déposés par voie chimique (Chemical Vapor Deposition: CVD) figure I-7. Chacune de ces familles possède une variété importante de sous-familles en constante évolution depuis quelques années. Ainsi, les procédés PVD sont basés sur trois types de technologie : l'évaporation, la pulvérisation et le dépôt ionique (ou 'ion-plating'). Chacune de ces sous-familles connaît également des variantes basées sur des moyens différents d'aboutir à l'évaporation ou à la pulvérisation des sources de matière : faisceau d'ions, effet joule, diode, etc.

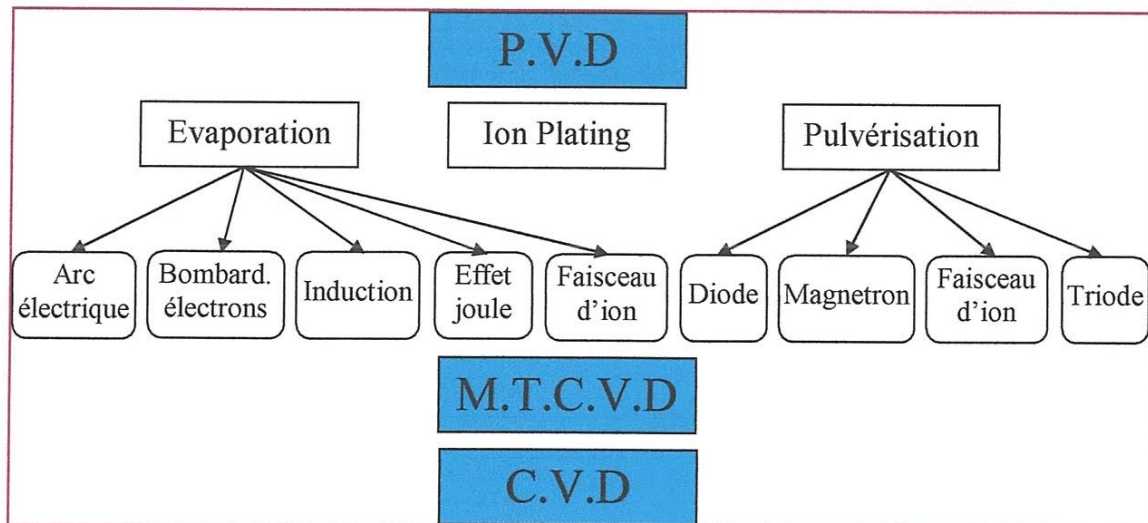


Figure I-7 : Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils-coupants

L'ensemble de ces procédés permet de déposer des couches de compositions et d'aspects très voisins. Cependant, les modalités de dépôts peuvent entraîner des différences très importantes en termes de texture, adhésion, dureté, etc. Il est important de noter que les technologies de dépôt ont subi de très grandes évolutions ces dernières années. A tel point qu'il est difficile de donner un aperçu exhaustif de l'ensemble des variant.



PVD. Cela limite ainsi toute une partie des applications sur les outils en acier rapide. Les avantages et les inconvénients des deux techniques sont regroupés dans le tableau I-2 :

	Avantages	Inconvénients
<b>PVD</b>	Investissement limité Faible température de dépôt Bonne adhérence de dépôt Couches en contraintes compressives Nombreuses possibilités de dépôt Bonne acuité d'arête des outils	Nécessité de réaliser les dépôts sur des pièces de formes voisines Vitesse de dépôt faible Dépôts non uniformes Difficultés pour revêtir des outils à géométrie complexe
<b>CVD</b>	Grande pureté des dépôts Grande variété de composition Possibilité de dépôt sur des pièces complexes Bonne adhérence sur substrat carbure	Température de déposition élevée Investissement élevé Résidus toxiques de déposition Mauvaise acuité d'arête des outils Couches en contraintes de traction Risques d'attaque des substrats par les gazes corrosifs

*Tableau I-2 : Comparaison des propriétés des modes de déposition PVD et CVD*

Ainsi dans le cadre d'un usinage continu (perçage, tournage), un revêtement épais et adhérent sera préféré (afin d'accroître la quantité de matière à enlever).

Pour les procédés à coupe interrompue (fraisage, taillage, etc.), il sera privilégié un revêtement tenace, résistant à l'oxydation et ayant des contraintes de compression. Ces conditions privilégient plutôt les revêtements obtenus par PVD. Cette analyse est à moduler avec l'apparition de revêtements MTCVD. Par ailleurs, cela nécessite d'avoir des arêtes arrondies ce qui privilégie l'emploi des dépôts CVD, même si les dépôts PVD peuvent aussi s'appliquer sur des arêtes préalablement rodées. Les opérations de finition nécessitent des arêtes vives, ce qui privilégie plutôt l'emploi de revêtements PVD.

Actuellement, les revêtements les plus couramment utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane (TiN), les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Le dépôt choisi dépend du but recherché : résistance à l'usure et/ou à l'oxydation, tenue à la température, réduction du frottement, etc. (tableau I-3) La combinaison de plusieurs de ces objectifs oriente les tendances actuelles et futures.

Revêtement	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	+++++	+	+	+++
TiN	+++	+++	+++	+++++
Ti(C,N)	++	++	++	++++
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	++++	+++++	+++++	++
HfN	+++	++++	++++	++++

Tableau I-3 : Comparatif des propriétés de certains revêtements de + à ++++++

### I-3 Endommagement des outils de coupe

Les outils de coupe ont une géométrie généralement complexe qui résulte assez souvent de mises au point d'atelier purement empiriques, quelquefois d'études plus analytiques à partir de divers critères (résistance à l'endommagement ou qualité de la surface générée), rarement d'une véritable optimisation qui nécessiterait une modélisation de l'écoulement du ou des copeaux [10].

#### I-3.1 L'usure des outils

L'usure est une caractéristique utilisée souvent pour décrire l'état d'un système mécanique. Elle est une conséquence due au frottement entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre. Concrètement, l'usure Figure I-9, avec ses 35 deux composantes, l'adhésion et l'abrasion. Ce phénomène peut entraîner des modifications dimensionnelles, géométriques et structurales par une augmentation des jeux fonctionnels [11].

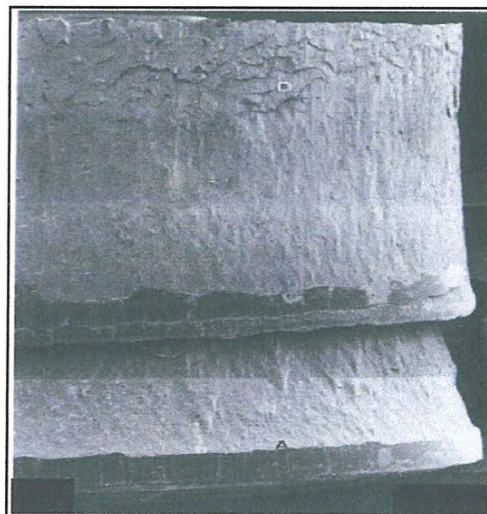


Figure I-9 : Usure des outils

Si l'on fait un inventaire des configurations de coupe que l'on rencontre dans un atelier d'usinage, on observe une très grande diversité des vitesses de coupe (entre 10 et plusieurs milliers de m/min), de la géométrie des copeaux et de leurs conditions d'évacuation, de la rigidité du contact pièce usinée/outil, de la nature et de la géométrie des outils. Dans une telle



variété de configurations de coupe, il n'est pas surprenant d'observer une grande variété de faciès de dégradation. Ces mécanismes d'endommagement sont maintenant bien connus, notamment :

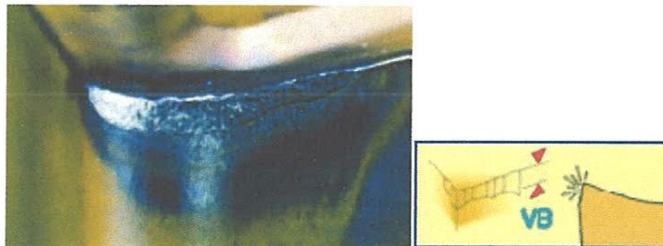
- **l'usure abrasive** : provoquée par la présence d'un troisième corps contenant des particules de haute dureté dans le contact copeau/outil ;
- **l'usure adhésive** : liée au frottement copeau/outil, et qui va prendre de plus en plus d'importance lorsque la vitesse de coupe croît, notamment dans le cas de certains matériaux comme les aciers inoxydables et les alliages à base de nickel ou de cobalt, ainsi que les alliages de titane ;
- **l'usure par diffusion** : que l'on retrouve aux vitesses de coupe élevées, conséquence d'une diffusion du matériau usiné vers l'outil et donc d'une fragilisation de ce dernier (par exemple : usinage de matériaux à base de fer avec des outils en carbures à liant au cobalt) ;
- **l'usure par fatigue mécanique** : qui est liée à l'apparition de phénomènes vibratoires de natures diverses : élimination partielle d'arête rapportée sur l'outil, apparition d'instabilités dans la formation du copeau en passant du copeau continu au copeau segmenté ;
- **l'usure par fatigue thermique** : dans le cas d'outils de très faible conductivité thermique (notamment les céramiques) avec de très grandes vitesses de coupe (UGV par exemple).

### I-3.2 Usure des arêtes de coupe

Pour comprendre les avantages et les limites de chaque matière, il est important de connaître les différents mécanismes d'usure qui agissent sur les outils [6].

#### a) *Usure en dépouille*

C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce.

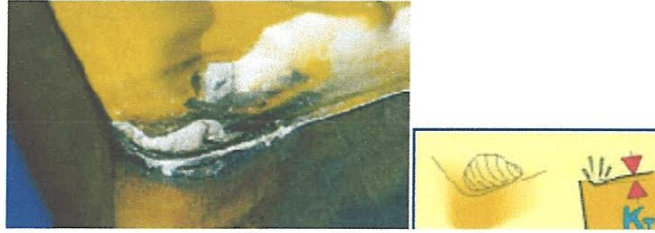


Usure par abrasion

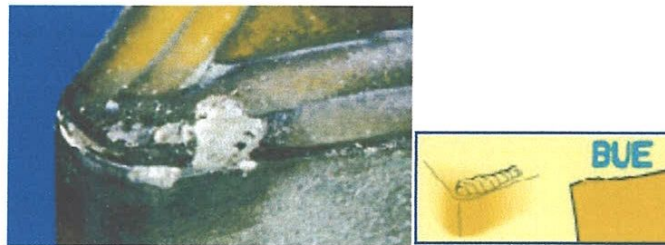
#### b) *Usure en cratère*

L'usure en cratère apparaît sur la face de coupe de la plaquette. Elle est provoquée par la réaction chimique entre la matière de la pièce et le matériau de coupe. La vitesse de coupe l'amplifie. Une usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre.

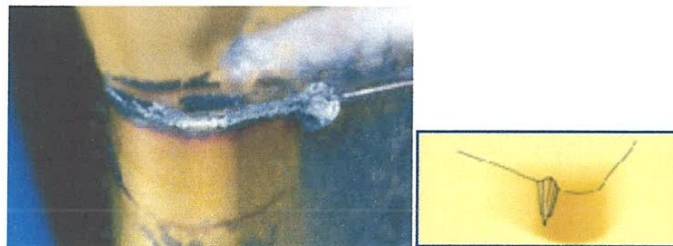


Usure chimique**c) Arête rapportée**

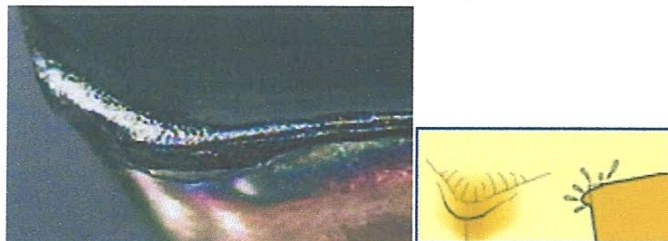
Ce type d'usure est provoqué par le soudage sous pression du copeau sur la plaquette. C'est le type d'usure le plus courant avec les matières collantes telles que les aciers bas carbone, les aciers inoxydables et l'aluminium. Une faible vitesse de coupe accélère la formation d'une arête rapportée.

Usure par adhérence**d) Usure en entaille**

Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille, au niveau de la profondeur de coupe. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.

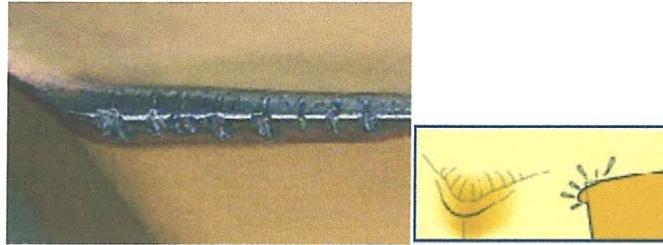
Usure par adhérence**e) Déformation plastique**

La déformation plastique survient lorsque le matériau de coupe est ramolli par une température trop élevée. De manière générale, plus une nuance est dure et plus le revêtement est épais, meilleure est la résistance à la déformation plastique.

Usure thermique

### f) Usure en peigne

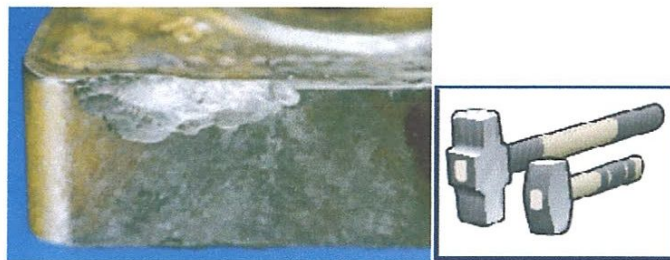
Lorsque l'arête de coupe subit des refroidissements brusques, des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent. Ce type de fissure est fréquent en cas de coupes interrompues, ce qui est courant en fraisage. L'utilisation de l'arrosage aggrave ce phénomène.



Usure thermique

### g) Ecaillage ou rupture de l'arête

L'écaillage ou la rupture de l'arête survient en cas de surcharge des contraintes de traction mécanique. Celles-ci sont dues à différentes causes telles que le martèlement des copeaux, une profondeur de coupe ou une avance excessives, des inclusions de sable dans la matière de la pièce, des arêtes rapportées, des vibrations ou une usure excessive de la plaquette.



Usure mécanique

## I-4 Rugosité des surfaces usinées

### I-4.1 Rugosité

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.) Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [12].

- **Surface géométrique**

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

- **Surface spécifiée**

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

- **Surface mesurée**

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

- **Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication.

- **L**

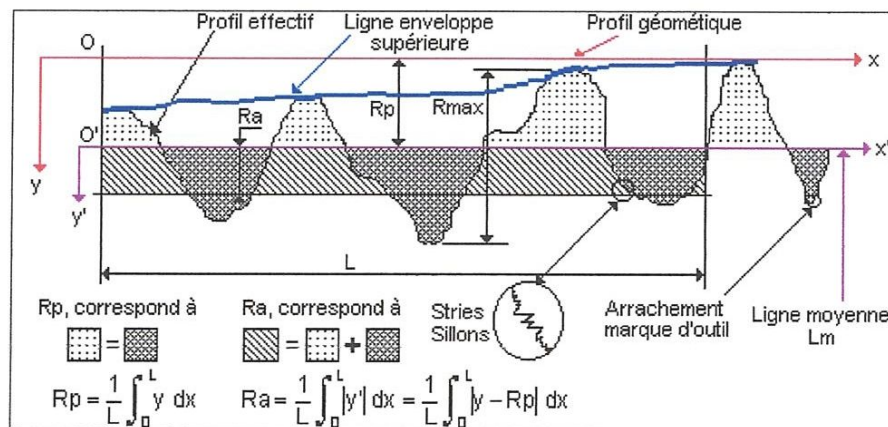
Longueur de base du profil moyen

- **R<sub>p</sub>**

Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L.

- **R<sub>a</sub>**

Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y' (entre chaque point de la courbe et l'axe Ox').



**a) Technologie de mesure :**

La mesure des états de surface peut être réalisée avec un microscope d'état de surface. Cette technologie de mesure présente l'avantage de permettre l'obtention d'un modèle numérique de la surface réelle sans contact. La mesure est réalisée sur un échantillon de surface. Ainsi, la mesure prend en compte la forme et la direction des stries.

**b) Cotation fonctionnelle des états de surface :**

Le critère physique R est micro-géométrique, et c'est l'amplitude moyenne de la rugosité (rugosité).

Le critère statistique R<sub>a</sub> est statistique, et c'est l'écart moyen arithmétique par rapport à la ligne moyenne. R = 5 R<sub>a</sub> environ

**c) Caractéristiques du profil :**



La rugosité concerne les défauts d'ordre 3 et 4 : défaut d'une largeur inférieure à 0,5 mm (500  $\mu\text{m}$ ), périodiques (stries, sillons) ou localisés.

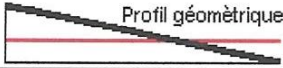

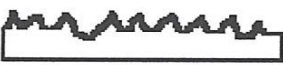
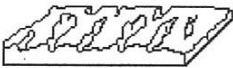
	Types des défauts	Désignation	Causes
macrographiques		défauts de forme et de position	Pendant l'usinage et après l'usinage etc.
		Ondulation périodique	Fraisage : pas de l'ondulation = avance par tour de fraise, vibrations, pièce et outil, etc.
macrographiques		strie - sillon, rugosité périodique	Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil : lubrification, vibrations.
		arrachement, fentes, marques d'outil, piqûres, etc.	Qualité de l'affûtage de l'outil. Hétérogénéité du matériau usiné.

Tableau I-4 : types des défauts

## I-5 Les efforts de coupe

### I-5.1 Généralités

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec une certaine force  $F$  dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe figure I-10 [14]. La résultante de coupe  $F$  est la somme de 3 composantes suivantes:

- $F_t$  ou  $F_z$  : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

- $F_a$  ou  $F_x$ : composante dans le sens de l'avance, appelée effort axial

- $F_r$  ou  $F_y$ : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial. Il n'a aucune importance et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

La composante déterminante  $F_t$  de l'énergie de coupe  $E$  nécessaire à l'enlèvement du copeau pendant l'unité de temps est donnée par la relation suivante:

$$E = F_t * Vc$$

L'énergie due à la composante  $F_a$  et presque négligeable à côté de  $E$ .

Rapport des composantes:

La résultante de coupe  $F$  étant une diagonale de parallélépipède est égale à:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

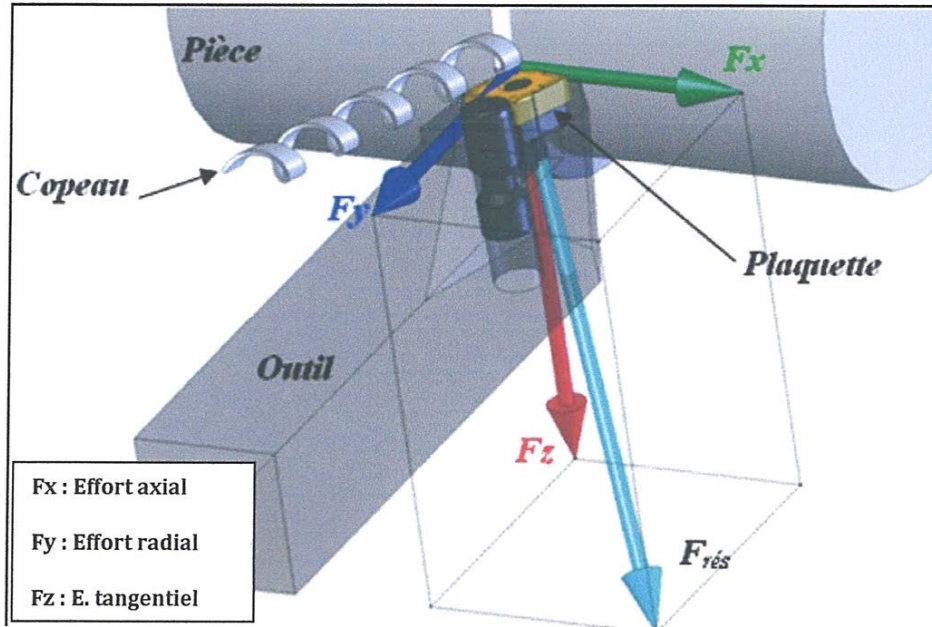


Figure I-10: composantes des efforts de coupe

### I-5.2 Intérêt de mesure des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine outil, on a besoin de savoir qu'elle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de la machine, et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient également dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations ou broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. En fin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de formation du copeau.

### I-5.3 Influence des différents facteurs sur l'effort de coupe

#### - Les propriétés mécaniques du métal à usiner :

La valeur de réaction  $F_v$ ,  $F_a$ ,  $F_p$  est proportionnelle à la charge rupture à la traction  $R_t$  et à la dureté HB du métal à usiner.

#### -Influence de la profondeur de passe et l'avance :

Avec l'augmentation des ces deux facteurs, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus fort à la formation du copeau et la valeur des composantes  $F_v$ ,  $F_a$ , et  $F_p$  nécessaire pour assurer la coupe est plus importante. En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance figure I-11.

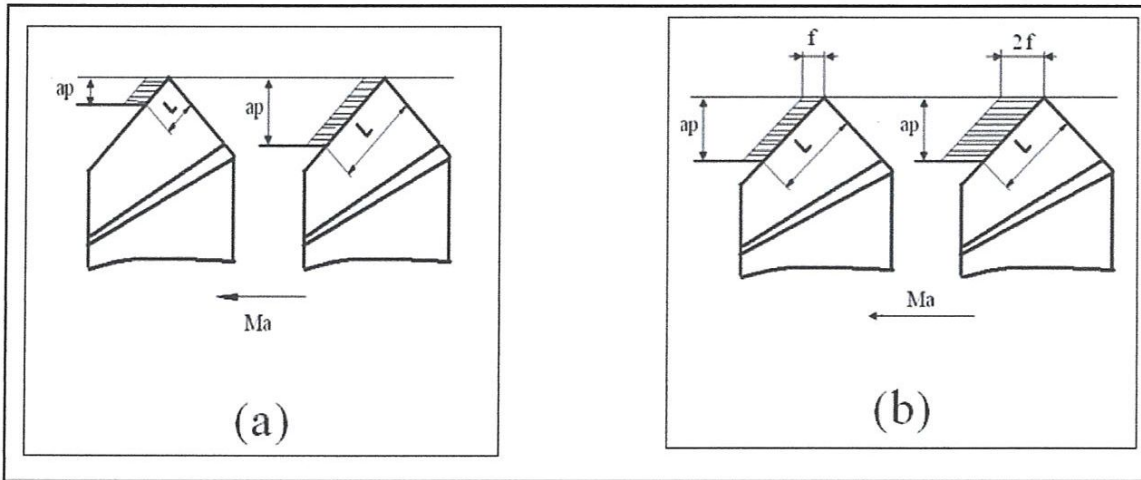


Figure I-11 : Influence (a) de la profondeur de Passe (b) l'avance sur les efforts de coupe

- Influence de la vitesse de coupe :

Pour des vitesses de coupe situant dans la plage de formation de l'arête rapportée, l'effort de coupe accuse un maximum, puis diminution à nouveau avec l'augmentation de la vitesse de coupe (l'arête rapportée diminue).

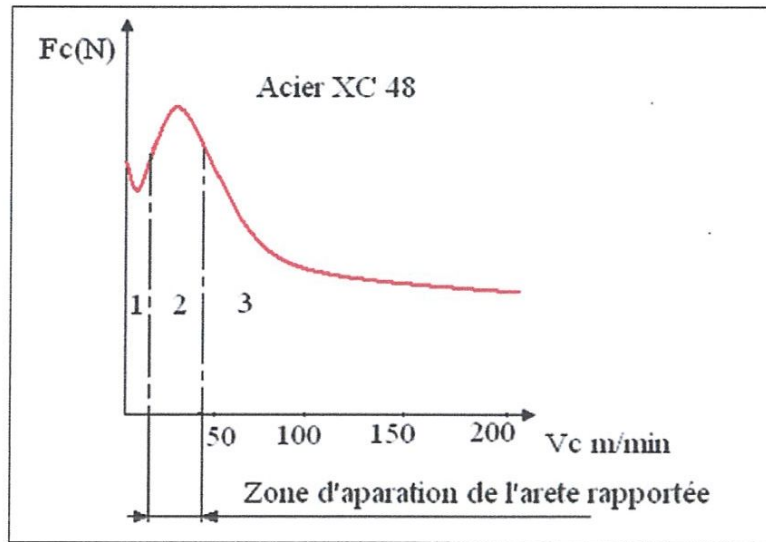


Figure I-12: Influence de la vitesse Coupe sur l'effort de coupe

-Influence des l'usure en dépouille :

Les arêtes de coupe usées augmentent les efforts de coupe, en pratique on estime qu'une augmentation de l'effort de coupe 10 % par 0.1mm d'usure sur la surface en dépouille de l'outil.

-Influence du matériau de coupe :

Les matériaux de coupe revêtu, en particulier ceux avec des revêtements TiN ou Ti (C,N), accusent un frottement moindre et des efforts de coupe plus faible que les matériaux de coupe non revêtus. les faces d'attaque superfinies et dotées d'une arête de coupe dure et tranchant, réduisent les efforts de coupe.



### I-6 Travaux de recherche en usinage avec différents types d'outil de coupe

Noordin.M.Y, Venkatesh.V.C, Sharif.S, Elting.S et Abdullah.A [15] ont exploré les performances d'un outil en carbure de tungstène multicouche lors de l'usinage de l'acier AISI 1045, utilisant la méthodologie de surface de réponse (MRS). Les résultats expérimentaux ont indiqué que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface et la force tangentielle. Cependant, il y a d'autres facteurs qui fournissent les contributions secondaires aux indicateurs de performance (tableaux I-5 et I-6).

Source	Sum of squares	d.f.	Mean square	F	Prob. > F
Model	9.71	9	1.08	35.59	0.0002 significant
A	0.080	1	0.080	2.62	0.1564
B	8.77	1	8.77	289.44	<0.0001
C	0.038	1	0.038	1.24	0.3075
A <sup>2</sup>	0.050	1	0.050	1.66	0.2449
B <sup>2</sup>	0.018	1	0.018	0.60	0.4678
C <sup>2</sup>	0.16	1	0.16	5.43	0.0586
AB	0.065	1	0.065	2.16	0.1922
AC	0.0028	1	0.0028	0.091	0.7729
BC	0.24	1	0.24	7.86	0.0310
Residual	0.18	6	0.030		
Lack-of-fit	0.18	5	0.036	1181.67	0.0563 not significant
Pure error	0.0002	1	0.0002		
Cor. total	9.89	15			
S.D.	0.17	R <sup>2</sup>	0.9816		
Mean	2.20	Adj. R <sup>2</sup>	0.9540		
CV	7.91	Pred. R <sup>2</sup>	0.7502		
PRESS	2.47	Adeq. precision	19.16		

Tableau I-5 : Table d'ANOVA pour le modèle quadratique de la surface de réponse (réponse : rugosité de la surface, Ra)

Source	Sum of squares	d.f.	Mean square	F	Prob. > F
Model	7.86E+04	5	1.57E+04	168.78	<0.0001 significant
A	482.40	1	482.40	5.18	0.0462
B	7.62E+04	1	7.62E+04	817.91	<0.0001
C	104.33	1	104.33	1.12	0.3149
C <sup>2</sup>	1668.17	1	1668.17	17.90	0.0017
BC	485.13	1	485.13	5.21	0.0457
Residual	931.90	10	93.19		
Lack-of-fit	905.84	9	100.65	3.86	0.3769 not significant
Pure error	26.06	1	26.06		
Cor. total	7.96E+04	15			
S.D.	9.65	R <sup>2</sup>	0.9883		
Mean	452.18	Adj. R <sup>2</sup>	0.9824		
CV	2.13	Pred. R <sup>2</sup>	0.9714		
PRESS	2279.00	Adeq. precision	35.91		

Tableau I-6 : Table d'ANOVA pour le modèle quadratique (réponse : force tangentielle, Fc)

J.G. Lima, R.F. vila, A.M. Abrao, M. Faustino et J. Paulo Davim [16] ont étudié l'usinabilité des aciers durcis à différents niveaux de dureté et à l'aide de divers matériaux d'outil de coupe. Leur étude a été concentrée sur l'usinage d'AISI 4340 durci (acier faiblement allié de haute résistance) et d'AISI D2 (acier d'outil travail à froid). Les résultats ont indiqué que lors du tournage de l'acier AISI 4340, la rugosité de surface des pièces usinées a été améliorée avec l'augmentation de la vitesse de coupe par contre avec l'augmentation de l'avance la rugosité se détériore, tandis que la profondeur de passe présente un effet moins significatif sur l'amélioration de rugosité de surface. L'usinage de l'acier AISI D2 avec les plaquettes mixte à base d'alumine a permis un état de la surface comparable à celui obtenu en rectification cylindrique (figure I-13).

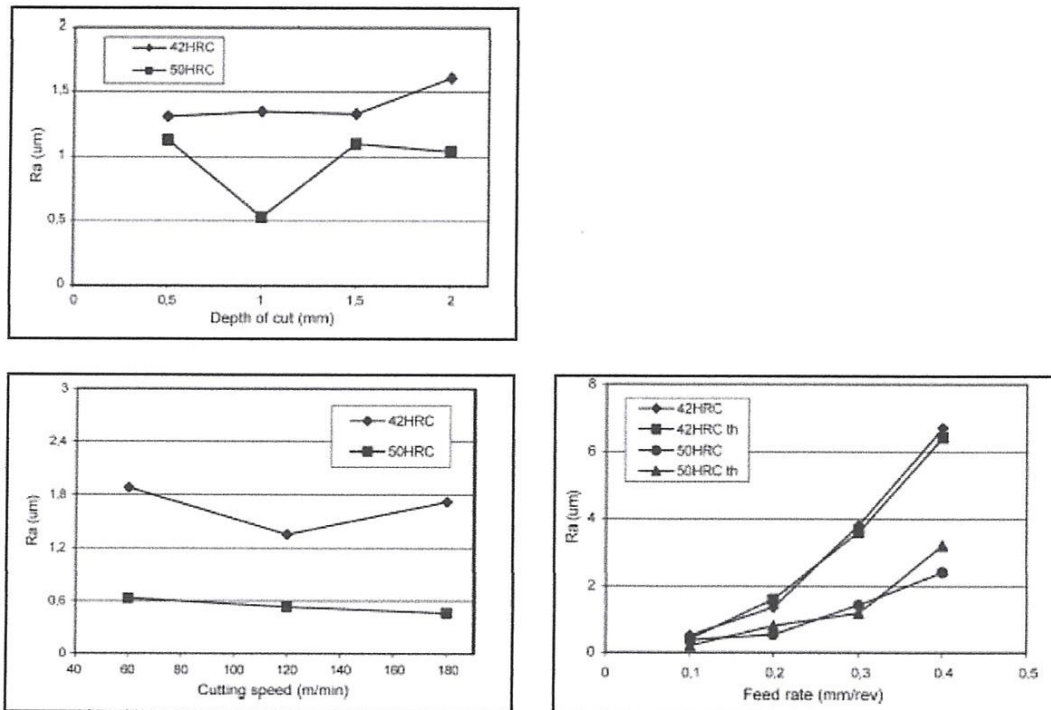


Figure I-13 : Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface pour  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$ ,  $V_c = 120 \text{ m/min}$  et  $a_p = 1 \text{ mm}$  (acier AISI 4340)

**Paulo .J et al** [17] ont étudié l'usinabilité de l'acier D2 pour le travail à froid avec les outils en céramique en utilisant des techniques statistiques lors du tournage dur. Les résultats indiquent qu'avec les paramètres de coupe appropriés, le choix est possible d'obtenir une rugosité de la surface ( $R_a < 0.8\mu\text{m}$ ) qui permet d'éliminer les opérations de rectification cylindrique.

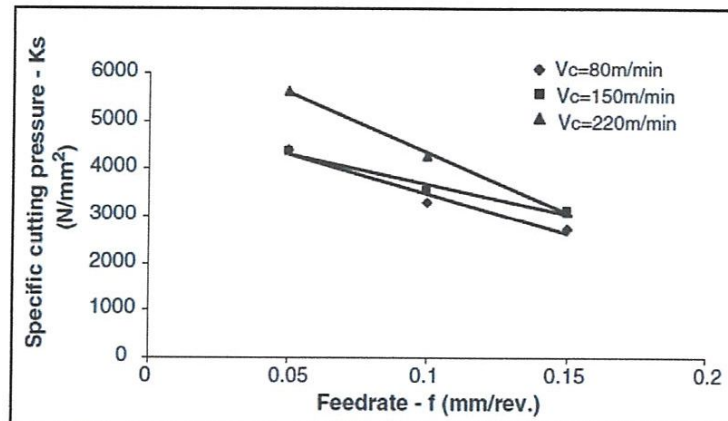


Figure I-14 : Pression de coupe spécifique contre l'avance par tour à de diverses vitesses de coupe

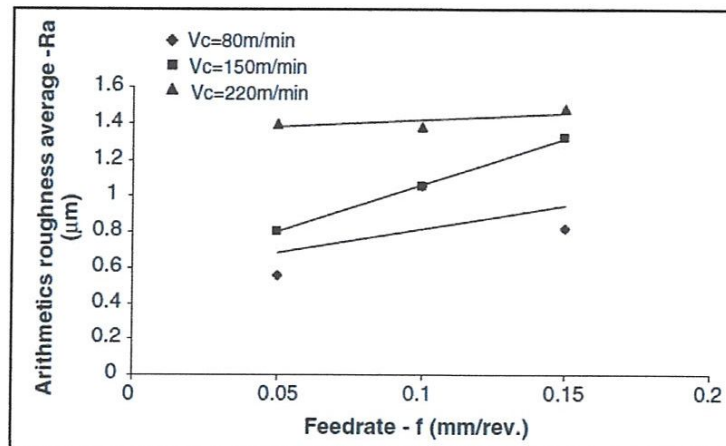


Figure I-15 : Moyenne arithmétique de rugosité contre vs. Avance par tour à de diverses vitesses de coupe

**J S Dureja, V K Gupta, V S Sharma, et M Dogra** [18] ont étudié la modélisation de l'usure de l'outil et la rugosité de la surface, par la méthodologie de surface de réponse (RMS) lors du tournage dur de l'acier AISI H11 avec des plaquettes céramiques mixte revêtue de TiN. L'effet des paramètres de coupe c.-à-d. la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, et dureté de la pièce sur les facteurs de réponse, tels que : l'usure en dépouille et la rugosité de surface, ont été étudiés par l'analyse de la variance (ANOVA) et. Le meilleur modèle quadratique non linéaire a adapté les points de repères expérimentaux. La fonction de l'approche désirable a été employée pour l'optimisation multiple des facteurs de réponse. Les expériences de confirmation effectuées pour vérifier la validité des modèles développés ont prévu des facteurs de réponse dans les limites d'erreur de 5 %. On observe que l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce ont un impact statistiquement significatif sur l'usure en



*Chapitre II*  
*Procédure expérimentale*

## II-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des moyens exploités pour la réalisation des expériences, un banc d'essais comportant un tour, une plate forme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et VISUAL 250 pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université de 08 Mai 1945.

## 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 40 C de puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure II-1). Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suit (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 40 C.

### II-2.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage

C'est un Acier mi-dur de haute qualité pouvant être utilisé à l'état traité ou recuit ou à l'état trempé superficiellement, de la désignation XC 48 H1 (NF A 35-552 / 07-86).

L' XC48 (aujourd'hui C45) a une résistance à la rupture de  $\geq 60$  daN/mm<sup>2</sup> et 16% en allongement.

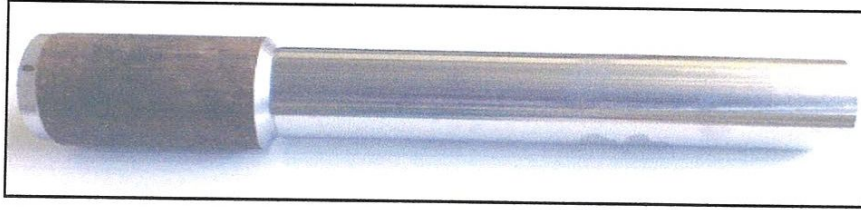
Le 301 ( ou Z 12 CrNi 17-07 ) à 61 - 85 daN/mm<sup>2</sup> , a sensiblement les même caractéristiques de traction , mais l'allongement est nettement différent ( 45% )

Si le C45 s'usine aisément, les inox sont plus difficiles à usiner, le métal est "collant".

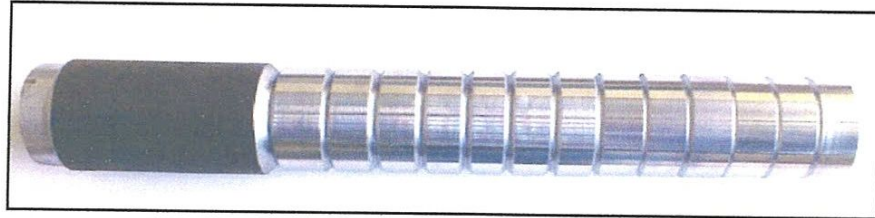
L'acier XC48 est souvent utilisé à l'état recuit. Il est légèrement plus dur que l'acier XC42.

En outre, il est très souvent employé pour l'exécution de pièces trempées superficiellement, par exemple, par trempe haute fréquence : on obtient une dureté supérieure à 58 Rc, ce qui est

très suffisant dans de nombreux cas. Bien entendu, on peut également le traiter par trempe et revenu dans le cas de pièces de petites dimensions.



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.

Pour les essais de longue durée (évolution de l'usure de l'outil et la rugosité en fonction du temps) on a utilisé des éprouvettes de diamètre  $\Phi = 66\text{mm}$  et de longueur  $L = 400\text{mm}$  (**figure II-2-a**), et pour les essais de courte durée (efforts de coupe et rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe :  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) on a utilisé des éprouvettes qui ont les mêmes dimensions avec des paliers de  $20\text{mm}$  de longueur (**figure II-2-b**).

La composition chimique de l'acier XC48 est représentée dans le tableau II-1.

élément	Pourcentage (%)
C	0.45-0.51
Si	0.15-0.35
Mn	0.5-0.8
P	$\leq 0,035$
S	$\leq 0,035$

**Tableau II-1** Composition chimique de l'acier XC48.

Les Caractéristiques de cet acier satisfait aux conditions de la norme XC 48. Il assure donc **tableau II-2**:

40 < d ≤ 100mm			
Rp0.2 N/mm <sup>2</sup>	R N/mm <sup>2</sup>	A % min	KCU J/cm <sup>2</sup>
325	620-740	16	35

**Tableau II-2** : Les Caractéristiques d'acier XC48

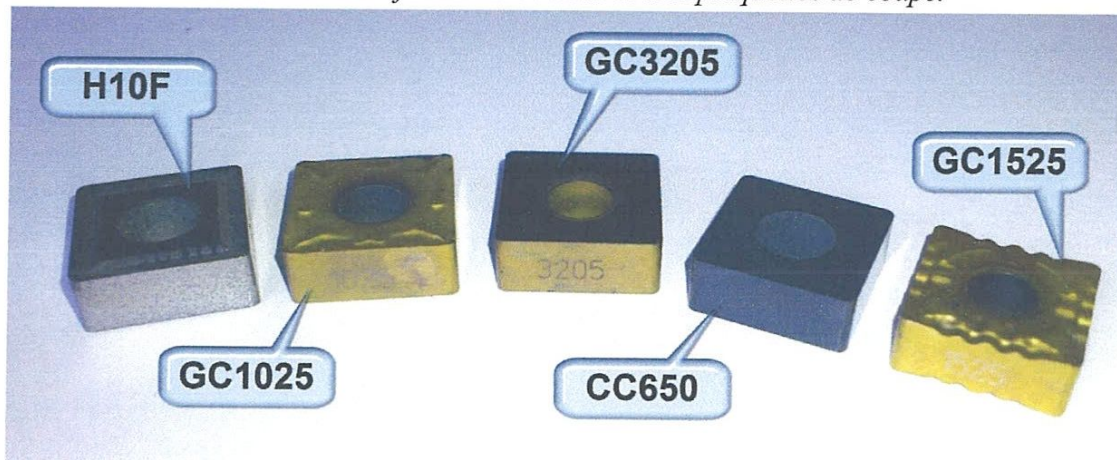


### II-2.3 Plaquette de coupe

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-3** [21].

Matériaux de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
<i>Carbure revêtu</i>	GC 1025	PVD	TiAlN	SNMG 12 04 08-PF
	GC 3215	CVD	Ti(C,N)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN	SNMG 12 04 08-KR
<i>Carbure non revêtu</i>	H10F	----	----	SNMG 12 04 08-23
<i>Cermet revêtu</i>	GC 1525	PVD	TiCN/TiN	SNMG 12 04 08-MF
<i>Céramique</i>	CC 650	----	----	SNGN 120408

**Tableau II-3** : Informations relatives aux plaquettes de coupe.



**Figure II-3** : Photos des plaquettes de coupe utilisées.

**Carbure 1025** : c'est une nuance à grain très fin, avec le tout nouveau revêtement PVD de TiAlN tenace et résistant à l'usure. Présente les qualités requises pour des arêtes de coupe vives et une sécurité élevée contre le martelage des copeaux. Pour tolérance serrées et excellent état de surface en finition des aciers inoxydables.

**Carbure H10F** : Nuance carbure non revêtu 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.

**Carbure GC3205** : 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.

**Cermet 1525** : nuance cermet à revêtement PVD pour la finition et la semi-finition. Substrat du même type que CT5015 avec tous ses avantages mais plus tenace. Le revêtement de TiC/TiN dur et résistant à l'usure confère d'excellentes propriétés dans une plage étendue de vitesse de coupe. Le plus tenace des cermets, pour une haute sécurité du processus.

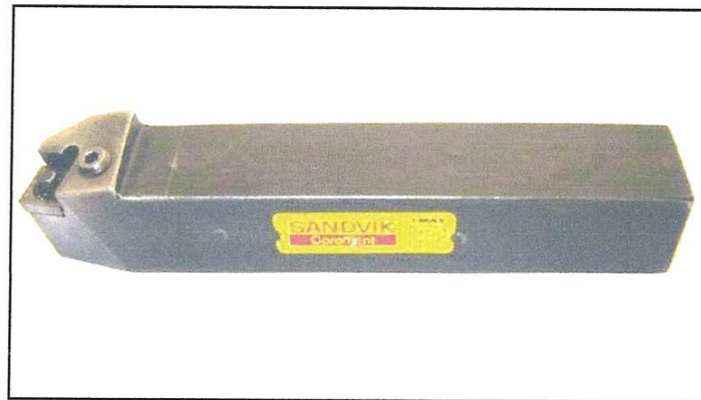
**Céramique CC650** : Nuance céramique à base  $Al_2O_3$  mélangée. Recommandée pour la finition à grande vitesse des fontes grises et des fontes trempées dans des conditions stables.

#### II-2.4 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la désignation est indiquée au **tableau II-4**.

Désignation	Marque	$\chi$	$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\chi_r$
PSBNR25x25M12	SANDVIK cora	75°	6°	-6°	-6°	15°

*Tableau II-4 : Caractéristiques de porte plaquette utilisé.*



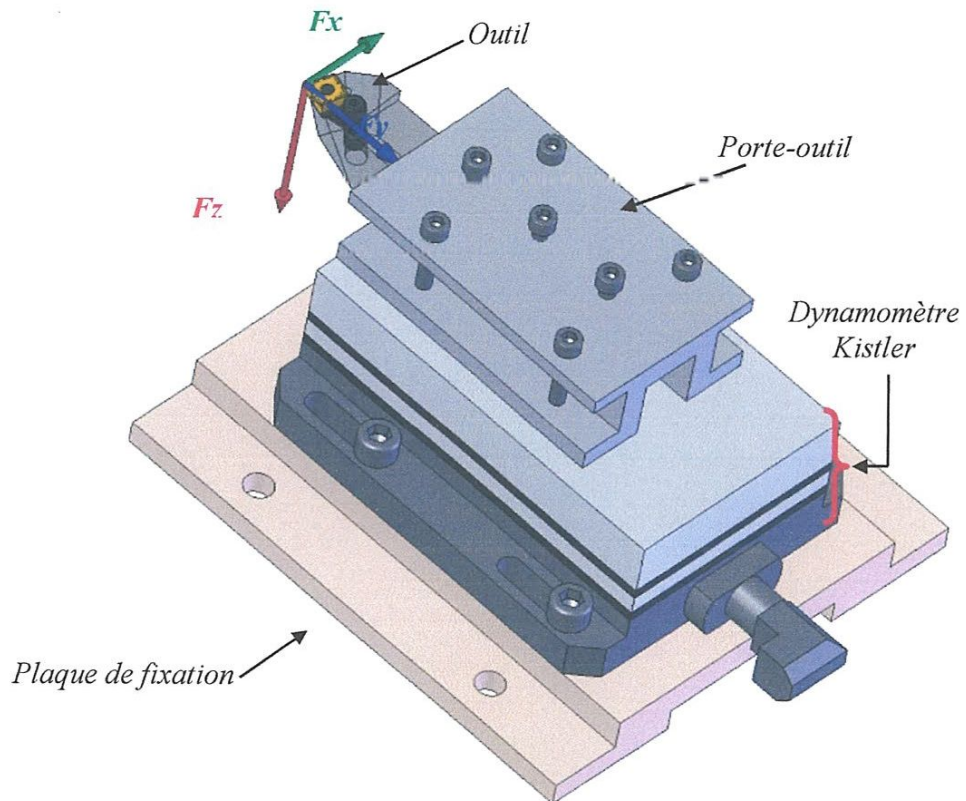
*Figure II-4 : Porte outil utilisé.*

#### II-2.5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

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 en cite: la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

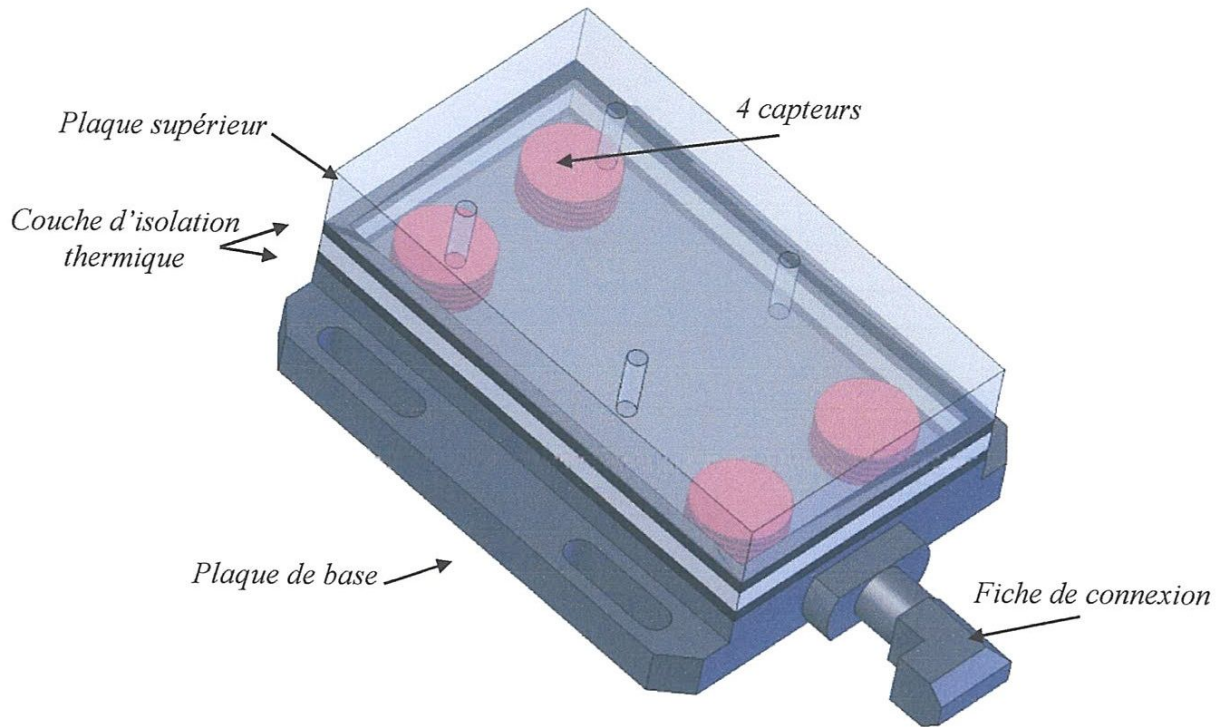
Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le

chriot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (**figure II-5**). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (**figure II-6**).



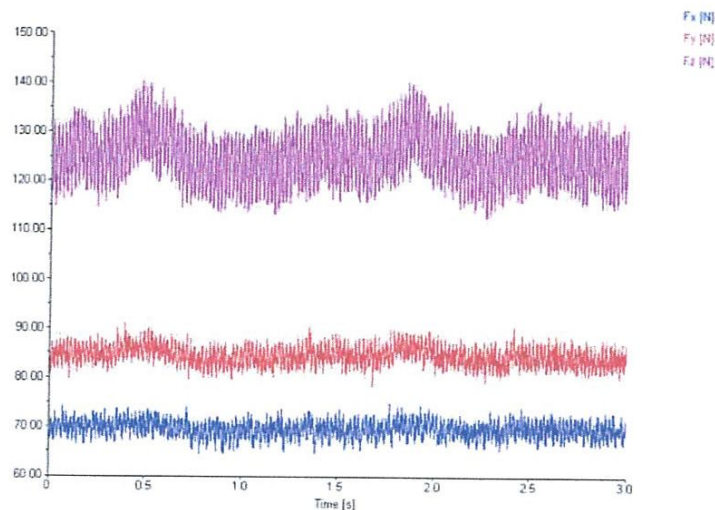
**Figure II-5 :** Montage du dynamomètre sur la table de la machine.





**Figure II-6 :** Capteur d'effort de coupe **KISTLER**.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (**DYNOWARE**) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La **figure II-7** 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:  $F_z$ ).

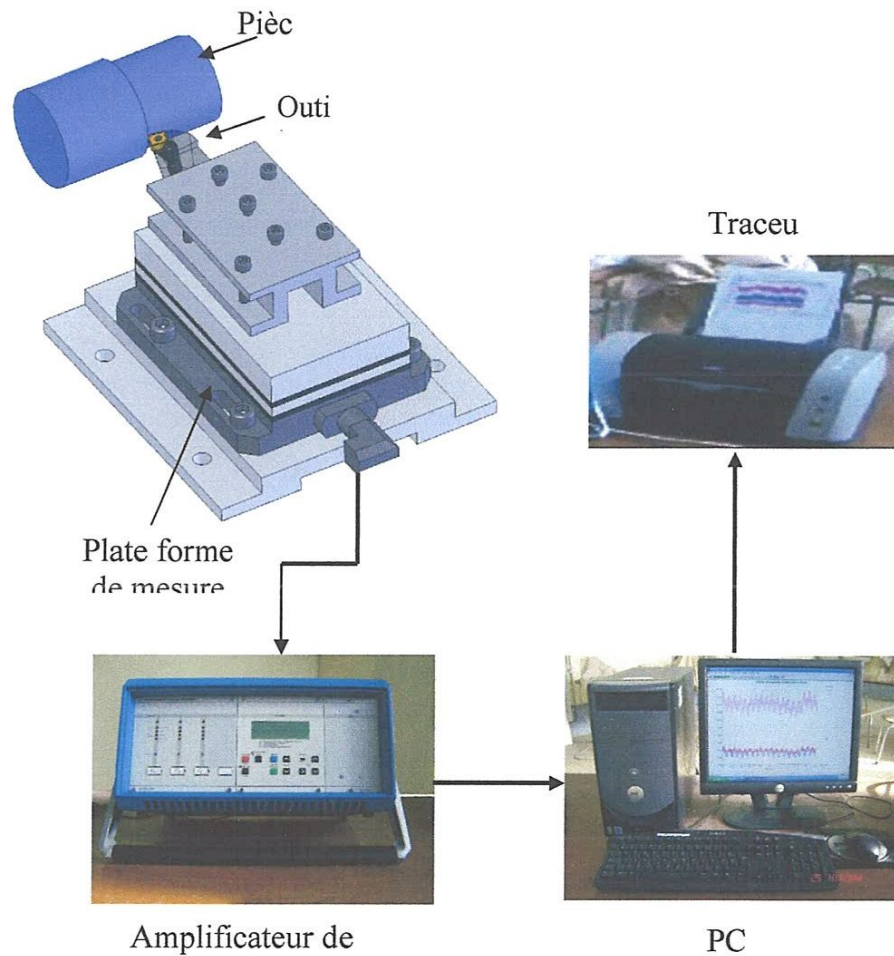


**Figure II-7 :** Exemple d'acquisition du logiciel « **DYNOWARE** ».

**Chaîne de mesure et caractéristiques**

Dynamomètre à 3 composants (9257 B): le porte outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 (**figure II-8**).

- 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 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ,
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Ordinateur personnel (PC) ;
- Traceur.



**Figure II-8** : Chaîne de mesure des efforts de coupe.



### II-2.6 STANDARD GAGE - VISUAL 250 pour la mesure de l'usure en dépouille VB

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-9).



Figure II-9 : VISUAL 250 pour la mesure de l'usure.

### II-2.7 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) SurfTest 201 (Mitutoyo) (figure II-10).

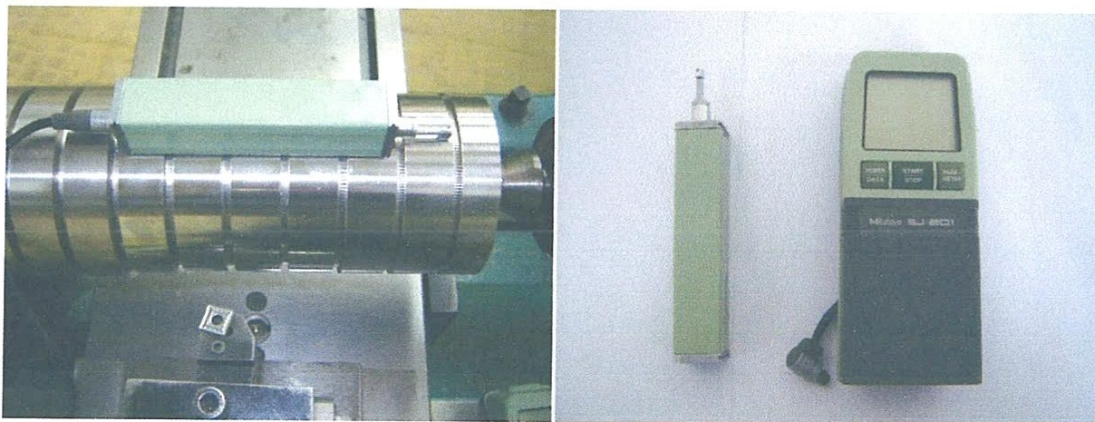


Figure II-10 : Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

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-2-8 Autres équipements**

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

**II-3 Planification des expériences****II-3.1 Conditions de coupe**

Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage), la pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification. Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les **tableaux II-5** et **II-6**. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification sur une longueur de 335 mm.

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
$f$ (mm/tr)	0.08	$V_c$ (m/min)	150 ; 300
$a_p$ (mm)	0.2		

**Tableau II-5:** Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe, la rugosité et de l'usure.

Sur la base des résultats obtenus dans la précédente campagne d'essais, nous avons choisis le carbure GC1025 pour mener une étude expérimentale statistique dans le but d'évaluer les performances d'usinage de ce carbure lors de l'usinage de l'acier XC48

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
$V_c$ (m/min)	100	$f$ (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16
$a_p$ (mm)	0.2	Tu (min)	5 ; 10 ; 15
$V_c$ (m/min)	143	$f$ (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16
$a_p$ (mm)	0.2	Tu (min)	10 ; 15 ; 5
$V_c$ (m/min)	280	$f$ (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16
$a_p$ (mm)	0.2	Tu (min)	15 ; 5 ; 10

**Tableau II-6 :** Conditions de coupe pour le plan de 9 essais.

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
$V_c$ (m/min)	145	$f$ (mm/tr) $a_p$ (mm)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 0.15 ; 0.30 ; 0.45
$V_c$ (m/min)	200	$f$ (mm/tr) $a_p$ (mm)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 0.15 ; 0.30 ; 0.45
$V_c$ (m/min)	280	$f$ (mm/tr) $a_p$ (mm)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 0.15 ; 0.30 ; 0.45

**Tableau II-7 : Conditions de coupe pour le plan de 27 essais.**

Les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\chi$ ,  $\epsilon_r$ ), 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-3.2 Méthode de planification des expériences

### II-3.2.1 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 ( $r$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$ , 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 la méthodes suivantes:

- Méthode multifactorielle.
- Méthode unifactorielle.

### II-3.2.2 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 :

$$N = qk \dots \dots \dots (II-1)$$

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 ( $X_1$ ,  $X_2$ , .....  $X_n$ ) 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-4 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

## Comportement des matériaux de coupe face à l'acier XC48

### III.1 Introduction

Ce chapitre porte sur l'évolution des différents paramètres de coupe étudiée tels que les efforts et les pressions spécifique de coupe, la rugosité de surface et l'usure pour les différentes nuances de plaquettes utilisées. Les résultats expérimentaux obtenus à partir des mesures effectuées par les équipements exposés au chapitre II seront présentés et nous proposons une analyse complète pour comprendre le comportement des outils de coupe lors de l'usinage de l'acier XC48. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu les performances en termes d'usure des différents types de matériaux de coupe tels que (carbure revêtu GC1025, carbure non revêtu H10F, carbure revêtu GC3215, cermet revêtu GC1525 et la céramique CC650) en usinant l'acier XC48 à une basse vitesse de coupe  $V_c=150\text{m/min}$ . puis en deuxième lieu nous utiliserons la vitesse de coupe  $300\text{m/min}$ .

### III-2 Essais réalisés

Deux types d'essais ont été réalisés pour étude des performances des outils de coupe.

- Essais de courtes durées, effectués sur des paliers de 20mm de longueur et de 66mm de diamètre.
- Essais de logues durées qui sont réalisés sur des éprouvettes de 335mm de longueur et de 66mm de diamètre.

L'ensemble des résultats indiqués dans ce chapitre sont comme suit :

- Résultats de l'évolution de l'usure.
- Résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps.
- Résultats de pression spécifique en fonction du temps.
- Résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps

### III-3 Les performances des matériaux de coupe

#### III-3.1 Performances des matériaux de coupe à $V_c=150\text{m/min}$

##### III-3.1.1 Evolution de l'usure

Les résultats de l'évolution de l'usure (VB, VN, VC et VB max) de cinq plaquettes étudiées lors de l'usinage de l'acier XC48 avec Les paramètres suivants : la vitesse de coupe  $V_c=150\text{m/min}$ , profondeur de passe  $a_p=0.2\text{mm}$  et l'avance  $f=0.08\text{mm/tr}$ , on choisi les cinq nuances (GC1025, H10F, GC3215, GC1525 et CC650).

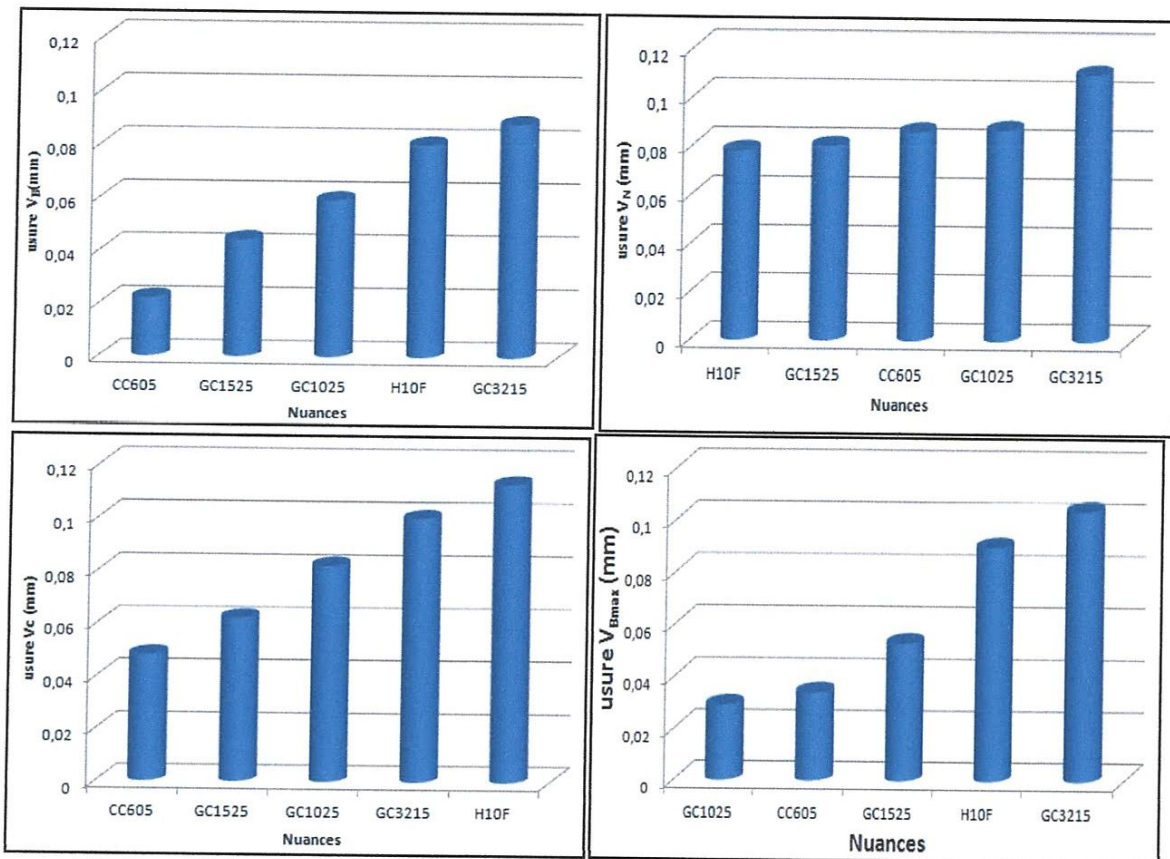


Figure III-1 : Comparaison entre l'usure des différents matériaux à  $V_c=150\text{m/min}$ .

Les histogrammes de la figure III-1 mettent en évidence l'évolution des critères d'usure VB, VN, VC et VBmax lors de l'usinage d'un palier de 335 mm de longueur. L'analyse de cette figure montre que le céramique CC650 présente une bonne résistance à l'usure VB et VC par rapport aux autres nuances de coupe mais par rapport à l'usure VN le carbure H10F présente une bonne résistance, alors que le carbure GC1025 résiste bien par rapport l'usure VBmax. D'après cette comparaison, on peut dire que la céramique est le matériau le plus adapté pour l'usinage de l'acier XC48 en termes d'usure à vitesse de coupe  $V_c=150\text{m/min}$ . La comparaison des ratios de l'usure VB des cinq matériaux de coupe, nous montre que le ratio  $(VB_{GC1525}/VB_{CC650})$  est de 2.00, le ratio  $(VB_{GC1025}/VB_{CC650})$  augmente pour donner la valeur de 2.68, par contre le ratio  $(VB_{H10F}/VB_{CC650})$  augmente et prend la valeur 3.63, en dernier lieu le ratio  $(VB_{GC3215}/VB_{CC650})$  s'envole à une valeur maximale de 4.00.

### III-3.1.2 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps

La figure III-2 illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage lors de l'usinage de l'acier XC48 avec les cinq Matériaux de coupe : GC1025, H10F, GC3215, GC1525 et CC650 à vitesse de coupe  $V_c=150\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.2\text{mm}$  et un temps d'usinage  $T_u=330$  secondes.



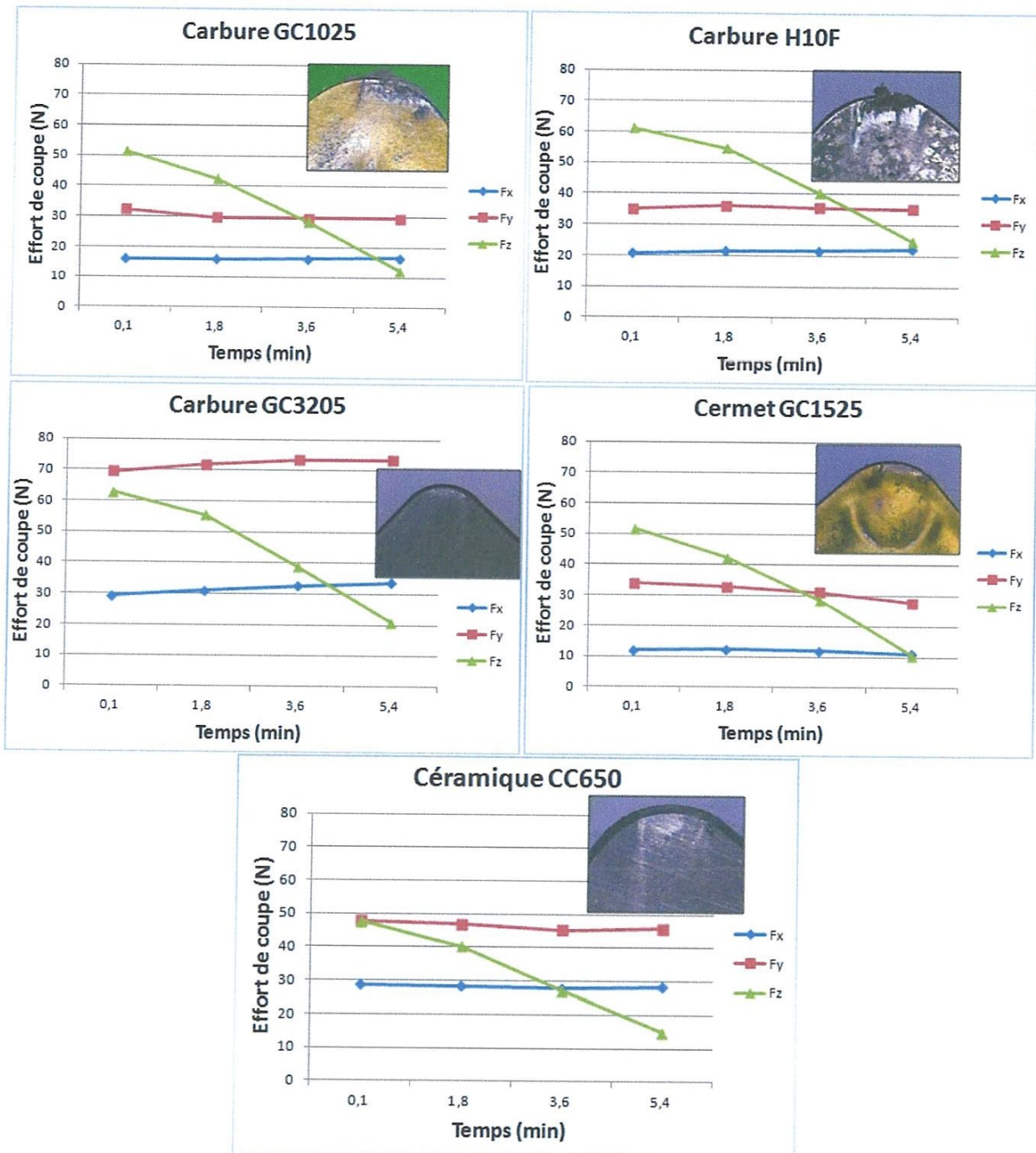


Figure III-2 : Evolution des efforts de coupe en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe à  $V_c=150\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.2\text{mm}$  et  $t=330\text{sec}$

L'analyse des résultats montre que l'augmentation du temps d'usinage conduit à une augmentation des deux composantes de l'effort de coupe  $F_x$  et  $F_y$  pour les deux nuances de coupe testées H10F et GC3205 et une diminution pour le cermet GC1525 et la céramique CC650, pour le carbure GC1025 remarque une diminution de la composante  $F_x$  et augmentation de  $F_y$ , ceci est dû à l'évolution de l'usure sur l'arête de coupe de l'outil puisque dans ce cas, la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente aussi bien que les forces de frottement et par conséquent, les deux composantes de l'effort de coupe.

En examinant l'allure des courbes on remarque que dans l'intervalle du temps de 0.1 à 5.4 minute, les composantes ( $F_x$ ,  $F_y$ ) augmente respectivement de (6.16 ; 0.34)% pour le H10F, de (13.05 ; 5.53) % pour GC3205, tous d'abord dans le même intervalle  $F_x$  et  $F_y$  diminuer respectivement de (0.84 ; 4.11) % pour CC650, de (8.85 ; 22.24) % pour GC1025, pour le carbure GC1025 il-y-a une augmentation de 2.71% du le composante  $F_x$  et diminution de 8.92 du le composante  $F_y$ . A la fin d'usinage la valeur maximale de l'usure VC enregistrée est de 0.059mm pour le GC1025, 0.08mm pour H10F, 0.088mm pour GC3205, 0.044mm pour GC1525 et 0.022mm pour CC650.

### III-3.1.3 Evolution du Pression spécifique de coupe en fonction du temps

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

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

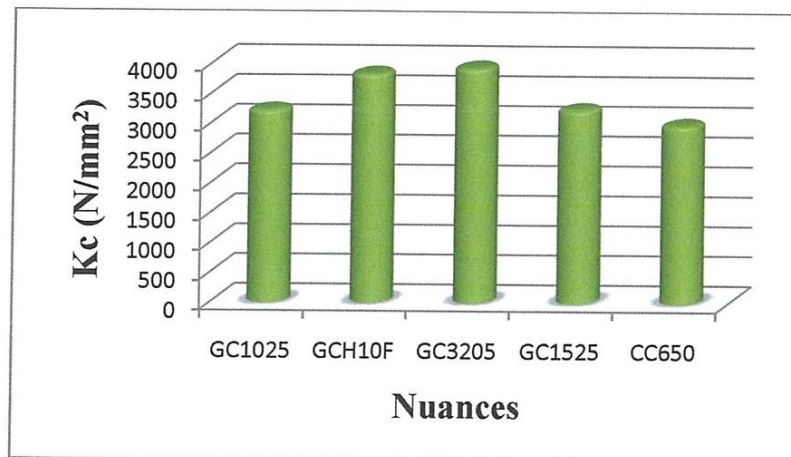
$K_c$  : Pression de coupe [ $N/mm^2$ ]

$F_z$  : Effort tangentiel [ $N$ ]

$f$  : Avance [ $mm/tr$ ];

$a_p$ : Profondeur de passe [ $mm$ ]

La figure (III.3) 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  $3210N/mm^2$  pour le GC1025,  $3824.375 N/mm^2$  pour H10F,  $3926.875 N/mm^2$  pour GC3205,  $3229.375 N/mm^2$  pour GC1525 et  $2976.25 N/mm^2$  pour CC650.



**Figure III-3** : Evolution de les pressions spécifiques de coupe pour les cinq nuances de coupe à  $V_c=150m/min$ ,  $f=0.08mm/tr$ ,  $a_p=0.2mm$  et  $t=330sec$ .

L'analyse de cette figure montre que l'outil de coupe (la céramique CC650) donne des efforts (pressions) spécifiques de coupe moindres par rapport aux autres matériaux de coupe et par conséquent un système usinant plus stable.



III-3.1.4 Evolution de la rugosité en fonction du temps

La figure III-4 présentent les résultats de l'évolution de la rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp et R3z) en fonction du temps et cela pour différents matériaux de coupe qui sont: la céramique CC650, le Cermet revêtu GC1525, le carbure revêtu GC1025, le carbure revêtu GC3205 et le carbure non revêtu H10F.

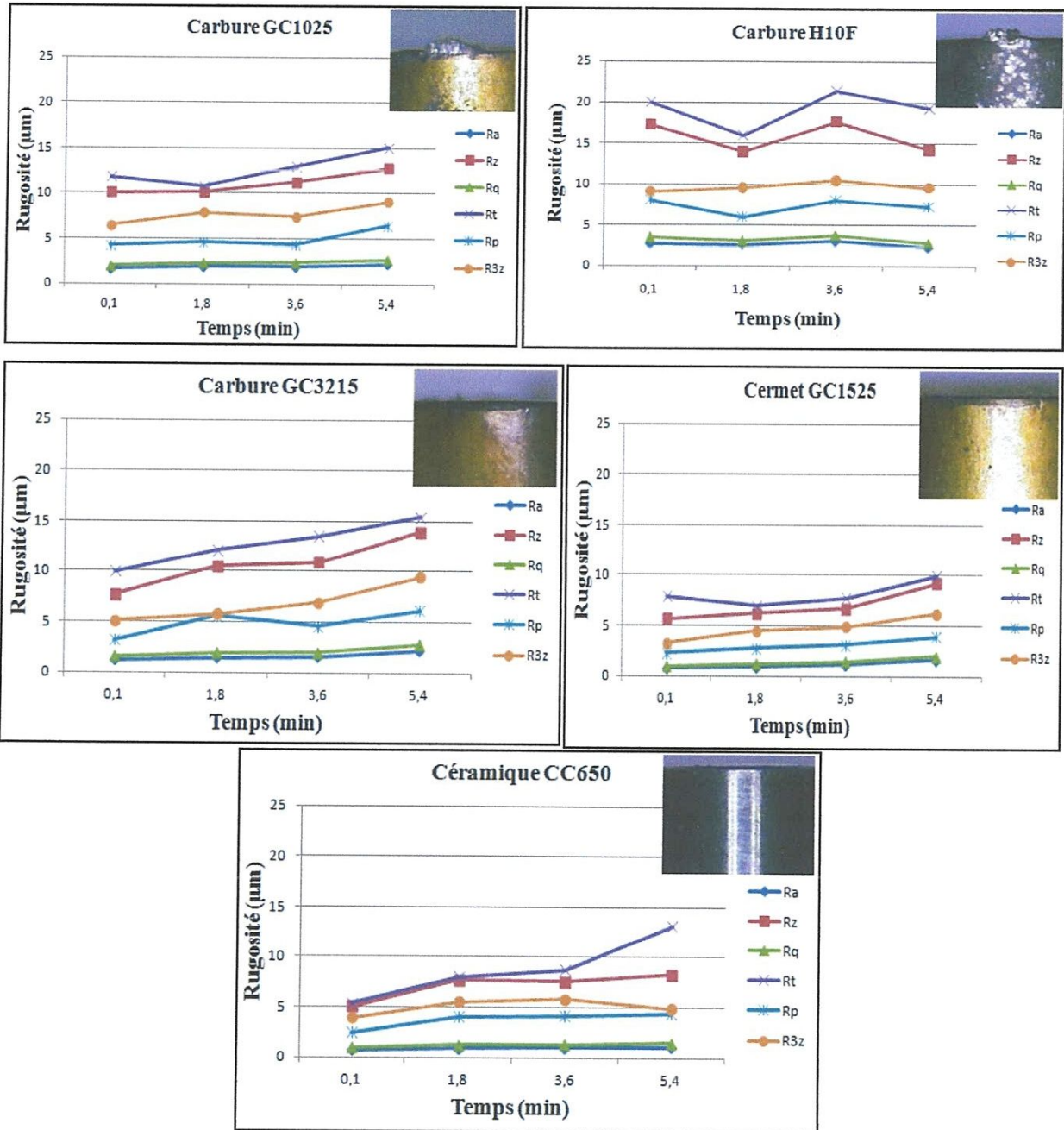


Figure III-4 : Evolution de la rugosité en fonction du temps pour les cinq nuances decoupe à  $V_c=150m/min$ ,  $f=0.08mm/tr$ ,  $ap=0.2mm$  et  $t=330sec$

L'analyse des résultats montre que la valeur la rugosité pour tous les critères n'est pas stable et uniforme pendant la coupe, mais elle subit une évolution en fonction du temps d'usinage. Ce



dernier est étroitement lié avec l'usure. Alors on peut dire que l'endommagement superficiel des facettes et des arêtes tranchantes de la partie active de l'outil conduit à la dégradation de l'état de surface du matériau usiné. Les conséquences sur le plan pratique est comme suit: pour une élévation du temps de travail de 10 à 330 secondes, on a une augmentation des critères de la rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt, Rp et R3z) successivement de ( 23.85 ; 21.59 ; 24.90; 21.81 ; 34.67 ; 29.13) % pour le carbure revêtu GC1025, de (44.59 ; 44.91 ; 44.71; 35.42; 47.97; 45.92) % pour carbure revêtu GC3205, de (53.65 ; 38.65 ; 50.73; 20.86 ; 42.71; 47.49) % pour le cermet GC1525 et de (31.81 ; 39.25 ; 35.33; 59.46 ; 43.86; 20.36)% pour la céramique CC650. Mais pour le carbure non revêtu H10F on a une diminution des critères de la rugosité (Ra, Rz, Rq, Rt et Rp) de (16.81 ; 21.28 ; 20.77; 3.48; 9.75) % sauf le critère R3z est augmenter 2.77%.

### III-3.2 Les performances des matériaux de coupe à $V_c=300\text{m/min}$

#### III-3.2.1 Evolution de l'usure

Les résultats de l'évolution de l'usure ( $V_B$ ,  $V_N$ ,  $V_C$  et  $V_{B\max}$ ) de cinq plaquettes étudiées lors de l'usinage de l'acier XC48 avec Les paramètres suivants : la vitesse de coupe  $V_c=300\text{m/min}$ , profondeur de passe  $a_p=0.2\text{mm}$  et l'avance  $f=0.08\text{mm/tr}$ , on a choisi les cinq nuances (GC1025, H10F, GC3215, GC1525 et CC650).

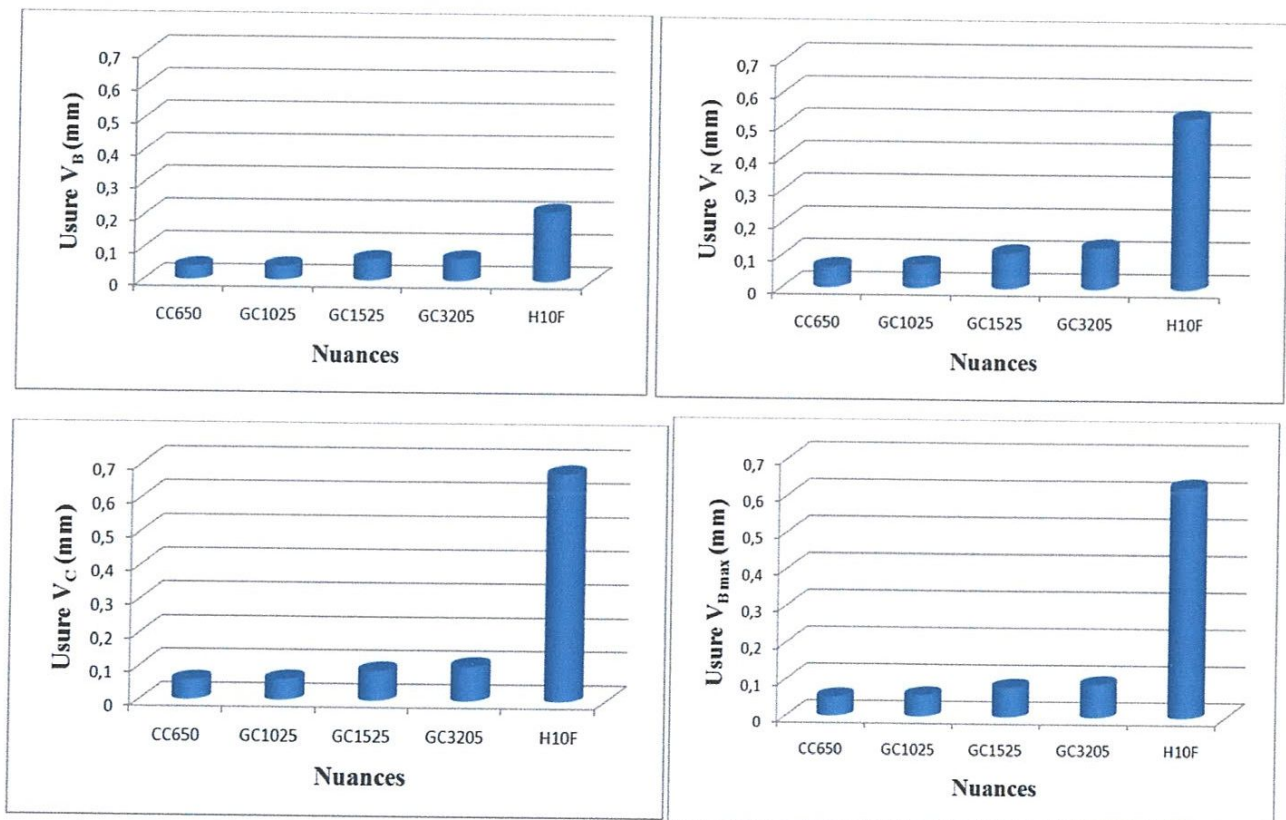


Figure III-5 : Comparaison entre l'usure des différents matériaux à  $V_c=300\text{m/min}$ .

L'analyse de cette figure III-5 montre que pour tous les critères d'usure ( $V_B$ ,  $V_N$ ,  $V_C$  et  $V_{B\max}$ ) le céramique CC650 présente une bonne résistance à l'usure par rapport aux autres nuances de coupe. D'après cette comparaison, on peut dire que la céramique est le matériau le plus adapté

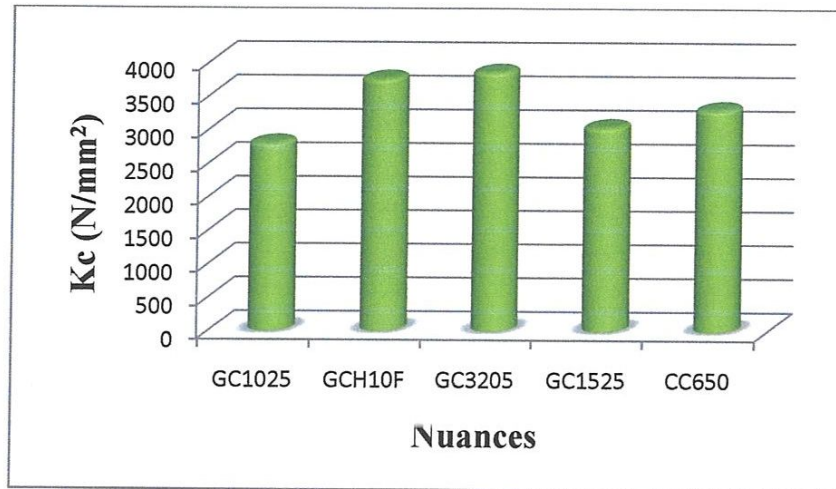


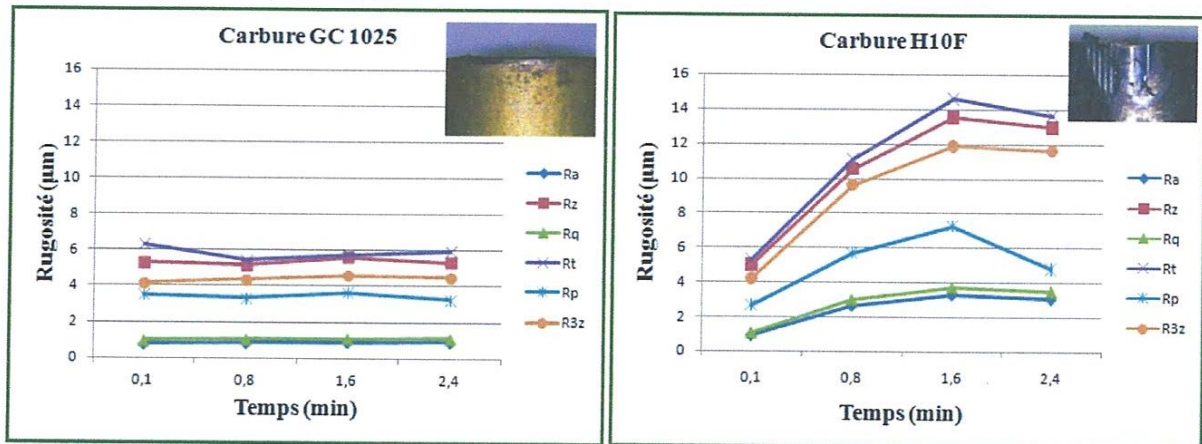
Figure III-7 : Evolution de la pression spécifique de coupe en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe à  $V_c=300\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.2\text{mm}$  et  $t=167\text{sec}$ .

L'analyse de cette figure montre que l'outil de coupe (le carbure revêtu GC1025) donnent des efforts (pressions) spécifiques de coupe moindres par rapport aux autres matériaux de coupe et par conséquent un système usinant plus stable.

### III-3.2.4 Evolution de la rugosité en fonction du temps

La figure III-8 présente les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps et cela pour différents matériaux de coupe qui sont: la céramique CC650, le cermet revêtu GC1525, le carbure revêtu GC1025, le carbure revêtu GC3205 et le carbure non revêtu H10F. Les conditions adoptées pour cette série d'essais sont :

- La vitesse de coupe  $V_c = 300 \text{ m/min}$ .
- La profondeur de passe  $a_p = 0,2\text{mm}$ .
- L'avance  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ .



**Chapitre IV**  
**Application de la méthodologie**  
**de surface de réponse pour la**  
**prédiction des modèles**  
**mathématiques**



## 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. Ce chapitre est divisé en deux parties, la première partie est consacrée à la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés lors de l'usinage de l'acier XC48 avec le matériau de coupe carbure revêtu GC1025 pour le plan de 9 essais. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ , et  $T_u$ ) et les paramètres technologiques étudiés (les efforts de coupe, la rugosité et l'usure en dépouille  $V_B$ ). Ils permettent d'optimiser le processus de coupe.

La deuxième partie est consacrée à la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ , et  $a_p$ ) et les paramètres technologiques étudiés (usure, rugosité et effort de coupe) lors de l'usinage de l'acier XC48 avec un outil de coupe en carbure revêtu GC1025 pour le plan de 27 essais. Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RMS), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «MINITAB16». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés.

## IV-2 Plan de Taguchi pour le cas du carbure GC1025

### IV-2.1 Evolution de la rugosité, des efforts de coupe et de l'usure en dépouille en fonction des paramètres d'usinage

Dans le but d'élaborer des modèles statistiques de la rugosité de surface, 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, ce qui correspond à un plan de Taguchi réduit. Les essais sont réalisés en utilisant la nuance de 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	$V_c$	$f$	$T_u$	$R_a$	$R_t$	$R_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$V_B$
1	100	0,08	5	2,47	14,4	16,95	7,79	13,21	46,78	0,058
2	100	0,12	10	3,32	14,46	21,03	11,32	26,47	64,6	0,061
3	100	0,16	15	4	20,89	25,32	26,04	54,23	78,2	0,016
4	143	0,08	10	2	12,6	14,14	12,92	31,86	33,28	0,063
5	143	0,12	15	3,19	16,94	19,53	14,66	32,29	60,3	0,081
6	143	0,16	5	2,56	13,94	15,44	16,85	54,18	77,44	0,051
7	280	0,08	15	0,9	4,95	5,51	16,64	48,51	43,26	0,083
8	280	0,12	5	0,87	5,47	6,19	20,75	45,61	75,9	0,074
9	280	0,16	10	1,64	7,59	8,16	16,26	38,94	76,72	0,085

**Tableau IV-1:** Plan d'expérience de 9 essais pour l'élaboration des modèles de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage pour le carbure revêtu GC1025.

### IV-2.1.1 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	CoefSE	Coef	T	P
Constant	2,88150	1,14888	2,50810	0,129
Vc	-0,01180	0,00569	-2,07587	0,174
f	3,99019	8,17046	0,48837	0,674
Tu	0,02601	0,15652	0,16619	0,883
Vc*f	0,01236	0,04257	0,29041	0,799
Vc*Tu	-0,00007	0,00034	-0,21817	0,848
f*Tu	0,53013	0,90919	0,58308	0,619

Tableau IV-2 : Analyse de régression de Ra

Le modèle généralisé qui décrit la variation de Ra en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$Ra = 2,8815 - 0,0118045 Vc + 3,99019 f + 0,0260121 Tu + 0,0123617 Vc*f - 7,42928e-005 Vc*Tu + 0,530127 f*Tu \dots \text{(IV-1)}$$

$$R^2=98,78\%$$

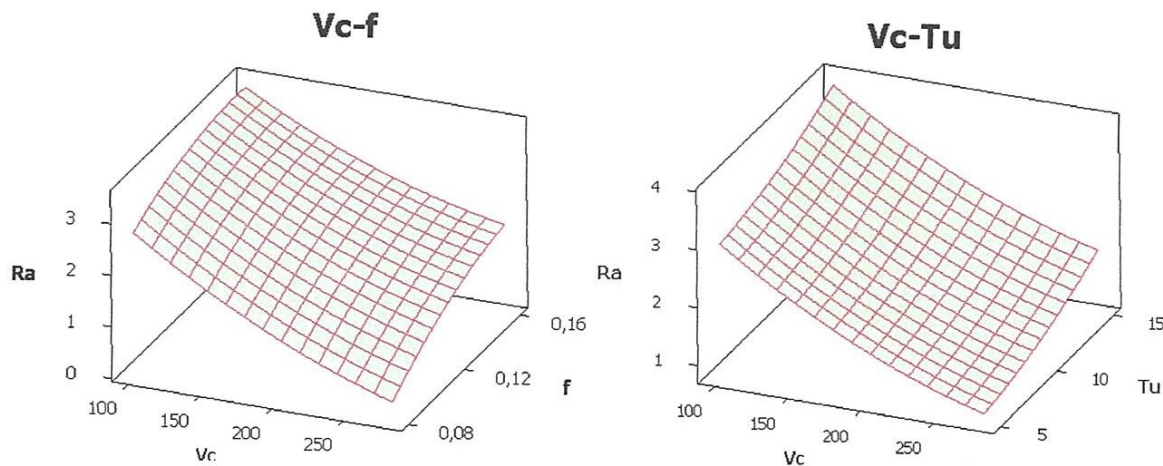
$$S = 0,239080$$

$$R\text{-Sq} = 98,78\%$$

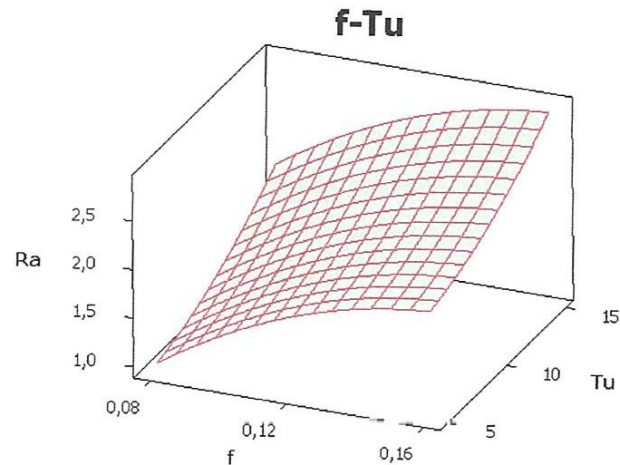
$$R\text{-Sq}(\text{adj}) = 95,11\%$$

#### A/ 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-1. 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.





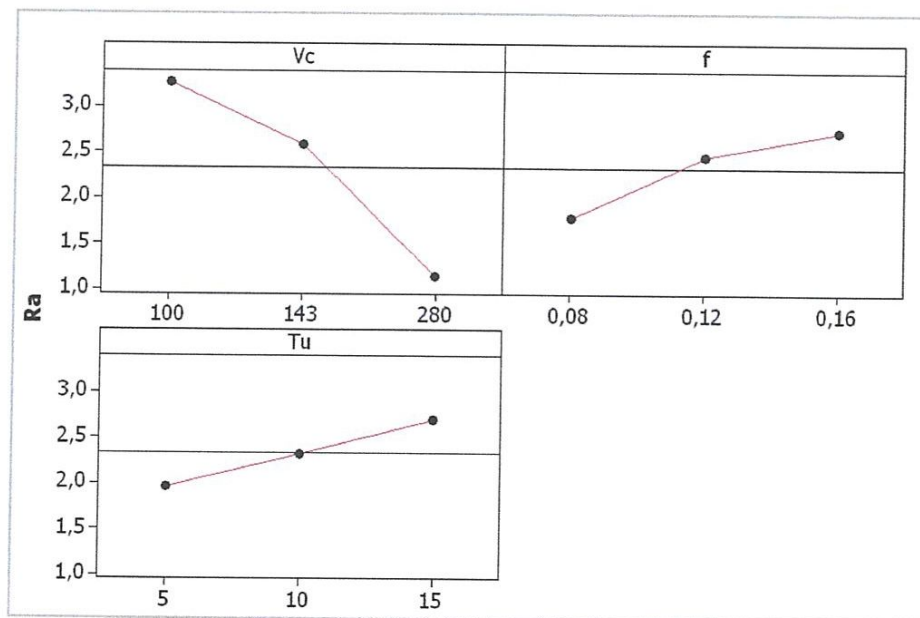


**Figure IV-1:** Diagramme de surface pour Ra en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_u$ .

L'analyse des courbes 3D montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la rugosité Ra diminue légèrement. Nous concluons aussi que la vitesse de coupe est le paramètre le plus prépondérant suivi du temps d'usinage et en dernier lieu l'avance par tours.

### B/ Graphique des effets principaux et modèles puissance pour Ra

La figure IV-2 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de temps de l'usinage sur le critère de rugosité Ra.



**Figure IV-2 :** Graphique des effets principaux pour Ra

La figure IV-2 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  $V_c$  est plus grande par rapport à la pente de l'avance et celle du temps d'usinage.



La méthode des effets moyens permet de déduire le modèle suivant :

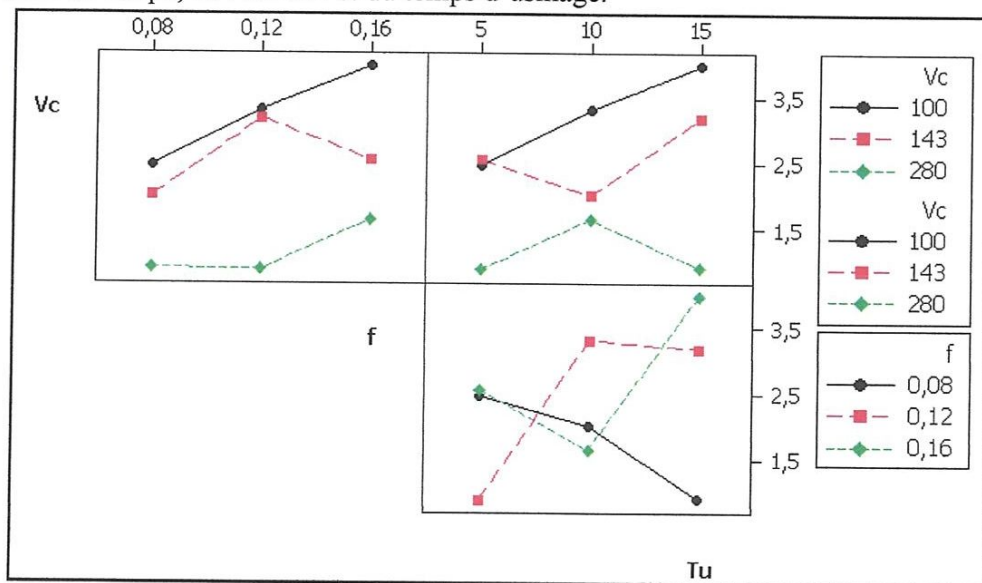
$$R_a = e^{7,037} \cdot Vc^{-1,076} \cdot f^{0,636} \cdot Tu^{0,234} \dots \text{(IV-2)}$$

Avec  $R^2=0,90$

L'analyse des exposants du modèle montre que l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à la diminution du critère de rugosité  $R_a$ . 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 $R_a$

On utilise la matrice de diagrammes d'interactions pour visualiser l'effet des interactions sur la réponse. La figure IV-3 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour  $R_a$  en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage.



**Figure IV-3 :** Matrice de diagrammes d'interactions pour  $R_a$

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

#### IV-2.1.2 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $R_z$

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

La méthode des effets moyens permet de déduire le modèle suivant :

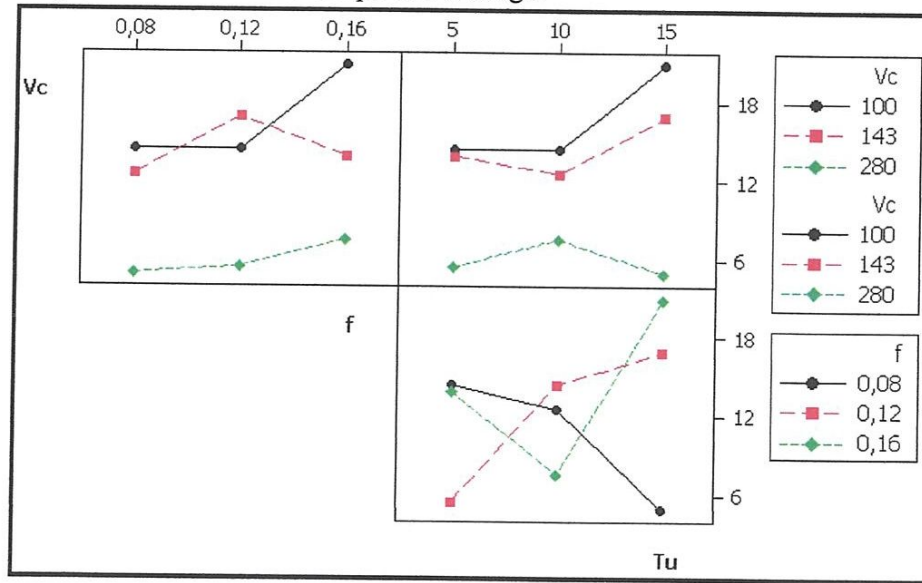
$$R_z = e^{8,254} \cdot V_c^{-1,031} \cdot f^{0,426} \cdot Tu^{0,138} \dots \text{(IV-4)}$$

Avec  $R^2=0,85$

Nous déduisons de ce modèle que le facteur le plus influent dans ce cas est la vitesse de coupe, son augmentation permet d'améliorer le critère de rugosité  $R_z$ . 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  $R_z$**

La figure IV-6 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour  $R_z$  en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage.



**Figure IV-6:** Matrice de diagrammes d'interactions pour  $R_z$

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

**IV-2.1.3 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur  $R_t$**

Le tableau IV-4 montre les coefficients de régression estimés pour  $R_t$  et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Term	Coef	SE	Coef	T	P
Constant	20,2485		5,1013	3,96926	0,058
Vc	-0,0462		0,0252	-1,82864	0,209
f	6,5174		36,2790	0,17965	0,874
Tu	0,0118		0,6950	0,01692	0,988
Vc*f	-0,0925		0,1890	-0,48963	0,673
Vc*Tu	-0,0016		0,0015	-1,08652	0,391
f*Tu	5,3316		4,0370	1,32069	0,317

**Tableau IV-4 :** Analyse de régression de  $R_t$

Le modèle généralisé qui décrit la variation de  $R_t$  en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$R_t = 20,2485 - 0,0461726 V_c + 6,51744 f + 0,0117568 T_u - 0,0925412 V_c * f - 0,00164285 V_c * T_u + 5,33165 f * T_u \dots \text{(IV-5)}$$

$$R^2 = 99,41\%$$

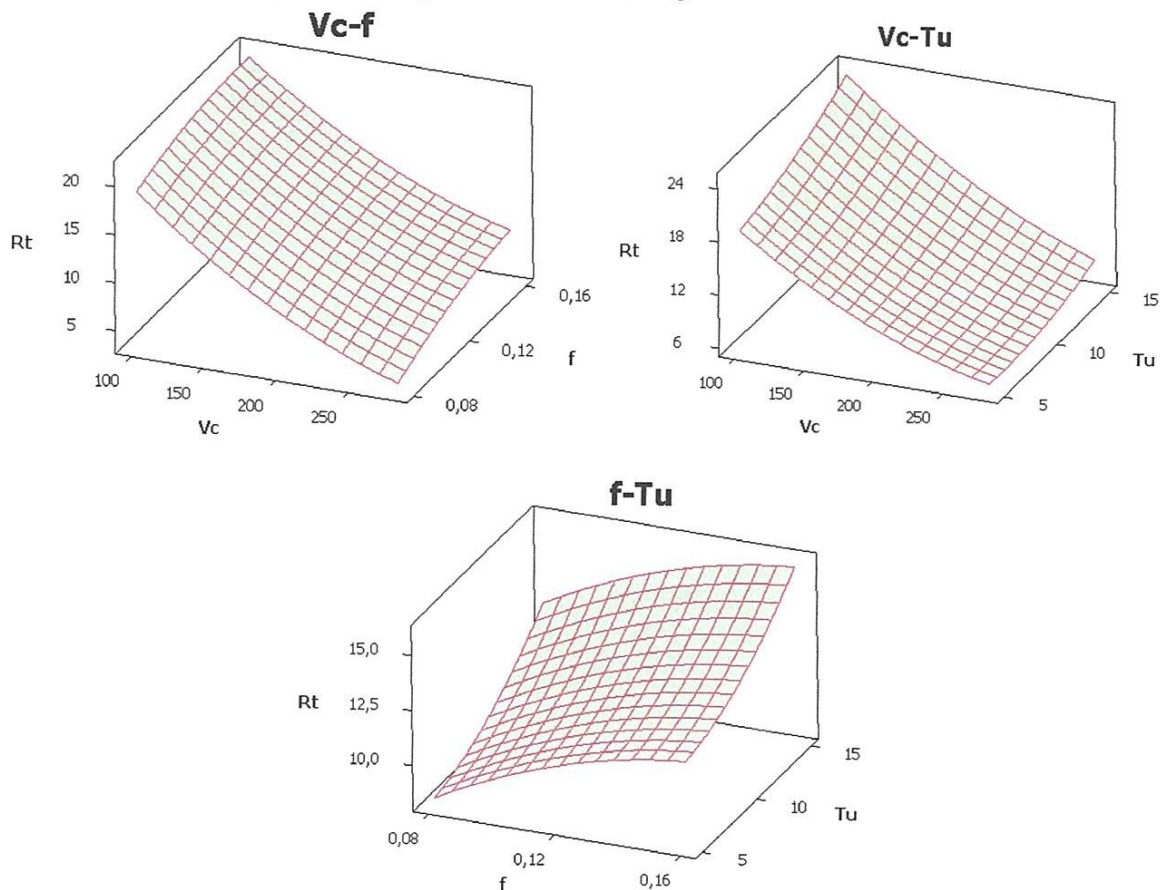
$$S = 1,06158$$

$$R\text{-Sq} = 99,41\%$$

$$R\text{-Sq}(\text{adj}) = 97,64\%$$

#### A/ Evolution de la rugosité $R_t$ en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité  $R_t$  en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur figure IV-7. 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  $R_t$ .



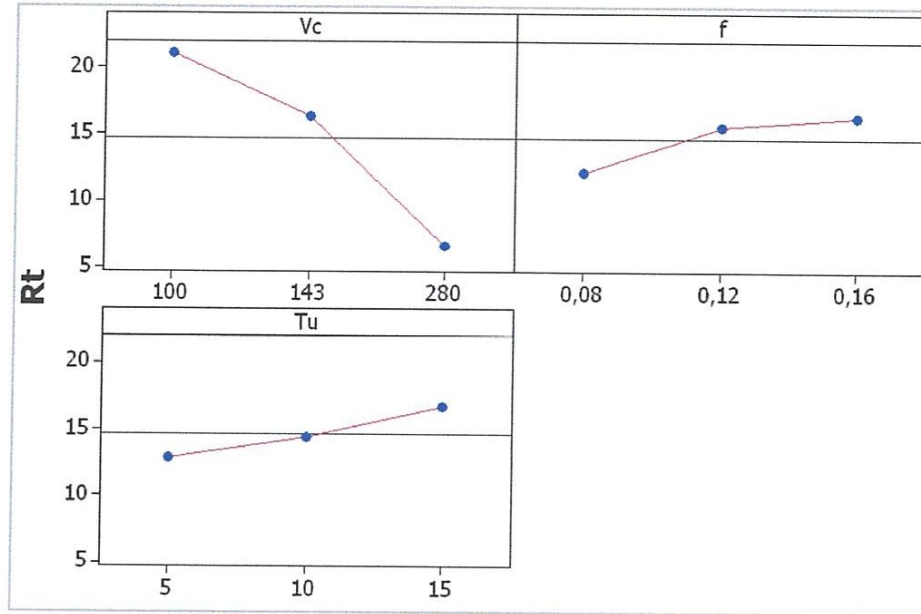
**Figure IV-7 :** Diagramme de surface pour  $R_t$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_u$

A partir de la figure IV-7, nous pouvons remarquer que la rugosité s'affecte légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Avec la diminution de la vitesse de coupe la rugosité  $R_t$  diminue.



**B/ Graphique des effets principaux et modèles puissance pour Rt**

La figure IV-8 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage sur le critère de rugosité Rt.



**Figure IV-8:** Graphique des effets principaux pour Rt

La figure IV-8 montre que seule la vitesse de coupe a un effet significatif sur le critère de rugosité Rt. 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.

La méthode des effets moyens permet de déduire le modèle suivant :

$$R_t = e^{8,998} \cdot V_c^{-1,155} \cdot f^{0,431} \cdot Tu^{0,161} \dots \text{(IV-6)}$$

Avec  $R^2=0,94$

Nous pouvons déduire de ce modèle que le facteur le plus influent dans ce cas est la vitesse de coupe, son augmentation permet d'améliorer le de rugosité Rt. 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 Rt**

La figure IV-9 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Rt en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage.

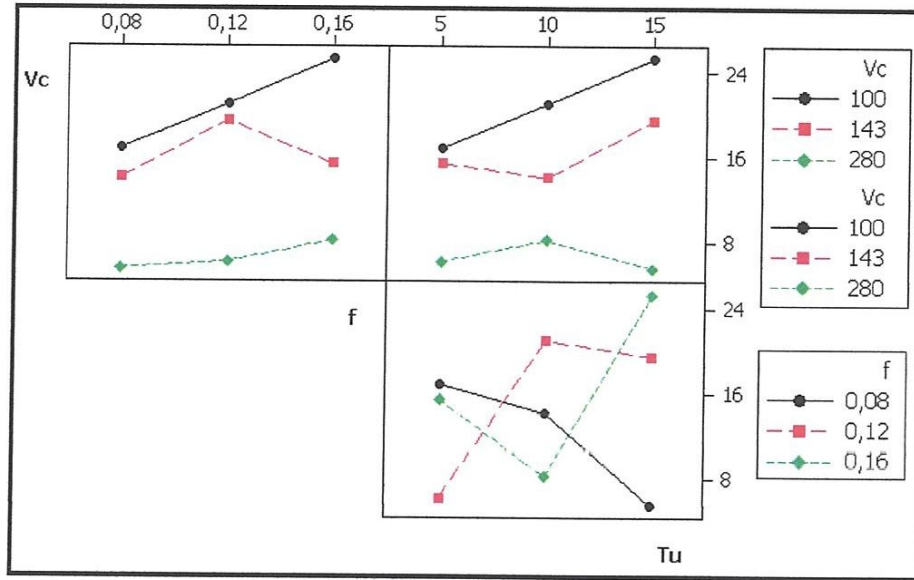


Figure IV-9: Matrice de diagrammes d'interactions pour Rt

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

**IV-2.1.4 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	CoefSE	Coef	T	P
Constant	-16,588	13,1598	-1,26053	0,335
Vc	0,238	0,0651	3,65360	0,067
f	167,160	93,5886	1,78611	0,216
Tu	-1,010	1,7928	-0,56310	0,630
Vc*f	-1,382	0,4876	-2,83509	0,105
Vc*Tu	-0,004	0,0039	-1,09088	0,389
f*Tu	14,489	10,4143	1,39124	0,299

Tableau IV-5 : Analyse de régression de Fx

Le modèle généralisé qui décrit la variation de Fx en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$F_x = -16,5883 + 0,237982 V_c + 167,16 f - 1,00953 T_u - 1,38231 V_c * f - 0,00425504 V_c * T_u + 14,4888 f * T_u \dots \text{(IV-7)}$$

R<sup>2</sup> = 93,34%

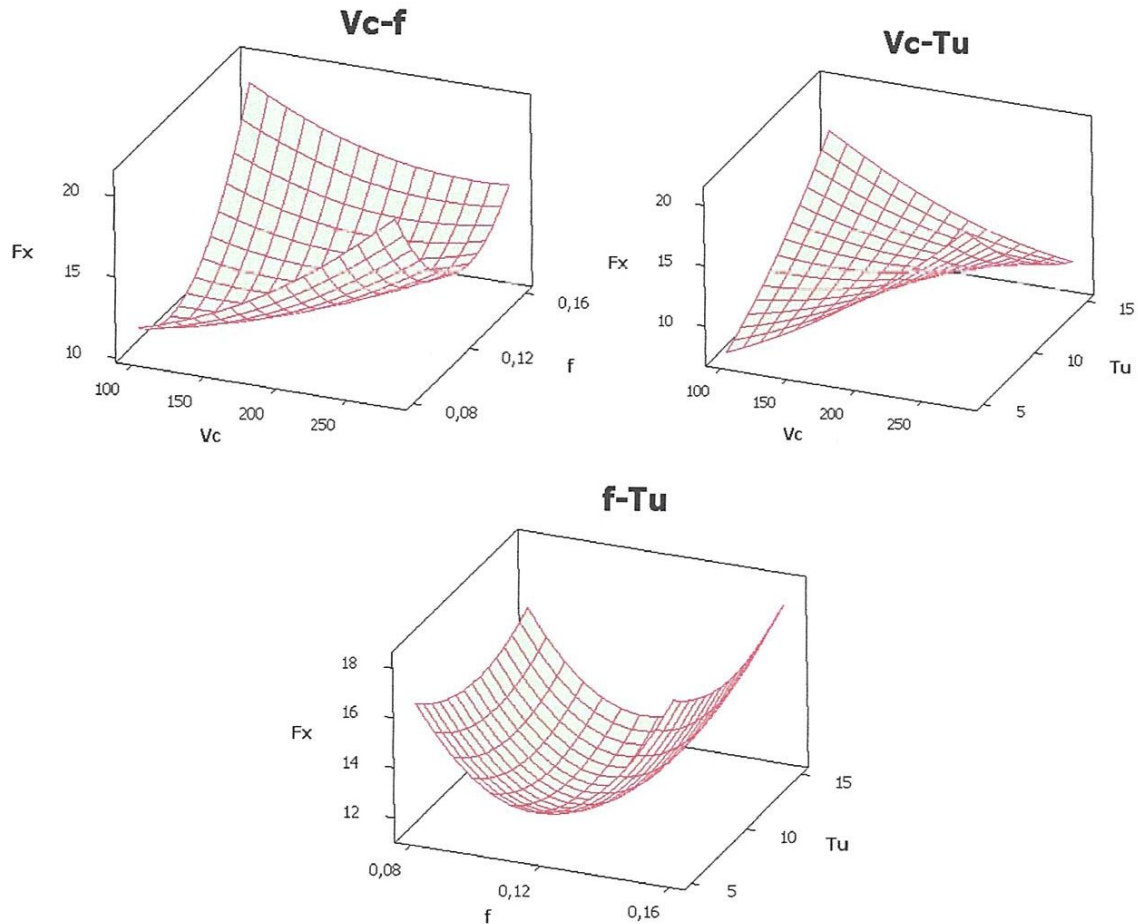
S = 2,73854

R-Sq = 93,34%

R-Sq(adj) = 73,35%

**A/ 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-10. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur  $F_x$ .



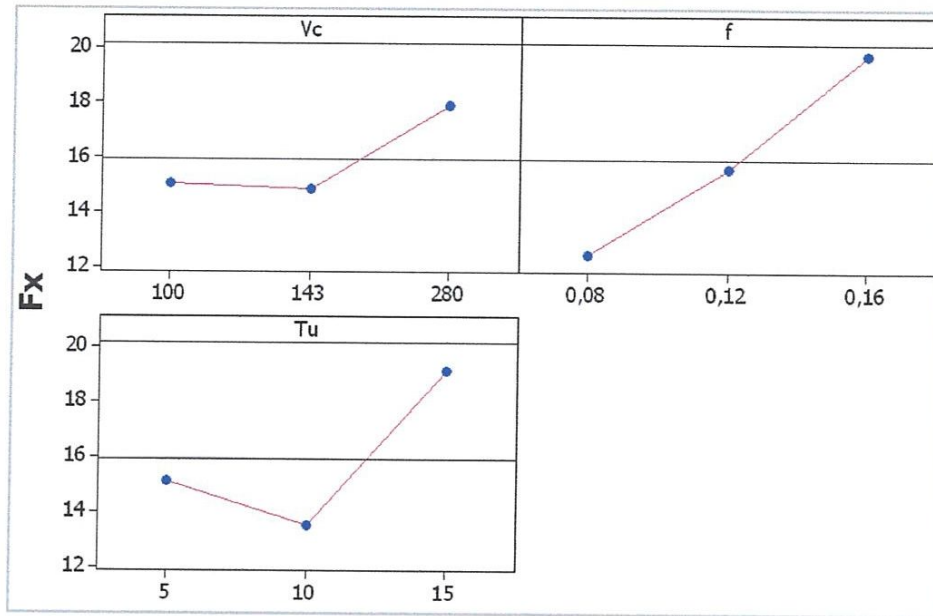
**Figure IV-10 :** Diagramme de surface pour  $F_x$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_u$

La présentation en 3D figure IV-10 montre que la pente l'avance est plus supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort axiale.

**B/ Graphique des effets principaux et modèles puissance pour  $F_x$** 

La figure IV-11 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage sur  $F_x$ .





**Figure IV-11 :** Graphique des effets principaux pour  $F_x$

La figure IV-11 montre que seule l'avance a un effet significatif sur la composante  $F_x$ . 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.

La méthode des effets moyens permet de déduire le modèle suivant :

$$F_x = e^{2,256} \cdot V_c^{0,288} \cdot f^{0,69} \cdot T_u^{0,222} \dots \text{(IV-8)}$$

Avec  $R^2=0,39$

Nous déduisons de ce modèle que le facteur le plus influent dans ce cas est l'avance, son augmentation permet d'augmenter le critère de l'effort de coupe  $F_x$ .

#### **C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour $F_x$**

La figure IV-12 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour  $F_x$  en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de l'usinage.

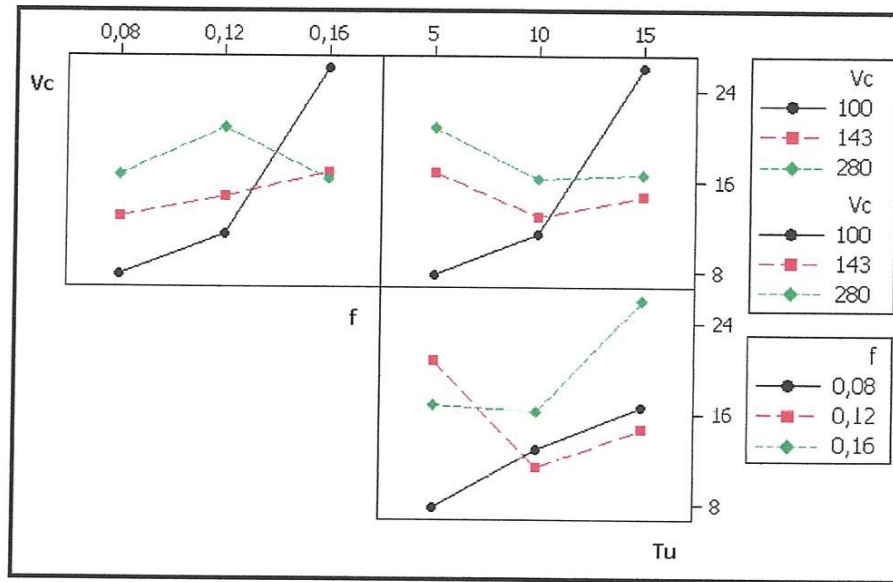


Figure IV-12 :Matrice de diagrammes d'interactions pour Fx

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

**IV-2.1.5 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	-79,691	42,352	-1,88164	0,201	
Vc	0,506	0,210	2,41510	0,137	
f	883,306	301,194	2,93269	0,099	
Tu	0,945	5,770	0,16370	0,885	
Vc*f	-3,496	1,569	-2,22826	0,156	
Vc*Tu	-0,003	0,013	-0,22616	0,842	
f*Tu	-6,291	33,516	-0,18769	0,868	

Tableau IV 6 :Analyse de régression de Fy

Le modèle généralisé qui décrit la variation de Fr en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$Fy = -79,6909 + 0,506267 Vc + 883,306 f + 0,944536 Tu - 3,49645 Vc*f - 0,002839 Vc*Tu - 6,29067 f*Tu \dots (IV-9)$$

R<sup>2</sup>= 89,72%

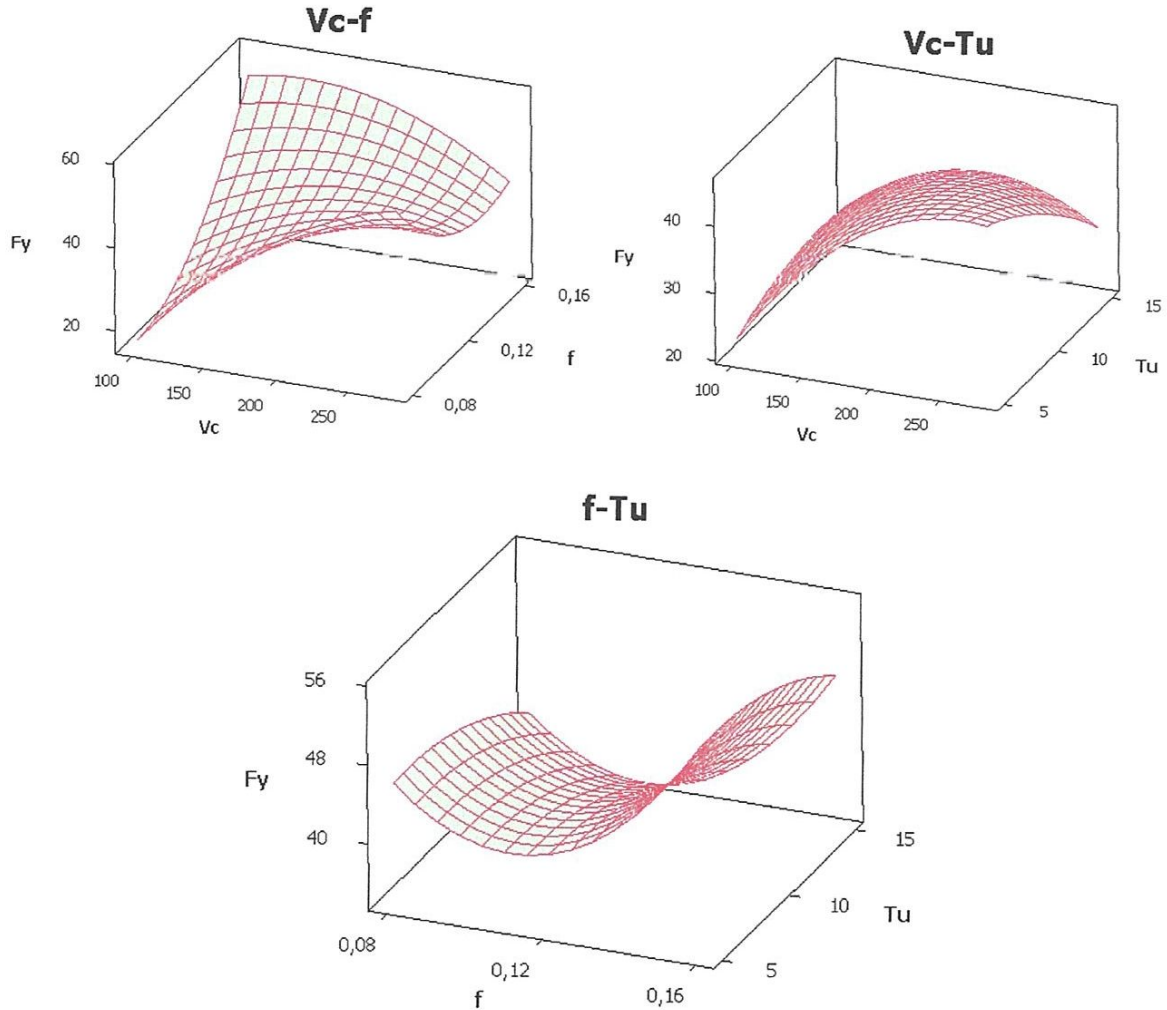
S = 8,81336

R-Sq = 89,72%

R-Sq(adj) = 58,88%

**A/ 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-13. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur  $F_y$ .



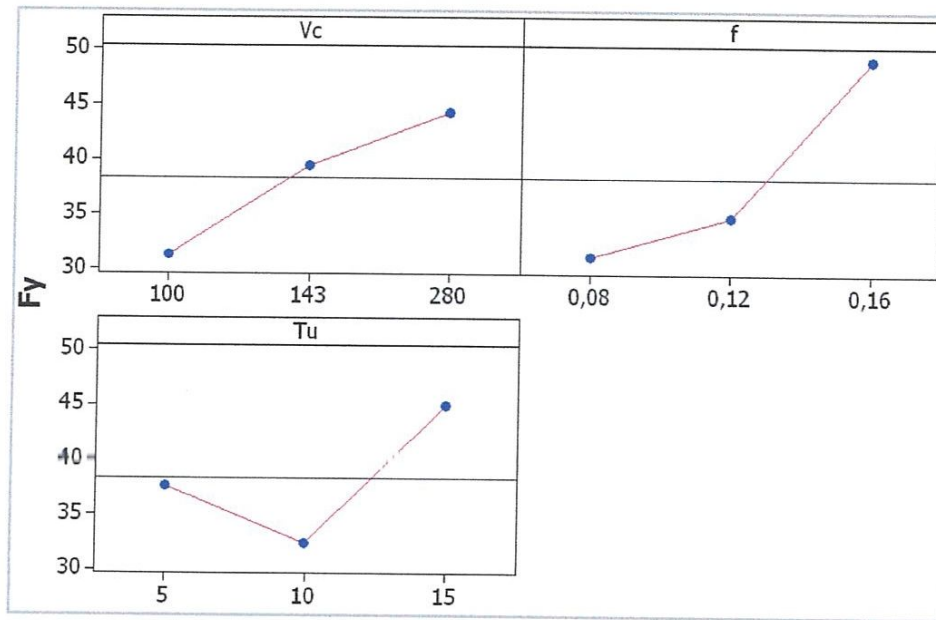
**Figure IV-13:** Diagramme de surface pour  $F_y$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_u$

La surface de réponse présentée sur la figure IV-13 montre que la pente l'avance 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 la vitesse de coupe.

**B/ Graphique des effets principaux et modèles puissance pour  $F_y$** 

La figure IV-14 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage sur  $F_y$ .





**Figure IV-14:** Graphique des effets principaux pour  $F_y$

La figure IV-14 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.

La méthode des effets moyens permet de déduire le modèle suivant :

$$F_y = e^{2,442} \cdot V_c^{0,454} \cdot f^{0,809} \cdot T_u^{0,259} \dots \text{(IV-10)}$$

Avec  $R^2=0,24$

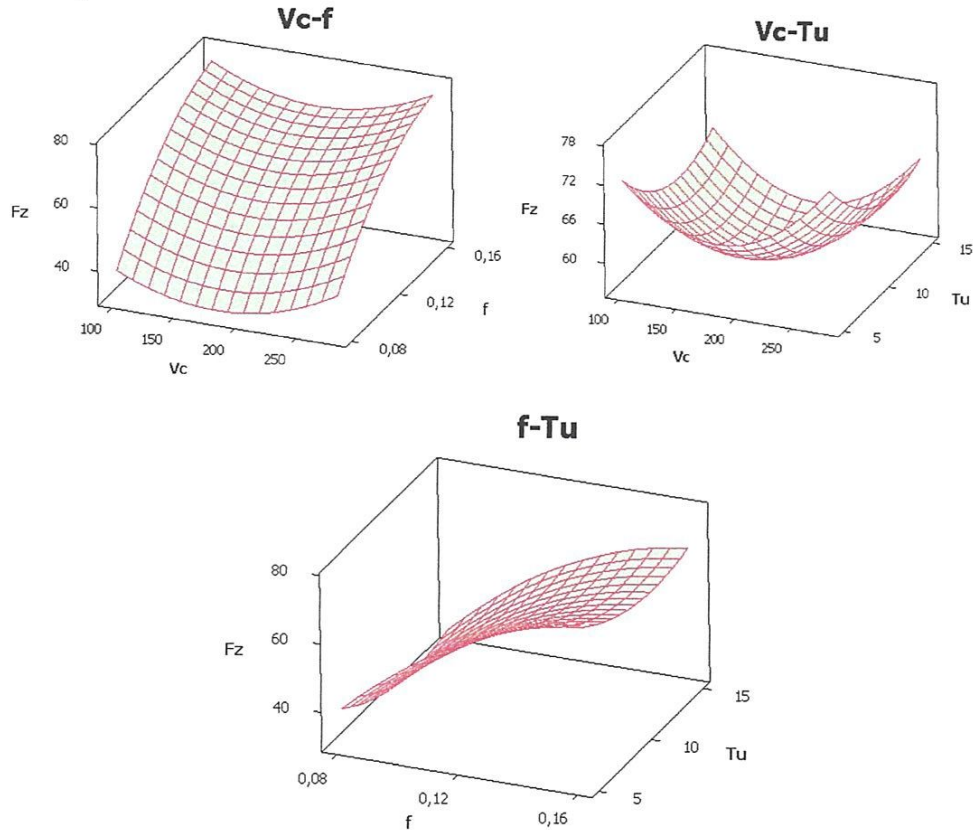
Nous déduisons de ce modèle que l'augmentation de l'avance contribue à l'augmentation de l'effort de coupe  $F_y$ , suivie par la vitesse de coupe, alors que l'augmentation de la section du copeau ( $f \cdot a_p$ ) contribue à l'accroissement d'effort  $F_y$ .

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour $F_y$

La figure IV-15 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.

**A/ 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-16. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur Fz.

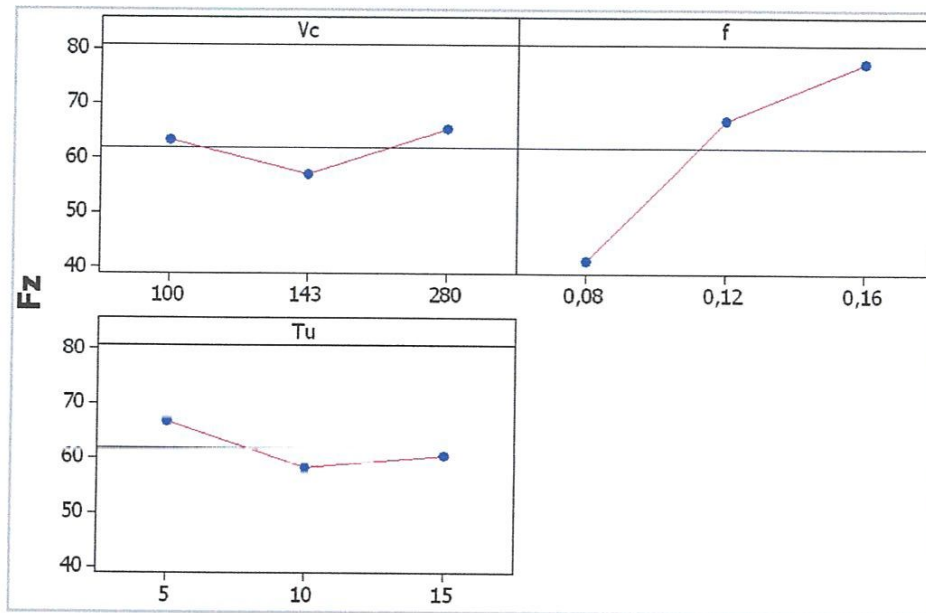


**Figure IV-16 :** Diagramme de surface pour Fz en fonction de Vc, f et Tu

L'évolution de l'effort tangentiel en fonction de ( $V_c$ ,  $f$  et  $T_u$ ) figure IV-16 illustre que cet effort est plus affecté par l'avance.

**B/ Graphique des effets principaux et modèles puissance pour Fz**

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



**Figure IV-17:** Graphique des effets principaux pour Fz

La figure IV-17 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 la pente du temps d'usinage et celle de la vitesse de coupe.

La méthode des effets moyens permet de déduire le modèle suivant :

$$F_z = e^{6,120} \cdot V_c^{0,048} \cdot f^{0,947} \cdot T_u^{-0,107} \dots \text{(IV-12)}$$

Avec  $R^2=0,88$

Nous déduisons de ce modèle que l'augmentation de l'avance contribue à l'augmentation d'effort de coupe Fz.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fz

La figure IV-18 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.



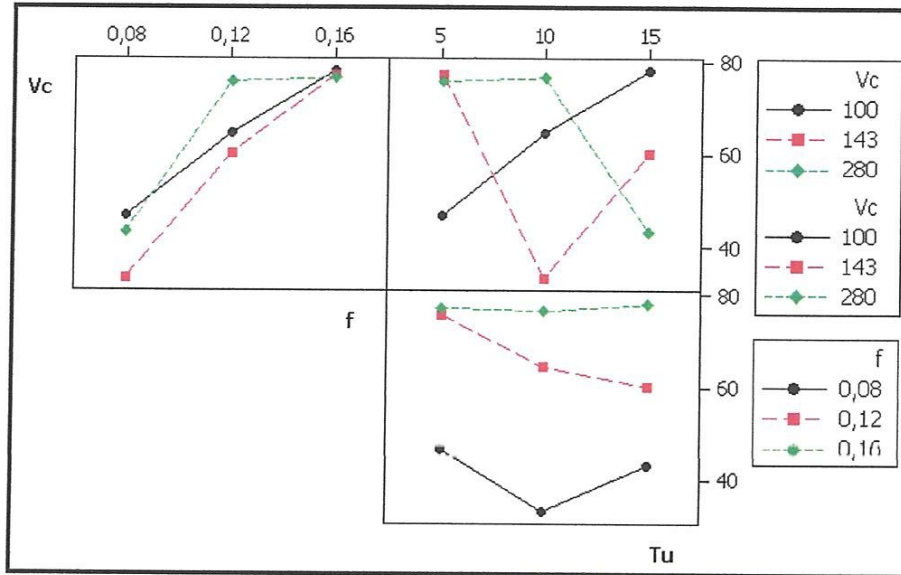


Figure IV-18 : Matrice de diagrammes d'interactions pour Fz

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

IV-2.1.7 Analyse des effets des facteurs et des interactions sur VB

Le tableau IV-8 montre les coefficients de régression estimés pour VB et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Term	CoefSE	Coef	T	P
Constant	0,053458	0,071404	0,74868	0,532
Vc	-0,000495	0,000353	-1,40024	0,296
f	-0,309177	0,507800	-0,60886	0,605
Tu	0,014091	0,009728	1,44860	0,284
Vc*f	0,005628	0,002646	2,12739	0,167
Vc*Tu	-0,000008	0,000021	-0,38081	0,740
f*Tu	-0,092608	0,056507	-1,63889	0,243

Tableau IV-8 : Analyse de régression de VB

Le modèle généralisé qui décrit la variation de VB en fonction des tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 VB = & 0,0534583 - 0,000494876 Vc - 0,309177 f + 0,0140914 Tu + \\
 & 0,00562801 Vc*f - 8,05941e-006 Vc*Tu - 0,0926082 f*Tu \dots \text{(IV-13)}
 \end{aligned}$$

**R<sup>2</sup> = 88,09%**

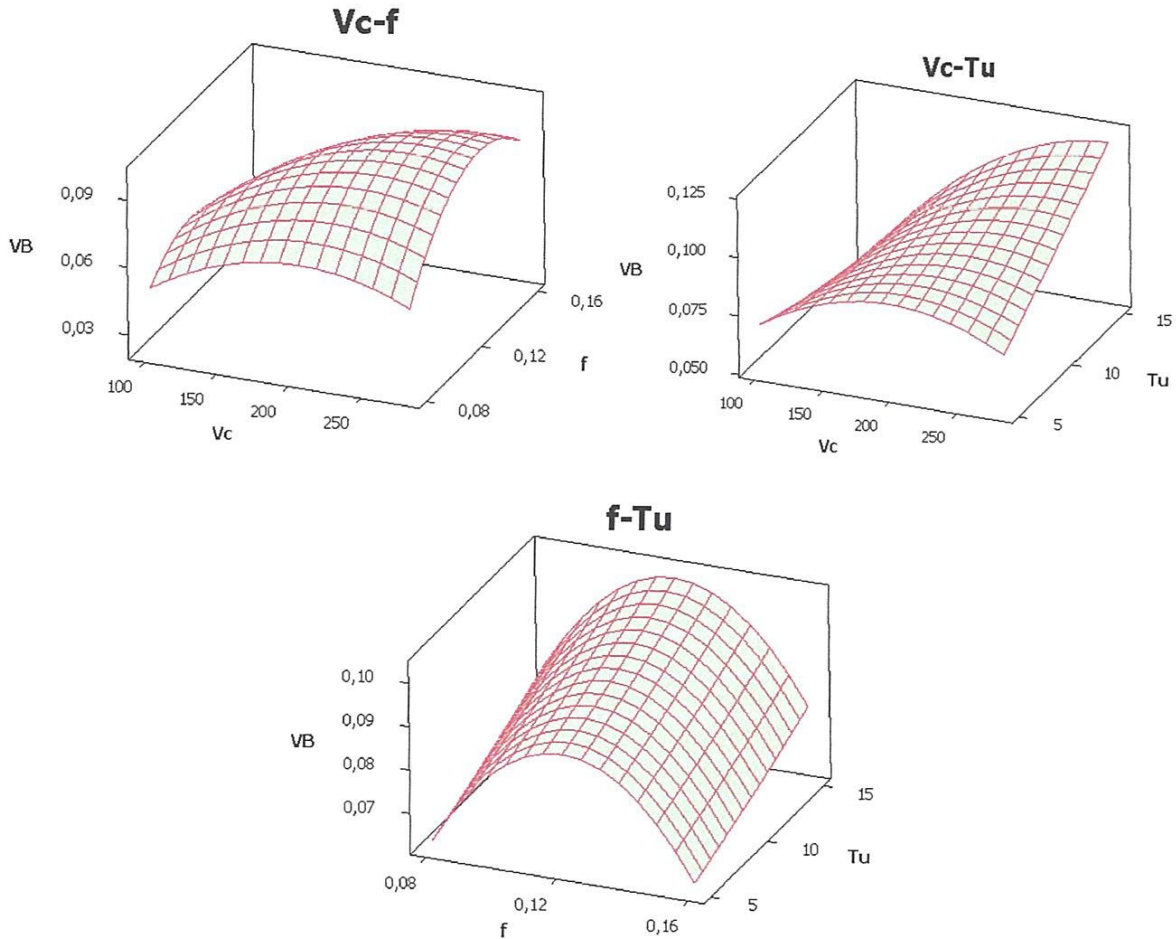
S = 0,0148590

R-Sq = 88,09%

R-Sq(adj) = 52,37%

### A/ Evolution de VB en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse de VB en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-19. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage sur VB.

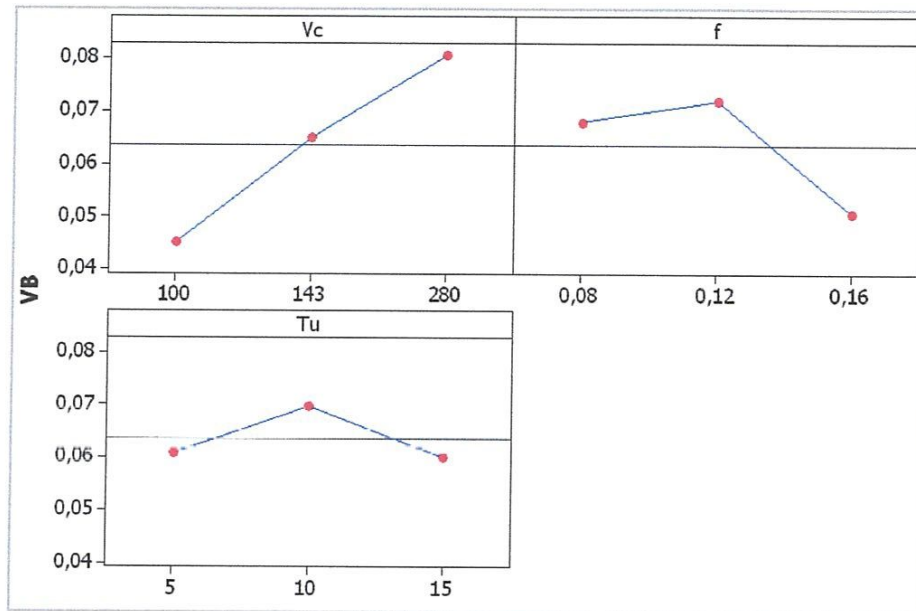


**Figure IV-19 :** Diagramme de surface pour VB en fonction de Vc, f et Tu

La présentation en 3D (figure IV-1) montre que la pente de la vitesse de coupe est plus supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'usure VB suivi de l'avance et en dernier lieu du temps d'usinage.

### B/ Graphique des effets principaux et modèles puissance pour VB

La figure IV-20 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de du temps d'usinage sur VB.



**Figure IV-20:** Graphique des effets principaux pour VB

L'analyse de la figure IV-20 montre que seule la vitesse de coupe a un effet significatif sur l'usure en dépouille VB. En effet, on remarque que la pente du paramètre Vc est plus grande que la pente de l'avance et celle du temps d'usinage.

La méthode des effets moyens permet de déduire le modèle suivant :

$$V_B = e^{-7,274} \cdot V_C^{0,671} \cdot f^{-0,652} \cdot T_u^{-0,171} \dots \text{(IV-14)}$$

Avec  $R^2=0,30$

Nous déduisons de ce modèle que le facteur le plus influent dans ce cas est la vitesse de coupe, son augmentation permet de détériorer le critère d'usure VB.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour VB

La figure IV-21 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour VB en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps d'usinage.



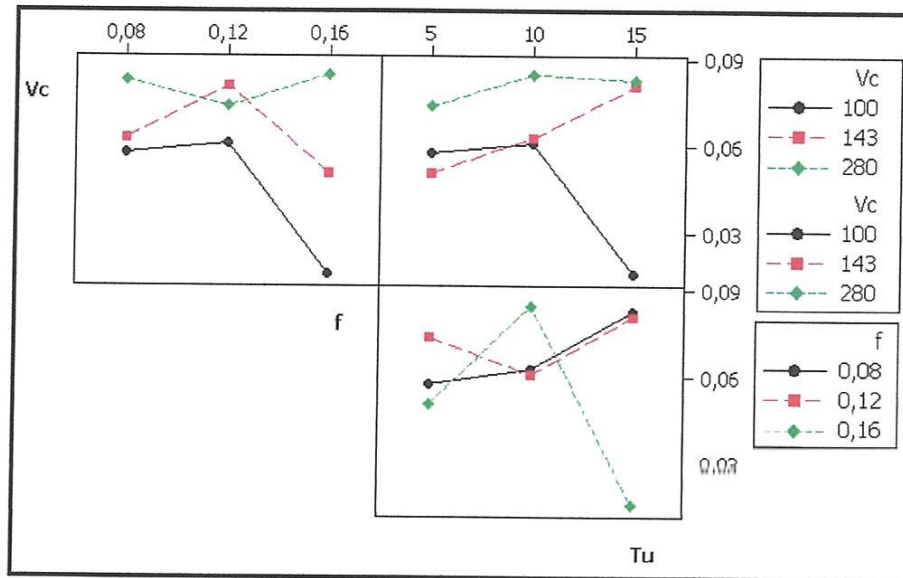


Figure IV-21 : Matrice de diagrammes d'interactions pour VB

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

### IV-3 Modélisation de la rugosité et des efforts de coupe pour un plan de 27 essais

#### IV-3.1 Résultats avec l'outil carbure GC1025

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe ( $Vc$ ,  $f$ ,  $ap$ ) 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 L27 est adopté comme conception expérimentale. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par les fabricants des outils de coupe. Le tableau orthogonal standard de Taguchi L27 à 27 lignes correspondre au nombre d'essais (26 degrés de liberté) à 13 colonnes à trois niveaux. Les résultats expérimentaux obtenus sont consignés au tableau IV-9. Ces résultats vont nous servir à la détermination des modèles mathématiques qui expriment la relation entre les paramètres d'entrées ( $Vc$ ,  $f$ ,  $ap$ ) et les paramètres de sorties (critères de rugosité  $Ra$ ,  $Rt$ ,  $Rz$  et les composantes de l'effort de coupe  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ). L'intérêt de cette modélisation et de faire des prédictions.

- Chaque essai est réalisé avec une nouvelle arête de coupe.

N° Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Ap (mm)	Ra ( $\mu$ m)	Rz ( $\mu$ m)	Rt ( $\mu$ m)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
1	145	0,08	0,15	1,96	11,77	14,67	11,31	36,10	50,02
2	145	0,08	0,30	1,85	10,45	11,40	18,57	43,83	75,82
3	145	0,08	0,45	1,54	8,87	10,76	37,64	56,27	86,31
4	145	0,12	0,15	1,47	8,62	10,24	7,21	34,82	53,61
5	145	0,12	0,30	1,55	8,64	9,75	25,09	60,10	98,81
6	145	0,12	0,45	1,19	7,73	9,98	42,07	70,82	139,36
7	145	0,16	0,15	1,96	10,68	12,16	12,74	45,88	70,88
8	145	0,16	0,30	1,74	9,25	10,58	27,46	69,77	127,19
9	145	0,16	0,45	1,91	9,76	10,54	50,45	89,70	169,99
10	200	0,08	0,15	1,28	7,78	9,18	14,85	30,91	39,98
11	200	0,08	0,30	1,16	6,99	7,90	28,41	34,67	62,94
12	200	0,08	0,45	0,67	4,48	4,87	34,64	72,98	109,85
13	200	0,12	0,15	1,23	6,41	6,99	6,52	34,46	59,45
14	200	0,12	0,30	1,13	6,15	6,72	32,89	51,59	93,73
15	200	0,12	0,45	0,98	5,96	7,65	59,20	93,07	144,52
16	200	0,16	0,15	1,42	7,51	8,18	16,75	38,14	56,77
17	200	0,16	0,30	1,47	7,25	7,68	24,38	60,81	116,27
18	200	0,16	0,45	1,38	7,22	7,77	46,94	94,50	176,09
19	280	0,08	0,15	0,57	3,50	3,81	9,48	22,22	36,63
20	280	0,08	0,30	0,56	3,67	4,45	28,70	60,05	83,22
21	280	0,08	0,45	0,63	4,25	5,39	50,85	74,22	106,54
22	280	0,12	0,15	0,87	4,47	4,86	23,59	48,99	59,53
23	280	0,12	0,30	0,89	4,42	5,03	29,65	60,54	87,11
24	280	0,12	0,45	0,91	4,67	5,03	49,37	78,90	139,18
25	280	0,16	0,15	1,34	6,25	6,63	17,17	53,19	57,79
26	280	0,16	0,30	1,40	6,78	7,30	26,29	66,04	137,75
27	280	0,16	0,45	1,40	6,64	7,07	58,85	87,71	181,48

Tableau IV-9 : Résultats de la rugosité et effort de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe (Le tableau orthogonal standard de TaguchiL27 ;  $N=3^3$ ).

### IV-3.2 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-10 (ANOVA) sont analysés par le logiciel MINITAB 16. 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 les autres interactions n'ont pas un effet significatif puisque ses valeurs de la probabilité P sont supérieures à 0,05. Dans ce cas la vitesse de coupe est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 55.41%.

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)	-0,0155	Vc (m/min)	2	2,51796	1,25898	101,84	0,000	55,41
f (mm/tr)	-12,2421	f (mm/tr)	2	1,06963	0,53481	43,26	0,000	23,53
ap (mm)	-3,7879	ap (mm)	2	0,13490	0,06745	5,46	0,032	02,96
Vc*f	0,0653	Vc*f	4	0,51304	0,12826	10,38	0,003	11,28
Vc*ap	0,0080	Vc*ap	4	0,11904	0,02976	2,41	0,135	2,61
f*ap	13,0556	f*ap	4	0,09077	0,02269	1,84	0,215	1,99
Constante	4,5065	Erreur	8	0,09890	0,01236			
Coefficient de détermination R <sup>2</sup> = 97,82%		Total	26	4,54423				

Tableau IV-10 : Résultats de l'analyse de la variance pour Ra

**B/Analyse de régression**

L'équation (IV-15) exprime le modèle de la rugosité Ra avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Ra = 4,50653 - 0,0154945 Vc - 12,2421 f - 3,78786 ap + 0,0652954Vc*f + 0,00801286 Vc*ap + 13,0556 f*ap \dots(IV-15)$$

$$R^2 = 97,82\%$$

$$S = 0,111185 \quad R-Sq = 97,82\% \quad R-Sq(adj) = 92,93\%$$

**C/ Graphique des effets principaux pour Ra**

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



**E/ Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe**

La figure IV-24 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.

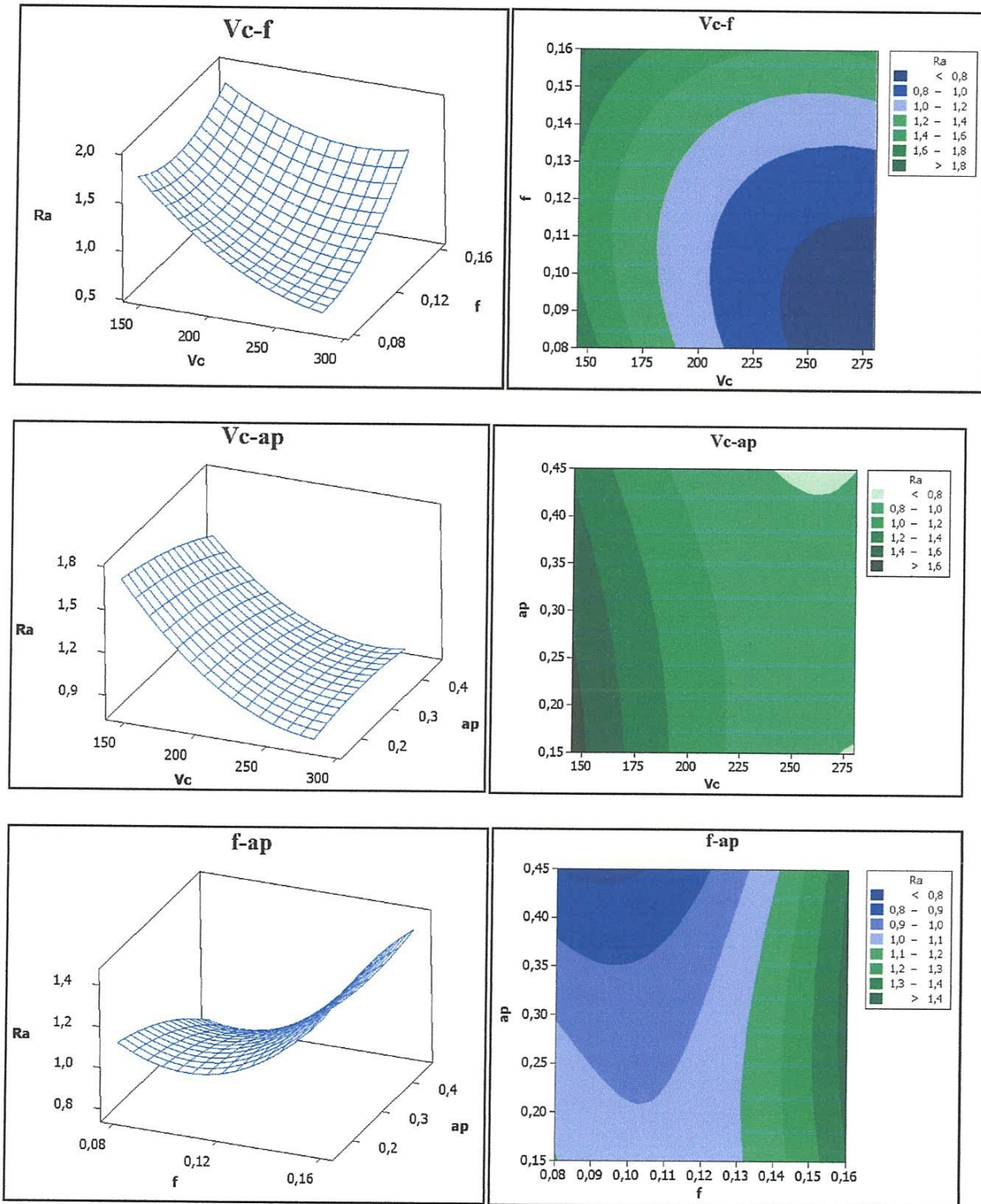


Figure IV-24 La surface de réponse de la rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc, f, ap et les graphes de contour

### IV-3.3 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-11) montre que l'avance a un effet significatif sur la variation des critères de la rugosité Rz, car sa valeur trouvée de P est inférieure à 5%. Par contre les valeurs de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont supérieures à 0,05. On remarque aussi que l'interaction Vc\*f a un effet significatif sa contribution est de 9.31% les deux autres interactions n'ont pas d'effet significatives. La vitesse de coupe a un effet important, car elle présente un pourcentage de contribution de 74,08%.

Coefficients de régression estimés pour Rz		Analyse des variances pour Rz						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	I <sup>2</sup> value	PC%
Vc (m/min)	-0,0840	Vc (m/min)	2	96,1446	48,0723	126,83	0,000	74,08
f (mm/tr)	-67,8802	f (mm/tr)	2	11,7558	5,8779	15,51	0,002	09,05
ap (mm)	-21,2106	ap (mm)	2	3,0578	1,5289	4,03	0,061	02,35
Vc*f	0,2971	Vc*f	4	9,4878	2,3719	6,26	0,014	09,31
Vc*ap	0,0516	Vc*ap	4	3,8024	0,9506	2,51	0,125	02,92
f*ap	64,3056	f*ap	4	2,5006	0,6252	1,65	0,253	01,92
Constante	26,0939	Erreur	8	3,0322	0,3790			
Coefficient de détermination R <sup>2</sup> = 97,66%		Total	26	129,7812				

Tableau IV-11 : Résultats de l'analyse de la variance pour Rz.

#### B/ Analyse de régression

L'équation (IV-16) de régression qui suit, exprime le modèle la rugosité Rz avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Rz = 26,0939 - 0,0840428 Vc - 67,8802 f - 21,2106 ap + 0,297092 Vc*f + 0,0515973 Vc*ap + 64,3056 f*ap \dots (IV-16)$$

$$R^2 = 97,66\%$$

$$S = 0,615648 \quad R-Sq = 97,66\% \quad R-Sq(adj) = 92,41\%$$

#### C/ Graphique des effets principaux pour Rz

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

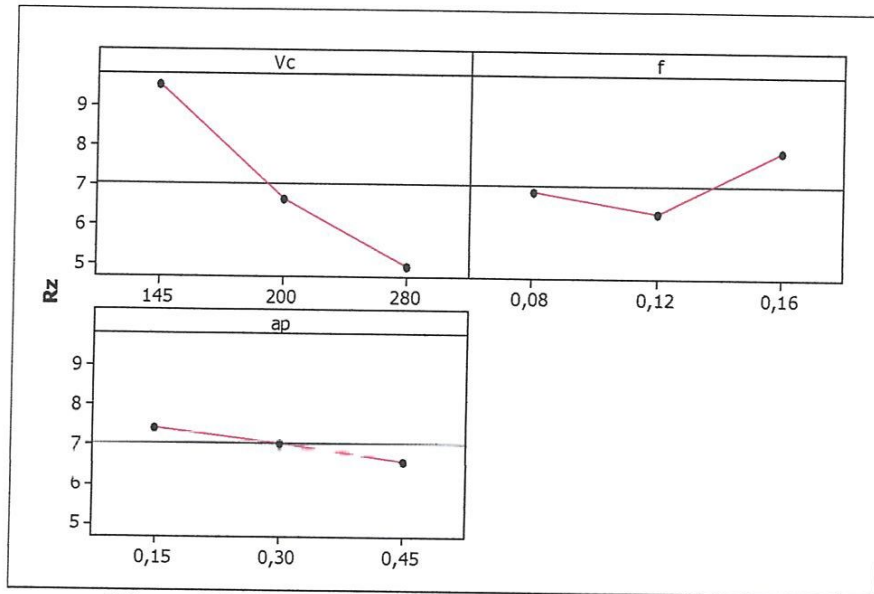


Figure IV-25 : Graphique des effets principaux pour Rz

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 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-26) 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.3 ou la contribution est de 09,31%.

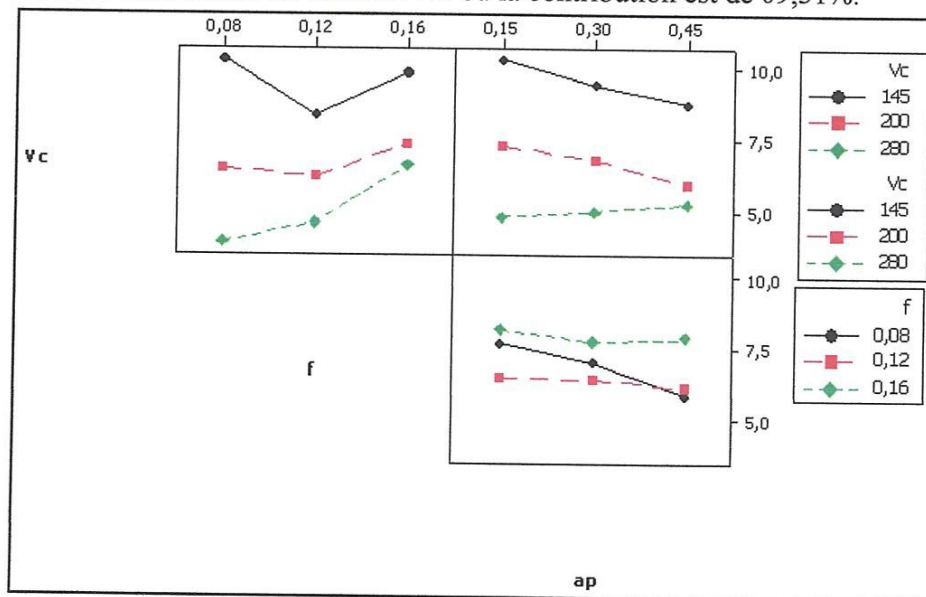


Figure IV-26: Graphe des interactions pour Rz



**E/ Evolution de la rugosité Rz en fonction des paramètres du régime de coupe**

La figure IV-27 illustre la surface de réponse du critère de rugosité (Rz) en fonction de ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) 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.

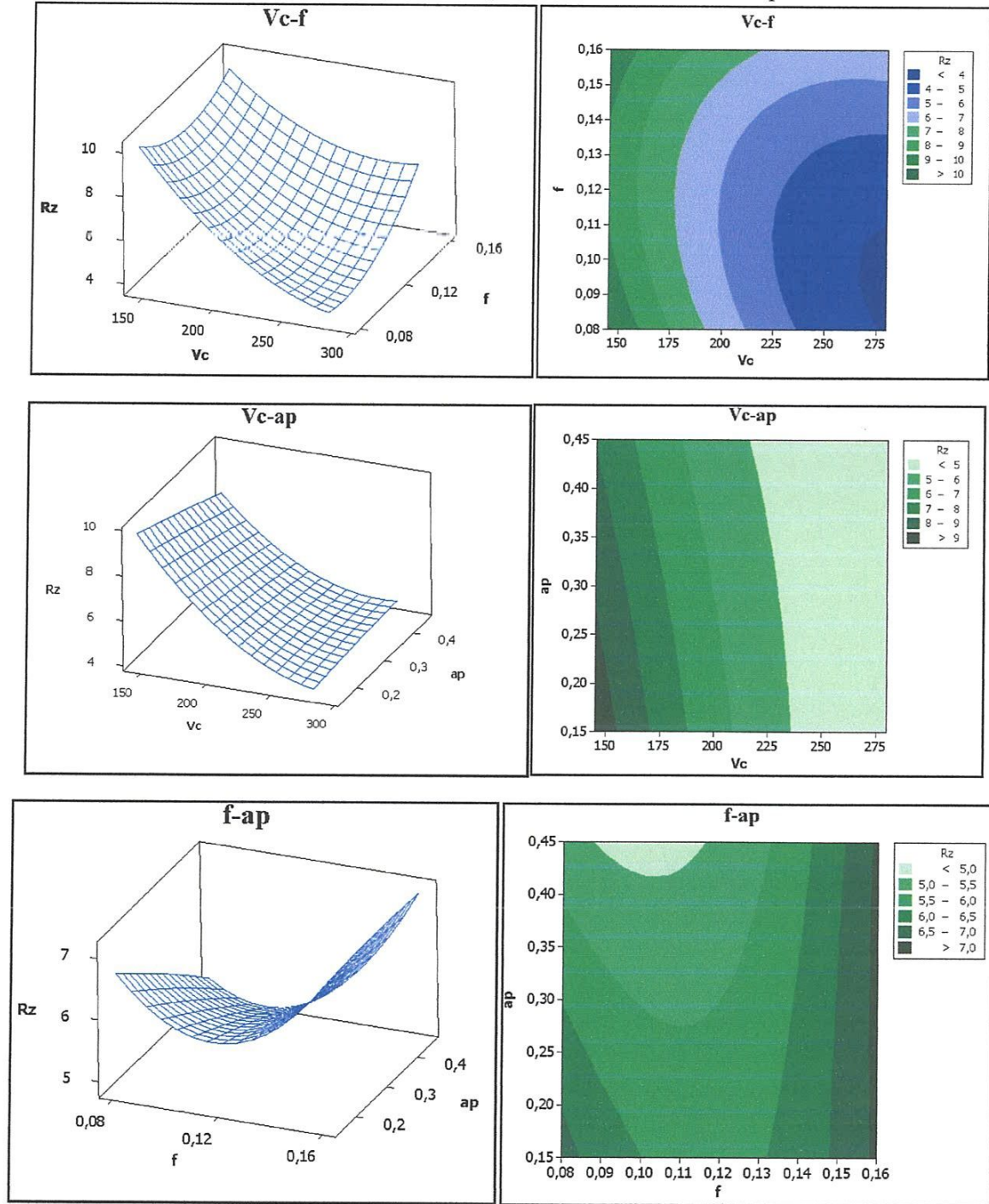


Figure IV-27: La surface de réponse de la rugosité de surface (Rz) en fonction de  $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et les graphes de contour

### IV-3.4 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-12) montre que la vitesse de coupe et la profondeur de passe n'ont 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 l'avance est inférieure à 0,05. On remarque aussi que les différentes interactions n'ont pas d'effet significatif. Le pourcentage de contribution de la vitesse de coupe est 77,86%, il présente un effet important.

Coefficients de régression estimés pour $R_t$		Analyse des variances pour $R_t$						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
$V_c$ (m/min)	-0,1005	$V_c$ (m/min)	2	146,342	73,171	78,40	0,000	77,86
$f$ (mm/tr)	-82,8985	$f$ (mm/tr)	2	7,562	3,781	4,05	0,061	04,02
$ap$ (mm)	-25,2552	$ap$ (mm)	2	3,580	1,790	1,92	0,209	01,90
$V_c*f$	0,3334	$V_c*f$	4	11,498	2,875	3,08	0,082	06,11
$V_c*ap$	0,0672	$V_c*ap$	4	6,915	1,729	1,85	0,212	03,67
$f*ap$	70,1389	$f*ap$	4	4,575	1,144	1,23	0,372	02,43
Constante	31,4192	Erreur	8	7,467	0,933			
Coefficient de détermination $R^2= 96,03\%$		Total	26	187,940				

Tableau IV-12 : Résultats de l'analyse de la variance pour  $R_t$

#### B/Analyse de régression

L'équation (IV-17) de régression qui suit, exprime le modèle de la rugosité  $R_t$  avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$R_t = 31,4192 - 0,100486 V_c - 82,8985 f - 25,2552 ap + 0,333446 V_c*f + 0,0672072 V_c*ap + 70,1389 f*ap \dots (IV-17)$$

$$R^2 = 96,03\%$$

$$S = 0,966088 \quad R-Sq = 96,03\% \quad R-Sq(adj) = 87,09\%$$

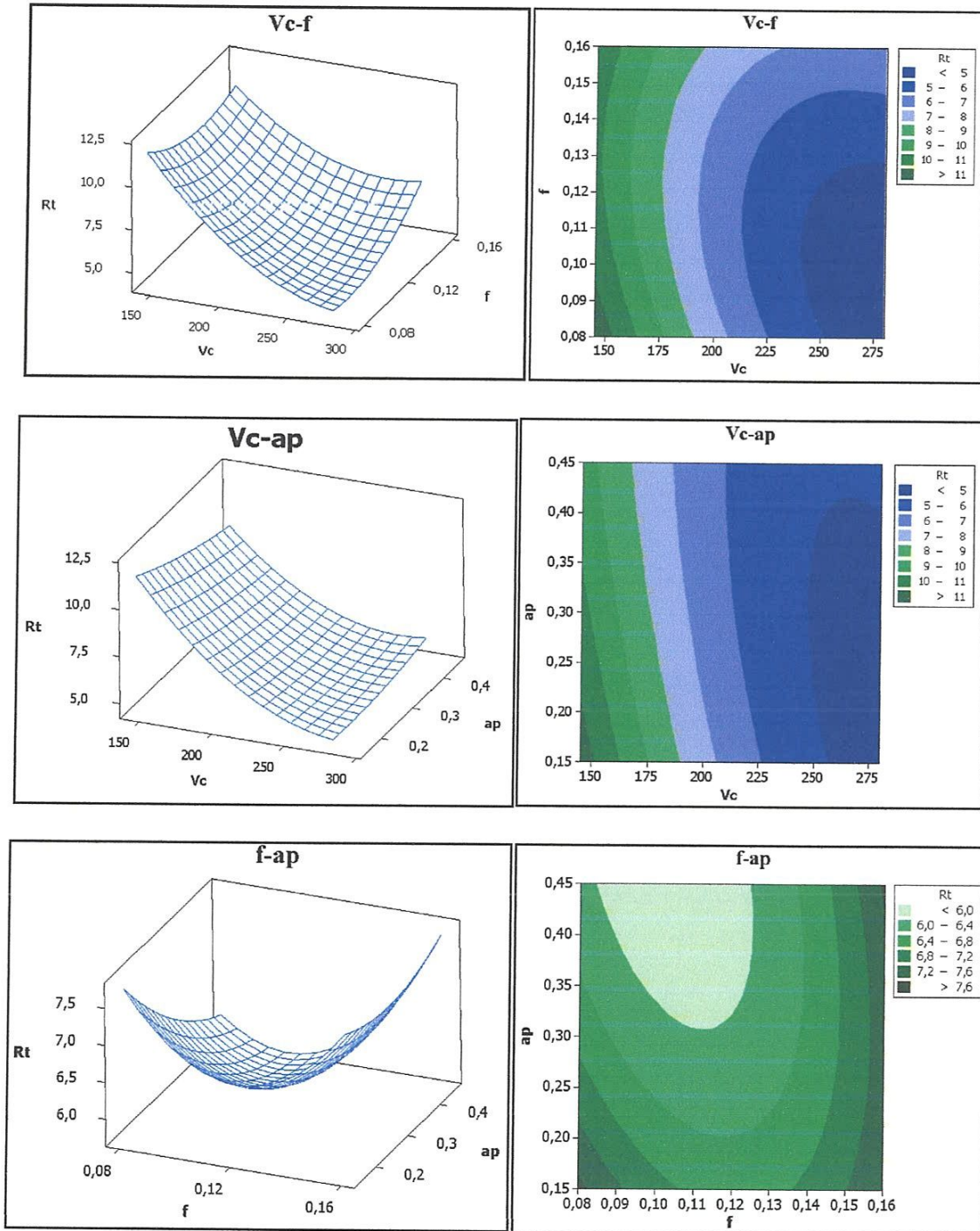
#### C/ Graphique des effets principaux pour $R_t$

La figure IV-28 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur  $R_t$ .



**E/ Evolution de la rugosité  $R_t$  en fonction des paramètres du régime de coupe**

La figure IV-30 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 la vitesse de coupe est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'usure VB.



**Figure IV-30:** La surface de réponse de la rugosité de la surface ( $R_t$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et les graphes de contour



IV-3.5 Modèles de l'effort axial  $F_x$  en fonction des paramètres de coupeA/ Analyse de la variance (ANOVA) pour  $F_x$ 

L'analyse de variance ANOVA présentée au tableau (IV-13) montre que la vitesse de coupe et la profondeur de passe n'ont pas un effet significatif sur la variation du critère de la rugosité  $F_x$ , car les valeurs trouvées de  $P$  sont supérieures à 5%. Par contre la valeur de l'avance est inférieure à 0,05. On remarque aussi que les différentes interactions n'ont pas d'effet significatif. Le pourcentage de contribution de la profondeur de passe est 85,16%, il présente un effet important.

Coefficients de régression estimés pour $F_x$		Analyse des variances pour $F_x$						
Terme	Coeff	Source	D.l.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
$V_c$ (m/min)	0,058	$V_c$ (m/min)	2	209,64	104,82	2,22	0,171	03,28
$f$ (mm/tr)	28,967	$f$ (mm/tr)	2	144,14	72,07	1,53	0,274	02,25
$ap$ (mm)	61,056	$ap$ (mm)	2	5434,84	2717,42	57,60	0,000	85,16
$V_c*f$	-0,270	$V_c*f$	4	61,55	15,39	0,33	0,853	00,96
$V_c*ap$	0,082	$V_c*ap$	4	38,49	9,62	0,20	0,929	00,60
$f*ap$	306,806	$f*ap$	4	115,30	28,83	0,61	0,666	01,80
Constante	-13,922	Erreur	8	377,41	47,18			
Coefficient de détermination $R^2 = 94,09\%$		Total	26	6381,38				

Tableau IV-13 Résultats de l'analyse de la variance pour  $F_x$ 

## B/Analyse de régression

L'équation (IV-18) de régression qui suit, exprime le modèle de l'effort axial  $F_x$  avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$F_x = -13,9218 + 0,05767 V_c + 28,9665 f + 61,0561 ap - 0,270306 V_c*f + 0,0820153 V_c*ap + 306,806 f*ap \dots \text{(IV-18)}$$

$$R^2 = 94,09\%$$

$$S = 6,86850 \quad R\text{-Sq} = 94,09\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 80,78\%$$

C/ Graphique des effets principaux pour  $F_x$ 

La figure (IV-31) illustre les effets principaux des paramètres de coupe sur l'effort axial. On remarque que  $F_x$  s'élève légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande.

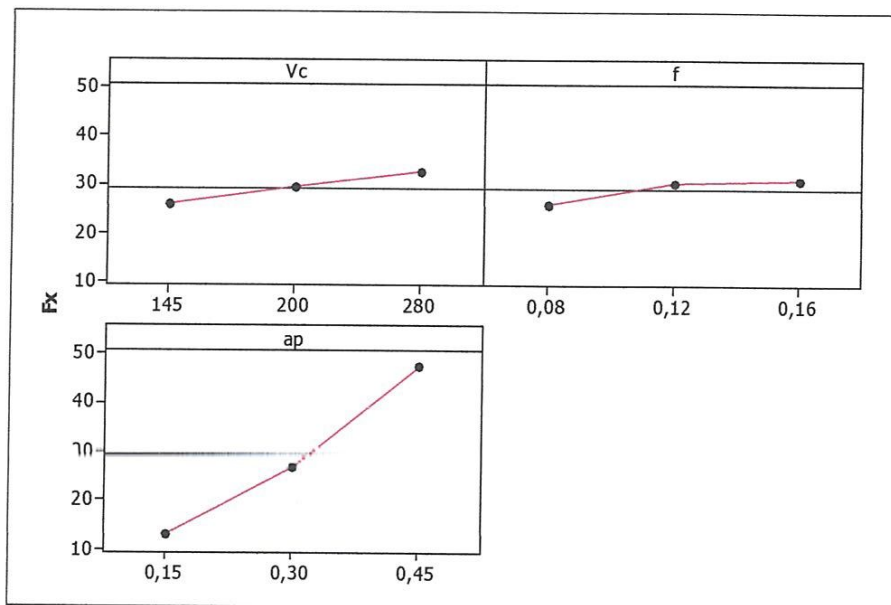


Figure IV-31 : Graphique des effets principaux pour  $F_x$

**D/ Diagramme des interactions pour  $F_x$**

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  $f*ap$  est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 01,80% suivant le tableau IV-13.

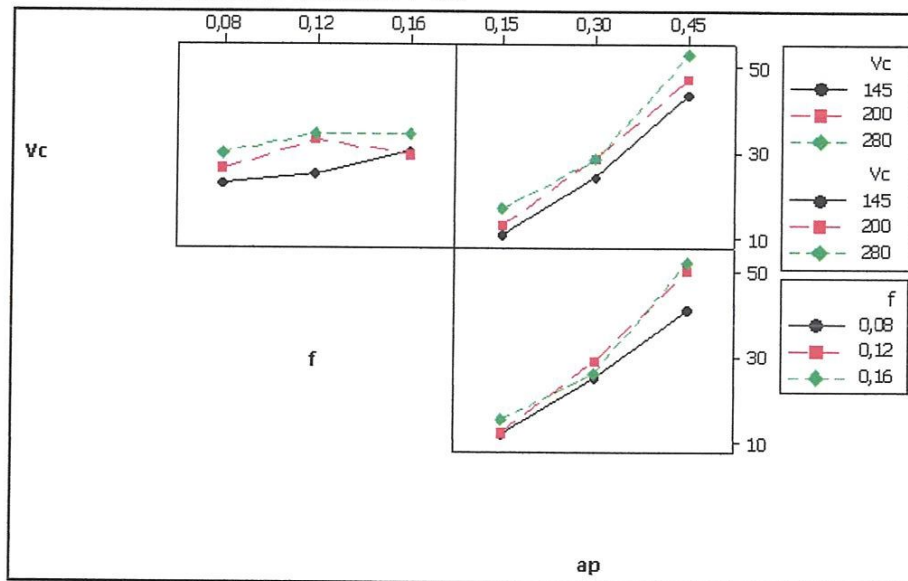


Figure IV-32: Graphe des interactions pour  $F_x$

**E/ Evolution de l'effort  $F_x$  en fonction des paramètres du régime de coupe**

La figure IV-33 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.

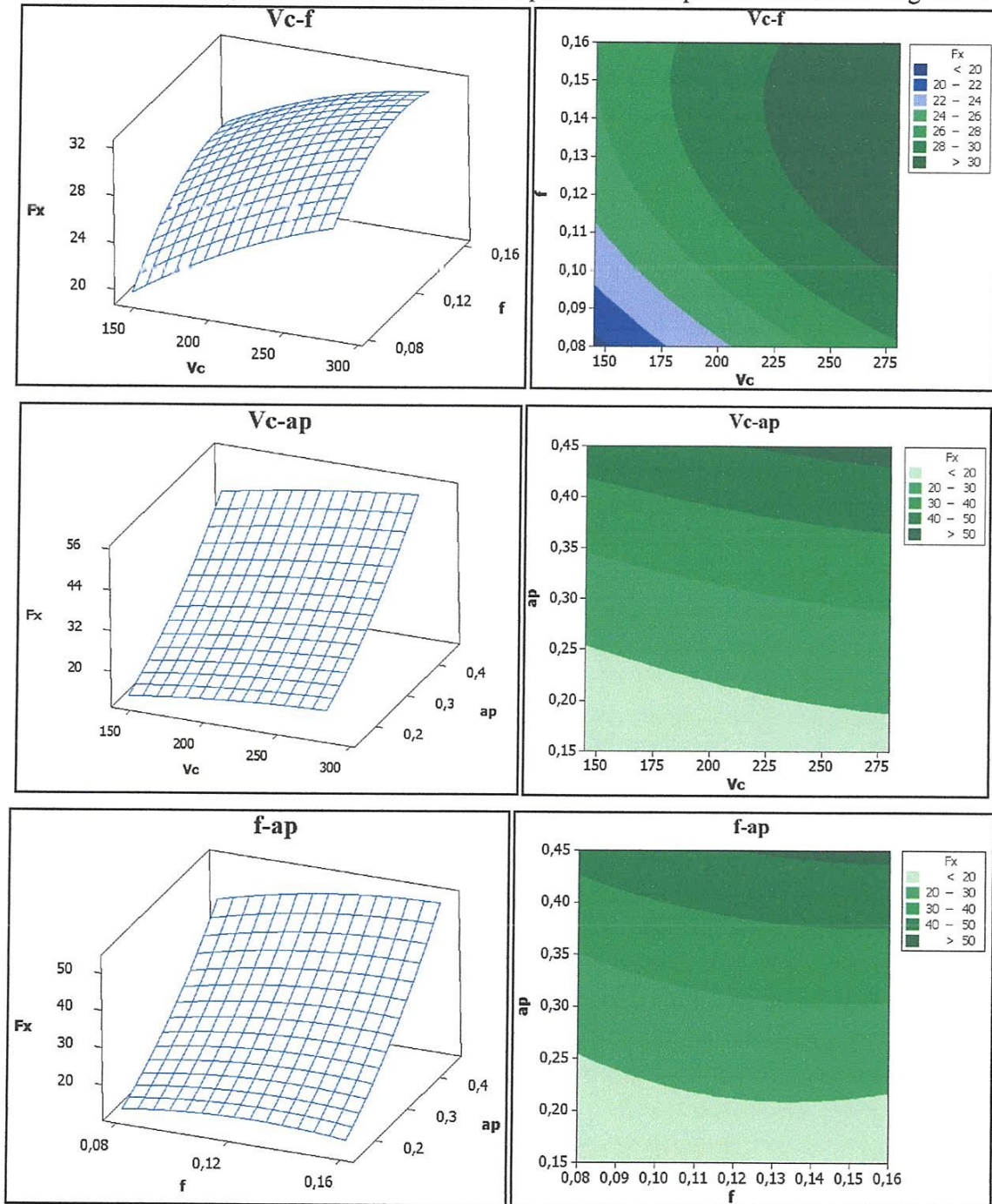


Figure IV-33: Surface de réponse de l'effort de coupe ( $F_x$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$  et graphe de contour.



### IV-3.6 Modèles de l'effort de coupe $F_y$ en fonction des paramètres de coupe

#### A/ Analyse de la variance (ANOVA) pour $F_y$

Le tableau IV14 présente l'analyse de la variance ANOVA pour la composante radiale  $F_y$ . On remarque que l'avance a un impact significatif puisque la valeur de la probabilité  $P$  est inférieure à 0.05 avec une contribution de 30,38%, les autres paramètres et leurs interactions ne présentent pas une influence significative sur l'effort  $F_y$  car  $P\text{-value} > 0,05$ .

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)	0,079	$V_c$ (m/min)	2	135,56	67,78	1,05	0,392	01,25
$f$ (mm/tr)	272,126	$f$ (mm/tr)	2	1707,70	853,85	13,28	0,003	15,83
$ap$ (mm)	86,568	$ap$ (mm)	2	7791,27	3895,64	60,59	0,000	72,25
$V_c * f$	-0,552	$V_c * f$	4	69,48	17,37	0,27	0,889	00,64
$V_c * ap$	0,085	$V_c * ap$	4	530,42	132,61	2,06	0,178	04,91
$f * ap$	284,167	$f * ap$	4	34,91	8,73	0,14	0,964	00,32
Constante	-18,639	Erreur	8	514,40	64,30			
Coefficient de détermination $R^2 = 95,23\%$		Total	26	10783,76				

Tableau IV-14 : Résultats de l'analyse de la variance pour  $F_y$

#### B/ Analyse de régression

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

$$F_y = -18,639 + 0,0789612V_c + 272,126 f + 86,5677 ap - 0,55214 V_c * f + 0,0847237V_c * ap + 284,167 f * ap \dots \text{(IV-19)}$$

$$R^2 = 95,23\%$$

$$S = 8,01874 \quad R\text{-Sq} = 95,23\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 84,50\%$$

#### C/ Graphique des effets principaux pour $F_y$

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 radial  $F_y$ . On remarque que  $F_y$  s'élève avec l'augmentation de la profondeur de passe. 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.

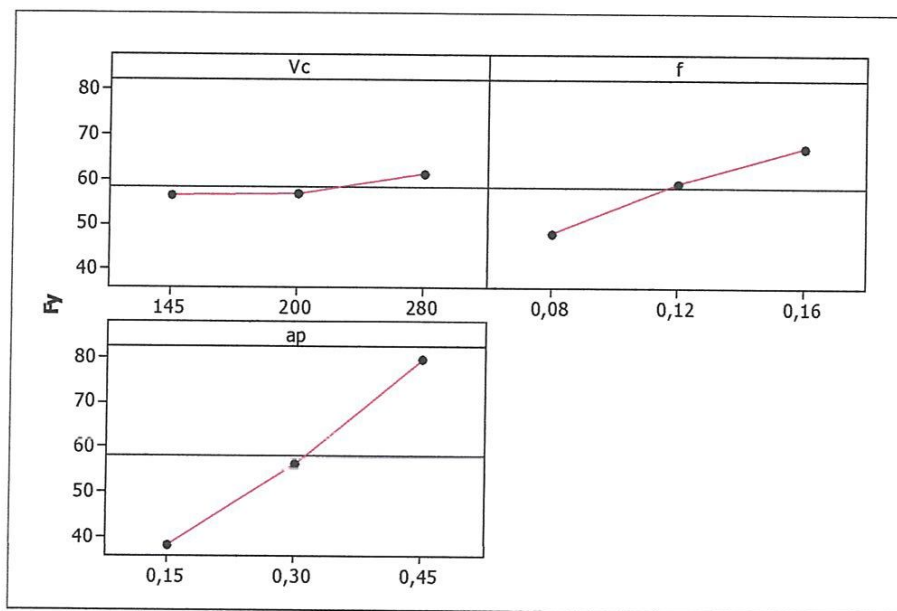


Figure IV-34 : Graphique des effets principaux pour  $F_y$

**D/ Diagramme des interactions pour  $F_y$**

La figure IV-35 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  $V_c*ap$  est supérieure que les deux autres interactions avec une contribution de 04,91% suivant le tableau IV.6.

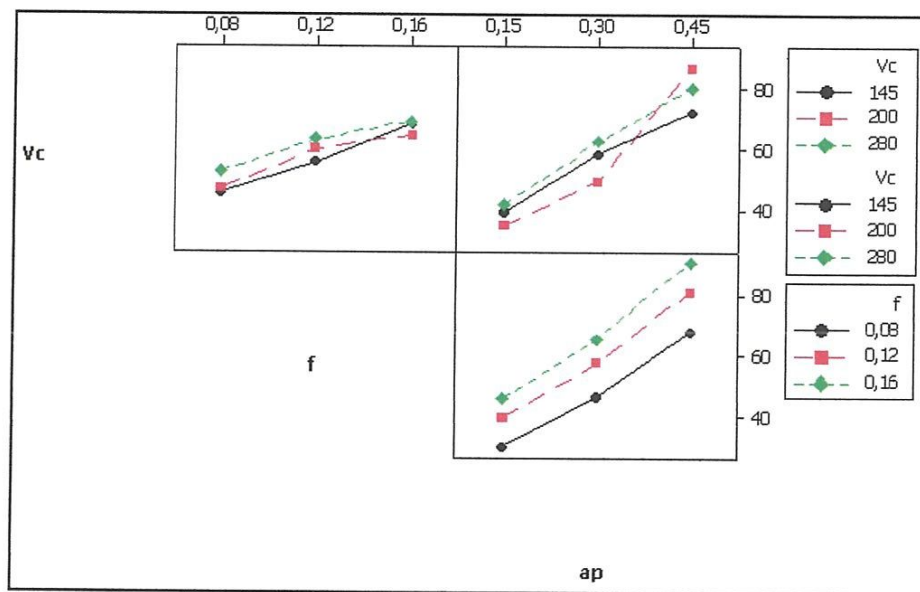


Figure IV-35: Graphe des interactions pour  $F_y$

**E/ Evolution de l'effort  $F_y$  en fonction des paramètres du régime de coupe**

La figure IV-36 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.

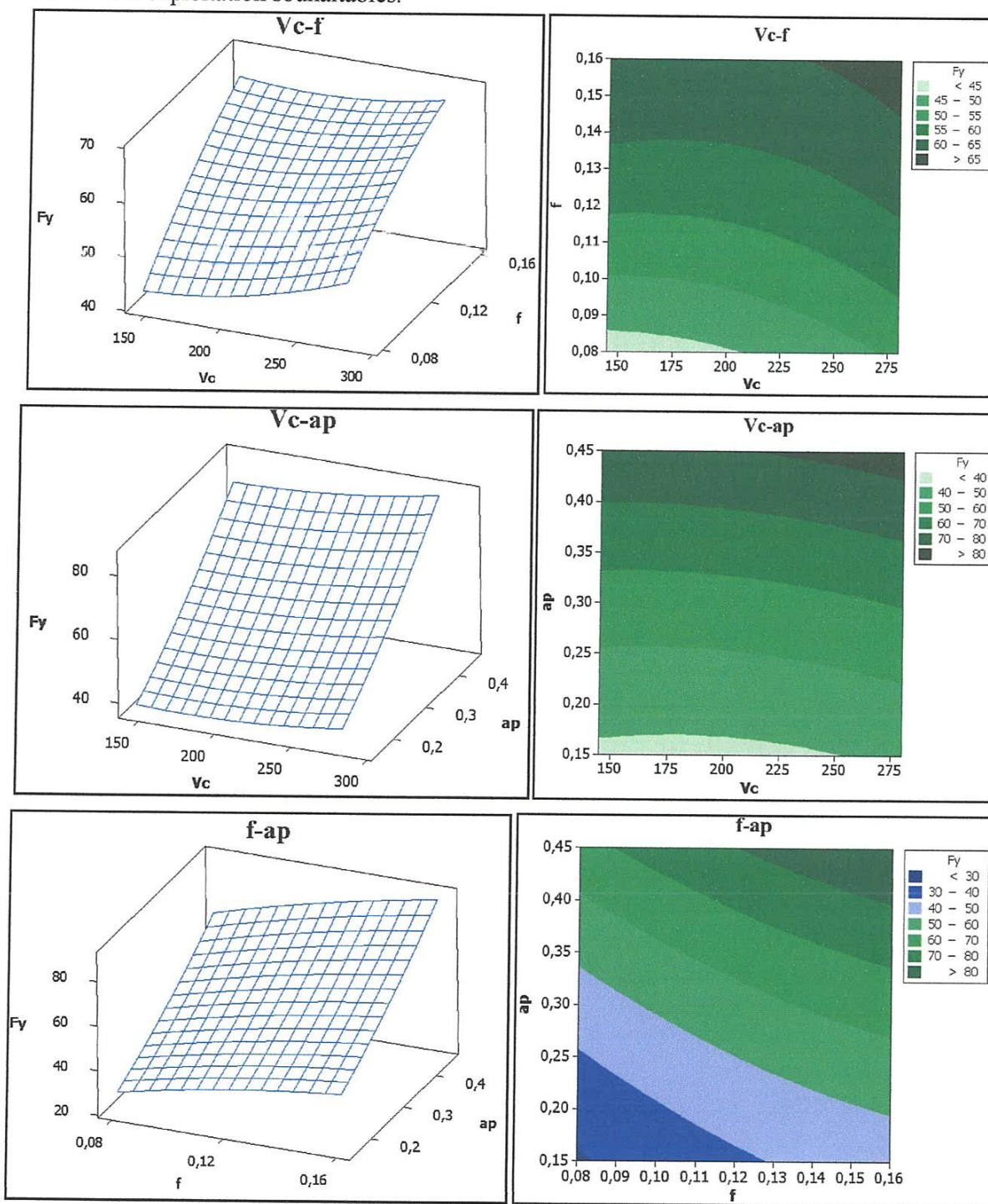


Figure IV-36: Surface de réponse de l'effort de coupe ( $F_y$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et les graphes de contour.



### IV-3.7 Modèles de l'effort de coupe Fz en fonction des paramètres de coupe

#### A/ Analyse de la variance (ANOVA) pour Fz

L'analyse de variance ANOVA présentée au tableau IV-15 pour la composante de l'effort tangentiel Fz montre que la profondeur de passe a un grand effet significatif, sa contribution est de 69,26% sur la variation de cette composante, suivie par l'avance avec une contribution de 22,98%. 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 05,29%.

Coefficients de régression estimés pour Fz		Analyse des variances pour Fz						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Vc (m/min)	-0,09	Vc (m/min)	2	49,2	24,6	0,44	0,658	00,10
f (mm/tr)	-56,44	f (mm/tr)	2	10898,3	5449,1	97,85	0,000	22,98
ap (mm)	-74,72	ap (mm)	2	32838,6	16419,3	294,84	0,000	69,26
Vc*f	-0,10	Vc*f	4	152,7	38,2	0,69	0,622	00,32
Vc*ap	0,40	Vc*ap	4	516,1	129,0	2,32	0,145	01,08
f*ap	2306,25	f*ap	4	2512,8	628,2	11,28	0,002	05,29
Constante	39,87	Erreur	8	445,5	55,7			
Coefficient de détermination R <sup>2</sup> = 99,06%		Total	26	47413,0				

Tableau IV-15 : Résultats de l'analyse de la variance pour Fz

#### B/ Analyse de régression

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

Modèle complet :

$$Fz = 39,8697 - 0,091203 Vc - 56,4412 f - 74,7226 ap - 0,0974156 Vc*f + 0,396775Vc*ap + 2306,25 f*ap \dots \text{(IV-20)}$$

$$R^2=99,06\%$$

$$S = 7,46248 \quad R-Sq = 99,06\% \quad R-Sq(\text{adj}) = 96,95\%$$

#### C/ Graphique des effets principaux pour Fz

La figure IV-37 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 et l'avance. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande. On remarque aussi que l'effort Fz est resté presque stable avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

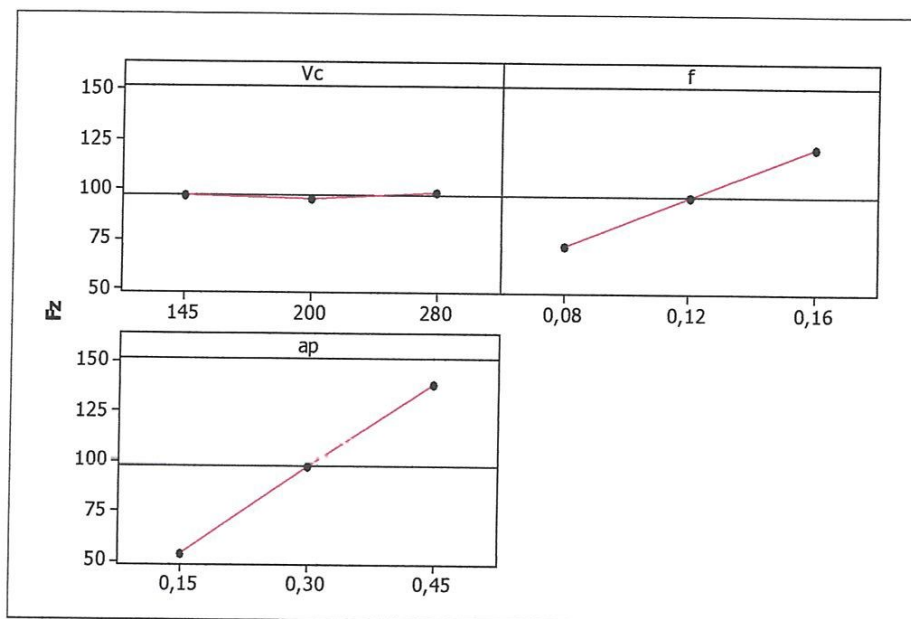


Figure IV-37 : Graphique des effets principaux pour  $Fz$

**D/ Diagramme 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-38) 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 05,29% d'après le tableau IV-15.

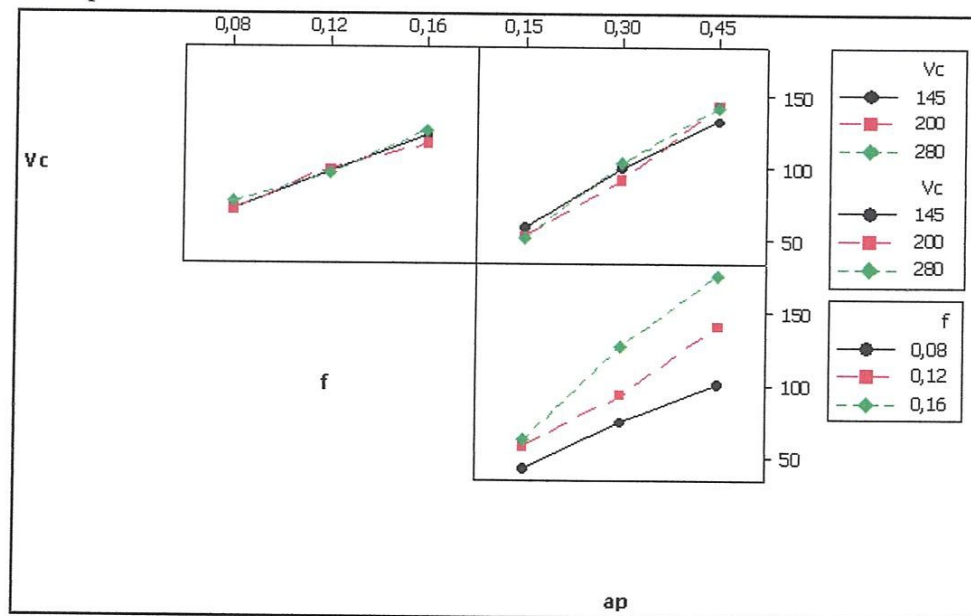


Figure IV-38: Graphe des interactions pour  $Fz$

**E/ Evolution de l'effort  $F_z$  en fonction des paramètres du régime de coupe**

Le graphe de contour montre la relation entre une variable de réponse ( $F_z$ ) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation (figure IV-39).

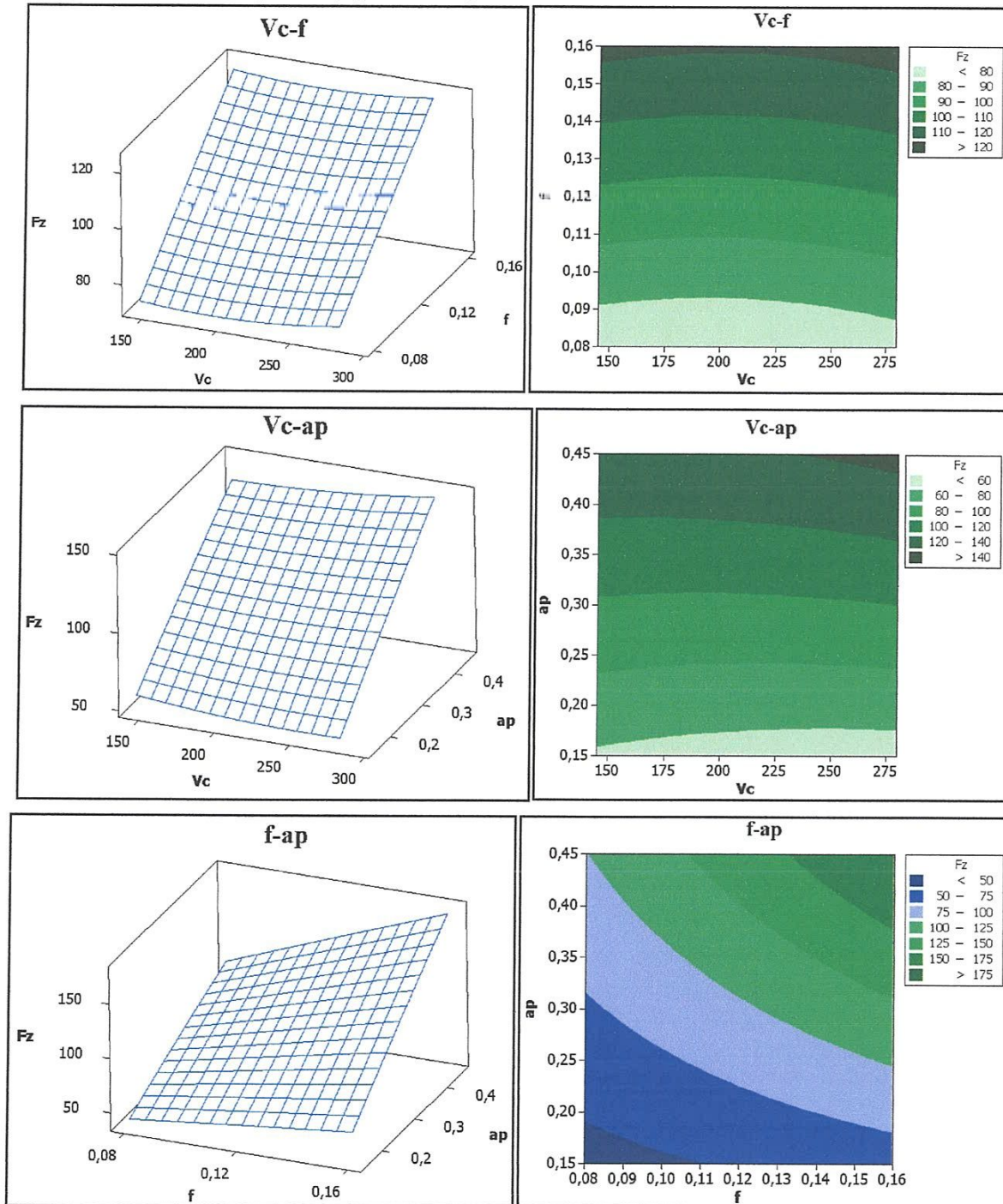


Figure IV-39: Surface de réponse de l'effort de coupe ( $F_z$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et les graphes de contour.



#### IV.4 Conclusion

la première partie de ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que rugosité et efforts de coupe et l'usure en dépouille (plan de 9 essais) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et le temps d'usinage) lors de l'usinage de l'acier XC48 avec le matériau de coupe le carbure revêtu GC1025. Les résultats de cette partie ont conduit aux conclusions suivantes :

Les modèles obtenus des différents critères de la rugosité pour le matériau de coupe testé, montre que :

- La vitesse de coupe est le paramètre le plus influent suivie de l'avance.

Les modèles obtenus des différentes composantes de l'effort de coupe pour le matériau de coupe testé, montre que :

- L'avance est le paramètre le plus influent suivie par la vitesse de coupe.

Les modèles obtenus de l'usure en dépouille pour le matériau de coupe testé, montre que :

- La vitesse de coupe est le paramètre le plus influent suivie de l'avance.

Pour la deuxième partie (plan de 27 essai) nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (les efforts de coupe et la rugosité) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) lors de l'usinage du même acier avec le même matériau de coupe.

Les résultats de cette partie ont conduit aux conclusions suivantes :

- 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 (55,41; 74,08 ; 77,86)% respectivement.
- Il est à signaler que parmi ces facteurs ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ), la profondeur de passe est le facteur plus influent sur les efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) avec une contribution de (85,16 ; 72,25 ; 69,26)% respectivement.

## Conclusion générale

L'étude expérimentale du comportement des matériaux de coupe lors du tournage de l'acier XC48 nous a permis d'étudier l'usinabilité de cet acier en se basant sur les critères suivants : efforts et pressions de coupe, rugosité de la surface usinée et usure des les outils de coupe.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur la coupe de métaux. Dans cette partie, nous avons classé les matériaux des outils de coupe, défini les phénomènes intervenant dans le processus de la coupe. Les travaux de recherche concernant l'usinage avec différents types des outils de coupe.

Dans le chapitre II, 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.

Dans le chapitre III, nous avons présenté en premier temps une comparaison entre les performances en terme d'usure des différents types de matériaux de coupe tels que les nuances le carbure revêtu GC1025, le carbure non revêtu H10F, carbure revêtu GC3205, le cermet GC1525 et la céramique CC650) en usinant l'acier XC48 à deux différentes vitesses de coupe (basse 150m/min et élevée 300m/min). Nous avons exposé également les résultats de l'évolution de l'usure, les efforts de coupe et la dégradation de la qualité de la surface de la pièce.

Dans le chapitre IV, nous avons fait deux plan de Taguchi, la première est une plan réduit de 9 essais que montre les différents résultats de l'impact de la vitesse de coupe, de l'avance et du temps de usinage lors du tournage de XC48 par le carbure revêtu GC1025. Ensuite nous avons proposé des modèles mathématiques en se basant sur la méthodologie de la surface de réponse, et les modèles puissance. Le deuxième plan (plan de 27 essais) nous avons fait une analyse de variance des résultats expérimentaux pour déterminer les facteurs qui ont un impact significatif. Ensuite nous avons proposé des modèles mathématiques en se basant sur la méthodologie de la surface de réponse en fonction du temps d'usinage.

L'étude du comportement des différents matériaux de coupe face à l'acier XC48 en tournage nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ✓ Le comportement à l'usure varie très largement en fonction de la composition chimique et aux caractéristiques physiques et mécaniques du couple outil-matière. En effet, la comparaison en termes d'usure montre que la céramique CC650 est le matériau le plus résistant à l'usure suivi par le carbure revêtu GC1025, ensuite le cermet revêtu GC1525 et le carbure revêtu GC3205 et en dernier lieu le carbure non revêtu H10F.
- ✓ La comparaison entre les différents matériaux de coupe pour deux vitesses de coupe basse 150m/min et élevée 300m/min, montre que l'outil en céramique CC650 présente des performances supérieures à celle des autres matériaux testés, suivi par le carbure revêtu GC1025, en termes d'usure, effort de coupe et rugosité de surface.



- ✓ Les modèles obtenus des différents critères de la rugosité pour le matériau de coupe carbure revêtu GC1025 pour un plan de 9 essais, montre que la vitesse de coupe est le paramètre le plus influent suivie par l'avance.
- ✓ Les modèles obtenus des différentes composantes de l'effort de coupe pour le matériau de coupe carbure revêtu GC1025 pour un plan de 9 essais, montre que l'avance est le paramètre le plus influent suivie par la vitesse de coupe.
- ✓ Les modèles obtenus de l'usure en dépouille pour le matériau de coupe carbure revêtu GC1025 pour un plan de 9 essais, montre que la vitesse de coupe est le paramètre le plus influent suivie de l'avance.

Pour la deuxième partie (plan de 27 essai) nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (les efforts de coupe et la rugosité) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) lors de l'usinage du même acier avec le même matériau de coupe.

Le traitement statistique des résultats des essais ont abouti à la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe et de la rugosité. L'analyse de la variance (ANOVA) nous a permis de déterminer les facteurs qui ont un impact significatif sur les différents phénomènes étudiés.

Les modèles obtenus des différents critères de la rugosité et les composantes de l'effort de coupe pour le matériau de coupe carbure revêtu GC1025 pour un plan de 27 essais, 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 (55,41; 74,08 ; 77,86)% respectivement, et avec des coefficients de détermination de (97,82 ; 97,66 ; 96,03)% respectivement.
- ✓ Il est à signaler que parmi ces facteurs ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ), la profondeur de passe est le facteur plus influent sur les efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) avec une contribution de (85,16 ; 72,25 ; 69,26)% respectivement, et avec des coefficients de détermination de (94,09 ; 95,23 ; 99,06)% respectivement.

### **Perspective**

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche qui sont :

1. Continuer à étudier le comportement de nouveaux matériaux de coupe face à l'acier XC48.
2. Déterminer les modèles mathématiques en fonction d'autres variables tels que : la géométrie de la partie active de l'outil (rayon du bec de l'outil et l'angle d'attaque).
3. Etudes des les vibrations de l'outil et son influence sur la rugosité de surface lors du tournage de l'acier XC48.
4. Faire une étude sur l'optimisation du régime de coupe.



## *Nomenclature*

ANOVA	Analyse de la variance.
$a_p$	Profondeur de passe (mm).
$f$	Avance par tour (mm/tr).
$F_x$ ( $F_a$ )	Effort de coupe axial (N).
$F_y$ ( $F_p$ )	Effort de coupe radial (N).
$F_z$ ( $F_t$ )	Effort de coupe tangentiel (N).
$K_c$	Pression spécifique de coupe ( $N/mm^2$ ).
$R_a$	Rugosité moyenne arithmétique ( $\mu m$ ).
$R_t$	Rugosité totale ( $\mu m$ ).
$R_z$	Profondeur moyenne de la rugosité ( $\mu m$ ).
VB	Hauteur de l'usure en dépouille (mm).
$V_c$	Vitesse de coupe (m/min).
$T_u$	Temps de l'usinage (min)
$\alpha$	Angle de dépouille principal (degré).
$\gamma$	Angle d'attaque (degré).
$X$	Angle de direction principal (degré).
PVD	Dépôt physique vapeur.
RSM	Méthodologie de la surface de réponse.
CVD	Dépôt chimique vapeur.