

11/531.653

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



# **Mémoire de fin d'étude**

Présenté par : MONTASSER Amara

**Master**

Option : Conception et Production Industrielle

=====

*Etude de l'influence des paramètres  
d'usinage lors du fraisage de face*

=====

Sous la direction de : Pr. yallese.M.A

Année universitaire 2012/2013

## Résumé

Le fraisage est un procédé qui réalise un état de surface par enlèvement progressif d'une certaine quantité de matière de la pièce usinée à un taux de mouvement ou d'avance relativement faible par une fraise tournant à une vitesse comparativement élevée. La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques et permet également, de réaliser tout type de formes mêmes complexes. Dans cette étude le matériau que nous avons utilisé pour tester nos plaquettes de coupe, est un acier XC42. Ces aciers couvrent un large domaine d'utilisation, les propriétés de cet acier est, avec une meilleure aptitude aux traitements thermiques. Acier au carbone souvent utilisé en mécanique générale de part sa bonne usinabilité, d'autre part dans ce travail nous avons étudié l'usinabilité de cet acier en fraisage, en utilisant comme matériaux de coupe, le carbure revêtu (GC1030). L'objectif est de voir l'impact des différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe), du mode d'usinage (en opposition ou en avalent) et de l'usinage à sec ou avec arrosage, sur les différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ). D'autre part, nous avons fait une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité, et le débit de copeau pour d'éventuel des prédictions.

13/2912



## *Remerciement*

*A 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.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur : Pr. Yaltese.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 surtout Bouzid*

*Aisame.*

*Toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin tout long*

*de ce travail.*

*montasser amara*

# DEDICACE

*J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.*

© *A mes parents.*

© *Mon encadreur Pr. Yaltese.M.A*



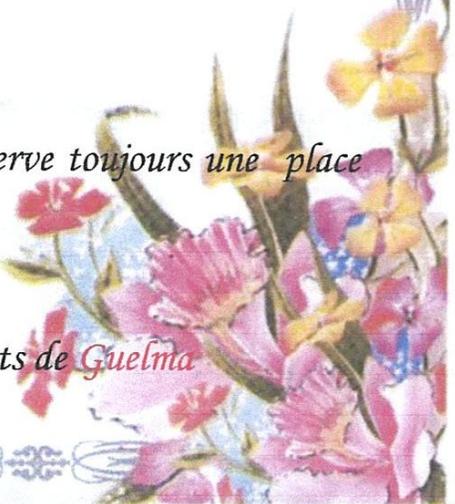
© *A Mon frère, et Mes sœurs, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

© *A toute ma famille **montasser et sonhadji***

© *A tous mes **Amis sans exception.***

© *A tout le groupe **CPI** ainsi que les étudiants de **Guelma***

*montasser amara*



# Sommaire

Introduction général	1
----------------------	---

## Chapitre I

### *Etude bibliographique sur l'influence des paramètres d'usinage lors du fraisage de face*

1-Introduction	3
2-Définition de l'usinabilité	3
3-Usinabilité des matériaux	4
3-1 Aciers	4
3-1-1 Aciers doux < 550 Mpa	4
3-1-2 Aciers de construction et aciers au carbone < 850 Mpa	4
3-2 Aciers inoxydables	4
3-2-1 Les aciers inoxydables ferritiques de décolletage	4
3-2-2 Aciers austénitiques	4
3-3 Fonte	4
3-3-1 Fonte grise (fonte à graphite lamellaire)	4
3-3-2 Fonte ductile	5
4- Le fraisage	5
4-1 Définition	6
4-2 Mode de fraisage	6
4-3 Types de fraiseuse (Ancienne classification)	6
4-3-1 Fraiseuse horizontale	6
4-3-2 Fraiseuse verticale	6
4-3-3 Fraiseuse universelle	7
4-4 Les procédés de fraisage	7
4-4-1 Le fraisage en bout	7
4-4-2 Le fraisage e roulant	7
4-5 Les paramètres de coupe	7
4-5-1 La vitesse de coupe	8
4-5-2 vitesse d'avance « Vf »	8
4-5-3 La profondeur de passe (ap)	8
4-5-4 L'épaisseur de copeaux maximale (hex)	8
4-5-6 La profondeur de coupe axiale (ap)	8
4-5-7 La largeur de coupe radiale (ae)	8
4-5-8 Le débit copeaux (Q)	8
4-6 fraisages en opposition et en avalant	9
4 6-1 fraisages en opposition	9
4 6-2 fraisages en avaant	9
4-7 Quelques types de fraises et utilisations	10
5- Matériaux de coupe	11
5-1 Sélections des matériaux de coupe	11
5-2 Définitions des principaux types de matériaux pour outils de coupe	12
5-2-1 Aciers rapides	12

5-2-2 Carbures métalliques	12
5-2-3 Carbures micro-grain	12
5-2-4 Aciers et carbures revêtus	13
5-2-5 Cermets	13
5-2-6 Céramiques	13
5-2-7 Nitrure de bore cubique (CBN)	13
5-2-8 Diamant polycristallin (DP ou PCD)	14
6- Effort de coupe lors du fraisage	14
6-1 Définition et intérêt de leur mesure	14
7-Rugosité de surface	15
7-1 Généralités sur les états de surface	15
7-1-1 Ra: rugosité moyenne du profil	15
7-1-2 Rz: hauteur de profil maximum	16
7-1-3 Rt: hauteur de profil total	16
7-1-4 Fraisage /surfaçage axial (effet de la forme des plaquettes)	17
7-1-5 Fraisage /surfaçage radial	17
8- Usure des outils	17
8-1 Types et cause d'usures	19
9-Formation de copeaux	20
9-1 Mode de formation de copeaux	20
9-2 Épaisseur maximum des copeaux	20
9-3 L'amincissement des copeaux autorise une augmentation de l'avance	21
9-4 Plaquettes à arêtes rectilignes	21
9-5 Fraises à plaquettes rondes ou à grand rayon	21
10-Travaux de recherche en Fraisage	22
Conclusion	28

## Chapitre II

### *Moyens utilisés et programme d'expérience*

II-1-Introduction	29
II-2-Moyennes utilisées	29
II-2-1/ Machine-outil	29
a-Fréquences de rotation	30
b- Vitesses d'avances	30
II-2-2- Matériau usiné	31
a- Désignation	31
b- Composition chimique en %	32
c- Caractéristiques mécaniques	32
d- Propriétés physiques	32
II-2-3- Outil de coupe	33
II-3- Equipement de mesures utilisées	35
II-3-1-Rugosimètre	35
II-4- Planification des expériences	35
II-4-1- Introduction	35
II-4-2- Méthode unifactorielle	36
II-4-3- Conditions de coupe	36

II-4-4- Méthode multifactorielle	37
II-4-5- Conditions de coupe	39
Conclusion	39

### Chapitre III

#### *Influence des paramètres de coupe en fraisage*

III-1- Introduction	40
III-2-1/ Influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité	40
III-2-1-1/ Influence de l'avance par dent	40
III-2-1-2/ Influence de la profondeur de passe	41
III-2-1-3/ Influence de la vitesse de coupe	42
III-2-2 Influence du mode d'usinage sur la rugosité	43
III-2-2-1- Influence de l'avance par dent sur la rugosité	44
III-2-2-2- Influence de la profondeur de passe sur la rugosité	44
III-2-2-3- Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité	45
III-2-3- Influence de l'arrosage sur la rugosité	46
III-2-3-1 Influence de l'avance par dent sur la rugosité	46
III-2-3-2 Influence de la profondeur de passe sur la rugosité	47
III-2-3-3 - Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité	48
Conclusion	48

### Chapitre IV

#### *Modélisation de la rugosité et du débit de coupe*

IV- 1- Introduction	49
IV-2- Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe	49
IV-2-1- Résultats expérimentaux	49
IV-2-2- Méthode appliquée	50
IV-2-3- Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère Ra	50
IV-2-3-1 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	51
IV-2-3-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	53
IV-2-3-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	54
IV-2-4 Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère Ry	55
IV-2-4-1 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	56
IV-2-4-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	57
IV-2-4-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	59
IV-2-5 Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère Rz	60
IV-2-5-1 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	61
IV-2-5-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	62
IV-2-5-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	64
IV-2-6 Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de coupeau Q	65
IV-2-6-1 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	66
IV-2-6-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	67
IV-2-6-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	69
IV-3- confirmation de teste	69
IV-4 sélection du régime optimal	70
Conclusion	71

Conclusion général	72
Nomenclature	74
Références bibliographiques	75

# ***Introduction Générale***

L'obtention des formes requises d'une pièce par enlèvement de matière, est encore à ce jour le procédé de fabrication le plus répandu. Malgré les progrès réalisés par les procédés de mise en forme des matériaux (formage, moulage,.....), l'usinage reste le plus souvent nécessaire à l'obtention des produits finaux, surtout si les tolérances exigées sur le produit final sont faibles. Les performances dans le domaine de l'automatisation des machines-outils, le développement rapide des techniques de commande numérique, des outils de coupe et des logiciels de FAO ont aidé à maintenir la compétitivité du procédé d'usinage. Particulièrement si ces performances s'accompagnent de gains non négligeables en productivité et en qualité.

Afin d'améliorer encore plus cette compétitivité, les données sur l'usinabilité doivent être plus précises, et cela nécessite une stabilité plus élevée sur les paramètres de coupe. Malgré le nombre important d'études portées par les chercheurs, ce domaine a encore besoin d'être exploré. De notre part, nous avons décidé de contribuer à cette amélioration avec notre travail dans ce mémoire, par une étude intitulée : « *Etude de l'influence des paramètres d'usinage lors du fraisage de face* ». Elle consiste à étudier l'usinabilité de l'acier XC42 en fraisage de face en utilisant comme un matériau de coupe, le carbure revêtu. Depuis si longtemps le procédé d'usinage qui a prit la part du lion parmi tous les procédés de fabrication par enlèvement de matière est le tournage. Ceci est l'une des causes qui nous a poussés à nous engager dans cette étude en utilisant le fraisage comme processus de coupe.

Les principaux types d'opérations de fraisage, si l'on considère l'effet sur la pièce ou la trajectoire d'outil sont les suivants:

- |                         |                               |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1- surfaçage            | 8- tronçonnage                |
| 2- surfaçage- dressage  | 9- fraisage sous haute avance |
| 3- fraisage de profil   | 10- trèflage                  |
| 4- fraisage de cavités  | 11- fraisage en pente         |
| 5- fraisage de rainures | 12- interpolation hélicoïdale |
| 6- tournage- fraisage   | 13- interpolation circulaire  |
| 7- fraisage de filets   | 14- fraisage trochoïdal.      |

Dans notre cas on a utilisé comme opération de fraisage le surfaçage, La structure de notre mémoire est comme suit:

Nous avons présenté dans le premier chapitre l'étude bibliographique. Dans cette étude nous avons défini l'usinabilité et ces différents critères, le fraisage et différents paramètres qui lui sont liés, la rugosité et différents critères. Nous avons évoqué les caractéristiques des matériaux de coupe qui peuvent être utilisés dans les essais. Nous avons présenté quelques

travaux de recherche sur la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe.

Dans le second chapitre, on a présenté les moyens et les instruments nécessaires à la réalisation des essais et la planification des expériences aussi que les conditions de coupe.

Dans le troisième chapitre, on a présenté les résultats expérimentaux concernant les différents critères de rugosité des surfaces usinées, en fonction des éléments du régime de coupe (avance par dent, profondeur de passe et vitesse de coupe), aussi que l'effet du mode de fraisage et la lubrification.

Le quatrième chapitre a été consacré à la détermination des différents modèles mathématiques de la coupe (modèle du critère de rugosité, le débit de coupe) en fonction des différents paramètres de coupe et on obtient le régime de coupe optimal pour ces essais.

Finalement, notre travail a été clôturé par une conclusion générale et des recommandations, ainsi qu'une liste de références bibliographiques.

# **Chapitre I**

**Etude bibliographique sur**

***l'influence des paramètres***

***d'usinage lors du fraisage de face***

## I-1-Introduction

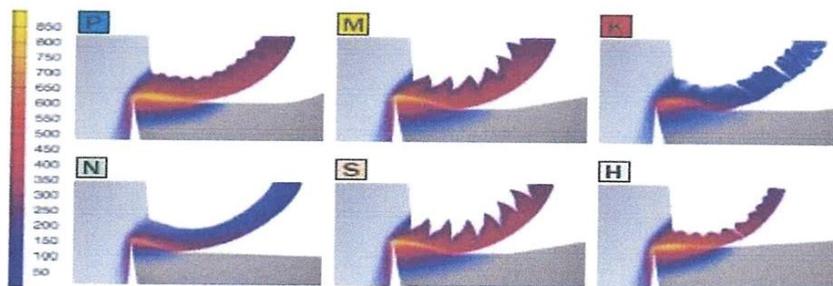
Le principal but pour toutes les entreprises de fabrication mécanique, est d'arriver à réaliser le maximum de gain possible. Ce dernier ne peut être obtenu qu'on améliorant et maximisant la production. L'augmentation de la production à son tour ne peut avoir lieu qu'avec un développement technologique sans cesse d'une part des machines-outils, d'autre part des matériaux de coupe ayant des caractéristiques élevées en termes de : dureté, résistance mécanique, résistance à l'usure, conductivité thermique, géométrie appropriée de la partie active de l'outil de coupe. Ce but peut être réalisé en poussant plus les études sur les matériaux usinés vis-à-vis des moyens utilisés. Pour stabiliser au mieux les différents paramètres de coupe.

## I-2-Définition de l'usinabilité

Pour déterminer l'usinabilité d'une matière, il faut généralement identifier trois paramètres principaux.

- Classe de la matière du point de vue métallurgique et mécanique.
- Géométrie de l'arête de coupe à utiliser, niveau micro et macro.
- Matériau de coupe (nuance) et ses composants corrects, notamment carbure cémenté revêtu, céramique, CBN ou PCD, etc.

Les choix ci-dessus ont une grande influence sur l'usinabilité de la matière. Les autres facteurs importants sont les conditions de coupe, les forces de coupe, les traitements thermiques que la matière a reçus, la présence d'une croûte superficielle, la présence d'inclusions métalliques, l'attachement des outils, les conditions générales d'usinage, etc. L'usinabilité n'a pas de définition formelle basée sur les nuances ou sur des chiffres. Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe et la formation des copeaux qui la caractérise. Dans ce sens, un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier inoxydable austénitique. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers inoxydables. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil correcte. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables. figure (I-1) [1].



**Fig-I-1:** Vue en coupe d'une plaquette en carbure cémenté usinant un acier. Température en degrés Celsius.

## **I-3-Usinabilité des matériaux**

### **I-3-1 Aciers**

#### **I-3-1-1 Aciers doux < 550 Mpa**

Incluant les aciers au carbone resulfurés et au phosphore contenant moins de 0,65% de manganèse, 0,60% de silicium et 0,60% de cuivre. Les aciers magnétiques et les aciers au plomb sont également inclus.

- Utilisation : appareils magnétiques et électriques ainsi que de nombreuses autres applications.
- Excellente usinabilité.

#### **I-3-1-2 Aciers de construction et aciers au carbone < 850 Mpa**

- Utilisation : bâtiment, ponts, arbres machines, axes, vis, écrous, bielles, engrenages, éléments de structure, maillons de chaîne, pièces cémentées et pièces obtenues par déformation à froid.
- Bonne usinabilité.

### **I-3-2 Aciers inoxydables**

#### **I-3-2-1 Les aciers inoxydables ferritiques de décolletage**

Ont une structure ferritique, avec parfois des carbures de chrome dans la matrice. Ne contiennent pas de nickel, peu de carbone, et ne sont pas durcissables.

- Utilisation : électronique, échappement automobile, matériel de manutention, réservoirs d'eau chaude.
- Mauvaise usinabilité.

#### **I-3-2-2 Aciers austénitiques**

Procurent une grande résistance à la corrosion. Aciers inoxydables les plus utilisés.

- Utilisation : électronique, industrie pharmaceutique, chimique, industrie alimentaire, bâtiment.
- Usinabilité difficile comparée aux aciers inoxydables ferritiques et martensitiques. Possèdent une grande résistance aux hautes températures, écrouissables, demandent des machines-outils robustes. De faibles vitesses de coupe et de grandes avances sont recommandées.

### **I-3-3 Fonte**

#### **I-3-3-1 Fonte grise (fonte à graphite lamellaire)**

Fonte de base à faible coût.

- Utilisation : tambours de freins, blocs-cylindres, corps de vanne, bâtis de machines.
- Excellente usinabilité.

#### **I-3-3-2 Fonte ductile [2]**

Présente la résistance la plus élevée, en concurrence avec les aciers de construction dans les applications automobiles.

- Utilisation : arbres à cames, vilebrequin, etc.
- Excellente usinabilité.

## I-4- Le fraisage

### I-4-1 Définition

Le fraisage désigne un procédé d'usinage par enlèvement de matière. Il se caractérise par le recours à une machine-outil : la fraiseuse. L'outil classiquement utilisé est la fraise.

En fraisage, l'enlèvement de matière (sous forme de copeaux) résulte de la combinaison de deux mouvements : rotation de l'outil de coupe d'une part, et avance de la pièce à usiner d'autre part.

La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques et permet également, si la machine est équipée de Commande Numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes.

Les fraiseuses actuelles sont fréquemment automatisées (fraiseuses à commande numérique et centres d'usinage). La programmation de commande numérique de ces machines nécessite le recours à des interfaces logicielles, pour une part embarquées sur la machine elle-même (Directeur de Cde Numérique), et pour une autre part, extérieure à la machine (PC + progiciels Fabrication assistée par ordinateur 2D et 3D). Dans l'industrie, les ouvriers fraiseurs qualifiés effectuent fréquemment des travaux de tournage complémentaires figure (I-2) [3].

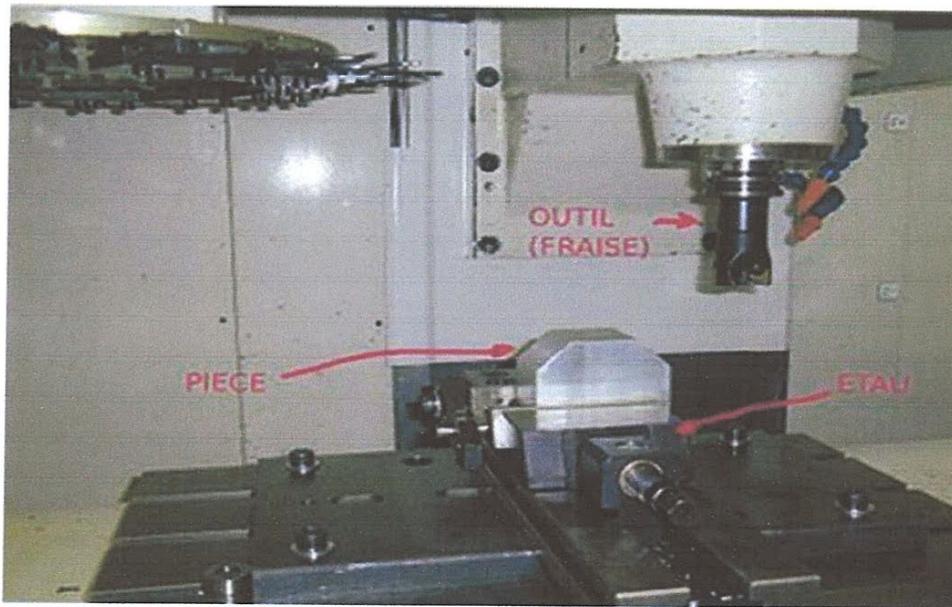


Fig-I-2 : Fraiseuse à commande numérique [3].

### I-4-2 Mode de fraisage

Les principales méthodes de fraisage pratiquées sont :

- le fraisage de profil (dit « de forme »).
- le fraisage en bout (dit « d'enveloppe » ou « surfaçage »).
- le fraisage combiné (en bout et de profil).
- le tréflage[4].

### I-4-3 Types de fraiseuse (Ancienne classification)

Avant l'avènement de la commande numérique, les fraiseuses étaient catégorisées de la façon suivante.

**I-4-3-1 Fraiseuse horizontale** l'axe de la broche est parallèle à la table. Cette solution permet aux copeaux de tomber et donc de ne pas rester sur la pièce. De cette manière, on n'usine pas les copeaux, et la qualité de la pièce est meilleure. Mais ce type de montage était surtout destiné à installer des fraises à trois tailles ou fraises disques dans le but de réaliser des rainurages de profilés plats figure (I-3).



Fig- I-3 : Fraiseuse horizontale

**I-4-3-2 Fraiseuse verticale** l'axe de la broche est perpendiculaire (En géométrie plane, on dit que deux droites sont perpendiculaires quand elles se coupent en formant un angle droit...) à la table figure (I-4).



Fig- I-4 : Fraiseuse verticale

**I-4-3-3 Fraiseuse universelle** l'axe de la broche est réglable

- tête bi-rotative, avec 2 coulisses circulaires (perpendiculaires l'une par rapport à l'autre)
- tête oblique, avec 2 coulisses circulaires (inclinaison à 45°)
- tête articulée figure (I-5) [5].



Fig- I-5 : Fraiseuse universelle

### I-4-4 Les procédés de fraisage

#### I-4-4-1 Le fraisage en bout

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale. Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure figure (I-6).

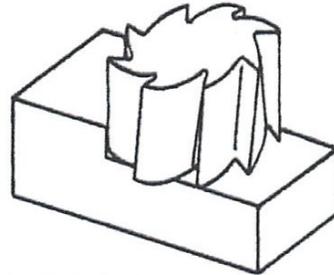


Fig- I-6 : fraisage en bout

#### I-4-4-2 Le fraisage en roulant

L'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre. La charge de la machine en est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les à-coups provoqués par cette façon de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, on utilisera une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration enregistrée s'explique ainsi: la denture est chargée et déchargée progressivement figure (I-7).

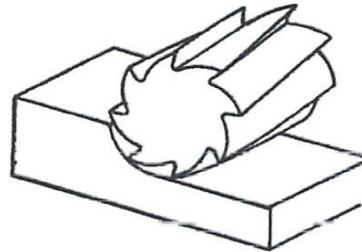


Fig- I-7 : fraisage en roulant

### I-4-5 Les paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont des éléments constants ou variables, qui dépendent les uns des autres afin d'obtenir le meilleur compromis possible pour un usinage figure (I-8).

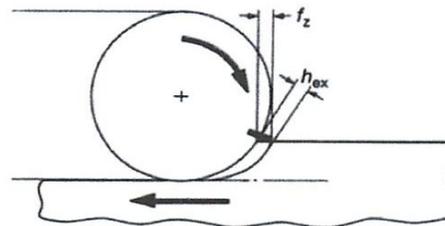
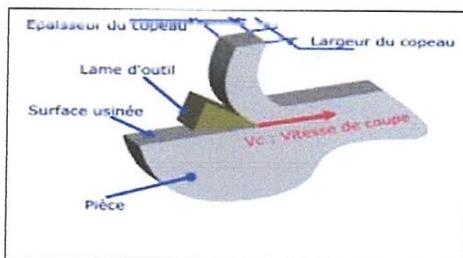


Fig- I-8 : Les paramètres de coupe [6]

#### I-4-5-1 La vitesse de coupe

En matière de fraisage, on mesure la vitesse de coupe par le chemin parcouru par un point placé sur le diamètre de coupe extérieur de la fraise, en mètres par minute.

Pour déterminer la vitesse de coupe optimale, il faudra également tenir compte de l'épaisseur maximale du copeau ( $h_{ex}$ ) qui est en relation directe avec l'avance par dent ( $f_z$ ).

$$n = (1000 \cdot V) / (\pi \cdot \varnothing) \quad (I-1)$$

$V$  = vitesse de coupe (m/min)

$\pi$  = 3,14

$\varnothing$  = diamètre de la fraise (mm)

$n$  = nombre de tours/min

**I-4-5-2 vitesse d'avance « Vf »**

Elle est exprimée en mm/min. Elle découle de la formule suivante:

$$V_f = f_z \cdot Z_n \cdot n \quad (\text{I-2})$$

$V_f$  = mm/min

$f_z$  = avance en mm/dent (selon tablelle)

$Z_n$  = nombre de dents de la fraise

$n$  = fréquence de rotation de la fraise en tr/min

**I-4-5-3 La profondeur de passe ( $a_p$ )**

Elle est quelquefois suggérée dans les tabelles des fabricants d'outils de coupe et elle dépend du type d'état de surface que l'on veut obtenir (ébauche, finition). Pour ce qui concerne les fraises équipées de plaquettes en métal dur rapportées, cette profondeur est limitée en fonction de la forme et de la taille de la plaquette. Cette valeur maximale est indiquée dans les tableaux des fournisseurs figure (I-9).

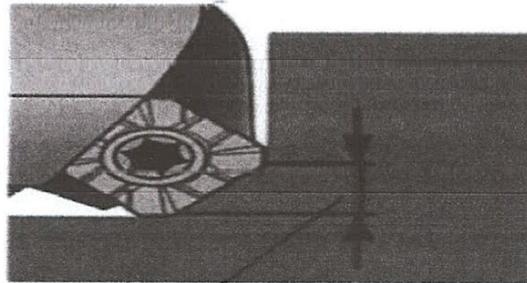


Fig- I-9 : Valeur de la profondeur  $a_p$  maxi autorisée

**I-4-5-4 L'épaisseur de copeaux maximale (hex) en [mm]** est le facteur limitant le plus important d'un outil pour une opération. L'arête de coupe d'une fraise est conçue et testée, ainsi que des valeurs minimales et maximales.

**I-4-5-6 La profondeur de coupe axiale ( $a_p$ ) en [mm]** correspond à la quantité de métal que l'outil enlève sur la face de la pièce. Elle correspond à la distance à laquelle l'outil est réglé en dessous de la surface non usinée.

**I-4-5-7 La largeur de coupe radiale ( $a_e$ ) en [mm]** est la largeur sur laquelle le diamètre de la fraise est engagé en coupe. Il s'agit de la largeur de la surface usinée ou, si le diamètre d'outil est plus petit que la largeur couverte par l'outil.

**I-4-5-8 Le débit copeaux (Q) en [mm<sup>3</sup>/min]** est le volume de métal par unité de temps et peut être déterminé à l'aide de la profondeur de coupe, de la largeur de coupe et de l'avance.

$$Q = a_e \cdot a_p \cdot V_f \quad (\text{I-3})$$

### I-4-6 fraisages en opposition et en avalant

L'action de fraisage peut se faire soit en opposition soit en avalant.

#### I-4 6-1 fraisages en opposition

Le mouvement d'avance de la pièce à fraiser est opposé au sens de rotation de la fraise. Cette dernière attaque le copeau au point d'épaisseur minimal. Dans ce cas, les dents glissent sur la surface usinée avant rotation de la fraise. Cette façon de faire provoque un grand frottement d'où une usure plus rapide des tranchants de la fraise.

De plus, l'effort de coupe en fraisage horizontal tend à soulever la pièce à usiner. Les copeaux peuvent également être entraînés par la fraise et se coincer entre la pièce et les arêtes de coupe, endommageant la pièce et la fraise figure (I-10) [6].

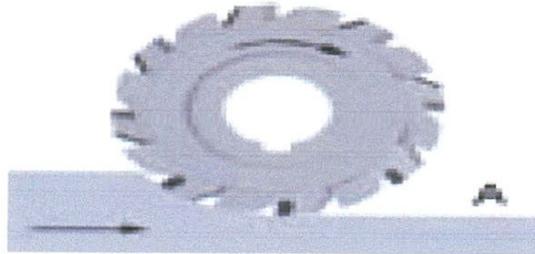


Fig- I-10 : fraisage en opposition [7]

#### ❖ *Avantages*

- L'engagement de la dent n'est pas fonction des caractéristiques de surface de la pièce usinée
- Les souillures ou écailles de la surface n'affectent pas la durée de vie de l'outil.
- Le procédé de coupe est adouci, d'autant plus que les dents de la fraise sont affûtées [7].

#### ❖ *Inconvénient*

- L'outil a tendance à trembler.
- La pièce usinée a tendance à être décalée vers le haut, ce qui implique d'importants blocages.
- Usure plus rapide de l'outil qu'en fraisant en avalant.
- Les copeaux tombent devant la fraise – évacuation difficile.
- La force ascendante a tendance à relever la pièce usinée.
- Plus de puissance est requise à cause d'une friction accrue.
- La surface de finition n'est pas bonne à cause de l'évacuation des copeaux [7].

#### I-4 6-2 fraisages en avalant

Le sens de rotation de la fraise et celui du déplacement de la pièce à fraiser vont dans la même direction. Les tranchants de la fraise attaquent le copeau au point d'épaisseur maximal. Cette façon de faire, en fraisage horizontal, plaque la pièce sur la table de la fraiseuse et donne des surfaces finies de bonne qualité. Ce principe nécessite l'utilisation d'une machine robuste disposant d'une table équipée d'un système de translation avec rattrapage de jeu, ce qui est le cas sur les machines modernes. Ainsi on évite que la pièce soit "tirée" dans la fraise figure (I-11) [6].

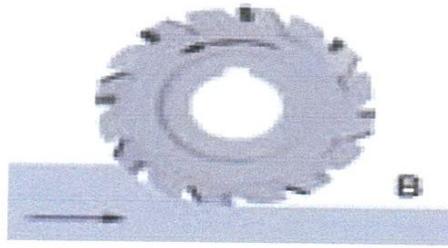


Fig- I-11 : fraisage en avalant [7]

❖ *Avantage*

- Les forces de coupe vers le bas permettent de maintenir la pièce usinée en place, particulièrement pour les parties peu épaisses.
- Evacuation plus facile des copeaux – Les copeaux sont évacués derrière la fraise.
- Moins d'usure – diminution de 50% de la durée de vie de l'outil.
- Finition de surface améliorée – Les copeaux sont moins emmenés par la dent.
- Moins de puissance requise – on peut utiliser une fraise avec un angle de coupe élevé.
- Le fraisage en avalant exerce une force sur la pièce à usiner [7].

❖ *Inconvénient*

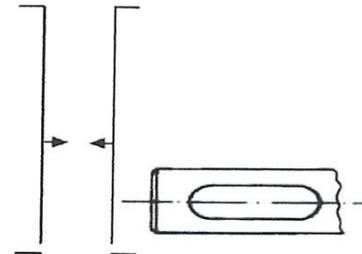
- Lors de l'engagement des dents dans la pièce usinée les forces ont un impact important, c'est pourquoi cette opération doit avoir un montage rigide, et tout jeu doit être éliminé.
- Le fraisage en avalant ne convient pas à l'usinage de pièces ayant un mauvais état de surface, telles que les pièces de forge et moulées. En effet les écailles sur la matière causent une usure excessive et abîment les dents, réduisant ainsi la durée de vie [7].

## I-4-7 Quelques types de fraises et utilisations [6]

Exécution courte  
(DIN 844K)



Fraise cylindrique  
d'ébauche, 2 tailles,  
queue cylindrique lisse



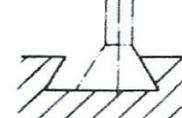
Fraise pour rainure à T,  
3 tailles, denture alternée



Fraise conique à cône  
renversé, 1 taille, Fraise



Usinage de coulisse  
«queue d'aigle»

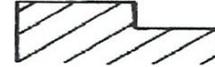
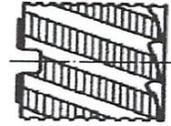
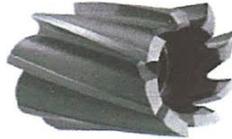


Fraise à rainurer 3 tailles,  
à denture alternée



Utilisée pour l'usinage de rainures de faible largeur

Fraise cylindrique en bout, 2  
tailles, avec rainure  
transversale pour tenons ou  
entrée longitudinale pour  
clavette



Certains modèles sont équipés d'arêtes avec un profil pour un usinage de semi-finition ou d'ébauche.

Fig- I-12 Quelques types de fraises et utilisations

## I-5- Matériaux de coupe

### I-5-1 Sélections des matériaux de coupe

La très grande diversité des matériaux de coupe offerts actuellement oblige à opérer des choix. L'importance du couple outil/ matière a été démontrée par de nombreuses études récentes. En règle générale, l'usineur a peu de possibilités d'agir sur la matière de la pièce usinée. C'est donc sur l'outil, et par conséquent sur le matériau de coupe, que devra porter toute son attention. Avant de décider des conditions de coupe, l'usineur devra vérifier l'aptitude (ou la qualification) du matériau de coupe à usiner la matière de la pièce. Pour cette première étape, l'aide du fabricant d'outils est généralement indispensable et utile. En effet, la plupart des matériaux de coupe sont vendus sous des dénominations commerciales. La connaissance exacte du matériau de coupe (y compris des revêtements s'il y a lieu) est donc parfois délicate à obtenir. Une fois l'étape de qualification et d'aptitude assurée, il faut valider techniquement le matériau de coupe, c'est-à-dire à lui associer des valeurs numériques (vitesse de coupe et avance généralement) de fonctionnement. Ces valeurs numériques sont également liées au type d'outil sur lequel est monté le matériau de coupe. Ces deux étapes sont entièrement prises en compte par le couple outil/matière. La norme NF E 66-520 donne la méthodologie d'essais à réaliser pour aboutir au bon fonctionnement de l'outil. Les normes type NF E 66-505 (essais normalisés qui permettent de classer les matériaux de coupe dans des conditions de fonctionnement bien définies) ont montré leurs limites et ne sont plus utilisées dans l'industrie. Les petites et moyennes entreprises ne sont pas équipées pour réaliser des essais d'usinage. Quant aux grandes entreprises, la tendance actuelle est de réduire très fortement (voire supprimer) les services destinés aux méthodes usinage. Les usineurs doivent donc avoir accès directement à des informations techniques fiables concernant le domaine d'emploi des matériaux de coupe. La diversité des références commerciales des fabricants d'outils est telle que cette tâche est pratiquement impossible

à réaliser sans l'aide de logiciels. Cette même méthode COM sert également à caractériser l'usinabilité de la matière usinée [8].

## **I-5-2 Définitions des principaux types de matériaux pour outils de coupe**

### **5-2-1 Aciers rapides**

Ce sont des aciers fortement alliés qui contiennent plus de 0,7 % de carbone et des éléments d'addition susceptibles de former des carbures.

- Dans tous les cas environ 4 % de chrome (C).
- Du tungstène (W), du molybdène (D), du vanadium (V), en proportions variables.
- Eventuellement du cobalt (K) qui a pour rôle d'augmenter la dureté à chaud.

Ils ont la propriété de pouvoir acquérir, après trempe, une dureté très élevée, et de la conserver jusqu'à une température de l'ordre de 600 °C.

Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de ces alliages, la norme NFA 35-590 en retient 16, parmi lesquelles des aciers sur carburés et des aciers au cobalt.

### **I-5-2-2 Carbures métalliques**

Ils sont fabriqués selon la technique de métallurgie des poudres par frittage.

Ils sont constitués :

- De substances dures 60 à 95 % du carbure qui donnent la dureté et donc la résistance à l'usure. Elles se composent de carbure de tungstène (WC) phase ( $\gamma$ ), de carbure de titane (TiC), de carbure tantale (TaC) et de carbure de niobium (NbC) (phase  $\gamma$ ).
- De substances liantes qui donnent la ténacité au carbure. La plus employée est le cobalt (Co) car il dissout facilement les différents carbures (phase  $\beta$ ).

On obtient différentes nuances de carbures en faisant varier le pourcentage des substances dures et liantes. Ces nuances présentent des tenues plus ou moins importantes à l'usure (selon la dureté) et aux chocs (selon la ténacité) en fonction de l'utilisation prévue.

La résistance à la chaleur et la conductivité thermique dépendent.

- ✓ De la taille des grains WC.
- ✓ Du % de Co.
- ✓ Du contenu de la phase  $\gamma$ .

### **I-5-2-3 Carbures micro-grain**

Ils sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène (0,2 à 1  $\mu\text{m}$ ), lié par du cobalt (6 à 13 %). Ils ont une ténacité plus élevée pour une dureté constante et de ce fait peuvent entrer dans le domaine des applications de matériaux tels que l'acier rapide. Cette nuance permet des arêtes beaucoup plus fines par suite, l'obtention d'angles de coupe très positifs.

#### I-5-2-4 Aciers et carbures revêtus

Les aciers rapides et les carbures existent de plus en plus sous forme revêtus. Ce revêtement en couches de quelques microns (1 à 20  $\mu\text{m}$ ) est constitué, selon les applications :

- De nitrure de titane (TiN), d'une dureté d'environ 2 000 HV (jaune d'or).
- De carbure de titane (TiC), d'une dureté d'environ 3 900 HV (gris).
- De carbonitrure de titane (Ti) (C1N), d'une dureté de 3 000 HV (gris).
- D'oxyde d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), d'une dureté d'environ 2 400 (noir).

Ces revêtements améliorent très nettement les possibilités des outils, en particulier la durée de vie, grâce à une réduction importante du frottement copeau/outil et pièce/outil.

Les résultats sont surtout spectaculaires sur les aciers rapides (certains fabricants de fraises annoncent une augmentation de la durée de vie de 500 %).

#### I-5-2-5 Cermets

Il s'agit de matériaux à base de titane avec un liant de nickel, de cobalt ou des deux à la fois. Ils ont une très bonne résistance à l'usure et une excellente stabilité chimique. Ils sont surtout réservés aux opérations de finition. Ils donnent de bons résultats en tournage de finition pour les aciers, en particulier pour les aciers inoxydables. Ils peuvent être revêtus (PVD) de TiN et Ti (C1N) [9].

#### I-5-2-6 Céramiques

Les céramiques se présentent sous formes de plaquettes frittées, il existe deux grandes familles de céramiques :

- Les céramiques à base d'alumine sous deux aspects : les céramiques pures de couleur blanche composées d'oxyde d'aluminium et d'autres oxydes métalliques ; les céramiques mixtes de couleur grise composée d'oxydes d'aluminium et de carbures métalliques.
- Les céramiques à base de nitrure de silicium : ce sont des matériaux nouveaux, les plus connus étant les sialons. Elles sont de couleur noire, composée de nitrure de silicium et d'oxydes métalliques.

En pratique, les céramiques sont prévues pour supporter des vitesses de coupe élevées à des températures importantes. Elles résistent bien à l'usure mais mal aux chocs. Elles sont souvent utilisées sur des machines puissantes pour l'usinage des métaux ferreux. Elles ne conviennent pas pour les alliages légers et pour les alliages de titane (problèmes chimiques). Elles peuvent être revêtues de TiN et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### I-5-2-7 Nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est un des matériaux de coupe des plus durs (dureté supérieure aux céramiques et aux carbures). Il s'agit de particules de nitrure de bore cubique et une matière liante céramique. Il se présente généralement sous la forme d'une pointe qui est brasée sur un support de carbure.

Il peut également être fritté sur chaque pointe du support carbure, ce qui améliore la sécurité. Les plaquettes peuvent être revêtues (PVD) de TiN, ce qui facilite la détection

de l'usure. Une nuance additionnée de nitrure de titane, très dure, est principalement utilisée en finition pour les aciers trempés, les aciers cémentés et pour les fontes trempées. Une nuance de CBN pure, très résistante à l'usure, mais aussi très tenace est recommandée pour les aciers et les fontes trempées dans des conditions difficiles.

#### I-5-2-8 Diamant polycristallin (DP ou PCD)

Le diamant polycristallin est composé de cristaux à grains fins de diamètres compris entre 5 et 30  $\mu\text{m}$ . Les plaquettes de coupe sont découpées par électroérosion dans un disque de diamant polycristallin. Il est recommandé pour la finition et la semi-finition des métaux non ferreux (aluminium, cuivre, plomb) et pour les matières non métalliques telles que le graphite et les composites.

### I-6- Effort de coupe lors du fraisage

#### I-6-1 Définition et intérêt de leur mesure [9]

Le fraisage donne naissance à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage figure (I-13).

$F_v$  (ou  $F_y$ ): composante dans le sens de rotation de la fraise appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. Elle a la plus grande valeur absolue.

$F_a$  (ou  $F_x$ ): composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance, ou effort axial.

$F_r$  (ou  $F_z$ ): composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres (suivant l'axe de la fraise), appelée effort de refoulement ou effort radial.

$F$ : La résultante de coupe - peu utilisée en pratique - représente la diagonale d'un parallépipède. Elle est égale à la somme vectorielle des trois composantes ou à :

$$F = \sqrt{F_v^2 + F_a^2 + F_r^2} \quad (\text{I-4})$$

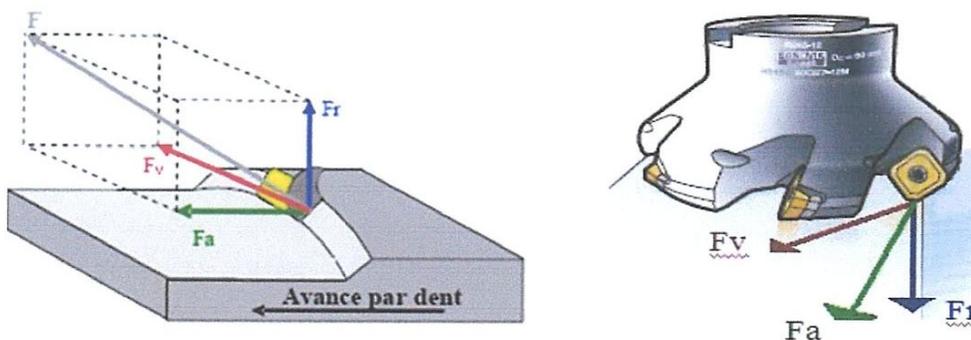


Fig- I-13 : Composantes de l'effort de coup [11].

La connaissance des efforts de coupe est à 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 quelle est la puissance prise à l'outil et donc d'avoir les renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions de l'apparitions des vibrations auto excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur le matériau coupé [10].

## I-7-Rugosité de surface

### I-7-1 Généralités sur les états de surface

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération figures (I-14 + I-15).



Fig- I-14 : mesure de rugosité

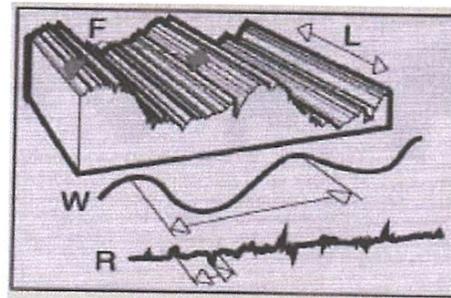


Fig- I-15 : critères de rugosité

Cette structure est définie par les critères suivants :

- *La rugosité R*: exprime les plus petites irrégularités, c'est à dire le fin réseau d'écart micro géométriques mesurés sur la plus petite longueur d'échantillonnage.
- *L'ondulation W* : est constituée d'irrégularités de plus grande dimensions au niveau suivant de la longueur d'évaluation sur la surface de la pièce.
- *La direction des traces d'usinage L* : définit l'orientation du profil superficiel. Elle indique la direction dominante générée par la méthode d'usinage

Il existe un grand nombre de paramètres pour la définition de la rugosité, certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres.

#### I-7-1-1 Ra: rugosité moyenne du profil

- Valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite, dans la longueur d'évaluation, indifféremment de la direction verticale figure (I-16).
  - ✓ Impossible de savoir si les écarts sont des creux ou des bosses
  - ✓ Pas d'altération pas des écarts isolés, donc risque de manquer un sommet
  - ✓ Valeur de Ra typiques entre  $0.02\mu\text{m}$  et  $3.5\mu\text{m}$ .

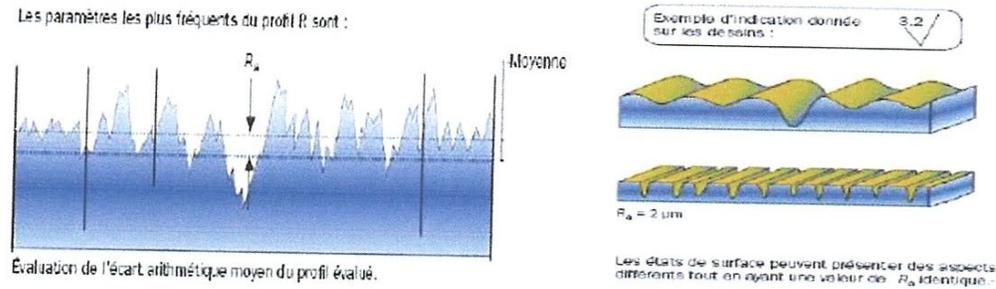


Figure-16 : Ra: rugosité moyenne du profil

**I-7-1-2 Rz: hauteur de profil maximum**

C'est la moyenne des différentes hauteurs de profil entre la hauteur de crête la plus élevée et la profondeur de creux la plus importante sur des longueurs de référence comprises dans la longueur d'évaluation figure (I-17).

- Il y a couramment 5 longueurs de référence.
- La valeur affichant la plus grande déviation dans la longueur de référence = Rmax ou Rzmax.

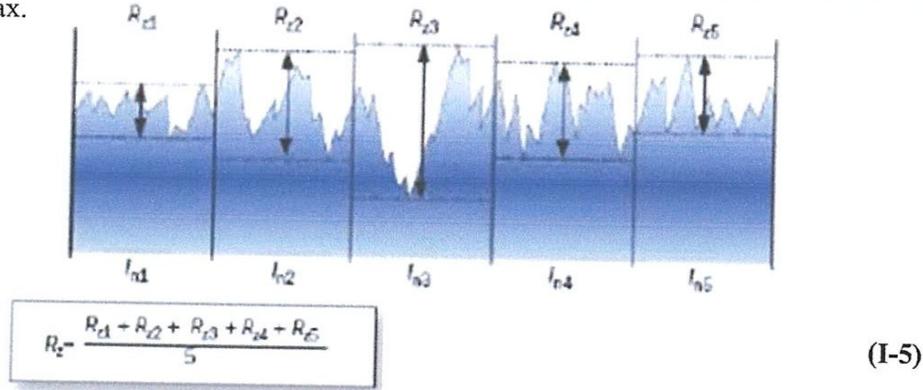


Fig- I-17: Rz: hauteur de profil maximum

**I-7-1-3 Rt: hauteur de profil total**

C'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation figure (I-18)

- Une seule valeur Rt, non combiné à un Rz ou Ra est l'une des exigences les plus strictes.

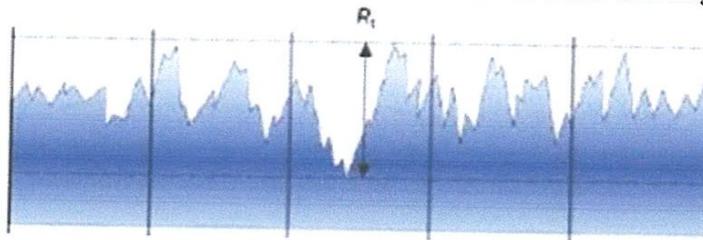
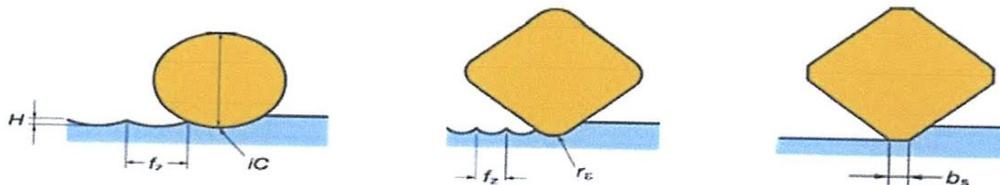


Fig- I-18 : Rt: hauteur de profil total du profil R

### I-7-1-4 Fraisage /surfaçage axial (effet de la forme des plaquettes)

- L'état de surface dépend de la forme des arêtes de coupe des plaquettes.
- Les arêtes à rayon génèrent des crêtes dont la taille dépend du rayon lui-même et de l'avance.
- Les plaquettes avec un biseau plan (bs) peuvent générer des surfaces Planes figure (I-19).



$$h = \frac{1}{2} (IC - \sqrt{IC^2 - f_z^2})$$

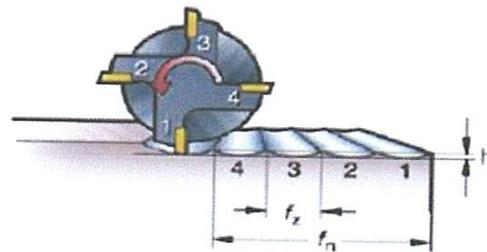
(I-6)

Fig- I-19: Fraisage /surfaçage axial

### I-7-1-5 Fraisage /surfaçage radial [12]

C'est le côté de l'outil qui génère le profil figure (I-20).

- Chaque dent produit une crête :
  - ✓ La largeur est déterminée par l'avance à la dent  $f_z$ .
  - ✓ La profondeur est déterminée par la relation entre le diamètre de la fraise ( $D_c$ ) et  $f_z$ .
- La taille théorique des crêtes générées est minimale, par exemple:
  - ✓  $D_c$  10mm.
  - ✓  $f_z$  0.1 mm.
  - ✓  $z_n$  4.
  - ✓  $h = 0.0003$  mm.



$$h = \frac{1}{2} (D_c - \sqrt{D_c^2 - f_z^2})$$

(I7)

Fig- I-20 : Fraisage /surfaçage radial

## I-8- Usure des outils

L'usure des outils de coupe est un des phénomènes physico-chimiques les plus complexes. Il influe sur la géométrie de l'outil ainsi que sur la qualité de la pièce. Elle est due par son apparition aux causes suivantes figure (I-21):

- Frottements outil-copeau, outil-pièce et pièce-copeau (usure abrasive).
- Déformations plastiques de la matière de la partie active de l'outil.
- Echauffement important dû à la coupe.
- L'émiettement de l'outil (arrachement de petites particules métal).

L'usure peut être sous plusieurs formes:

- L'usure abrasive est particulière à tous les outils, elle est la cause principale de l'emoussage de l'outil.
- L'usure due aux déformations plastiques de la matière de l'outil est surtout pour les

outils en aciers à faible teneur en éléments d'alliages (acier rapide).

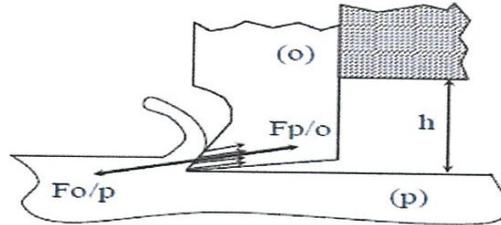


Fig- I-21 : Courbe ( $\theta^\circ$ , T[min]),

L'usure provoquée par une haute température de coupe se manifeste plus fortement dans les aciers au carbone et les aciers rapides, par suite de leurs résistances à chaud relativement faible. L'usure est d'autant plus rapide que la température de la partie active est plus élevée comme le montre la figure (I-22).

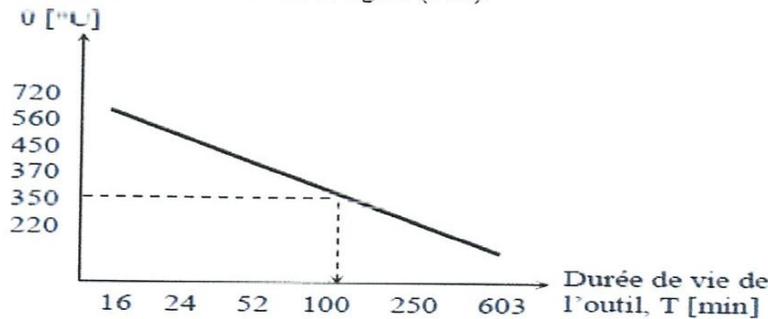


Fig- I-22 : Courbe ( $\theta^\circ$ , T[min])

Une autre série d'expériences d'usinage dont l'objectif consistait à déterminer la vitesse « Vc » en fonction du temps « T » pour un usinage à sec et un autre avec lubrification, donne les résultats suivants figure (I-23).

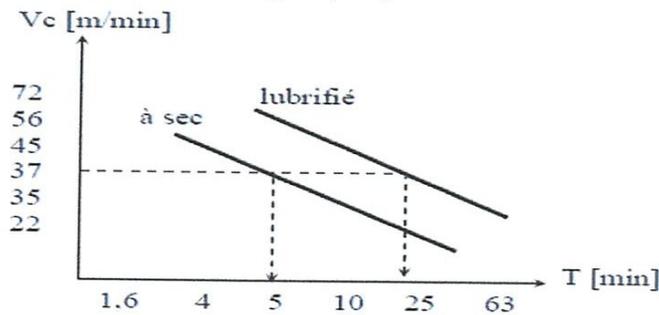


Fig- I-23 : Influence de la lubrification

Ce que l'on constate sur la figure, qu'avec une lubrification bien adoptée au travail à réaliser permet d'augmenter considérablement la durée de vie de l'outil, d'où une diminution de l'usure.

Les outils en carbures métalliques s'usent généralement à cause de l'émiettement c'est à dire l'arrachement de petites particules du métal de l'outil, tandis qu'ils restent fortement résistant à l'usure par frottement [13].

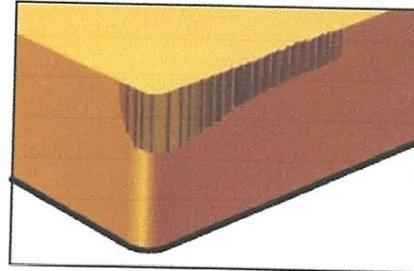
**I-8-1 Types et cause d'usures [14]**

En fonction des conditions de coupe, l'usure peut se produire suivant la surface de dépouille, suivant la surface d'attaque ou suivant les deux surfaces en même temps [14].

**I-8-1-1 Usure en dépouille**❖ *Cause*

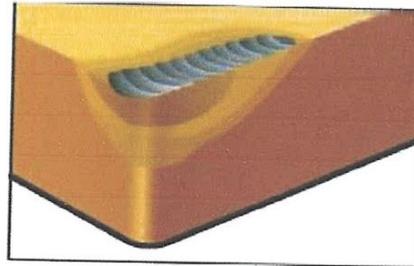
Usure rapide provoquant un mauvais état de surface ou des cotes hors tolérances.

- Vitesse de coupe trop élevée.
- Résistance à l'usure insuffisante.
- Avance,  $f_z$ , trop faible.

**I-8-1-2 Usure en cratère**❖ *Cause*

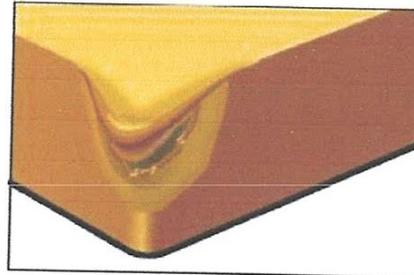
Usure excessive qui affaiblit l'arête de coupe. La dégradation, voire la rupture de l'arête entraîne de mauvais états de surface.

- Usure par diffusion due à des températures de coupe trop élevées sur la face de dégagement de la plaquette.

**I-8-1-3 Déformation plastique**❖ *Cause*

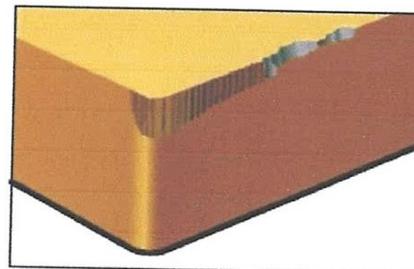
Déformation plastique de l'arête, dépression ou renflement latéral entraînant un mauvais contrôle copeaux, un mauvais état de surface, voire la rupture de la plaquette.

- Température et pression de coupe trop élevées.

**I-8-1-4 Écaillage**❖ *Cause*

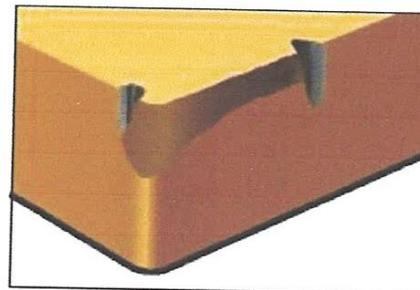
La partie de l'arête qui n'est pas engagée subit un écaillage dû au martèlement des copeaux. La face supérieure et le support de la plaquette peuvent être endommagés, ce qui génère de mauvais états de surface et une usure en dépouille excessive.

- Les copeaux sont déviés en direction de l'arête de coupe.

**I-8-1-5 Usure en entaille**❖ *Cause*

Usure en entaille entraînant un état de surface médiocre et un risque de rupture de l'arête.

- Matières sujettes à l'écroûissage en coupe.



- Croûte.

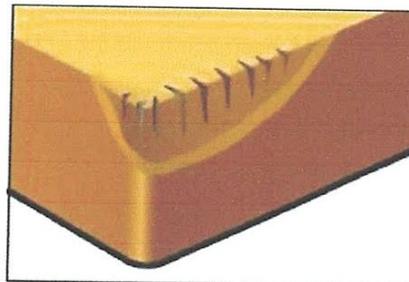
### I-8-1-6 Usure en peigne

#### ❖ Cause

Petites fissures perpendiculaires à l'arête de coupe provoquant un écaillage et une dégradation de l'état de surface.

L'usure en peigne est due aux fluctuations thermiques causées par :

- Coupe intermittente.
- Adduction irrégulière de liquide de coupe.



## I-9-Formation de copeaux

### I-9-1 Mode de formation de copeaux

Le contrôle de la formation des copeaux est particulièrement critique en fraisage. Pour parvenir aux performances correctes, prolonger la durée de vie de l'outil et obtenir de bons résultats, il est nécessaire de déterminer les valeurs d'épaisseur des copeaux.

C'est le trajet parcouru par l'outil qui donne naissance au copeau, qui se forme entre l'entrée de la fraise dans la matière et sa sortie de celle-ci. Les copeaux sont plus longs en fraisage conventionnel qu'en fraisage en avalant, ce qui est donc également un facteur à prendre en considération lors du choix de la méthode appropriée. La forme des copeaux varie avec la méthode de fraisage et le positionnement de la fraise figure (I-24) [15].



Fig- I-24 : formation de copeaux

### I-9-2 Épaisseur maximum des copeaux [15]

L'épaisseur maximum des copeaux est le paramètre le plus important pour obtenir un processus de fraisage productif et fiable. Pour que la coupe soit efficace, elle doit être adaptée à la fraise utilisée.

Si les copeaux sont fins et la valeur de  $h_{ex}$  trop faible, les performances sont mauvaises et la productivité est basse. La durée de vie d'outil peut être réduite et la formation des copeaux mauvaise.

Si l'épaisseur des copeaux est trop importante, la surcharge sur l'arête de coupe peut provoquer sa rupture.

### I-9-3 L'amincissement des copeaux autorise une augmentation de l'avance

L'avance à la dent peut être augmentée dans les trois situations suivantes en raison de l'effet d'amincissement des copeaux :

- Fraise à arêtes rectilignes avec angle d'attaque inférieur à  $90^\circ$ .
- Fraise à plaquettes rondes, ou avec grands rayons de bec, et faible profondeur de coupe  $a_p$ .
- Contournage avec faible engagement radial,  $a_e/De$ .

### 9-4 Plaquettes à arêtes rectilignes

Avec les plaquettes à arêtes rectilignes, l'épaisseur des copeaux,  $h_{ex}$ , est égale à  $f_z$  si l'angle d'attaque est de  $90$  degrés. La réduction de l'angle d'attaque,  $\kappa_r$ , permet d'augmenter  $f_z$  figure (I-25).

$$h_{ex} = f_z \times \sin \kappa_r \quad (\text{I-8})$$

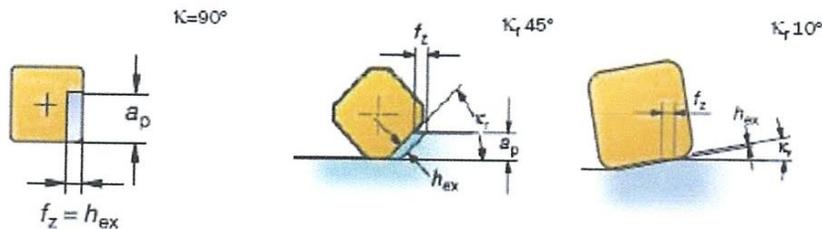


Fig- I-25 : Plaquettes à arêtes rectilignes [16]

### I-9-5 Fraises à plaquettes rondes ou à grand rayon [16]

- Avec les fraises à plaquettes rondes ou les fraises à bout sphérique on obtient les meilleures performances avec un angle d'attaque,  $\kappa_r$ , inférieur à  $60^\circ$  si la profondeur de coupe est faible. Celle-ci ne doit pas dépasser 25 % du diamètre des plaquettes,  $iC$ .
- Pour les profondeurs de coupe plus importantes, il est préférable d'utiliser des plaquettes carrées avec un  $\kappa_r$  de  $45^\circ$  constant.
- Avec les plaquettes rondes, l'épaisseur des copeaux,  $h_{ex}$ , est variable. Elle dépend de l'angle d'attaque. Il est possible d'augmenter considérablement l'avance, lorsque le ratio  $a_p/iC$  est faible, pour augmenter l'épaisseur des copeaux et obtenir l'épaisseur désirée.
- L'épaisseur maximum des copeaux est plus élevée avec les plaquettes rondes qu'avec des arêtes rectilignes en raison de leur plus grande robustesse et de la longueur des arêtes de coupe plus importante figure (I-26).

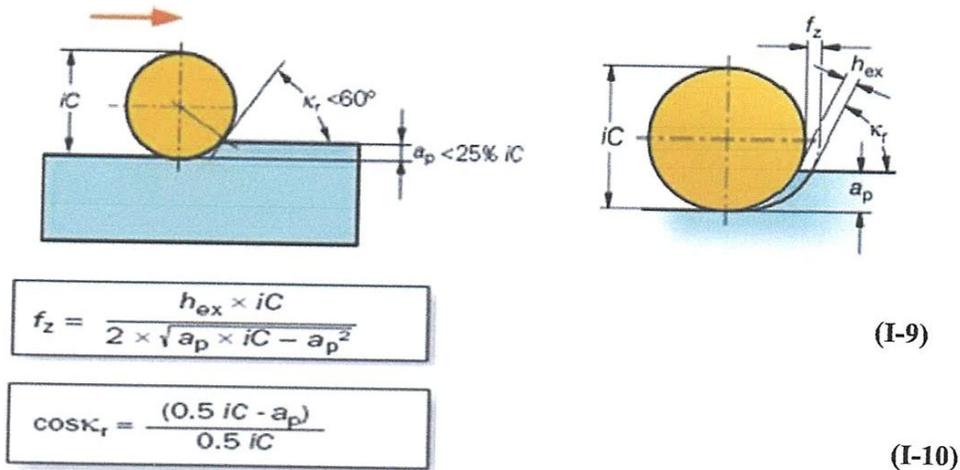


Fig- I-26 : Fraises à plaquettes rondes ou à grand rayon [18]

### I-10-Travaux de recherche en Fraisage

M. BENGHERSALLAH and all [17] ont étudié l'usinage en fraisage des couches de rechargement base cobalt (Stellite 6) monocouche et bicouche. Il s'agit d'étudier l'usinabilité des couches de rechargement qui présentent une structure métallurgique fortement hétérogène. Cette hétérogénéité se traduit en usinage par un écrouissage superficiel élevé, qui provoque l'usure prématurée des outils de coupe (fraise). Cette dégradation résulte d'une adhésion entretenue du copeau conduisant à des usures en entailles et des écaillages très sévères des plaquettes de fraisage. Cinq nuances de plaquettes en carbure revêtues et non revêtues ont été testées par les auteurs pour différents paramètres du régime de coupe en usinage à grande vitesse de l'acier fortement allié (Z38CDV5). D'autres parts les auteurs ont fait une investigation détaillée du comportement à l'usure des plaquettes ainsi que son évolution par le système WattPilote de surveillance du processus de coupe.

Les résultats trouvés par les auteurs débouchent sur les conclusions suivantes :

- L'usinabilité des couches de rechargement PTA en stellite 6 est possible mais difficile.
- Les plaquettes de coupe de fraisage subissent différents types d'usure. Au cours de l'usinage à grande vitesse des matériaux durs et à usinabilité difficile, il faut réduire la valeur du critère d'usure admissible de la surface en dépouille VB à la valeur [VB]=0,2mm.
- L'entaille par sa longueur et sa profondeur peut s'avérer un autre critère d'évaluation à considérer.
- L'adaptation du système WattPilote au centre d'usinage pour le contrôle de l'usinage est satisfaisante. Il donne l'opportunité d'avoir un suivi de l'évolution du processus de coupe en temps réel, le contrôle simultané de l'usure va prévenir sur le temps des changements des outils Figure (I-27 à I-30).

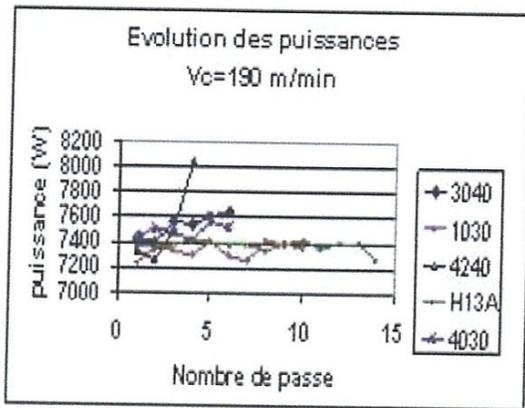


Fig-I- 27 : Evolution des puissances usinage du rechargement monocouche ( $V_c=190\text{ m/min}$   $f_z= 0,067\text{ mm/dent}$   $a_e= 0,3\text{ mm}$ ,  $a_p=3\text{ mm}$ )

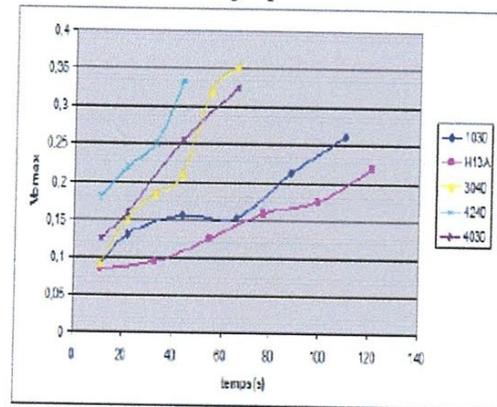


Fig-I- 28 : Evolution de l'usure  $V_{bmax}$  pour les cinq nuances testées

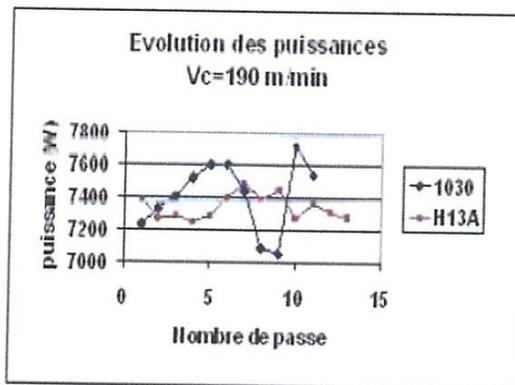


Fig- I- 29 : Evolution des puissances usinage Rechargement bicouche ( $V_c=190\text{ m/min}$   $f_z= 0.067\text{ mm/dent}$  -  $a_e= 0,3\text{ mm}$ ,  $a_p=5\text{ mm}$ )

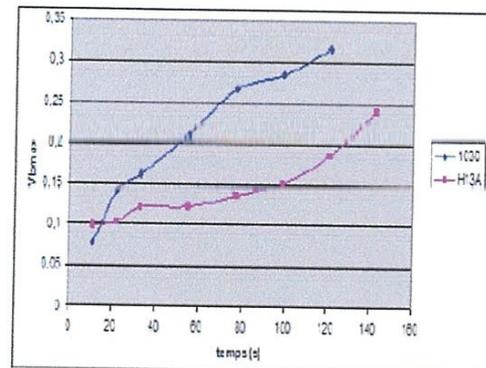


Figure- I- 30 : Evolution de l'usure  $V_{bmax}$  pour les deux nuances testées ( $V_c=190\text{ m/min}$ ).

Mohamad Al-Ahmad, and all [18] ont fait une étude sur les paramètres pertinents de l'opération de fraisage axial ou tréflage. Le but est de montrer sa performance dans la gamme d'usinage de moule et matrice. Dans ce cadre ils ont définis la trajectoire d'usinage et les différentes stratégies adaptées à l'opération de tréflage. Ensuite, ils ont déterminé le temps d'usinage et la qualité de surface (hauteur de crête) pour les différentes stratégies proposées. Les résultats trouvés par les auteurs ont permis de faire une comparaison des trois stratégies d'usinage et de faire les commentaires suivants :

- Le pas radial est un des conditions opératoires importante pour évaluer la qualité des surfaces usinées ainsi que la productivité et que l'augmentation du pas radial diminue le temps d'usinage et augmente la hauteur de crête.
- L'usinage par tréflage utilisant la stratégie de type serpent-engagement complet donne un temps d'usinage le plus faible et produit une surface de bonne qualité (faible hauteur de crête). Par contre la section de copeau est plus importante d'où des efforts de coupe en augmentation et cela demande des vérifications expérimentales plus approfondie.
- Les mouvements de l'outil hors matière en tréflage consomment une partie non négligeable du temps d'usinage. Néanmoins, cette contrainte est fortement conditionner par les performances en vitesse de rapide de la machine outil figure (I-31).

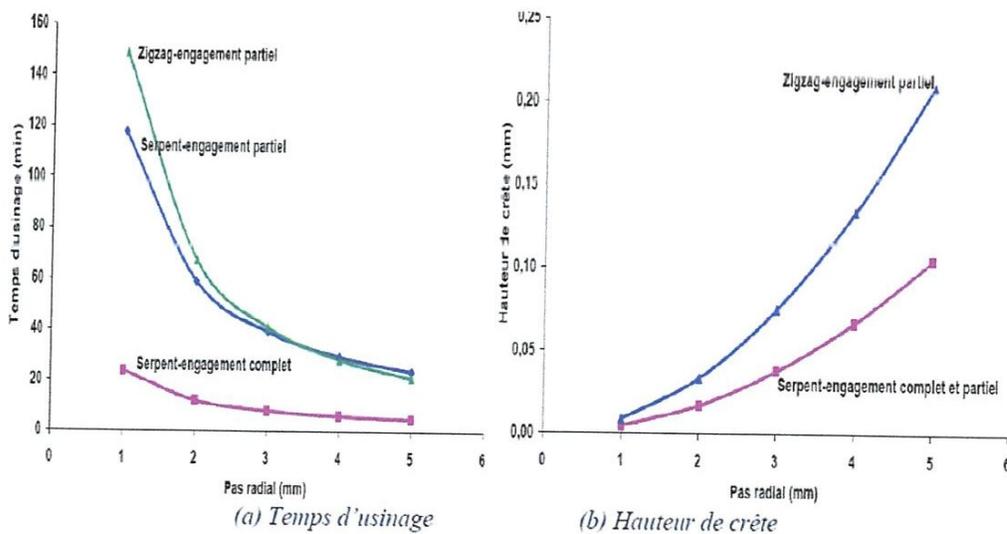


Fig- I- 31 : Evaluation des temps d'usinage et des hauteurs de crête en fonction du pas radial.

**Khairi Yusufi and all** [19] ont étudié le fraisage de finition des alliages titane. Dans cet article ils ont étudié les paramètres optimaux qui pourraient produire la bonne rugosité de la surface significative. Elle a utilisé la méthode de conception de Taguchi pour optimiser la qualité de rugosité de la surface. Les paramètres de d'entée étaient la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe et type d'outil en fraisage de finition. D'autre part, les paramètres de bruit étaient pression de fluide de refroidissement. Un plan d'expérience de 8 essai a été réalisé et une analyses de la variance (ANOVA) ont été effectués pour identifier les facteurs significatifs affectant la rugosité de la surface.

Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs indiquent

- Les facteurs les plus significatifs affectant la rugosité de la surface de l'alliage titane pendant le processus de fraisage de finition étaient principalement la vitesse de la broche de la machine, deuxièmement, du type d'outil utilisé, troisièmement, l'avance f adoptée et pour finir la profondeur de passe choisie.

- En outre, les deux facteurs de bruit, pressions de fluide de refroidissement (x), n'affectent pas de manière significative la durée de vie de l'outil et la rugosité de la surface.
- La vitesse de broche à 2865 t/mn (A2), l'avance par tour à 815 mm/min (B2), la profondeur de passe 0.4 millimètre (C1) en utilisant un outil en carbure de tungstène (D1) sont identifiées comme paramètre de coupe optimale qui pouvait produire la meilleure rugosité de surface Tableau (I-1).

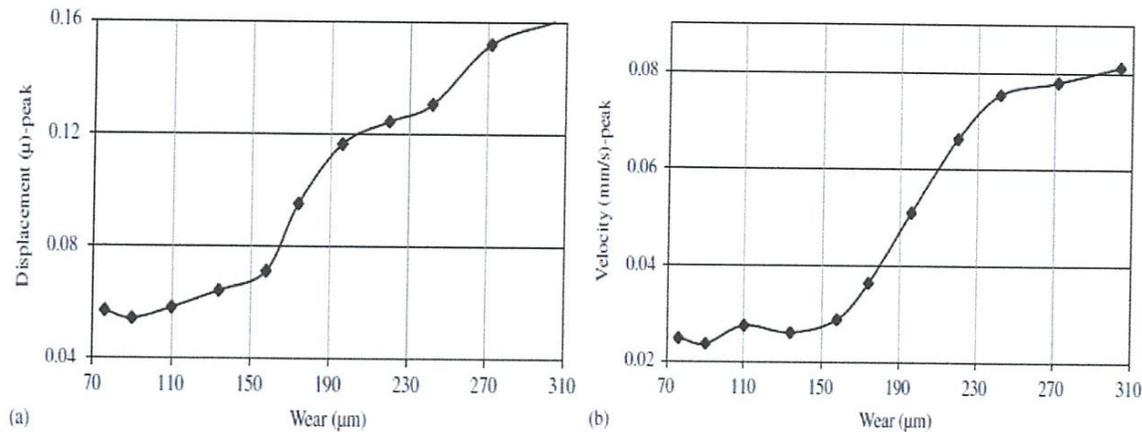
No. exp.	X				1		2	
	A	B	C	D	N1 (µm)	N2 (µm)	N3 (µm)	N4 (µm)
1	1	1	1	1	1.867	1.855	1.849	1.852
2	1	1	2	2	2.029	2.022	2.062	2.020
3	1	2	1	2	1.961	1.956	1.974	1.978
4	1	2	2	1	1.713	1.703	1.714	1.704
5	2	1	1	2	1.662	1.644	1.665	1.656
6	2	1	2	1	1.758	1.767	1.732	1.755
7	2	2	1	1	1.470	1.445	1.442	1.443
8	2	2	2	2	1.704	1.709	1.708	1.708

**Tab I-1 :** Moyenne N1, N2, N3, N4 Résultats de rugosité de la surface X: Pression de fluide de refroidissement

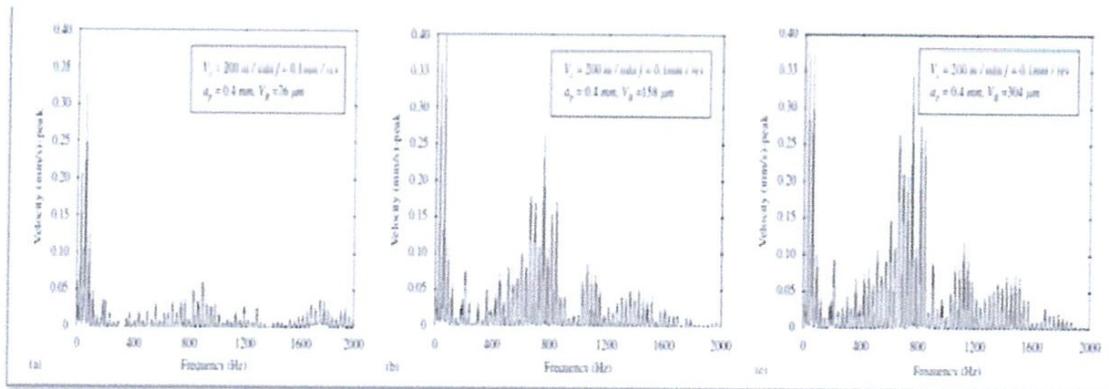
**Sadettin Orhan and all [20]** ont étudié le rapport entre la vibration et l'usure de l'outil en fraisage de finition. Ils ont utilisé une fraiseuse verticale, des plaquettes amovibles de CBN. Le fraisage est réalisé sur un acier d'outil de travail à froid d'AISI D3 durci à 35 HRC. La vibration a été mesurée seulement dans la direction d'usinage, qui a des signaux plus dominants que dans les deux autres directions. Ils ont utilisé dans la mesure une sonde d'accélération assemblée sur un analyseur de vibration. L'usure de l'outil a été mesurée au microscope optique.

Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs indiquent :

- Il n'y avait aucune augmentation considérable dans l'amplitude de vibration jusqu'à ce qu'une valeur d'usure en dépouille qui a voisine les 160 µm, au-dessus l'amplitude de vibration a augmenté de manière significative
- L'amplitude de vibration augmente progressivement avec l'usure de l'outil
- Les auteurs observé que les trois premiers dent de la fréquence (1x , 2x , 3x ) a fourni les informations de meilleur sur l'usure de l'outil figures (I-32 +I-33)



**Fig- I- 32:** Rapport entre l'amplitude de vibration et l'usure de l'outil (a) déplacement et (b) vitesse.



**Fig- I- 33 :** Les amplitudes de vibration pour d'outils usés et non usés et demi usés (a) outil non usé, (b) outil demi usé et (c) outil usé.

**K. Kadirgama and all [21]** ont étudié l'optimisation de la rugosité de la surface en fraisage d'un moule en alliages d'aluminium 6061-T6 avec des plaquettes en carbure revêtu. L'optimisation du fraisage est très importante pour réduire le coût et le temps d'usinage pour le moule. Les objectifs visés par les auteurs dans cette étude sont de développer un modèle de prédiction de la rugosité de surface et étudier la variable la plus dominante parmi la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur axiale et la profondeur radiale et aussi d'optimiser ces variables en fraisage.

Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs indiquent :

- La technique RSM est efficace pour effectuer l'analyse des tendances de la rugosité de surface par rapport à différentes combinaisons de variables de conception (vitesse de coupe, avance, profondeur axiale et radiale de profondeur).
- Les modèles de première et de deuxième ordre sont jugés suffisamment représentant la rugosité de surface avec les résultats expérimentaux.

- Le modèle de RSM indiquent que l'avance par tour est la variable de conception la plus significative pour prévoir la réponse de rugosité de la surface par rapport à d'autres variables.
- Le modèle de 1<sup>er</sup> ordre ne montre aucune interaction entre les variables.
- Avec les équations du modèle obtenu, un concepteur peut ensuite choisir la meilleure combinaison des variables de d'usinage pour l'obtention de la rugosité de surface optimale. Cela réduit finalement l'usinage temps et d'économiser des outils de coupe figure (I-34).

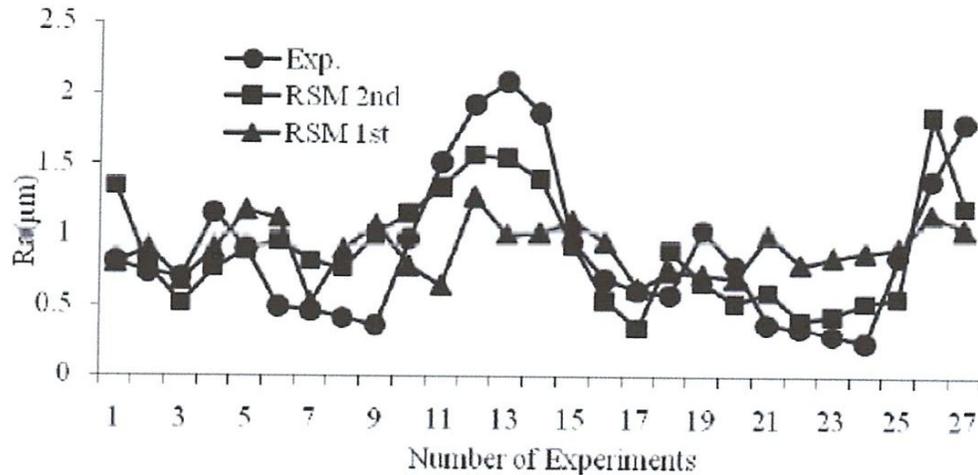


Fig- I- 34 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et prévus

Modèles proposés :

$$R_a = 0.5764 + 0.0049C_{speed} + 47.69f + 58.45a_{depth} + 1.08r_{depth} + 40.37f^2 + 7217a_{depth}^2 \quad (I-11)$$

$$R_a = 2.83 + 0.0511C_{speed} + 47.69f + 58.45a_{depth} + 1.08r_{depth} + 40.37f^2 \quad (I-12)$$

$$+ 72.17a_{depth}^2 + 0.0094r_{depth}^2 - 0.162C_{speed} \times f - 0.1652C_{speed} \times a_{depth}$$

$$- 220f \times a_{depth} - 2.18f \times r_{depth} - 6.38a_{depth} \times r_{depth}$$

### **Conclusion**

Ce chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux en générale et le fraisage en particulier. La définition de l'usinabilité, les matériaux de coupe les efforts, l'usure des outils, la rugosité de surface et la formation du copeau ont été définis. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée aux travaux de recherche en fraisage et particulièrement la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe.

# **Chapitre II**

## **Moyens utilisés et programme d'expérience**

## II-1-Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des moyens mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le but de caractériser le comportement des matériaux de coupe étudiés, vis à vis du matériau à usiner. Cela mènera à la présentation des différents équipements utilisés qui ont servi au suivi de la rugosité des surfaces obtenues lors de l'usinage. Nous présentons également les différentes méthodes utilisées pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées au Laboratoire pédagogique de Coupe des Métaux du département de Génie Mécanique (Université du 08 Mai 1945 de Guelma).

## II-2-Moyennes utilisée

### II-2-1/ Machine-outil

La fraiseuse qui a servie à nos essais est une fraiseuse verticale de la Société Nationale de Production des Machines Outils Industrielles (PMO), modèle almo de puissance 5 KW figure (II-1).



Fig. II-1. Machine-outil utilisée

**a-Fréquences de rotation :** Les fréquences de rotation disponibles sur la fraiseuse sont présentées sur la figure (II-2).



**Fig. II-2.** Fréquences de rotation de la machine outil

❖ Les différentes vitesses de coupe de cette machine (en tr/min) :

45	63	90	125	180	250
355	500	710	1000	1400	2000

**Tab. II-1** Les différentes vitesses de coupe de la machine outil

**b- Vitesses d'avances** Les vitesses d'avances disponibles sur la fraiseuse sont mentionnées sur la figure (II-3).



**Fig. II-3** Vitesses d'avances de la machine outil

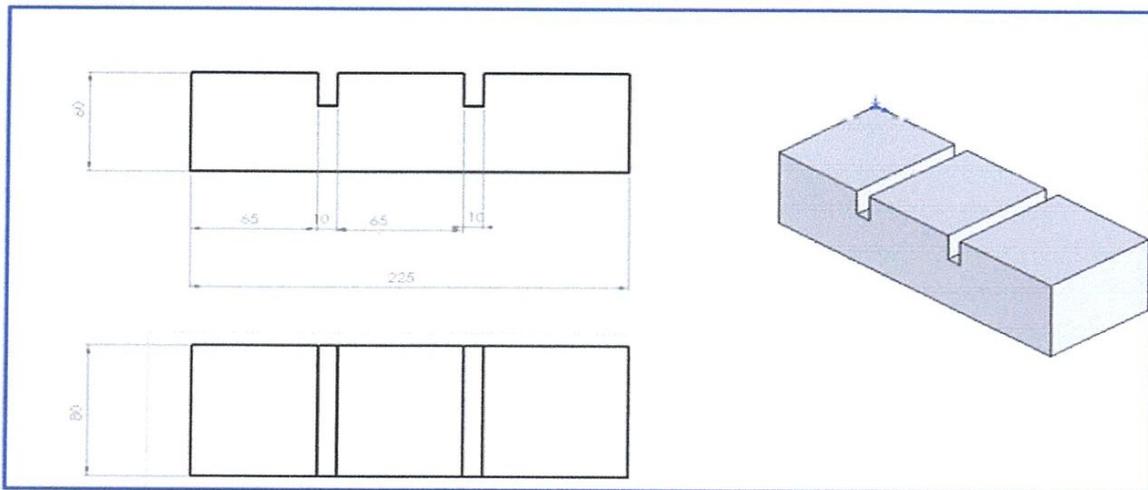
❖ les différentes vitesses d'avance de cette machine sont en (mm/min) :

16	10	20	25	31,5	50	63	80	100
125	160	200	250	314	400	500	630	800

**Tab. II-2** Les différentes vitesses d'avance de la machine outil

### II-2-2- Matériau usiné

Le matériau que nous avons utilisé dans nos essais pour tester nos plaquettes de coupe, est un acier XC42. Cet acier couvre un large domaine d'utilisation, (Pièces moyennement soumises aux chocs et nécessitant une assez bonne résistance : engrenage, vis sans fin, axes, paliers, pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres.....)). Les propriétés de cet acier est équivalent à la nuance C35, avec une meilleure aptitude aux traitements thermiques. Acier au carbone souvent utilisé en mécanique générale de part sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques. Apte aux traitements thermiques. Pour ces essais nous avons utilisé les éprouvettes présentées sur la figure (II-4).



**Fig. II-4** : Eprouvette pour les essais.

#### a- Désignation

La désignation de notre acier est donnée au tableau (II-3)

EN	AFNOR	DIN	UNI	UNE	AISI	NORME
C 40	XC 42	Ck 40	C 40	F - 1141	-	EN 10083

**Tab. II-3:** Désignation du matériau de la pièce.

**b- Composition chimique en %**

La composition chimique de notre acier est donnée au tableau (II-4)

C	S	Mn	P	Si
0,37 - 0,44	≤ 0,035	0,50 - 0,80	≤ 0,035	0,40 maxi

**Tab. II-4:** Composition chimique de l'acier XC42.

**c- Caractéristiques mécaniques**

Les caractéristiques mécaniques à température ambiante de l'acier XC42 sont représentées dans le tableau (II-5).

❖ Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé)

Rm N/mm <sup>2</sup>	Re N/mm <sup>2</sup>	A %	Dureté HB
530 / 580	260 / 320	16 / 17	170

**Tab. II-5:** Caractéristiques mécaniques de l'acier XC42.

**d- Propriétés physiques**

Les propriétés physiques de notre acier sont indiquées au tableau (II-6)

Masse volumique	Module d'élasticité	Conductivité thermique	Capacité thermique massique à 20°C	Résistivité électrique à 20°C	Coefficient de Poisson	Coefficient de dilatation linéique	Diffusivité thermique
(kg/m <sup>3</sup> )	(KN/mm <sup>2</sup> )	(W.m-1.K-1)	(j.kg-1.K-1)	(Ω x mm <sup>2</sup> /m)		( 10-6 x K-1)	(m <sup>2</sup> .s-1) x 10 <sup>6</sup>
7670	165	37	650	0.57	0.36	16.6	7.1

**Tab. II-6:** Propriétés physiques de l'acier XC42.

### II-2-3- Outil de coupe

L'outil de coupe qui a servi aux essais, est une fraise à surfacer de 100 mm de diamètre, figure (II-5). Elle est composée de trois éléments essentiels:



Fig. II-5 : Fraise à surfacer.

-(1) D'un cône morse.

-(2) D'une cloche **CoroMill 245** à surfacer sur laquelle sont montées 5 plaquettes amovibles à fixation par vis fabriquée à la firme SANDVIK figure (II-5), dont les caractéristiques géométriques de cette fraise sont données sur la figure II-6-b, et sur le tableau (II-7).

-(3) De plaquettes rapportées dont les caractéristiques sont représentés dans les tableaux (II-8 ; II-9) et les figures (II-7 ; II-8):

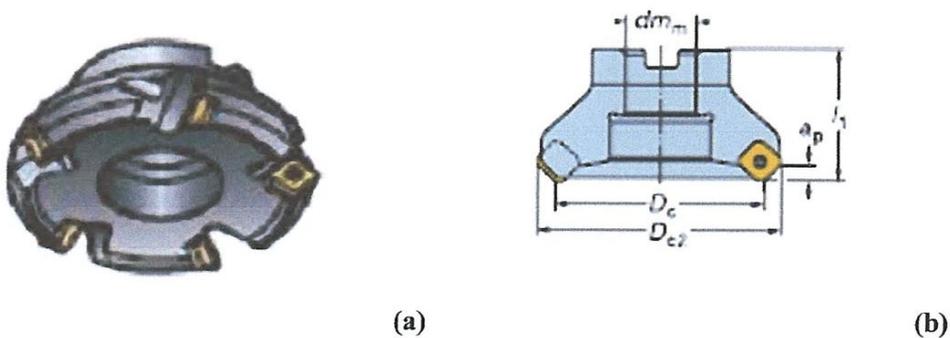


Fig. II-6: Fraise à surfacer Coromill 245.

Désignation	Démentions							
	Dc	dm <sub>m</sub>	Dc2	l <sub>1</sub>	a <sub>p</sub> Max	tr/min max	κ <sub>r</sub>	γ
R245-12 T3 EPL	100	32	112,5	50	6	11300	45°	+23°

**Tab. II-7:** Caractéristiques géométriques et dimensions de la fraise.

κ<sub>r</sub> : Angle de direction principale,

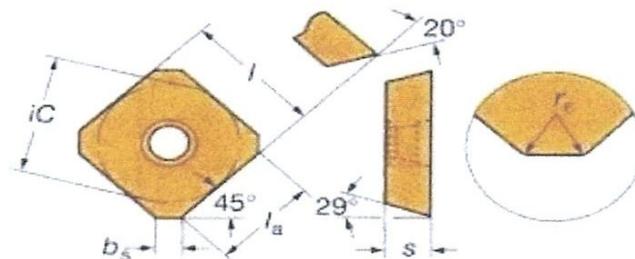
γ : Angle d'attaque.

Matériau de coupe	Désignation SANDVIK	Désignation ISO
Carbure revêtu	GC1030	R245-12 T3 EPL

**Tab. II-8 :** Désignation des plaquettes de coupe.



**Fig. II-7:** Plaquettes de coupe utilisées en carbure revêtu.



**Fig. II-8:** Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.

	Désignation	$l=iC$	$s$	$bs$	$la$	$r_\epsilon$
12	R245-12 T3 EPL	13,4	3,97	2,1	10	1,5

Tab. II-9:Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.

## II-3- Equipement de mesures utilisées

### II-3-1-Rugosimètre

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) nous avons utilisé un rugosimètre Sj-201p (Mitutoyo) figure (II-9). 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.

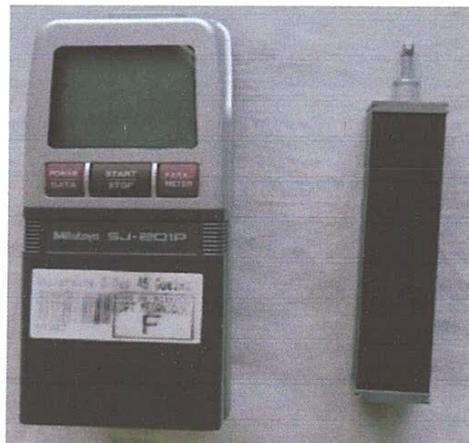


Fig. II-9: Rugosimètre Sj-201p (Mitutoyo)

## II-4- Planification des expériences

### II-4-1- Introduction

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage on peut citer, les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ), la géométrie de la partie active de l'outil ( $r, \alpha, \beta, \gamma, \epsilon_r, \dots$ etc.), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, lubrification). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. Dans cette étude nous avons étudié l'évolution de la rugosité ainsi que le débit de copeau en fonction des paramètres ( $V_c$ ,  $f_z$  et

$a_p$ ) avec les deux méthodes de planification des expériences (unifactorielle et multifactorielle).

#### II-4-2- Méthode unifactorielle

Cette méthode est indispensable lorsqu'il s'agit de caractériser l'action d'un seul facteur  $X$  sur un paramètre  $Y$ . Pour cela, on donne une série de valeurs discrètes au facteur examiné [ $X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$ ] tout en maintenant tous les autres facteurs constants (Tableau (II-10)). Pour chaque  $X=X_i$ , on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de  $Y_i$ , ( $i = 1 \div N$ ). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation  $Y = f(X)$ .

N°	Facteurs variables	Paramètres de sortie						
	$X$	$Y_1$	$Y_2$	-	$Y_g$	-	$Y_n$	$Y_{moy}$
1	$X_1$	$Y_{11}$	$Y_{21}$	-	$Y_{g1}$	-	$Y_{n1}$	$Y_{moy1}$
2	$X_2$	$Y_{12}$	$Y_{22}$	-	$Y_{g2}$	-	$Y_{n2}$	$Y_{moy2}$
3	$X_3$	$Y_{13}$	$Y_{23}$	-	$Y_{g3}$	-	$Y_{n3}$	$Y_{moy3}$
$i$	$X_i$	$Y_{1i}$	$Y_{2i}$	-	$Y_{gi}$	-	$Y_{ni}$	$Y_{moyi}$
-	-	-	-	-	-	-	-	-
$N$	$X_N$	$Y_{1N}$	$Y_{2N}$	-	$Y_{gN}$	-	$Y_{nN}$	$Y_{moyN}$

Tab. II-10: Matrice de planification par la méthode unifactorielle.

#### II-4-3- Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ). Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les tableaux (II.11).

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
$V_c$ (tr/min)	710	$f$ (mm/dt)	0.007, 0.01, 0.05, 0.11, 0.22
$a_p$ (mm)	0.3		
$V_c$ (tr/min)	710	$a_p$ (mm)	0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.8
$f$ (mm/dt)	0.05		
$a_p$ (mm)	0.3	$V_c$ (m/min)	19.78, 39.25, 78, 157, 222, 314
$f$ (mm/dt)	0.16		

Tab. II-11 Conditions de coupe pour les essais unifactoriels.

#### II-4-4- Méthode multifactorielle

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base ( $V_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$ ) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité et débit de coupeau). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

$$N=q^k \quad (II-1)$$

Où: - N: nombre d'essais;

- q: nombre de niveau de variations des facteurs de base;

- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons :

##### **La rugosité**

Trois facteurs de base ( $k=3$ ) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyen (0) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors:  $N=3^3=27$ .

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau Tableau (II-12).

Niveau de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs		
	Vc (m/min)	fz(mm/dent)	ap (mm)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau moyen (0)	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur moyenne
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale	Valeur minimale
N° des essais	Valeurs codifiées des facteurs		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

**Tab. II-12:** Matrice de planification par la méthode multifactorielle.

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les tableaux (II.13).

Condition de coupe	Valeur max	Valeur moy	Valeur min
Vc (m/min)	78	157	314
Fz (mm/dt)	0.04	0.08	0.16
ap (mm)	0.2	0.4	0.6

**Tab. II-13** Conditions de coupe pour les essais Multifactoriels

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. La désignation, la composition chimique, les caractéristiques mécaniques, les propriétés physiques 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**

## **Influence des paramètres de coupe en fraisage**

### III-1- Introduction

Les paramètres qui peuvent influencer sur le processus de coupe sont d'une manière générale les paramètres d'entrée cités dans le chapitre II. Les essais expérimentaux de la coupe en fraisage effectués dans notre étude sur l'acier XC42, ont été menés en se limitant sur quelques uns parmi cette diversité de paramètres qui sont:

➤ Les paramètres de coupe :  $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f_z$ .

Les types d'essais que nous avons menés concernent la rugosité de surface de l'acier XC42 où on a étudié :

- L'influence des différents paramètres de coupe sur les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ).
- L'influence du mode d'usinage - en opposition ou en avalent – sur les critères de la rugosité.
- L'influence de l'arrosage sur les critères de la rugosité.

Notre travail consiste à faire des essais expérimentaux en utilisant une nuance de plaquettes de coupe en Carbure revêtu.

### III-2-1- Influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité

#### III-2-1-1- Influence de l'avance par dent

Nous constatons à travers les résultats obtenus et représentés sur la figure (III-1) que l'effet de l'avance sur la rugosité montre qu'avec l'augmentation de ce paramètre l'état de surface se dégrade d'une manière générale figure. (III-2), Cette augmentation ce caractérisé par l'ondulation engendré par la zone de contact outil matière et du frottement qui fait croître la température dans cette zone. On peut remarquer que l'avance est l'un des paramètres de coupe dont l'effet est général sur l'état de la surface usinée, elle contribue à l'évolution de la rugosité. L'augmentation de l'avance de 0.02 à 0.22 (mm/dent) fait accroître les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) respectivement de (64.64%, 89.74%, 68.71%).

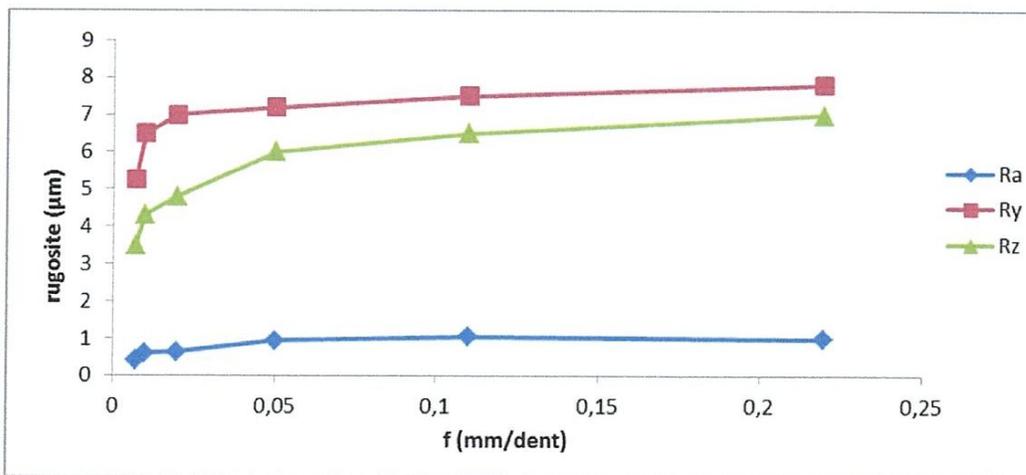
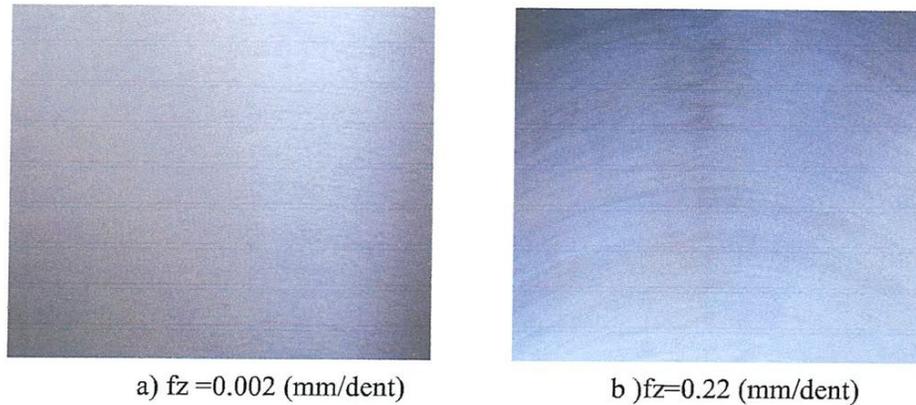


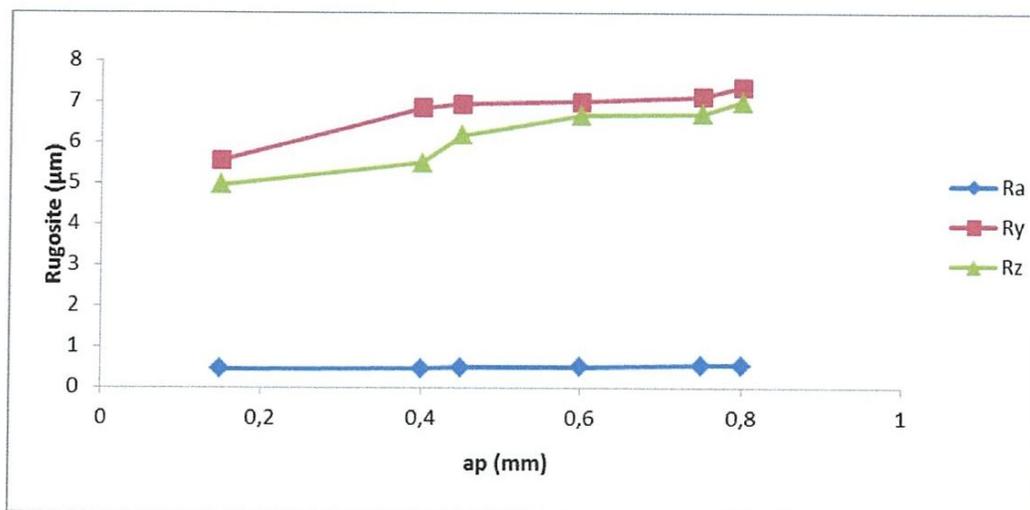
Fig. III-1: Effet de l'avance par dent sur la rugosité,  $V_c = 222$  m/min ;  $a_p = 0,3$ mm.



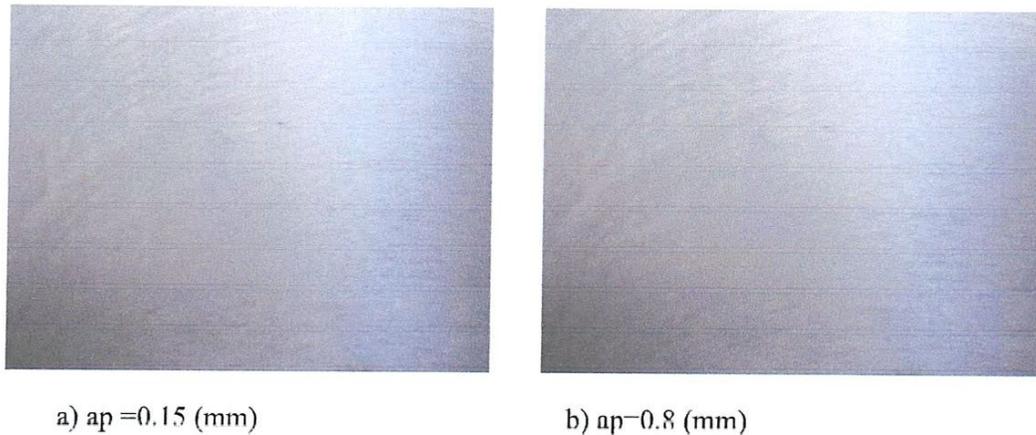
**Fig.III-2** topographie de la surface usinée pour : a)  $fz=0.002$  (mm/dent) et b)  $fz=0.22$  (mm/dt)

### III-2-1-2- Influence de la profondeur de passe

On peut constater sur l'illustration de la figure (III-3) que la profondeur de passe ( $a_p$ ) ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées figure (III-4). Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce. Ce qui améliore les conditions d'évacuations de la chaleur de la zone de coupe et par conséquent elle freine le processus du mécanisme d'usure. Pour une profondeur de passe minimale de 0.15 mm les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ , et  $R_z$ ) sont respectivement de (0.46, 5.55, 4.96)  $\mu\text{m}$ . Pour une valeur maximale de la profondeur de passe égale à 0.8mm les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ , et  $R_z$ ) sont respectivement de (0.56, 7.36, 7)  $\mu\text{m}$ . Ce constat nous permet de conclure que l'augmentation est de (17.85%, 24.6, 29.14%) pour les trois critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ , et  $R_z$ ).



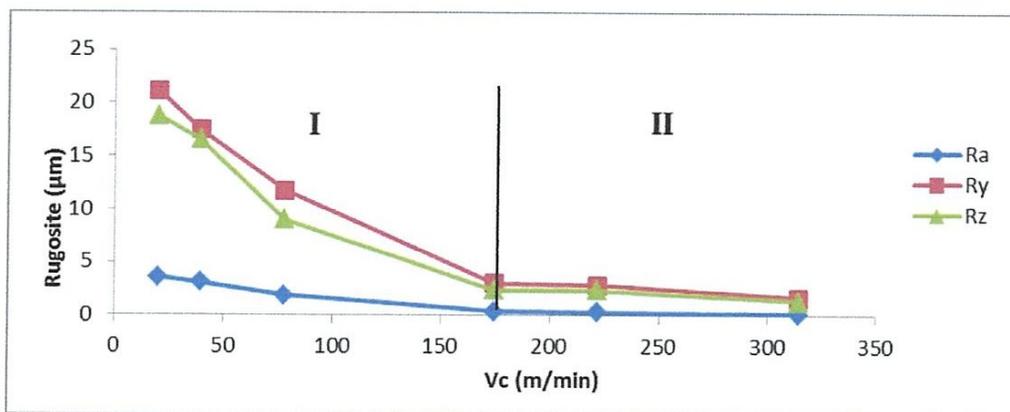
**Fig. III-3:** Effet de la profondeur de passe sur la rugosité.  $V_c = 222$  m/min ;  $fz = 0.05$ mm/dt.



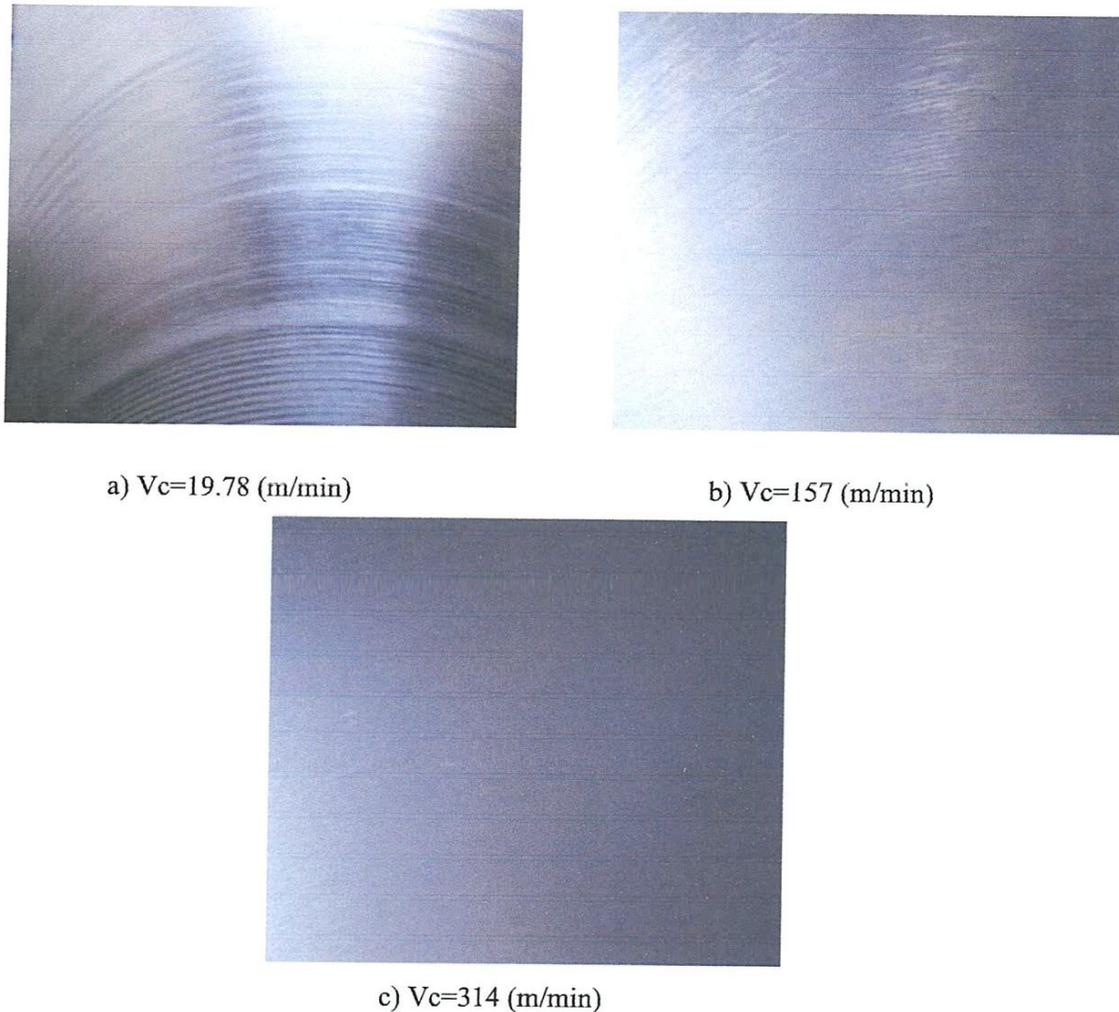
**Fig. III-4** Topographie de la surface usinée pour : a)  $a_p=0.15$  (mm) et b)  $a_p=0.8$  (mm)

### III-2-1-3 Influence de la vitesse de coupe

Nous constatons à travers les résultats obtenus et représentés sur la figure (III-5) que la tendance des courbes se divise en deux zones. Dans la première zone l'effet de la vitesse de coupe montre qu'avec l'augmentation de ce paramètre, l'état de surface s'améliore d'une manière très significative, on remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe engendre un nombre moins important d'ondulation figure (III-6) et d'autre part l'arrachement de coupeau est plus facile à cause de la température élevée ce qui nous donne une rugosité réduite. L'augmentation de la vitesse de coupe de 19.78 à 157 (m/min) fait diminuer les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ , et  $R_z$ ) respectivement de (88.48%, 80.6%, 108.20%). Dans la deuxième zone on observe une stabilisation dans les critères de rugosité qui se traduisent par une stabilité du système usinant. L'augmentation de la vitesse de coupe de 157 à 314 (m/min) fait diminuer les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ , et  $R_z$ ) respectivement de (20.53%, 24.12%, 25.75%)



**Fig. III-5:** Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité.  $f_z = 0,16\text{mm/dent}$  ;  $a_p = 0,3\text{mm}$



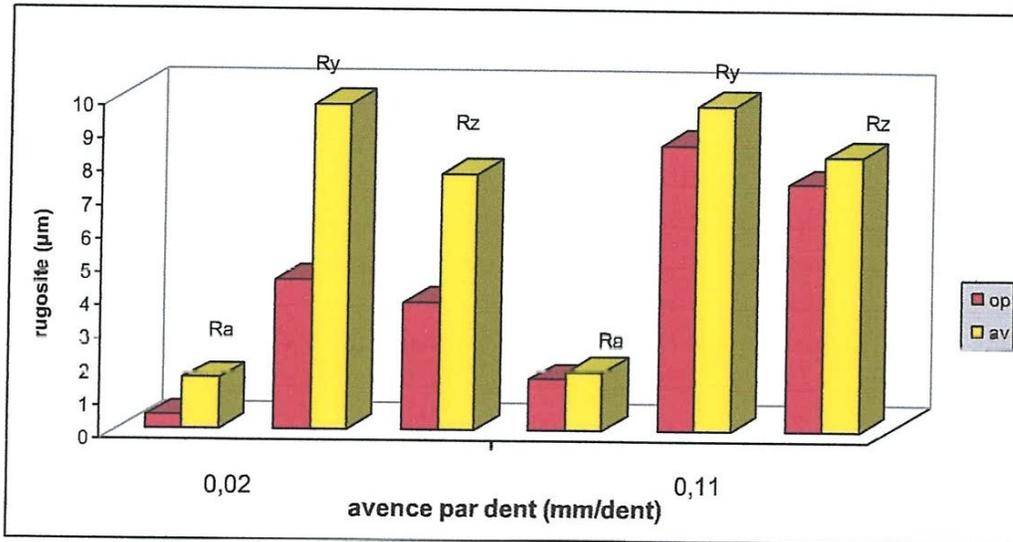
**Fig. III-6** topographie de la surface usinée pour : a)  $V_c=19.78$  (m/min), b)  $V_c=157$  (m/min) et  
c)  $V_c=314$  (m/min)

### III-2-2- Influence du mode d'usinage sur la rugosité

Les figures (III-7 à III-9) illustrent l'évolution de la rugosité de la surface usinée de l'acier XC42 en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$  et  $f_z$ ), et cela pour deux modes d'usinage (le fraisage en opposition et le fraisage en avalant). L'analyse de résultat montre une augmentation de la rugosité avec l'augmentation de l'avance par dent et la profondeur de passe et son amélioration avec la croissance de la vitesse de coupe. Ces figures montrent aussi clairement que le fraisage en

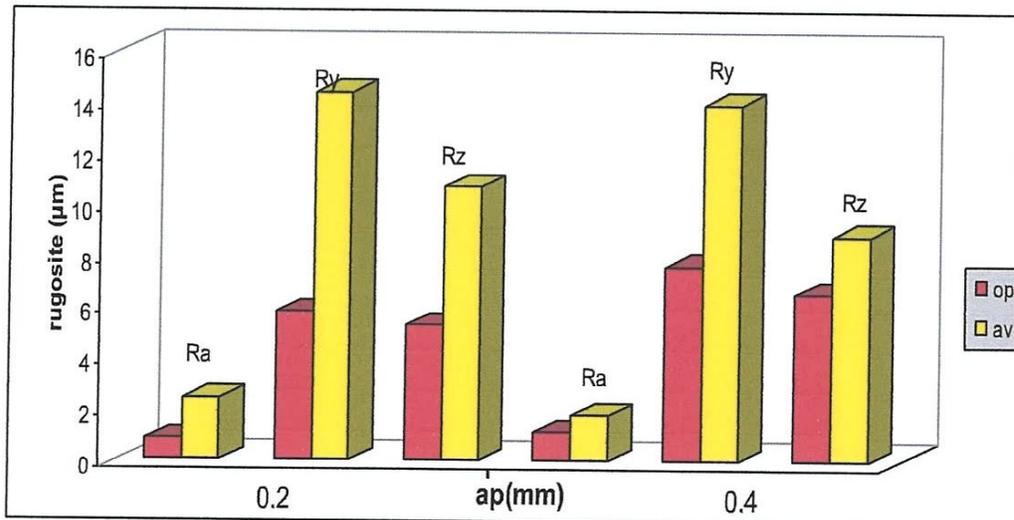
opposition donne des résultats d'état de surface meilleurs que le fraisage en avalant et cela pour toutes les conditions de coupe utilisées.

**III-2-2-1- Influence de l'avance par dent sur la rugosité**



**Fig. III-7 :** Effet du mode d'usinage sur la rugosité.  $V_c=222$  m/min ;  $a_p=0,3$ mm.

**III-2-2-2- Influence de la profondeur de passe sur la rugosité**



**Fig. III-8 :** Effet du mode d'usinage sur la rugosité.  $f_z=0,02$ mm/dent ;  $V_c=222$ m/min.

III-2-2-3- Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité

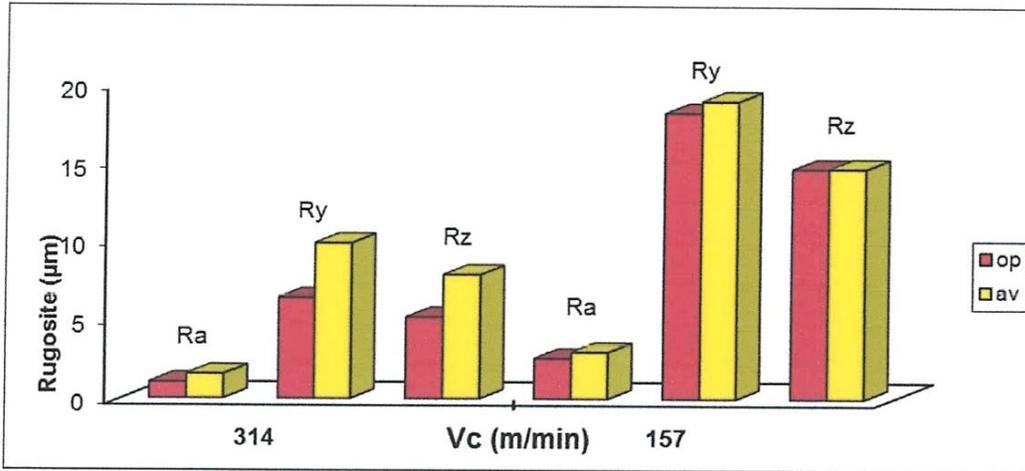


Fig. III-9 : Effet du mode d'usinage sur la rugosité.  $f_z = 0,08\text{mm/dt}$  ;  $a_p = 0,3\text{mm}$ .

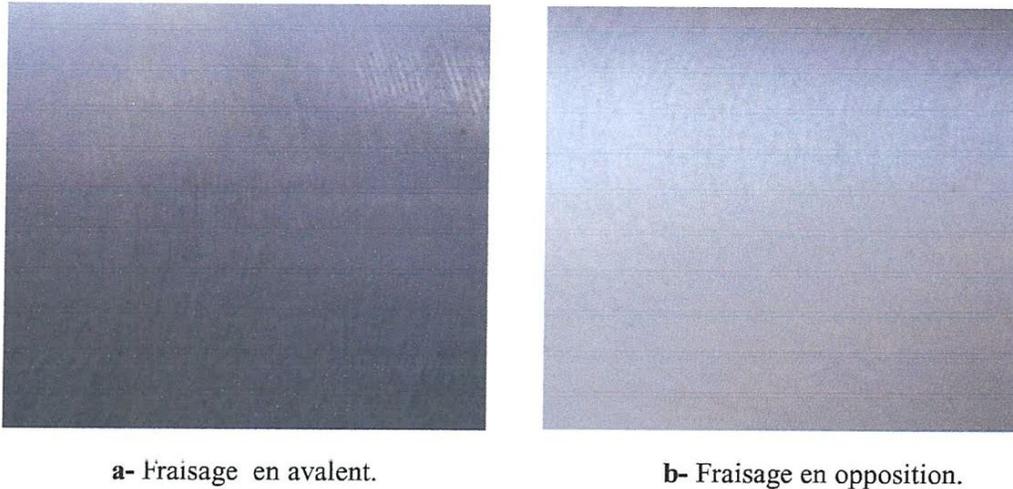


a- Fraisage en avalent.



b- Fraisage en opposition.

Fig. III-10 : topographie de la surface usinée pour : a- Fraisage en avalant. et b- Fraisage en opposition,  $V_c=39.25\text{m/min}$  ;  $a_p=0,3\text{mm}$  ;  $f_z=0,11\text{mm/dent}$ .



a- Fraisage en avalant.

b- Fraisage en opposition.

**Fig. III-11 :** Topographie de la surface usinée pour : a- Fraisage en avalant et b- Fraisage en opposition  $V_c=314\text{m/min}$  ;  $a_p=0,3\text{mm}$  ;  $f_z=0,11\text{mm/dent}$ .

D'après l'aspect des surfaces usinées dans les figures (III-10 et III-11), on observe une différence nette de la rugosité de la surface en fonction du mode d'usinage (fraisage en opposition ou fraisage en avalant). Ces figures montrent aussi l'influence de la vitesse de coupe et l'avance par dent sur l'état de surface.

### III-2-3- Influence de l'arrosage sur la rugosité

Les figures (III-12 à III-14) illustrent l'évolution de la rugosité de la surface usinée en fonction des paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f_z$ ) pour le fraisage avec lubrification et sans lubrification.

#### III-2-3-1 Influence de l'avance par dent sur la rugosité

La figure (III-12) illustre l'évolution des différents critères de la rugosité de surface usinée de l'acier XC42 en fonction de l'avance par dent. Il ressort d'une manière générale que l'usinage avec lubrification donne des résultats meilleurs que l'usinage à sec. A titre d'exemple pour une avance par dent de 0.02 (mm/dent), on remarque une augmentation des critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) de (14.85%, 0.68%, 37.04%) respectivement. Cela est dû au fluide d'arrosage qui a permis le refroidissement du couple outil matière et l'évacuation du copeau enlevé en dehors de la zone de coupe et aussi la diminution du frottement.

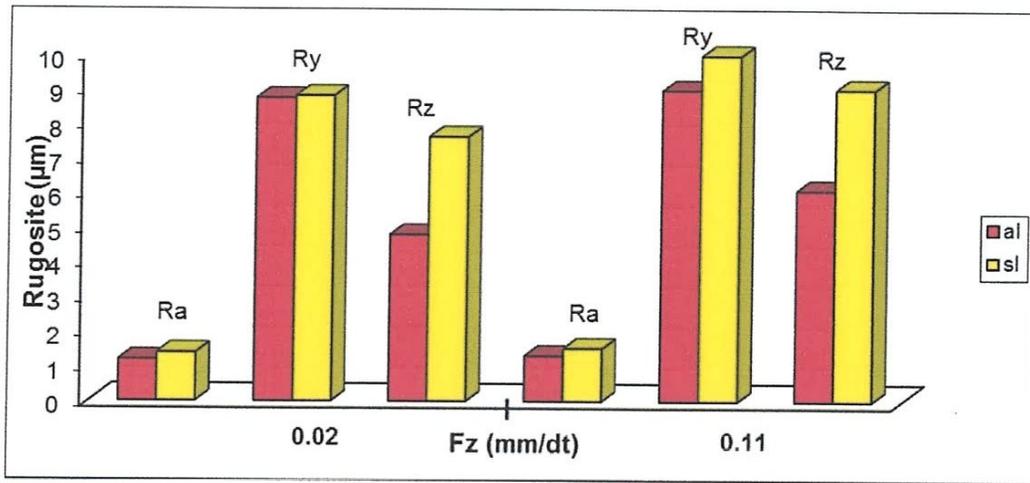


Fig. III-12 : Effet de l'arrosage sur la rugosité  $V_c = 222\text{m/min}$  ;  $a_p = 0,3\text{mm}$ .

\* al : Avec lubrification,      sl : Sans lubrification,

### III-2-3-2 Influence de la profondeur de passe sur la rugosité

La figure (III-13) illustre l'évolution des différents critères de la rugosité de la surface usinée en fonction de la profondeur de passe. Pour une profondeur de passe de 0.2 (mm), on remarque l'augmentation dans les critères de rugosité (Ra, Ry et Rz) de (54.85%, 7.5%, 26%).

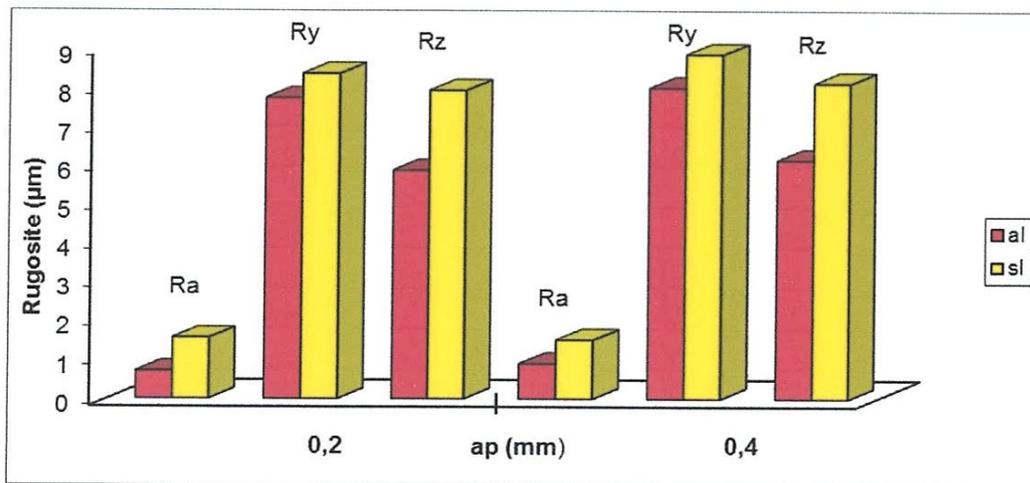


Fig. III-13: Effet de l'arrosage sur la rugosité  $V_c = 222\text{m/min}$  ;  $f_z = 0,02\text{mm/dent}$ .

### III-2-3-3 - Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité

La figure (III-14) illustre l'évolution des différents critères de la rugosité de la surface usinée de l'acier XC42 en fonction de la vitesse de coupe. Pour une vitesse de coupe de 157 (m/min), on remarque l'augmentation dans les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) de (1.96%, 6.37%, 6%).

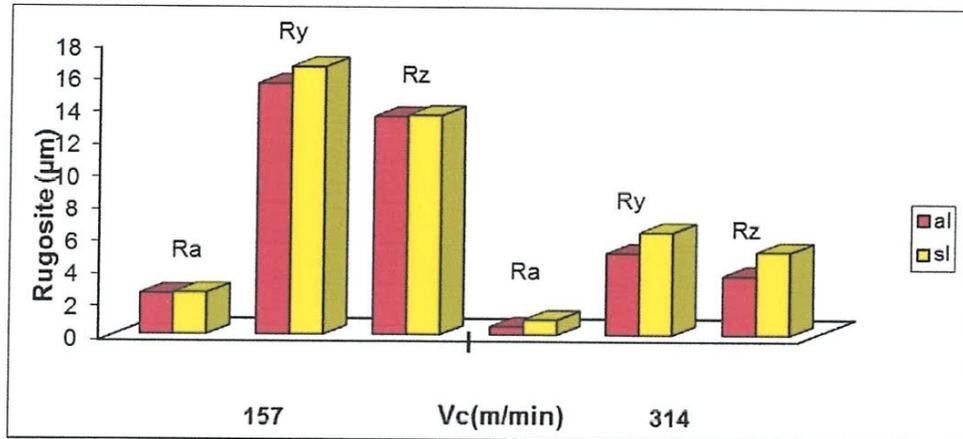


Fig. III-14 : Effet de l'arrosage sur la rugosité  $a_p = 0,3\text{mm}$ ;  $f_z = 0,08\text{mm/dent}$ .

### Conclusion

En se basant sur les résultats obtenus dans ce chapitre nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Les facteurs les plus significatifs affectant la rugosité de la surface est la vitesse de coupe, suivi par l'avance par dent et cela dans les conditions de coupe utilisées.
- la profondeur de passe n'a pas une grande influence sur l'état de surface.
- le fraisage en opposition donne des résultats d'état de surface meilleurs que le fraisage on avalant.
- l'usinage avec lubrification donne un bon résultat que l'usinage à sec avec une augmentation dans les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) respectivement de (1.96%, 6.37%, 6%) à vitesse de coupe de 157 (m/min).

# **Chapitre IV**

## **Modélisation de la rugosité et du débit de coupeau**

## IV- 1- Introduction

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques du processus de coupe en fraisage de face. Les modèles trouvés permettent d'exprimer les relations entre les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) et les paramètres technologiques étudié (rugosité et débit de coupeau).

## IV-2- Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

### IV-2-1- Résultats expérimentaux

Dans le tableau (IV-1) sont présentés les valeurs expérimentales des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ) et le débit de coupeau ( $Q$ ). Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience factorielle complet L27 lors du fraisage de face avec des plaquettes en carbure revêtu.

Essais	Factures			Critters de rugosité			Q (mm <sup>3</sup> /min)
	Vc (m/min)	f (mm/dt)	a <sub>p</sub> (mm)	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>y</sub> (μm)	R <sub>z</sub> (μm)	
1	78	0.04	0.2	2.23	13.84	12.18	730
2	78	0.04	0.4	2.29	15.12	12.22	1460
3	78	0.04	0.6	2.32	14.86	12.66	2190
4	78	0.08	0.2	2.37	12.93	12.22	1460
5	78	0.08	0.4	2.4	15.83	12.83	2920
6	78	0.08	0.6	2.42	16.05	13.09	4380
7	78	0.16	0.2	2.58	16.82	13.65	2920
8	78	0.16	0.4	2.6	18.67	14.61	5840
9	78	0.16	0.6	2.62	20.55	15.47	8760
10	157	0.04	0.2	1.5	7.89	7.47	1460
11	157	0.04	0.4	1.54	8.16	7.64	2920
12	157	0.04	0.6	1.55	8.17	7.92	4380
13	157	0.08	0.2	1.59	8.56	7.68	2920
14	157	0.08	0.4	1.6	8.57	7.74	5840
15	157	0.08	0.6	1.61	9.3	8.28	8760
16	157	0.16	0.2	1.62	9.84	7.86	5840
17	157	0.16	0.4	1.64	10.22	8.62	11680
18	157	0.16	0.6	1.65	11.04	9.38	17520
19	314	0.04	0.2	0.5	3.27	2.73	2920
20	314	0.04	0.4	0.48	3.71	3.01	5840
21	314	0.04	0.6	0.51	2.85	3.05	8760

22	314	0.08	0.2	0.55	2.92	3.81	5840
23	314	0.08	0.4	0.6	3.32	3.14	11680
24	314	0.08	0.6	0.62	3.77	3.3	17520
25	314	0.16	0.2	0.65	3.7	3.36	11680
26	314	0.16	0.4	0.76	3.35	3.74	23360
27	314	0.16	0.6	0.82	4.83	4.17	35040

**Tableau. IV-1 :** Résultats des expériences PFC (27 essais).

#### IV-2-2- Méthode appliquée

La méthode appliquée pour la détermination des modèles mathématiques est la méthodologie de surface de réponse (MSR), en utilisant un logiciel statistique Minitab 16. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité et le débit de coupe. Pour cela on doit choisir un niveau de signification  $\alpha$  fixé à ( $\alpha = 0.05$ ).

#### IV-2-3- Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère Ra

Le tableau (IV-2) expose les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour le critère Ra. Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur le critère Ra. Dans le tableau (IV-3), sont exposés les coefficients de régressions pour le modèle mathématique estimé.

Source	DL	SomCar séq	ajust	CM	F	P	cont. %
Régression	6	14.8049	14.8049	2.46749	139.873	0.000000	
Vc	1	14.5601	1.3953	1.39533	79.096	0.000000	96.057
f	1	0.2268	0.0201	0.02014	1.142	0.297994	1.496
ap	1	0.0156	0.0001	0.00005	0.003	0.957450	0.102
Vc*f	1	0.0008	0.0008	0.00084	0.048	0.829171	0.005
Vc*ap	1	0.0007	0.0007	0.00073	0.041	0.840768	0.004
f*ap	1	0.0008	0.0008	0.00084	0.048	0.829507	0.005
Erreur	20	0.3528	0.3528	0.01764			2.327
Total	26	15.1577					

R carré = 97.67 %      R carré (ajust) = 96.97 %

**Tab. IV-2:** Analyse de variance (ANOVA) pour le critère Ra.

L'analyse de la variance (ANOVA) du critère de rugosité (Ra) indiquée au tableau (IV.1), montre que la vitesse de coupe (Vc) est le facteur le plus influent sur la rugosité de surface car sa contribution est de 96,05% suivi par l'avance (f) avec une contribution

1.5% et en dernier lieu la profondeur de passe ( $a_p$ ) avec une contribution négligeable 0,10%. D'autre part nous pouvons déterminer l'influence des facteurs principaux ainsi que les interactions.

Coefficients				
Terme	Coeff	Coef ErT	T	P
Constante	2,71103	0,21086	12,8570	0,000
Vc	-0,00751	0,00084	-8,8936	0,000
f	1,77246	1,65873	1,0686	0,298
$a_p$	0,02389	0,44220	0,0540	0,957
Vc*f	-0,00114	0,00522	-0,2186	0,829
Vc* $a_p$	0,00032	0,00160	0,2035	0,841
f* $a_p$	0,68452	3,13756	0,2182	0,830

**Tab. IV-3:** Les Coefficients de régressions pour le critère Ra.

❖ L'équation de régression pour le critère Ra est:

$$Ra = 2.711 - 0.007 Vc + 1.772 f + 0.024 a_p - 0.001 Vc*f + 0.0003 Vc*a_p + 0.684 f*a_p \quad (IV-1)$$

#### IV-2-3-1 Diagrammes de surfaces 3D et Graphiques de Contour

La figure (IV.1) présente les diagrammes (3D) de la rugosité de surface ( $R_a$ ) en fonction des paramètres de régime de coupe. Cette figure montre que la pente de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité ( $R_a$ ) suivi par l'avance ( $f$ ) et en dernier lieu par la profondeur de passe ( $a_p$ ). D'autre part les graphes de contour figure (IV.2) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas  $R_a$ ) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

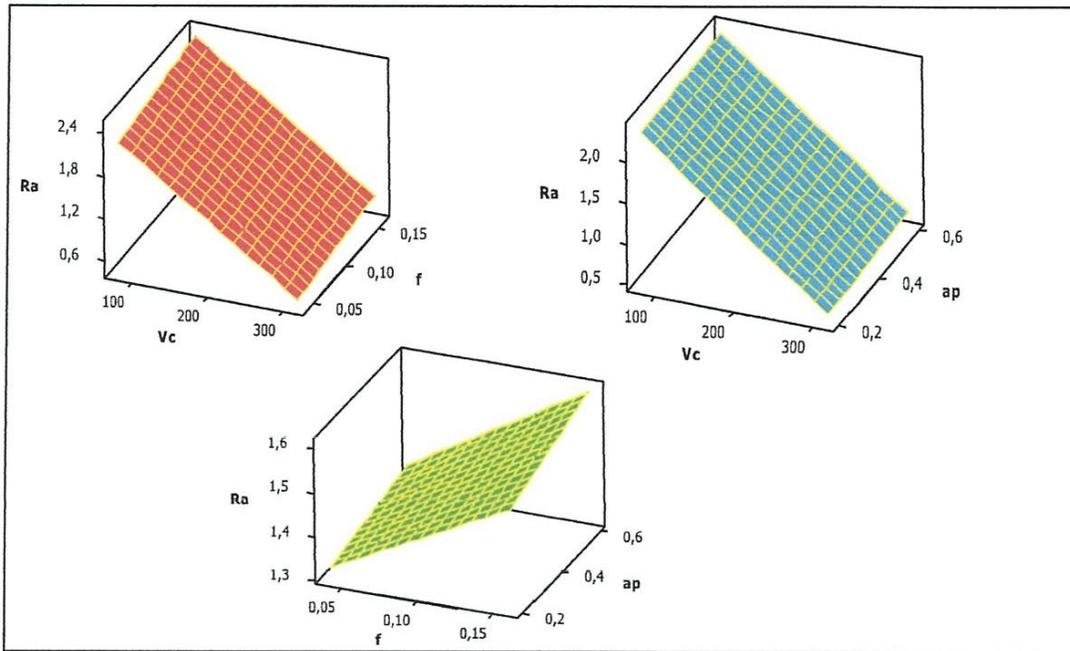


Fig IV-1- Diagrammes de surfaces de Ra en fonction de (Vc. fz. ap).

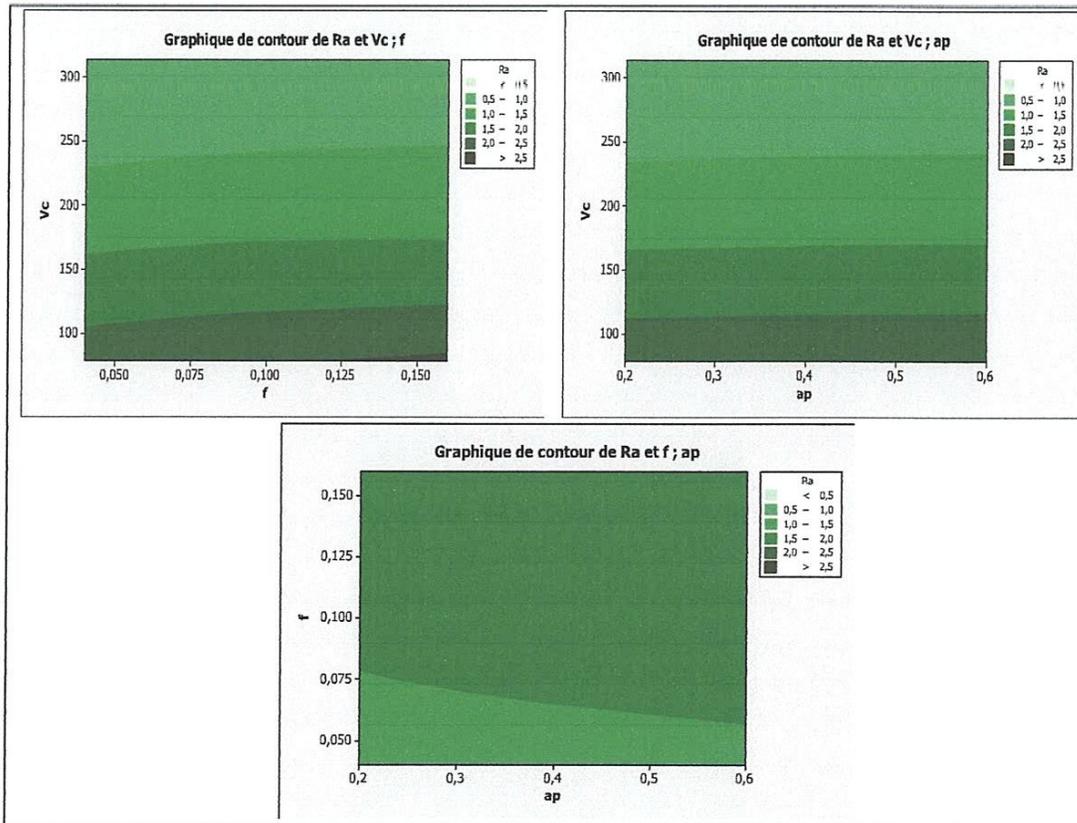
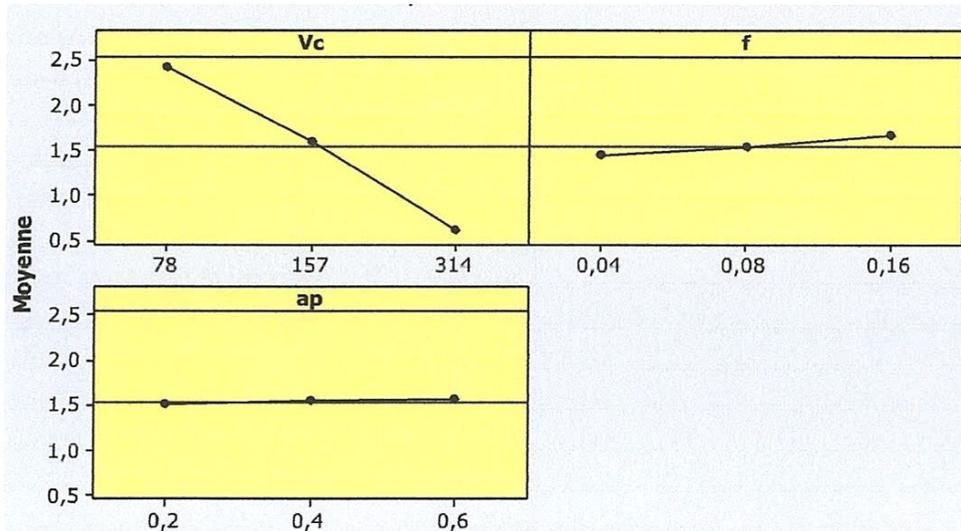


Fig. IV-2: Graphique de Contour de Ra en fonction de Vc ;fz ;ap

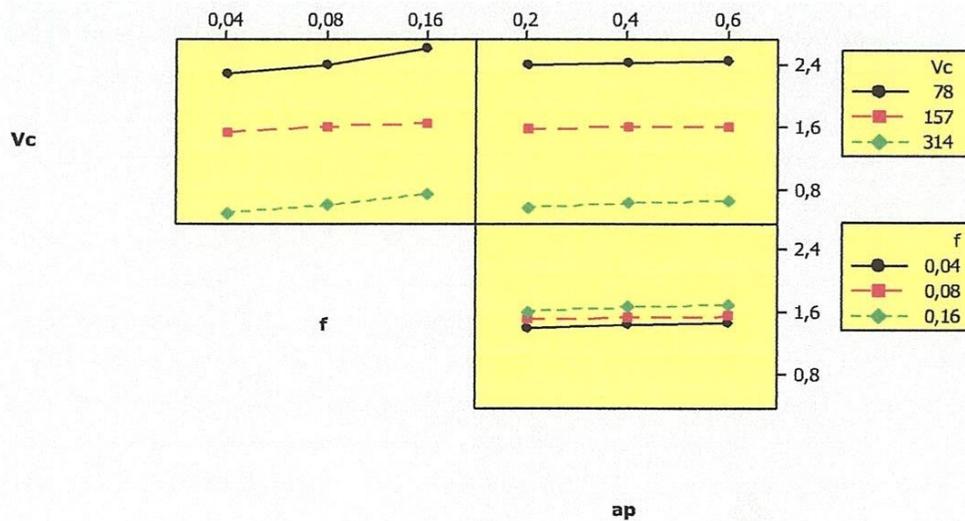
**IV-2-3-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction**

La figure (IV.3) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité (Ra). On remarque que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ra) car il a la plus grande pente suivi par l'avance (f) et en dernier lieu la profondeur de passe (ap). Sur le graphe l'influence de la profondeur de passe (ap) est presque inexistante.



**Fig. IV-3-** Graphique des effets principaux pour Ra.

La figure (IV-4) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la rugosité Ra. Cette figure ne montre aucune interaction entre tous les variables.



**Fig. IV-4 :** Diagramme d'interaction pour Ra.

#### IV-2-3-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure (IV.5) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la rugosité (Ra). Ces courbes permettent de comparer les valeurs prédites aux valeurs expérimentales dans le but d'évaluer l'ajustement du modèle. Le tableau (IV.4) montre le pourcentage d'erreur pour les 27 essais réalisés. L'analyse de la figure (IV.5) montre la bonne corrélation entre les deux courbes.

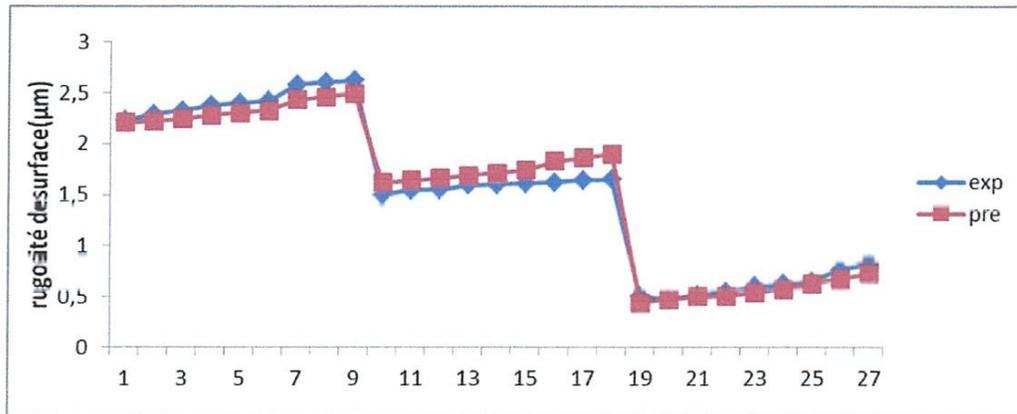


Fig. IV-5: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Ra

Pour déterminer le pourcentage d'erreur, on applique la formule suivante:

$$\left| \frac{\text{Valeur Théorique} - \text{Valeur Expérimentale}}{\text{Valeur Expérimentale}} \right| \times 100 \quad (\text{IV.2})$$

N essais	Ra mesurés	Ra prédites	erreur %	N essais	Ra mesurés	Ra prédites	erreur %
1	2,23	2,20	0,99	15	1,61	1,7	7,89
2	2,29	2,22	2,91	16	1,62	1,82	12,57
3	2,32	2,23	3,51	17	1,64	1,86	13,45
4	2,37	2,28	3,76	18	1,65	1,89	14,99
5	2,4	2,30	4,10	19	0,5	0,44	11,99
6	2,42	2,32	4,037	20	0,48	0,47	1,93
7	2,58	2,42	5,95	21	0,51	0,50	1,69
8	2,6	2,45	5,45	22	0,55	0,50	8,71
9	2,62	2,48	4,96	23	0,6	0,53	10,29
10	1,5	1,61	7,74	24	0,62	0,57	7,36
11	1,54	1,63	6,27	25	0,65	0,62	3,67
12	1,55	1,65	6,9	26	0,76	0,67	11,41
13	1,59	1,68	5,99	27	0,82	0,72	12,15
14	1,6	1,71	6,95				

Tab. IV-4 Le pourcentage d'erreur pour les 27 essais réalisés.

#### IV-2-4 Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère Ry

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour le critère Ry sont exposés dans le tableau (IV-5). Dans le tableau (IV-6), sont exposés les coefficients de régression pour le modèle mathématique estimé.

Source	DL	SomCar séq	ajust	CM	F	P	cont%
Régression	6	715.982	715.982	119.330	45.3023	0.000000	
Vc	1	666.773	24.694	24.694	9.3746	0.006155	86.75
f	1	27.724	5.458	5.458	2.0719	0.165505	3.524
ap	1	7.540	1.277	1.277	0.4848	0.494278	0.958
Vc*f	1	9.344	9.344	9.344	3.5474	0.074264	1.187
Vc*ap	1	2.668	2.668	2.668	1.0128	0.326246	0.339
f*ap	1	1.933	1.933	1.933	0.7338	0.401804	0.245
Erreur	20	52.682	52.682	2.634			6.696
Total	26	768.663					

R carré = 93.15 %                      R carré (ajust) = 91.09 %

Tab. IV-5: Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère Ry.

Le tableau IV-5 montre l'analyse (ANOVA) du critère de rugosité (Ry). La vitesse de coupe (Vc) est le facteur le plus significatif avec une contribution de 86.75% suivi par l'avance (f) avec une contribution 3.52% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec une contribution presque inexistante de 0,95%. Les interactions (Vc\*f, Vc\*ap et f\*ap) n'ont aucune influence sur (Ry).

Coefficients				
Terme	Coeff	Coef ErT	T	P
Constante	2,71103	0,21086	12,8570	0,000
Vc	-0,00751	0,00084	-8,8936	0,000
f	1,77246	1,65873	1,0686	0,298
ap	0,02389	0,44220	0,0540	0,957
Vc*f	-0,00114	0,00522	-0,2186	0,829
Vc*ap	0,00032	0,00160	0,2035	0,841
f*ap	0,68452	3,13756	0,2182	0,830

Tab. IV-6: Les coefficients de régressions pour le critère Ry.

❖ L'équation de régression pour la rugosité Ry est:

$$Ry = 13.37 - 0.031 Vc + 29.17 f + 3.762 ap - 0.120 Vc*f - 0.019Vc*ap + 32.842 f*ap \quad (IV.3)$$

#### IV-2-4-1 Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour

Les graphiques 3D de la rugosité de surface ( $R_y$ ) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée dans la figure (IV.6). Cette figure montre que l'augmentation de vitesse de coupe fait diminuer la rugosité  $R_y$ , par contre l'augmentation de l'avance ( $f$ ) augmenté la rugosité de surface  $R_y$ . La profondeur de passe a une faible influence. Par conséquent la meilleure rugosité est obtenue par l'application d'une faible vitesse d'avance et d'une grande vitesse de coupe. Les graphes de contour sont représentés dans la figure (IV.7) qui permet de visualiser la surface de réponse et d'établir les valeurs de réponse.

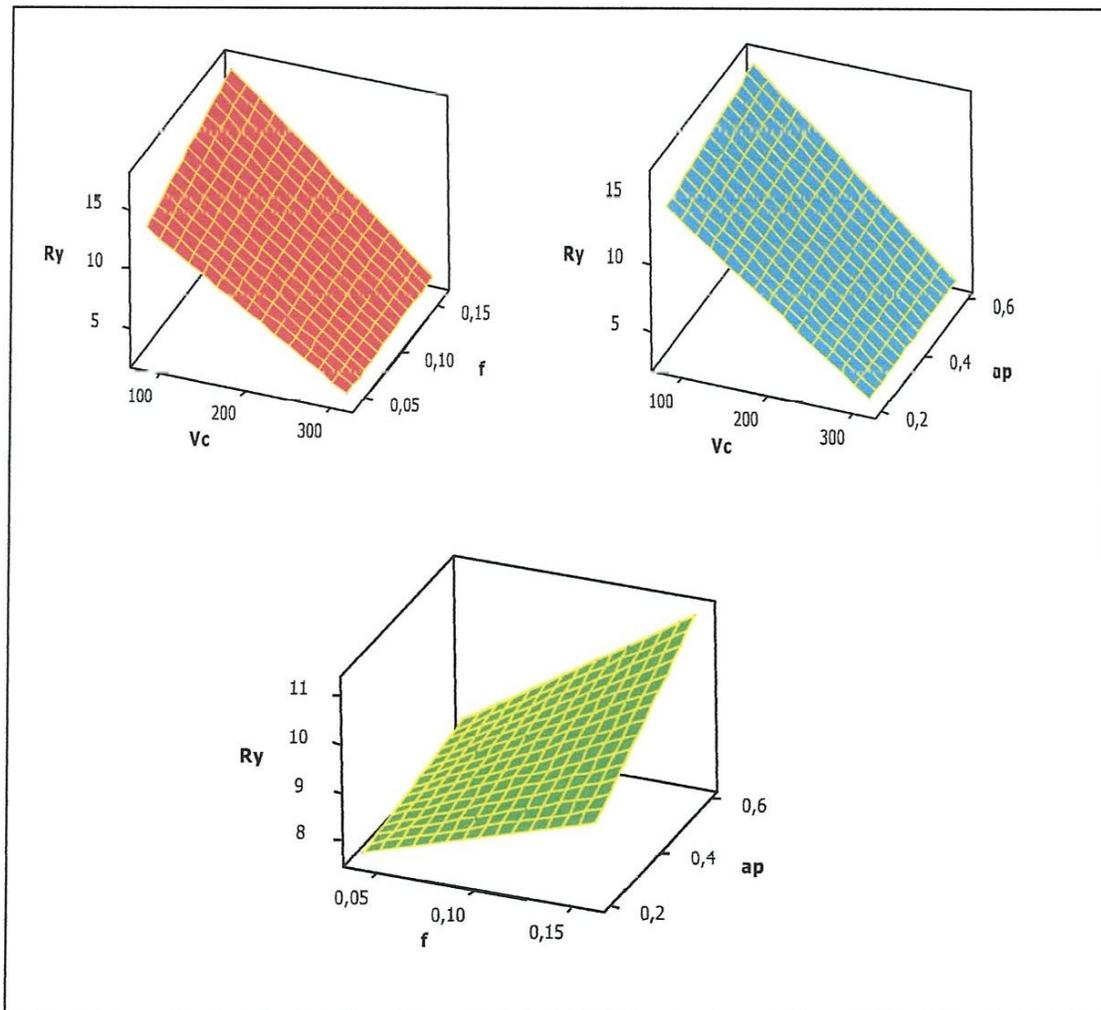


Fig-IV-6- Diagrammes de surfaces de  $R_y$  en fonction de ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ).

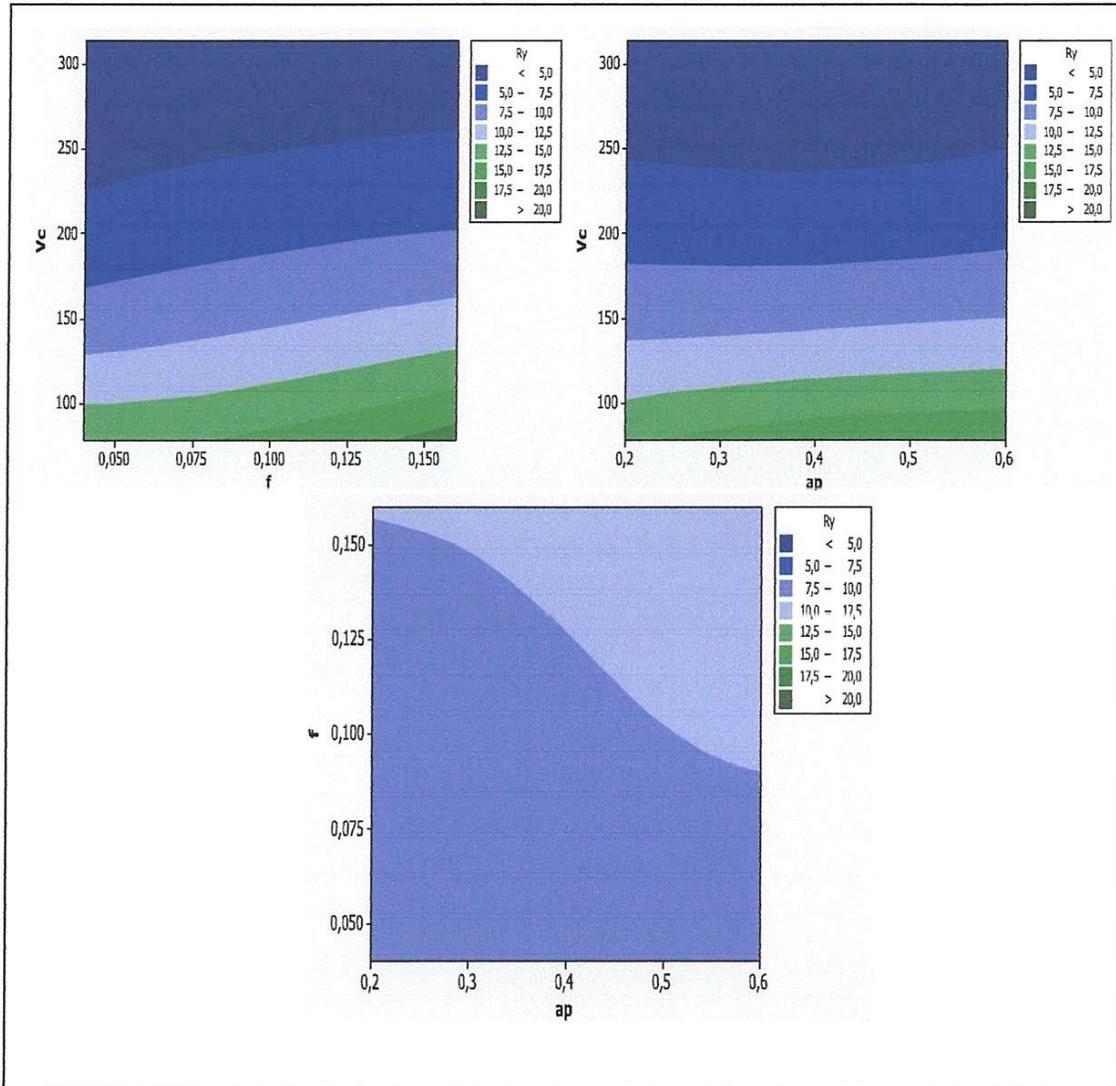


Fig. IV-7 : Graphique de Contour de Ry en fonction de Vc; fz; ap

#### IV-2-4-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La figure (IV.8) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité (Ry). On remarque que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ry) car il a la plus grande pente. Suivi par l'avance (f) et en dernier lieu la profondeur de passe (ap).

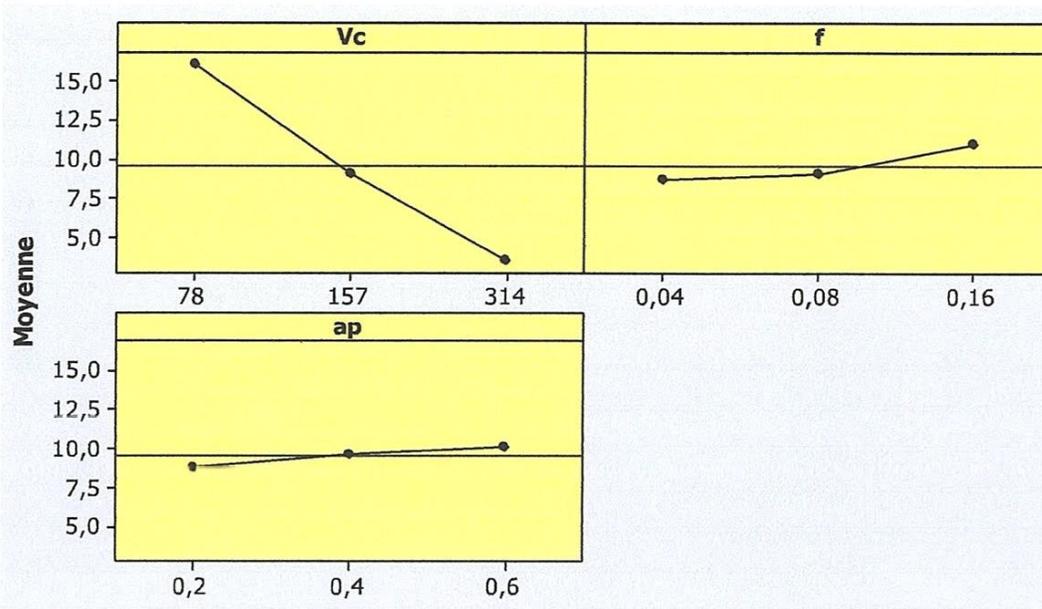


Fig. IV-8- Graphique des effets principaux pour Ry.

La figure (IV-9) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la rugosité Ry. Cette figure ne montre aucune interaction entre les variables, sauf dans le cas de f et Vc.

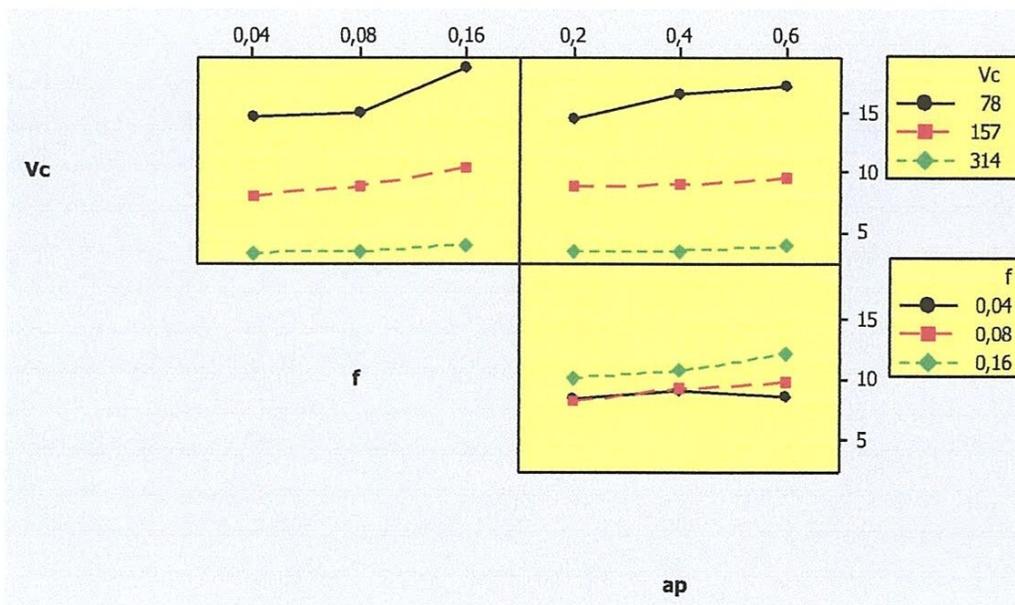


Fig. IV-9 : Diagramme d'interaction pour Ry.

#### IV-2-4-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la rugosité ( $R_y$ ) sont représentée dans la figure (IV.10). Le tableau (IV.7) montre le pourcentage d'erreur pour les 27 essais réalisés.

L'analyse de la figure (IV.10) montre la bonne corrélation entre les deux courbes.

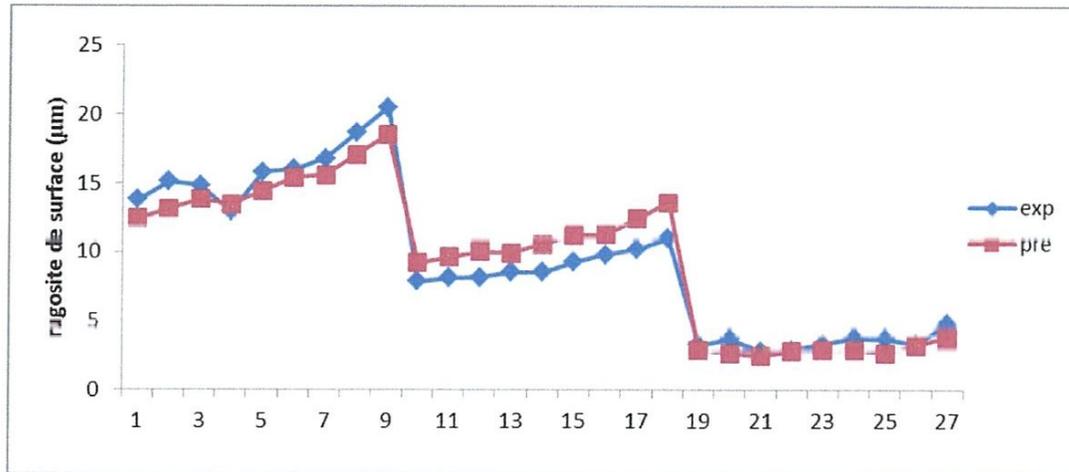


Fig. IV-10- Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du  $R_y$

N essais	$R_y$ mesurés	$R_y$ prédites	erreur %	N essais	$R_y$ mesurés	$R_y$ prédites	erreur %
1	13,84	12,41	10,29	15	9,3	11,22	20,72
2	15,12	13,12	13,20	16	9,84	11,25	14,36
3	14,86	13,83	6,91	17	10,22	12,44	21,72
4	12,93	13,46	4,17	18	11,04	13,62	23,43
5	15,83	14,44	8,77	19	3,27	2,89	11,38
6	16,05	15,41	3,96	20	3,71	2,68	27,75
7	16,82	15,57	7,37	21	2,85	2,46	13,57
8	18,67	17,07	8,53	22	2,92	2,81	3,51
9	20,55	18,57	9,61	23	3,32	2,86	13,76
10	7,89	9,22	16,97	24	3,77	2,90	22,85
11	8,16	9,62	17,99	25	3,7	2,65	28,19
12	8,17	10,02	22,72	26	3,35	3,22	3,64
13	8,56	9,90	15,69	27	4,83	3,79	21,35
14	8,57	10,56	23,28				

Tab. IV-7 Le pourcentage d'erreur pour les 27 essais réalisés.

#### IV-2-5 Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère Rz

Le tableau (IV-8) montre les résultats de l'analyse (ANOVA) pour le critère Rz. Le tableau (IV-9), expose les coefficients de régressions pour le modèle mathématique estimé.

SomCar							
Source	DL	SomCar séq	ajust	CM	F	P	cont%
Régression	6	430.403	430.403	71.7338	66.5546	0.000000	
Vc	1	416.738	25.235	25.2347	23.4128	0.000100	92.21
f	1	8.502	0.797	0.7966	0.7391	0.400144	1.88
ap	1	2.247	0.176	0.1756	0.1629	0.690773	0.49
Vc*f	1	1.462	1.462	1.4619	1.3563	0.257882	0.32
Vc*ap	1	0.586	0.586	0.5856	0.5433	0.469618	0.12
f*ap	1	0.868	0.868	0.8680	0.8054	0.380172	0.19
Erreur	20	21.556	21.556	1.0778			4.76
Total	26	451.959					
R carré = 95.23 %		R carré (ajust) = 93.80 %					

Tab. IV-8: Analyse de variance (ANOVA) pour le critère Rz.

L'analyse de la variance (ANOVA) du critère de rugosité (Rz) montre que la vitesse de coupe (Vc) et le facteur le plus influent avec une contribution de 92.21% suivie par l'avance (f) avec une contribution 1.88% et en dernier lieu par la profondeur de passe (ap) avec une contribution presque inexistante de 0,49%.

Coefficients					
Terme	Coef	Coef ErT	T	P	
Constante	13,1258	1,6482	7,96380	0,000	
Vc	-0,0319	0,0066	-4,83867	0,000	
f	11,1464	12,9655	0,85970	0,400	
ap	1,3951	3,4565	0,40362	0,691	
Vc*f	-0,0476	0,0408	-1,16461	0,258	
Vc*ap	-0,0092	0,0125	-0,73710	0,470	
f*ap	22,0089	24,5247	0,89742	0,380	

Tab. IV-9: Les Coefficients de régressions pour le critère Rz.

❖ L'équation de régression pour le critère Rz est:

$$Rz = 13.125 - 0.03193 Vc + 11.1464 f + 1.395 ap - 0.047 Vc*f - 0.009 Vc*ap + 22.008 f*ap \quad (IV-4)$$

#### IV-2-5-1 Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour

Les surfaces de réponse (3D) de la rugosité ( $R_z$ ) en fonction des paramètres de coupe sont représentées dans la figure (IV.11). La vitesse de coupe ( $V_c$ ) présente une pente supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité ( $R_z$ ) suivi par l'avance ( $f$ ) et en dernier lieu par la profondeur de passe ( $ap$ ). D'autre part la figure (IV.12) montre les graphes de contour.

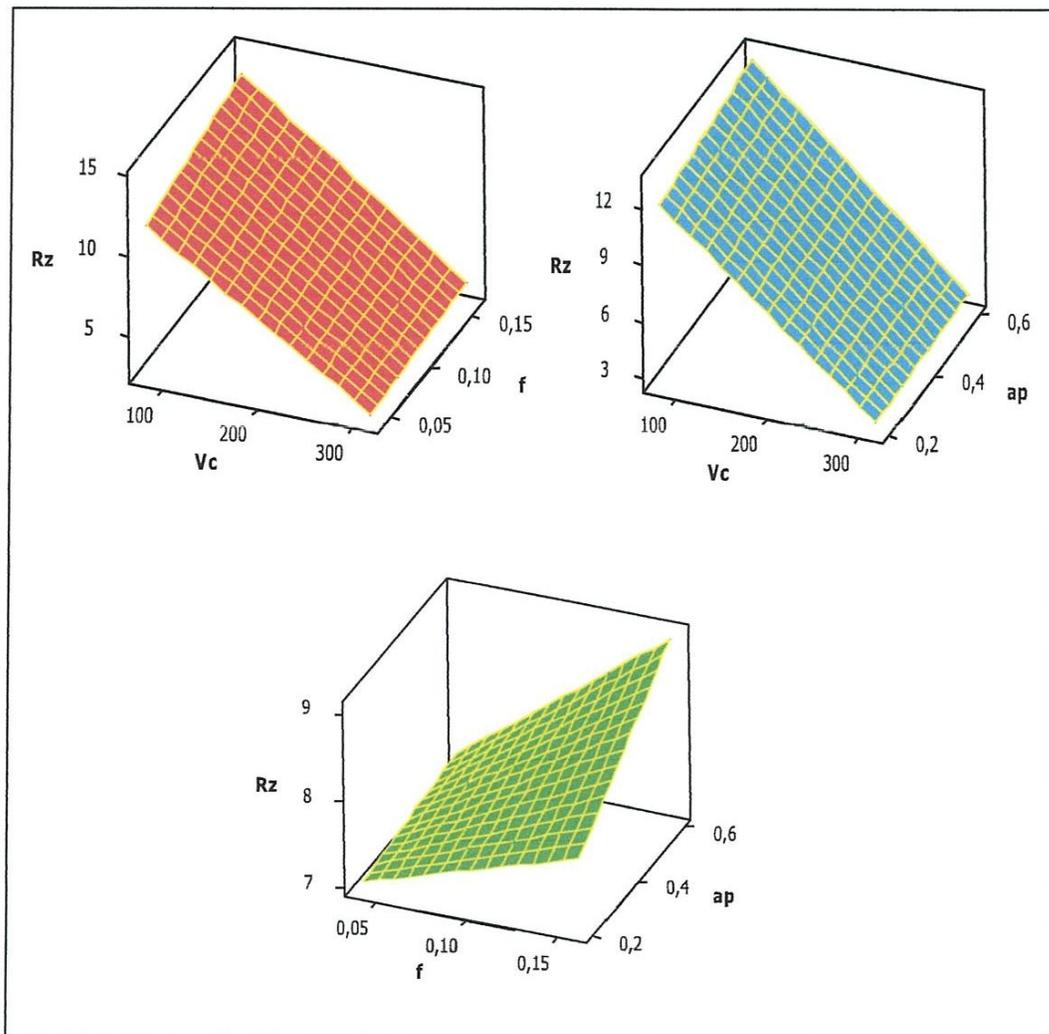


Fig. IV.11. Diagrammes de surfaces de  $R_z$  en fonction de ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ).

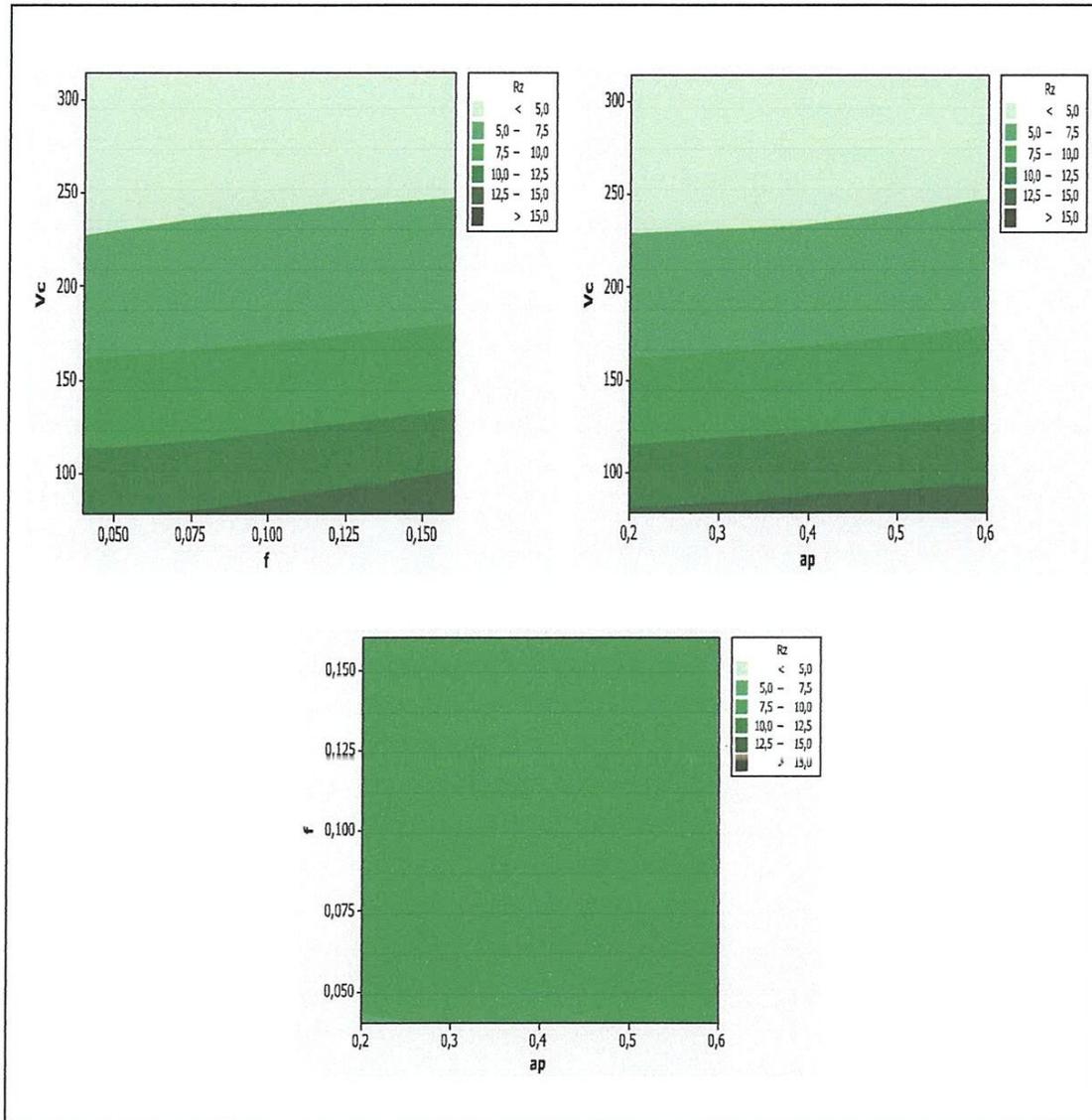


Fig. IV-12 : Graphique de Contour de Rz en fonction de Vc ;fz ;ap

#### IV-2-5-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La figure (IV.13) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité (Rz). On remarque que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur la rugosité (Rz) car il a la plus grande pente, suivie par l'avance (f) et en dernier lieu par la profondeur de passe (ap).

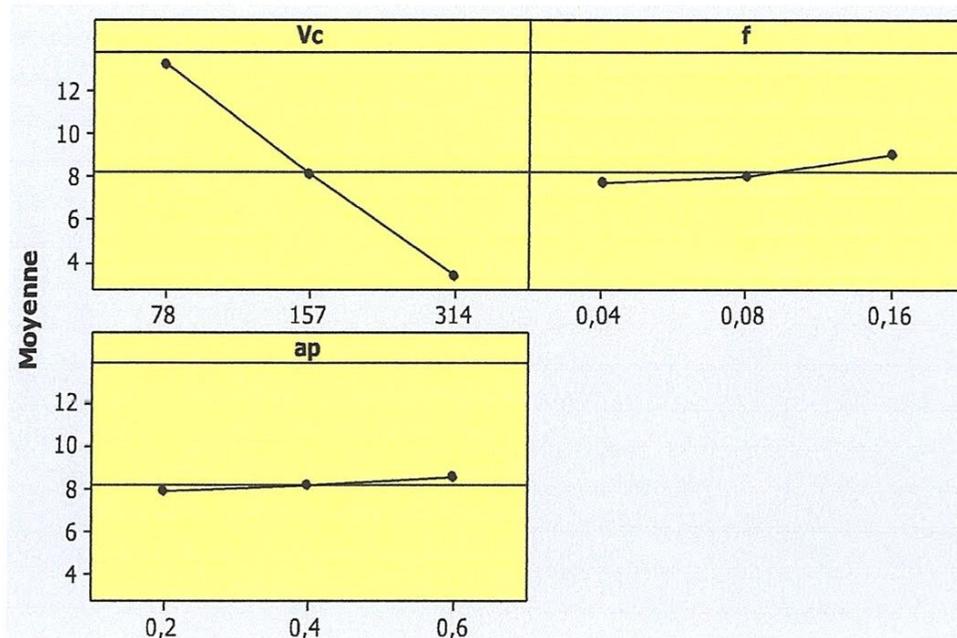


Fig. IV-13- Graphique des effets principaux pour Rz.

La figure (IV-14) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la Rugosité Rz.

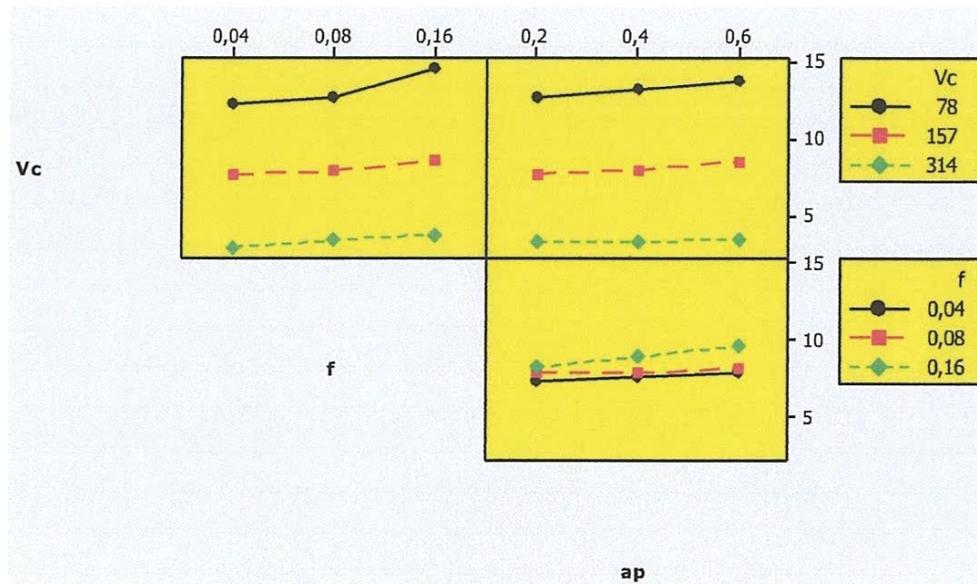


Fig. IV-14 : Diagramme d'interaction pour Rz.

#### IV-2-5-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure(IV.15) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la rugosité (Rz). L'analyse de la figure (IV.15) montre la bonne corrélation entre les deux courbes. Le tableau (IV.10) montre le pourcentage d'erreur pour les 27 essais réalisés.

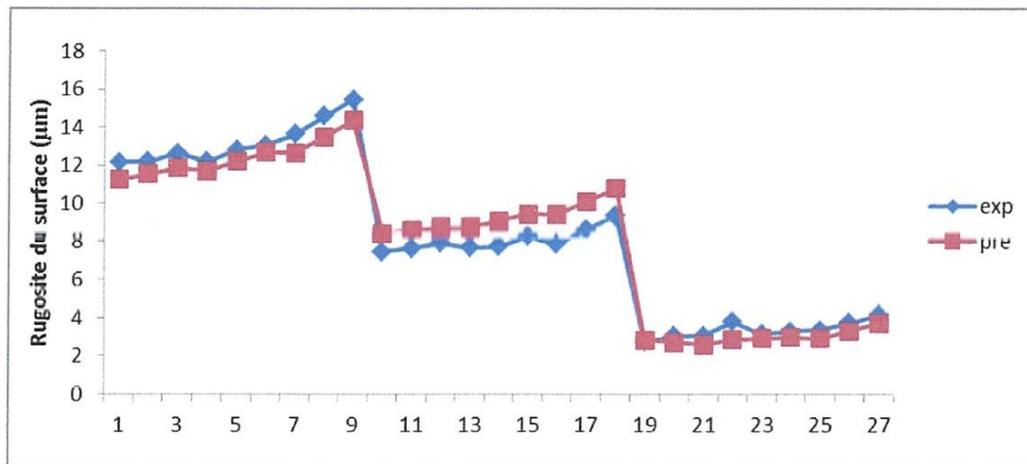


Fig. IV-15- Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Rz

N essais	Rz mesures	Rz prédites	erreur %	N essais	Rz mesures	Rz prédites	erreur %
1	13,84	12,41	10,29	15	9,3	11,22	20,72
2	15,12	13,12	13,20	16	9,84	11,25	14,36
3	14,86	13,83	6,91	17	10,22	12,44	21,72
4	12,93	13,46	4,17	18	11,04	13,62	23,43
5	15,83	14,44	8,77	19	3,27	2,89	11,38
6	16,05	15,41	3,96	20	3,71	2,68	27,75
7	16,82	15,57	7,37	21	2,85	2,46	13,57
8	18,67	17,07	8,53	22	2,92	2,81	3,51
9	20,55	18,57	9,61	23	3,32	2,86	13,76
10	7,89	9,22	16,97	24	3,77	2,90	22,85
11	8,16	9,62	17,99	25	3,7	2,65	28,19
12	8,17	10,02	22,72	26	3,35	3,22	3,64
13	8,56	9,90	15,69	27	4,83	3,79	21,35
14	8,57	10,56	23,28				

Tab. IV-10 Le pourcentage d'erreur pour les 27 essais réalisés.

#### IV-2-6 Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de coupeau Q

Le tableau (IV-11) présent les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour le débit de coupeau Q. Dans le tableau (IV-12), sont exposés les coefficients de régression pour le modèle mathématique estimé.

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM	F	P	cont%
Régression	6	1560921559	1560921559	260153593	224.149	0.0000000	
Vc	1	487424660	46421396	46421396	39.997	0.0000036	30.7691
f	1	487425867	46252592	46252592	39.851	0.0000037	30.7692
ap	1	284331756	35432272	35432272	30.529	0.0000208	17.9487
Vc*f	1	139264189	139264189	139264189	119.991	0.0000000	8.7900
Vc*ap	1	81237443	81237443	81237443	69.995	0.0000001	5.1281
f*ap	1	81237644	81237644	81237644	69.995	0.0000001	5.1282
Erreur	20	23212508	23212508	1160625			1.4653
Total	26	15841340					
R carré = 98.53 %		R carré (ajust) = 98.10 %					

Tab. IV-11: Analyse de variance (ANOVA) pour le débit de coupeau Q.

L'analyse de la variance (ANOVA) du débit de coupeau Q montre que la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) sont les facteurs les plus significatifs sur le débit de coupeau Q car sa contribution est de 30.76% pour les deux paramètres, suivie par la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 17%. Les interactions ont tous un effet significatif sur le débit de coupeau.

Coefficients					
Terme	Coeff	Coef ErT	T	P	
Constante	7927	1710,3	4,6349	0,000	
Vc	-43	6,8	-6,3243	0,000	
f	-84934	13454,3	-6,3128	0,000	
ap	-19818	3586,8	-5,5253	0,000	
Vc*f	464	42,4	10,9540	0,000	
Vc*ap	108	12,9	8,3663	0,000	
f*ap	212917	25449,4	8,3663	0,000	

Tab. IV-12: Les coefficients de régressions pour le débit de coupeau Q.

❖ L'équation de régression pour le débit de coupeau Q et la suivante :

$$Q = 7927.21 - 43.31 Vc - 84934.4 f - 19818 ap + 464.12 Vc*f + 108.295 Vc*ap + 212917 f*ap \quad (IV-5)$$

**IV-2-6-1 Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour**

La surface de réponse (3D) du débit de coupeau  $Q$  en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée dans la figure (IV.16). Cette figure montre que la pente de l'avance ( $f$ ) et la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ces facteurs ont une influence très importante sur le débit de coupeau  $Q$  suivi par la profondeur de passe ( $a_p$ ) D'autre part les graphes de contour figure (IV.17) permettent de visualiser la surface de réponse.

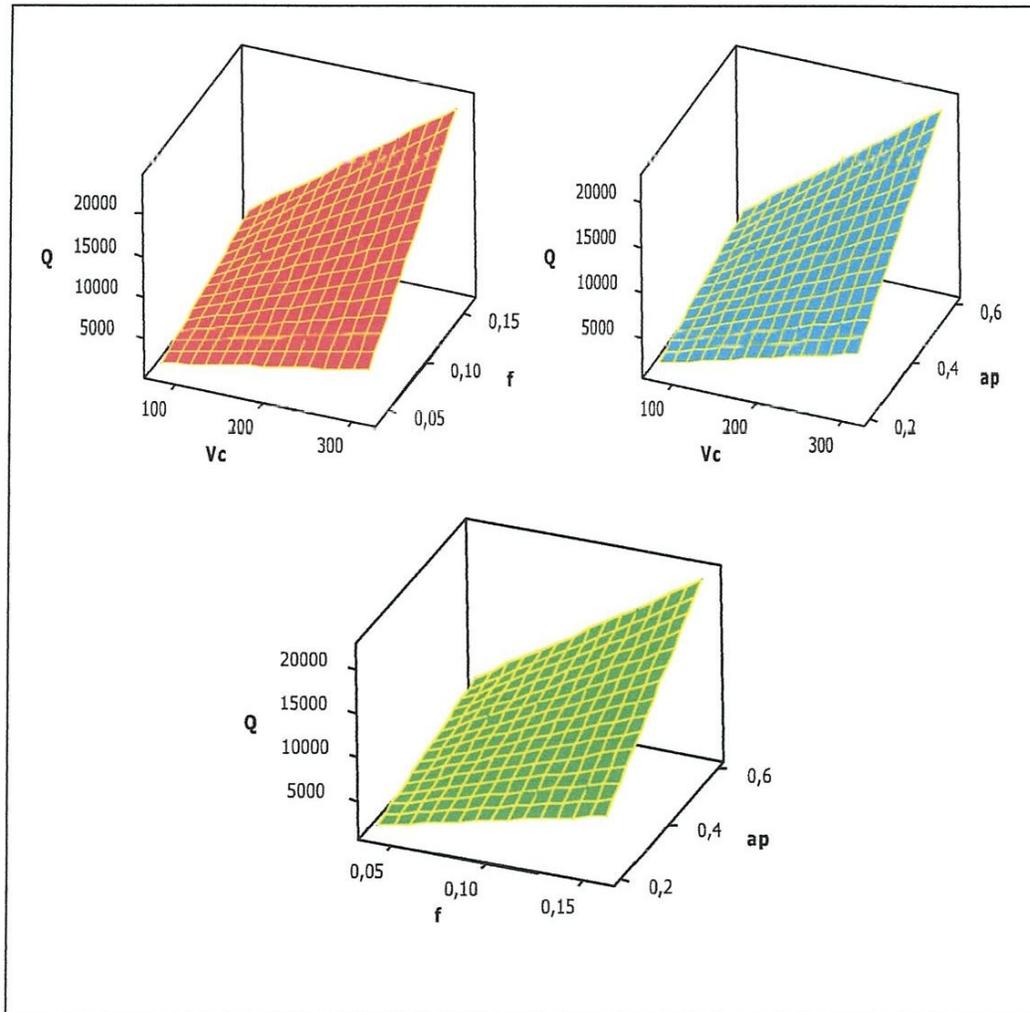


Fig-IV-16- Diagrammes de surfaces du  $Q$  en fonction de ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ).

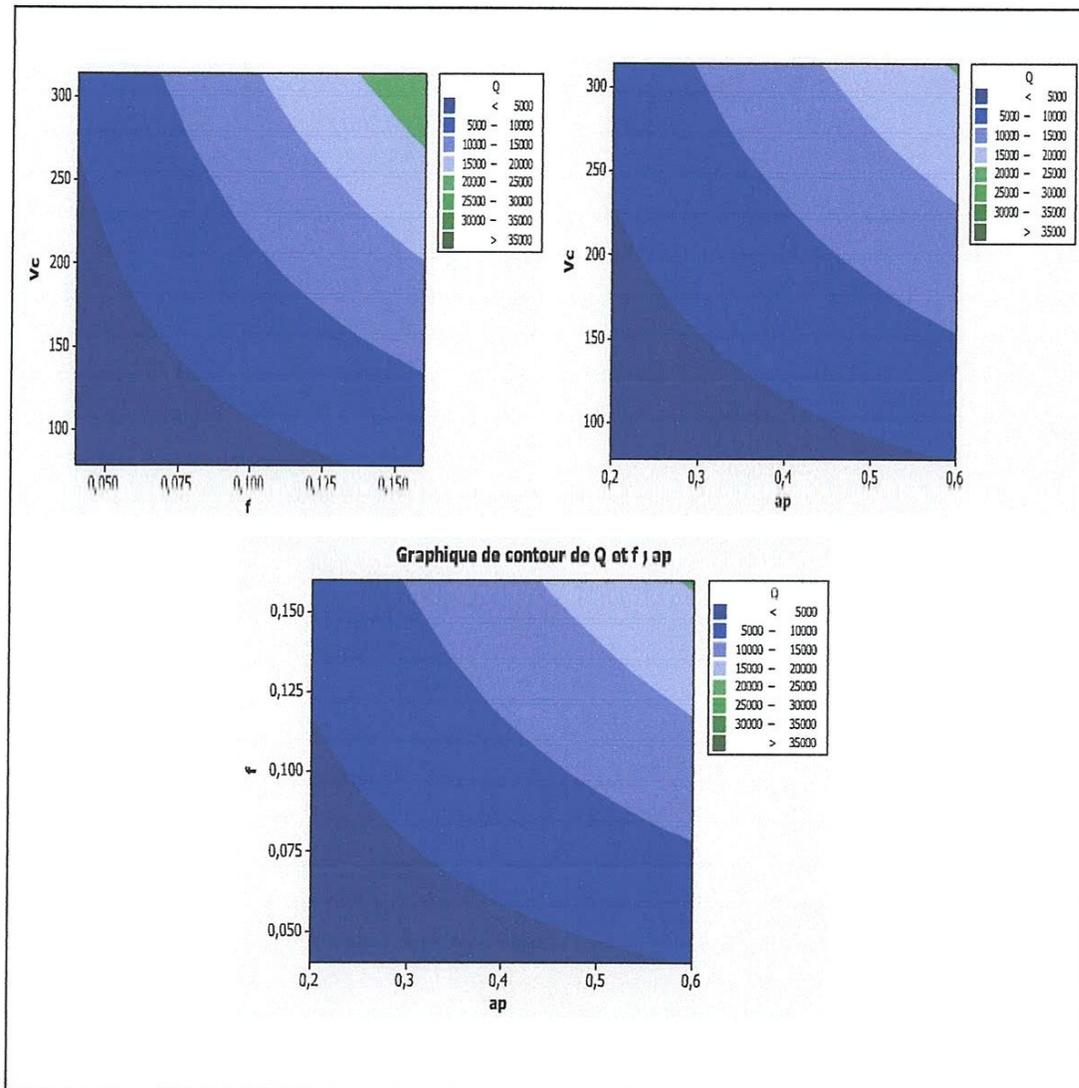


Fig. IV-17 : Graphique de Contour de  $Q$  en fonction de  $V_c$  ;  $f$  ;  $ap$

#### IV-2-6-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La figure (IV.18) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur le débit de coupeau  $Q$ . On remarque que les trois paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ) ont une influence sur le débit de coupeau  $Q$ .

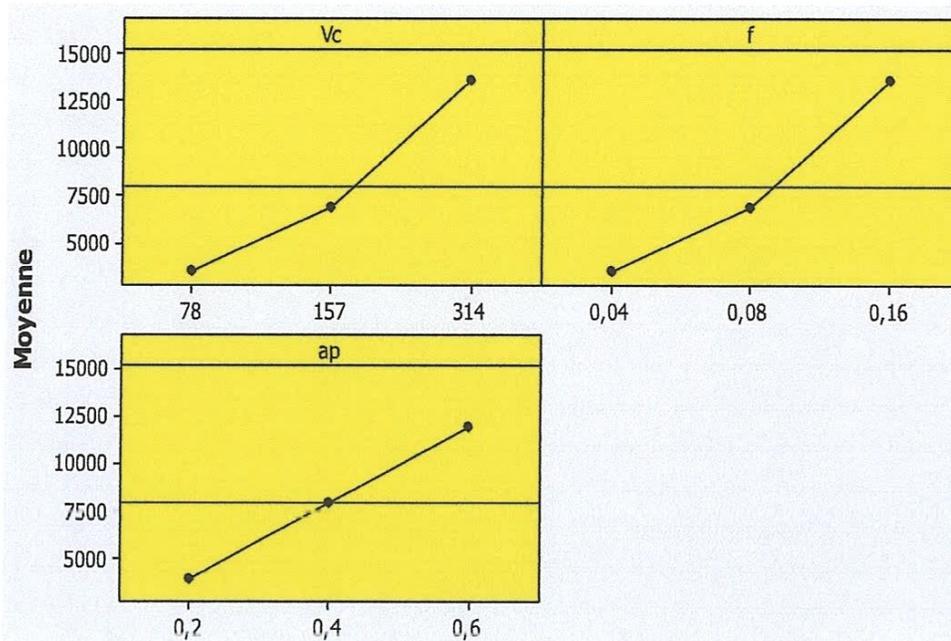


Fig. IV-18- Graphique des effets principaux pour le débit de coupeau Q.

La figure (IV-19) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour le débit de coupeau Q. Cette figure ne montre aucune interaction entre tous les variables.

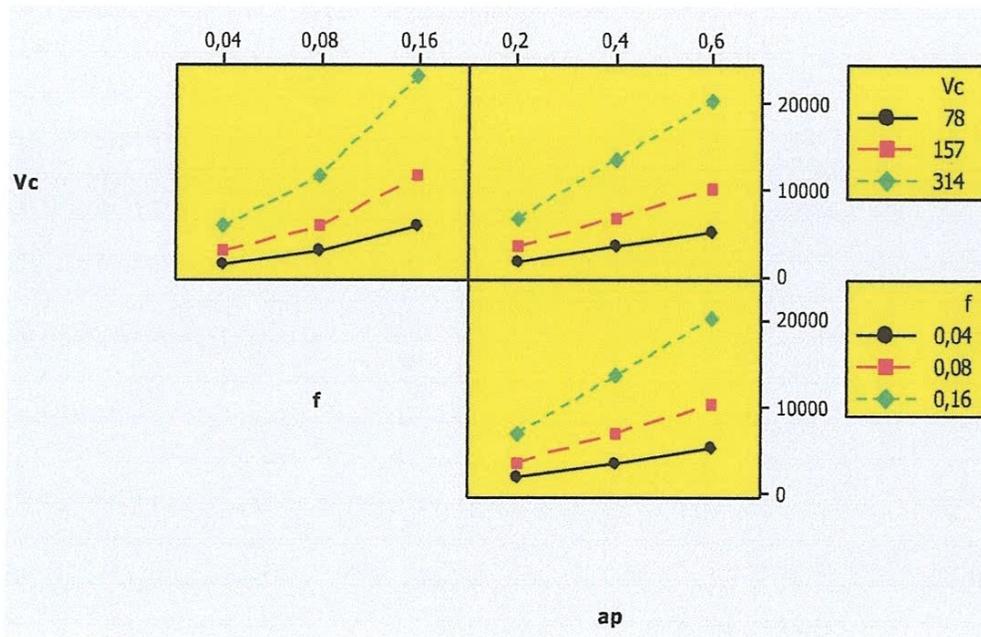


Fig. IV-19 : Diagramme d'interaction pour le débit de coupeau Q.

#### IV-2-6-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure (IV.20) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) du débit de coupeau  $Q$ . Ces courbes permettent de comparer les valeurs prédites aux valeurs expérimentales dans le but d'évaluer l'ajustement du modèle.

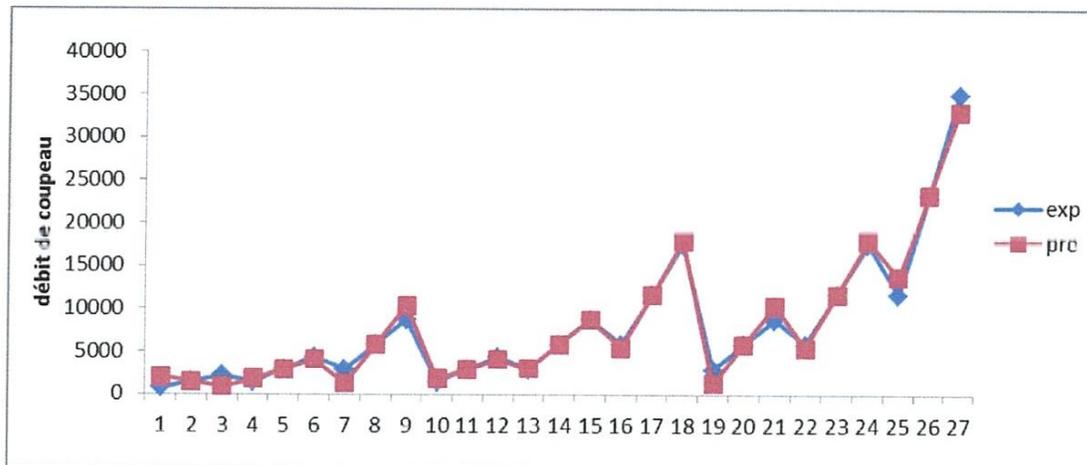


Fig. IV-20- Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour le débit de coupeau  $Q$

#### IV-3- Test de confirmation

Pour vérifier la validité de chaque modèle de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$  et  $R_z$ ), on réalise un test de confirmation avec des conditions de coupes différent qui sont utilisées précédemment dans le plan d'expérience de 27 essais. L'analyse du Tableau. (IV-13) montre la bonne corrélation entre les deux valeurs (valeurs expérimentales et valeurs prédites).

	valeurs expérimentales			valeurs prédites			Erreur %					
	Vc (m/min)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ry ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Vc (m/min)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ry ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Vc (m/min)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ry ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
	63	125	250	63	125	250	63	125	250	63	125	250
	2,3	2,15	1,35	2,47	2,22	1,13	7,39	3,25	16,29			
	16,2	14	6,75	17,91	13,66	6,57	10,55	2,42	2,66			
	12,55	11,33	6	13,89	11,09	5,8	10,67	2,11	3,33			

Tab. IV-13: Confirmation de test pour.  $f=0,16\text{mm/dent}$  et  $a_p=0,3\text{mm}$ .

#### IV-4 Sélection du régime optimale

Dans le domaine d'usinage par enlèvement de la matière l'objectif principale est de rechercher les conditions de coupe optimales, qui permettent d'atteindre plusieurs objectifs. Dans notre travail il faut recherche à la condition de coupe optimale qui traduit à l'amélioration de l'état de surface (minimisé Ra, Ry et Rz) et maximisé le débit de copeau (Q max)

Après l'analyse de résultat Tableau (IV-14) on observe que la vitesse de coupe (Vc) de 314 (m/min), l'avance (f) de 0.16 mm/dent, la profondeur de passe (ap) de 0.6 (mm) avec une désirabilité de 0,78 sont identifiées comme paramètres optimaux entre la rugosité de surface et le débit de copeau Q.

Number	Vc	f	ap	Ra	Ry	Rz	Q	Désirabilité	
<b>1</b>	<b>314.00</b>	<b>0.16</b>	<b>0.60</b>	<b>0.633253</b>	<b>3.3413</b>	<b>3.34752</b>	<b>15632.2</b>	<b>0,781518147</b>	<b>Selected</b>
2	314.00	0.16	0.60	0.632935	3.34058	3.34639	15619.4	0,781407067	
3	314.00	0.16	0.60	0.632837	3.34425	3.34558	15564.2	0,780663582	
4	314.00	0.16	0.60	0.630357	3.33467	3.33723	15516	0,780514912	
5	314.00	0.16	0.60	0.632812	3.34716	3.34516	15524	0,78011006	
6	314.00	0.15	0.60	0.629133	3.33188	3.33289	15467.3	0,780092061	
7	312.73	0.16	0.60	0.637389	3.3427	3.3566	15564.9	0,780065375	
8	314.00	0.15	0.60	0.627865	3.329	3.32839	15416.5	0,779648733	

**Tab. IV-14:** Le régime optimal pour les essais réalisés.

## Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer les coefficients de détermination et les modèles mathématiques qui nous permettent de mieux voir le degré d'influence des différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe) sur les différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) et le débit de copeau lors de fraisage de l'acier XC42. Ces modèles ont une grande importance économique dans le milieu industriel. Parce qu'ils permettent de prédire les conditions d'usinage pour optimiser le processus de coupe. A partir de ces résultats, nous avons tiré les conclusions suivantes :

- la vitesse de coupe a un impact considérable sur les différents critères de la rugosité étudié ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) avec des contributions de (96.05, 86.75 et 92.21) % respectivement.
- la vitesse de coup ( $V_c$ ) et l'avance ( $f$ ) sont les paramètres les plus influents sur le débit de copeau  $Q$  avec un pourcentage de contribution (30.76%) suivi par la profondeur de passe (17%).
- L'analyse de résultat montre que le modèle mathématique du débit de copeau  $Q$  est le modèle le plus représentatif car son  $R^2 = 98.53$  % suivi par le modèle de  $R_a$  avec un  $R^2 = 97.67$ % suivi par le modèle de  $R_z$  avec un  $R^2 = 95.23$  et en dernier le modèle de  $R_y$  avec une  $R^2 = 93.15$ .
- Le régime optimal entre la rugosité de surface et le débit de copeau est : La vitesse de coupe ( $V_c$ ) de 314 (m/min), l'avance ( $f$ ) de 0.16 (mm/dent), la profondeur de passe ( $a_p$ ) de 0.6 (mm).

# Conclusion générale

L'étude expérimentale sur l'usinabilité de l'acier XC42 en fraisage de face, en utilisant comme matériaux de coupe, le carbure revêtu (GC1030), nous a permis de mettre en évidence, d'une part l'impact des paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe ) ainsi que le mode d'usinage et la lubrification. D'autre part la modélisation de la rugosité de surface et le débit de copeau.

Les principales conclusions tirées de ce travail sont les suivantes :

- \* Les vitesses de coupe inférieure à 157 (m/min) donnent des rugosités élevées.
- \* la vitesse de coupe est le facteur qui affecte le plus, sur la rugosité de la surface usinée pour les trois critères étudiés (Ra, Ry et Rz).
- \* Le domaine conseillé de la vitesse de coupe qui permet d'obtenir la meilleure rugosité est situé entre 157 et 314 m/min.
- \* Le fraisage en opposition donne d'une manière générale de meilleurs résultats d'état de surface que le fraisage en avalent,  $Ra_{op}=1.03\mu\text{m}$ ;  $Ra_{av}=1.55\mu\text{m}$  pour ( $V_c=157$  (m/min)).
- \* Le fraisage avec lubrification à donner de meilleurs résultats d'état de surface que le fraisage à sec avec une augmentation dans les critères de rugosité (Ra, Ry et Rz) respectivement de (1.96%, 6.37%, 6%) à vitesse de coupe de 157 (m/min).
- \* L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité (Ra) montre que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 96.05% suivie par l'avance par dent (f) avec une contribution 1.49% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec contribution presque inexistante 0.005%.
- \* L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité (Ry) montre que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 86.75% suivie par l'avance par dent (f) avec une contribution 3.52% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec contribution presque inexistante 0.95%.
- \* L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité (Rz) montre que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 92.21% suivi par l'avance par dent (f) avec une contribution 1.88% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec une contribution presque inexistante 0.49%.
- \* L'analyse de la variance (ANOVA) du débit de copeau Q montre que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance par dent (f) sont les facteurs le plus significatif car leur contribution est de 30.76% pour les deux paramètres suivie par la profondeur de passe (ap) avec une contribution 17%.
- \* l'analyse de résultat montre que le modèle mathématique du débit de copeau Q est le modèle le plus représentatif car sa  $R^2 = 98.53$  % suivi par le modèle de Ra avec une  $R^2 = 97.67$ % suivi par le modèle de Rz avec une  $R^2=95.23$  et en dernier le modèle de Ry avec une  $R^2= 93.15$ .
- \* La vitesse de coupe ( $V_c$ ) en 314 (m/min), l'avance (f) en 0.16 mm/dent et la profondeur de passe (ap) en 0.6 (mm) avec une désirabilité de 0,78 sont identifiées comme paramètres optimaux entre la rugosité de surface et le débit de copeau.

- \* La connaissance de ces modèles représente un intérêt économique et industriel très importants car elle précise les plages des conditions d'usinage optimales pour le processus de coupe et assure une surveillance automatique de ce dernier.
- \* La meilleure rugosité de surface a été obtenue pour les valeurs basse de l'avance et les valeurs le plus grande de la vitesse de coupe.
- \* En comparant les valeurs expérimental et prédites des critères de rugosité de surface et le débit de coupeau, on remarque qu'ils sont en bonne corrélation.

### **Perspective**

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche qui sont :

- \* Continuer à étudier le comportement de nouveaux matériaux de coupe face à l'acier XC42.
- \* Déterminer les modèles mathématiques en fonction d'autres conditions de coupe (temps d'usinage et l'angle d'attaque).
- \* Etudes des vibrations de l'outil et son influence sur la rugosité de surface lors du fraisage de l'acier XC42.

## *Nomenclature*

ap	Profondeur de passe [mm]
fz	Avance par dent [mm/dent]
Fx	Effort axial [N]
Fz	Effort radial [N]
Fy	Effort tangentiel [N]
HB	Dureté Brinel
Lc	Longueur de coupe [mm]
n	Fréquence de rotation [tr/min]
R <sup>2</sup>	Coefficient de détermination
Ra	Rugosité arithmétique moyenne [μm]
Ry	Rugosité totale [μm]
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]
S	Section du copeau [mm <sup>2</sup> ]
hex	l'épaisseur maximum de copeau [mm]
Q	le débit de copeau [mm <sup>3</sup> /min]
Vc	Vitesse de coupe [m/min]
Vf	Vitesse d'avance [mm/min]
Zn	Nombre de dent de la fraise
K <sub>r</sub>	Angle de direction principale [degré]
α	Angle d'attaque [degré]
ic	diamètre de la plaquette [mm]
ANOVA	Analyse de variance
RMS	Méthodologie de surface de réponse

## *Références bibliographiques*

- [1] Définition de l'usinabilité.  
[http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/materials/workpiece\\_materials/machinability\\_definition](http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition).
- [2] Le conseil de l'outilleur.  
<https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:kSok0Vad2OsJ:hssforum.com/Francais/9-INFO>.
- [3] Fraisage définition et explications.  
<http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=1809/?onglet=glossaire&definition=1809>.
- [4] Le fraisage.  
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Fraisage>.
- [5] Définition de la fraiseuse.  
<http://fr.scribd.com/doc/38741999/Definition-de-la-fraiseuse>.
- [6] Fraisage sur petite fraiseuse. Guide méthodique micromécanicien, édition 2007.  
[http://jvr33.free.fr/pdf\\_laser/16\\_cnc/Proc%E9d%E9s\\_et\\_Techniques/Fraisage\\_sur\\_petite\\_fraiseuse.pdf](http://jvr33.free.fr/pdf_laser/16_cnc/Proc%E9d%E9s_et_Techniques/Fraisage_sur_petite_fraiseuse.pdf).
- [7] Recommandations Générales Pour le Fraisage.  
<http://www.dormertools.com/sandvik/2531/internet/s004114.nsf>.
- [8] Matériaux pour outils de coupe. Techniques de l'Ingénieur.  
<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/outillage-et-machine-outil-pour-le-travail-des-mat%C3%A9riaux-42511210>.
- [9] Claude Barlier. Les matériaux pour outils de coupe en usinage. Novembre 2012 - Equip'prod.  
<http://www.equip-prod.com/voir43megazinesrcPDF6.pdf>.
- [10] R. Weili . Technique d'usinage. Dunod. Paris 1971.
- [11] A Benyoucef. Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique. Mémoire de magister, Université de Batna, 06-2006.
- [12] Les solutions Sandvik Coromant aux problématiques d'états de surface Antoine Sarazin – 2010.  
<http://rdm.cnrs.fr/spip.php?action=autoriser&arg=1077>.
- [13] Coupe des métaux.  
<http://www.umc.edu.dz/vf/images/cours/FabricationMecanique/chapitreii.pdf>.
- [14] Usure de l'outil.  
[http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/milling/troubleshooting/tool\\_wear/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/Pages/default.aspx).
- [15] Copeaux de fraisage. Techniques de l'Ingénieur.htm.

<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/procedes-d-usinage-42190210/fraisage-bm7082/copeaux-de-fraisage-bm7082/niv10002.html>.

[16] Épaisseur maximum des copeaux.

[http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/milling/getting\\_started/general\\_guidelines/max\\_chip\\_thickness/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/max_chip_thickness/Pages/default.aspx).

[17] M. Benghersallah, S. Belhadi, L. Boulanouar, G. Lecoq, D. Dudzinski.

Fraisage à grande vitesse des rechargements « stellite 6 » sur les aciers de forgeage. vol755, pp12-23, 7554.

[18] Mohamad Al-Ahmad, Alain D'Acunto, Patrick Martin. Influence de différentes stratégies de tréflage sur la qualité de surface et la productivité. vol 4, pp 3096- 57078.

[19] Khairi Yusuf1, Y. Nukman, T. M. Yusof, S. Z. Dawal, H. Qin Yang, T. M. I. Mahlia and K. F. Tamrin. Effect of cutting parameters on the surface roughness of titanium alloys using end milling process. vol. 5(11), pp 1284-1293, 4 June, 2010.

[20] Sadettin Orhan, Ali Osman Er, Necip Camus-cu, Ersan Aslan. Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. NDT&E International vol40. (2007). pp 121–126.

[21] K. Kadirgama M. M. Noor, M. Rahman, M. R. M. Rejab, C. H. C. Haron, K. A. Abou-El-Hossein. Surface Roughness Prediction Model of 6061-T6 Aluminium Alloy Machining Using Statistical Method. ISSN 1450-216X Vol.25 No.2 (2009), pp 250-256.