

*République Algérienne Démocratique & populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université 8 Mai 1945 Guelma*  
*Faculté des Sciences et de la Technologie*  
*Département de Génie Mécanique*



**Mémoire de Fin D'étude**  
**Pour L'obtention du Diplôme de**  
***MASTER***

Spécialité : Génie Mécanique  
Option : Construction mécanique  
Présenté par

**HAMRI MOHAMED**

---

***TOURNAGE DUR DU L'ALLIAGE DE TITANE Ti-6Al-4V***

---

Directeur du Mémoire : Dr. KRIBS NABIL

2018-2019

## *Remerciements*

*Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire Docteur **KRIBS NABIL**, Docteur de génie Mécanique à l'université de Guelma, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.*

*Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.*

*Je remercie mes très chers parents, et mes sœurs et mon frère, pour leurs encouragements.*

## Résumé

Les propriétés mécaniques des alliages de titane jouent un rôle important sur leur aptitude à être usinés. Parmi ces propriétés mécaniques, conservées à haute température qui s'opposent à la déformation plastique nécessaire pour former un copeau, Un faible module d'élasticité propriétés à haute température tels que la résistance à l'usure par diffusion et une dureté élevée à chaud Des propriétés mécaniques conservées à haute température qui s'opposent à la déformation plastique nécessaire pour former un copeau ,Un faible module d'élasticité qui tend à voiler la surface sous la pression exercée par l'outil de coupe, entraînant du brouillage, du talonnage de l'outil ainsi que des problèmes de respect des tolérances dimensionnelles, Les revêtements sont soit monocouche ou multicouches, déposés par CVD ou PVD, de composition Une faible conductivité thermique Le présent travail concerne une étude expérimentale de tournage sur les alliages de titane Ti-6Al-4V par un outil de coupe en carbure non revêtu [H13A].

L'objectif principal de cette étude est d'utiliser la Méthodologie de surface de réponse afin de déterminer l'effet des paramètres de régime de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe sur les efforts de coupe, , la rugosité de la surface usinée . En plus, on a fait une optimisation multi-objective pour trouver les conditions de coupe optimales afin de minimiser les différents paramètres technologiques. Analyse de variance (ANOVA) a été utilisé pour étudier la signification de ces paramètres sur les variables des réponses, et aussi pour déterminer l'équation de régression pour les paramètres de sortie en fonction des paramètres de coupe. Les équations de régression ont été tracées sous forme d'une surface en 3D.

**Mots clés :** alliage de titane Ti-6Al-4V, Outil de coupe non revêtu, Analyse de la variance (ANOVA), Méthodologie de la surface de réponse (RSM), Effort de coupe, Rugosité,

## ***Liste des abréviations***

<b><i>Ap</i></b>	<i>Profondeur de passe (mm)</i>
<b><i>f</i></b>	<i>Avance (tr/min) Vc Vitesse de coupe (m/min)</i>
<b><i>Fx</i></b>	<i>Effort axiale de coupe (N)</i>
<b><i>Fy</i></b>	<i>Effort radiale de coupe (N)</i>
<b><i>Fz</i></b>	<i>Effort tangentielle de coupe (N)</i>
<b><i>ANOVA</i></b>	<i>Analyse de variance</i>
<b><i>RSM</i></b>	<i>méthodologie de surface de réponse</i>
<b><i>Ra</i></b>	<i>Rugosité moyenne arithmétique (<math>\mu\text{m}</math>)</i>
<b><i>R<sup>2</sup></i></b>	<i>Coefficient de détermination</i>
<b><i>Contr%</i></b>	<i>Pourcentage de contribution (%)</i>

# Sommaire

Introduction

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Le titane et ses alliages .....	14
I.1 Historique.....	14
I.2 Contexte industriel et applications.....	13
I.3 Matériau étudié : le Ti-6Al-4V .....	15
I.4 Usinage des alliages de titane .....	16
I.4.1 Usinabilité des alliages de titane.....	16
I.4.2 Processus de formation du copeau pour les alliages de titane .....	18
I.4.3 Outils de coupe pour l'usinage des alliages de titane .....	19
I.5 Les revêtements utilisés pour les alliages de titane .....	20
I.6 Travaux de recherche dans le ce domaine .....	21

## Chapitre II : Procédures expérimentales

II.1 Introduction .....	24
II.2 Equipements utilisés .....	24
II.2- 1 Machine-outil .....	25
II.2- 2 Outil de coupe utilisé.....	25
II.2- 3 Matériau à usiner .....	26
II.3 Appareillages de mesure utilisés .....	28
II.3- 1 Mesure des efforts de coup .....	30
II.3-2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité .....	31
II.3- 3 Schenck (Smart Balancer) .....	31
II.3- 4 Autres équipements .....	31
II.4 Planification des expériences .....	32
II.4-1: Introduction .....	32
II.4-2 Méthodologie de recherche .....	32
II.4-3 Méthode de planification des expériences.....	33
II.5 Conditions de coupe .....	34
II. 6 Conclusion .....	34

## Chapitre III : Modélisation et optimisation des paramètres technologiques lors de l'usinage du Ti 6Al-4v

III-1 Introduction .....	35
III-2 TESTE DE VALIDITÉ DES MODÈLES .....	36
III-3 OPTIMISATION .....	38
III-4 Analyse par la méthode de la surface de réponse pour Ti 6Al-4V .....	39
III-5 Analyse de la variance .....	39
III.5- 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra .....	39
III.5-1.1 Analyse de régression de (Ra) en fonction de Vc, f et ap.....	41

III.5.1.2. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	42
III.5- 2. Analyse de la variance (ANOVA) pour $F_x$ .....	42
III.5-2.1 Analyse de régression de ( $F_x$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ et $a_p$ .....	44
III.5.2.2 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	45
III.5- 3. Analyse de la variance (ANOVA) pour $F_z$ .....	46
III.5-3.1 Analyse de régression de ( $F_z$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ et $a_p$ .....	46
III.5.3.2 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées .....	47
III.5- 4. Analyse de la variance (ANOVA) pour $F_y$ .....	47
III.5-4.1 Analyse de régression de ( $F_y$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ et $a_p$ .....	49
III.5.4.2 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	51
III.6. Optimisation des conditions de coupe .....	52
III.6.1 Optimisation par la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) en utilisant la fonction de désirabilité (DF) .....	53
III.7. Conclusion.....	56
Conclusion générale .....	58
Références .....	60

## *Index des figures*

<b>Figure 1.1</b> – Distribution du chargement thermique lors de la coupe du TA6V et d'un acier [KONIG, 1978] .....	17
<b>Figure 1.2</b> – Contraintes normales et tangentielles lors de l'usinage du TA6V, Nimonic 105 et l'acier Ck53N [KONIG, 1978].....	18
<b>Figure 1.3</b> – Classification d'Ernst des différents types de copeaux [Burns and Davies, 2002] .....	19
<b>Figure II.1-</b> Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.....	24
<b>Figure II.2-</b> Porte outil utilisé.....	25
<b>Figure II.3.</b> Plaquette de coupe utilisée.....	25
<b>Figure II.4-</b> Eprouvettes utilisées.....	27
<b>La figure II.5-</b> illustre le montage du dynamomètre sur le chariot du tour.....	28
<b>La figure II.6-</b> Chaîne de mesure des efforts de coupe.....	29
<b>Figure II.7</b> - Mesure de rugosité avec démontage de la pièce.....	30
<b>Figure II.8</b> -Positionnement de l'accéléromètre sur le porte outil.....	31
<b>Figure III.1-</b> Graphiques des effets principaux pour la rugosité (Ra).....	41
<b>Figure III.2-</b> Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité de surface (Ra).....	42
<b>Figure III.3-</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra) .....	43
<b>Figure III.4-</b> Graphiques des effets principaux pour l'effort de coupe (Fx). .....	44
<b>Figure III.5-</b> Surface de réponse estimée pour l'effort de coupe (Fx) selon Vc, f et ap .....	45
<b>Figure III.6-</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Fx).....	46
<b>Figure III.7-</b> Graphiques des effets principaux pour l'effort de coupe (Fz).....	47
<b>Figure III.8-</b> Surface de réponse estimée pour l'effort de coupe (Fz) selon Vc, f et ap.....	48
<b>Figure III.9.</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Fz). .....	49
<b>Figure III.10.</b> Graphiques des effets principaux pour l'effort de coupe (Fx).....	50
<b>Figure III.10.</b> Surface de réponse estimée pour l'effort de coupe (Fy) selon Vc, f et ap.....	51
<b>Figure III.12.</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Fy).....	52
<b>Figure III.13.</b> Graphique de contour de désirabilité.....	54
<b>Figure III.14.</b> Le graphique de fonction pour l'optimisation de (Ra) et (Fx,Fy,Fz) .....	55

***Index des tableaux***

**Tableau 1.1** – Comparatif des prix de différents métaux [Titane, 2012]..... 14

**Tableau 1.2** – Consommation des marchés applicatifs [Titane, 2012]..... 15

**Tableau 1.3** – Composition chimique du TA6V (AFNOR L14-601) ..... 15

**Tableau 1.4** Propriétés mécaniques et physiques du TA6V ..... 15

**Tableau 1.5** – Température d’adoucissement de certains matériaux d’outils..... 20

**Tableau II.1:** Caractéristiques géométriques de porte outil ..... 25

**Tableau II.2-**Composition chimique des alliages Ti-6Al-4V..... 26

**Tableau II.3** Matrice de planification pour un plan 3<sup>3</sup> ..... 32

**Tableau II.4:** Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan 3<sup>3</sup> ..... 33

**Tableau III-1** - Plan orthogonal pour les différentes réponses pour un plan de Taguchi L9. .... 39

**Tableau III-2** -ANOVA pour Ra..... 40

**Tableau III-3** ANOVA pour Fx ..... 43

**Tableau III.4-** ANOVA pour Fz ..... 46

**Tableau III-5** ANOVA pour Fy ..... 49

**Tableau III.6.** Optimisation par RSM de (Ra) et (Fx Fy Fz) ..... 54

*Introduction*  
*Générale*

## **Introduction :**

De nos jours, les industries de fabrication ont pour objectifs, primordiaux, la réduction des coûts d'exploitation ainsi que l'amélioration de la qualité du produit. Dans les procédés d'usinage, par enlèvement de matière, le coût de l'opération d'usinage et la qualité du produit final sont des contraintes nécessaires à prendre en compte dans un environnement de plus en plus compétitif, où les investisseurs exigent un meilleur rendement de leurs investissements.

L'optimisation des conditions d'usinage fait partie des stratégies efficaces pour réduire les coûts de fabrication et la rugosité de surface du produit fini. Pour cela il est nécessaire d'utiliser les plans d'expériences pour étudier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage afin de développer des modèles de prédictions et d'optimiser les processus de coupe. Il est noté que les tâches d'optimisation comportent beaucoup de processus complexes, une petite variation d'un paramètre cause des changements notables des autres.

L'étude réalisée dans le cadre de cette mémoire permet d'atteindre les objectifs suivants :

- L'étude de l'influence des paramètres de coupe, soit, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, des outils de coupe sur les paramètres de performances de l'usinage (la rugosité de surface, les efforts de coupe, l'effort spécifique de) lors du tournage du l'alliage de titane (Ti 6Al-4V), avec une plaquette en carbure non revêtu (H13A)
- La modélisation et l'optimisation des conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) en utilisant la méthodologie des plans d'expériences et les méthodes d'optimisation

Cette mémoire est structurée en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique portée au premier lieu sur la coupe des métaux tels que la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité et les paramètres de coupe. Cette partie est suivie par une étude sur les alliages du titane générale (définition, classification, etc....) et une attention particulière a été réservée à l'étude du l'alliage de titane (Ti 6Al-4v)

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les équipements nécessaires à la réalisation des essais et la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe

### Le troisième chapitre

- Est réservé à l'exposition des résultats de l'usinabilité du Ti 6Al-4v. Pour atteindre cet objectif, nous avons analysé les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface, les efforts de coupe.

L'usinage est réalisé avec lubrifiant par un type d'outils de coupe (H13A)

Les résultats obtenus permettent de définir

- les performances des matériaux de coupe utilisés et les conditions de coupe adéquates pour optimiser le processus de coupe relatif à ce alliage
- détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés, en utilisant la méthodologie de surface de réponse RSM. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) et les paramètres technologiques d'usinage étudiés (effort tangentiel de coupe ( $F_z$ ), effort radial ( $F_y$ ) effort axial ( $F_x$ ) et la rugosité de surface arithmétique ( $R_a$ )). L'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse ont été réalisés par l'utilisation du logiciel de statistique «Design-Expert 10». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés, et de proposer des modèles mathématiques pour chaque phénomène étudié. exposé les résultats d'une étude d'optimisation afin de déterminer

A la fin de ce chapitre une analyse d'une méthodes d'optimisation est réalisée. En dernier lieu, nous avons terminé notre projet par une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

*Chapitre 1*

***ETUDE***

***BIBLIGRAPHIQUE***

## 1. Le titane et ses alliages

Cette première partie sera focalisée sur une présentation du titane et de ses alliages, à leurs différentes microstructures, notamment pour le Ti6Al4V qui est le matériau de l'étude, ainsi qu'à leur usinabilité. Par la suite l'influence de l'usinage sur l'intégrité de surface

### 1.1 Historique

Le titane représente 0,6% de la croûte terrestre et se classe 4<sup>ème</sup> des métaux les plus abondants après le fer, l'aluminium et le magnésium [1].

C'est en 1791, que William Gregor, un révérend britannique, minéralogiste et chimiste découvrit le titane. En examinant le sable de la rivière Helford dans la vallée de Menachan en Cornouailles, il isola ce qu'il nomma *sable noir*, connu aujourd'hui sous le nom d'*ilménite*. Suite à des manipulations physico-chimiques, élimination du fer avec un aimant et traitement du sable avec de l'acide chlorhydrique, il produisit un oxyde impur d'un élément inconnu. Il le nomma *méchanite ou ménachanite* d'après le nom de la vallée.

Indépendamment de cette découverte, 4 ans plus tard, un chimiste berlinois, Martin Heinrich Klaproth, identifia le même métal et le nomma oxyde de *titane*, connu aussi sous le nom de *rutile*.

C'est la mythologie grecque qui lui fournit ce nom. Les titans étaient les enfants d'Ouranos et de Gaïa. Leur père les haïssait car ils voulaient s'emparer de son trône. Il les a détenus en captivité dans la croûte terrestre, d'où le nom de titane.

Un siècle après Gregor, en 1910, Matthew Albert Hunter, chercheur au Rensselaer Polytechnic Institute à Troy (New-York), isola du titane pur à 99% en chauffant du tétrachlorure de titane ( $TiCl_4$ ) avec du sodium. La méthode trouvée par Hunter pour produire du titane ne fut suivie d'aucun développement industriel.

Wilhelm Justin Kroll, chimiste luxembourgeois, est reconnu comme le père de l'industrie du titane. En effet, en 1932 il produisit des quantités importantes de titane en combinant le  $TiCl_4$  avec du calcium. Au début de la seconde guerre mondiale, il s'enfuit aux Etats-Unis d'Amérique.

Chercheur à l'U.S. Bureau of Mines, il optimisa son extraction en réduisant le  $TiCl_4$  et en changeant le calcium par du magnésium. Aujourd'hui, cette méthode est la plus employée. Elle est connue sous le nom du *processus de Kroll*.

Après la deuxième guerre mondiale, les alliages de titane ont été considérés comme des matériaux de base pour la construction des moteurs d'avion. En 1948, la compagnie DuPont fut la première à produire et commercialiser le titane [2].

## 1.2 Contexte industriel et applications

L'intérêt pour le titane a commencé après la seconde guerre mondiale, à la fin des années 1940 et au début des années 1950. Principalement aux Etats-Unis d'Amérique, où le gouvernement apparrainé de grandes usines de production d'éponges de titane comme TIMET en 1951 et RMI en 1958.

En Europe, la production à grande échelle n'a débuté qu'en 1951 au Royaume-Uni avec la division métal des industries chimiques impériales, qui est devenu le principal producteur européen de titane.

Aux Etats-Unis, c'est le Ti-6Al-4V (ou TA6V). Il combine d'excellentes propriétés et une bonne productibilité. Aujourd'hui, il est l'alliage de titane le plus employé [2]. Parallèlement au Royaume-Uni, un alliage a été développé pour les hautes températures des moteurs aéronautiques et en 1956 l'alliage Ti-4Al-4Mo-2Sn-0,5Si (plus tard IMI 550) fit son apparition. Ce fut la première fois qu'on utilisa du silicium comme élément d'addition et ceci pour améliorer la résistance au fluage.

Au début des années 1960, sa haute résistance mécanique et sa dureté ont été utilisées pour fabriquer la peau d'un avion espion légendaire, le SR-71 (figure 1.2) [1].

Les progrès réalisés dans l'amélioration du procédé KROLL d'élaboration d'éponges de titane, dans la refusions d'éponges et de chutes pour la production de lingots ont permis de créer une gamme très complète de titanes et d'alliages, répondant à des spécifications technico-économiques variées. Aujourd'hui encore son coût unitaire reste élevé comparé aux autres familles de matériaux métalliques (tableau 1.1). Dans le tableau 1.2 se trouve la répartition de la consommation mondiale de titane selon les grands marchés applicatifs [3].

Métal	\$/tonne
Acier	400
Aluminium	1500
Acier Inox	2000
Titane	18000 à 25000

Tableau 1.1 – Comparatif des prix de différents métaux [3]

Marché applicatif	Consommation (tonnes)
-------------------	-----------------------

Energie/Chimie	20000-25000
Aéronautique civile	14000-19000
Aéronautique militaire	3000-4000
Sport & Loisirs	3000
Médical	800
Bâtiment	500
Autres (dont lunetterie)	1000
Total	42300-53300

Tableau 1.2 – Consommation des marchés applicatifs [3]

### 1.3 Matériau étudié : le Ti-6Al-4V ou TA6V

Sa composition chimique est présentée dans le tableau 1.3, selon la norme AFNOR L14-601.

Elément	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
% poids	Base	5,5-6,75	3,5-4,5	<0,25	<0,2	<0,08	<0,05	<0,01

Tableau 1.3 – Composition chimique du TA6V (AFNOR L14-601)

Les principales caractéristiques physiques et mécaniques sont données dans le tableau 1.4 [1] et [2] :

	Propriété	Valeur
HV	Dureté	300-400
E	Module d'Young (GPa)	110-140
Re	Limite d'élasticité (MPa)	800-1100
Rm	Résistance maximale à la traction (MPa)	900-1200
A	Allongement à la rupture (%)	13-16
$K_{IC}$	Ténacité ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )	33-110
$\rho$	Masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	4430
$\lambda$	Conductivité thermique ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	7
c	Capacité thermique massique ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	530
$T\beta$	Transformation allotropique	995°C

Tableau 1.4 – Propriétés mécaniques et physiques du TA6V

## 1.4 Usinage des alliages de titane

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans une fourchette de tolérance donnée [4]. De nos jours ces opérations d'usinages sont réalisées sur des machines-outils équipées de commande numérique (MOCN). Ces machines sont capables de piloter très précisément et de manière répétable les déplacements relatifs entre l'outil et la pièce pour générer les surfaces de la pièce (simples ou complexes) en respectant les spécifications demandées par le client. Ces opérations, représentent encore aujourd'hui une part très importante des procédés de mise en forme des matériaux. Dans le domaine aéronautique, l'évolution permanente des machines-outils et des outils permet de réaliser des pièces complexes avec des durées de production de plus en plus faibles. En aéronautique ce sont les opérations de fraisage qui permettent de réaliser la plupart des pièces usinées.

### 1.4.1 Usinabilité des alliages de titane

L'usinabilité est un terme utilisé pour décrire l'aptitude d'un matériau à subir une mise en forme par enlèvement de matière plus ou moins facile. Les principaux paramètres de l'usinabilité peuvent se mesurer à travers la durée de vie de l'outil (par exemple l'évolution de l'usure au cours du temps), le taux d'enlèvement de matière (productivité), les efforts de coupe et la puissance consommée lors de l'usinage, l'intégrité de surface, le respect des tolérances dimensionnelles et géométriques, et à travers l'observation des copeaux. L'usinabilité est affectée significativement par les propriétés (mécaniques et thermiques) de la matière à usiner, les propriétés et la géométrie de l'outil de coupe, les conditions de coupe utilisées et l'environnement de coupe [5].

Les études sur l'usinabilité du titane ont commencé dès le début des années 1950 avec l'augmentation de l'utilisation de celui-ci, notamment dans l'industrie aéronautique. Siekmann [6] fut l'un des premiers à souligner sa mauvaise usinabilité. Par la suite, d'autres auteurs comme [7] et [8] ont confirmé ce problème. Cette constatation est due aux propriétés intrinsèques du matériau, soit :

- Des propriétés mécaniques conservées à haute température qui s'opposent à la déformation plastique nécessaire pour former un copeau ;
- Un faible module d'élasticité qui tend à voiler la surface sous la pression exercée par l'outil de coupe, entraînant du broutage, du talonnage de l'outil ainsi que des problèmes de respect des tolérances dimensionnelles ;
- Une faible conductivité thermique qui a pour conséquence des températures élevées à l'interface outil-copeau-pièce ;

– Une forte réactivité chimique avec l’outil lorsque la température de coupe dépasse les 500 °C. La réussite de l’usinage du titane dépend donc de la maîtrise des problèmes qui s’associent à ses propriétés, à savoir :

– Lors de l’usinage des aciers, il est supposé que 50 % de la chaleur générée par la coupe est évacuée par les copeaux et les 50% restant sont absorbés par l’outil. Dans le cas du TA6V aux vitesses de coupes usuelles seulement 20% est évacuée par les copeaux et les 80% restant dans l’outil (figure 1.1).

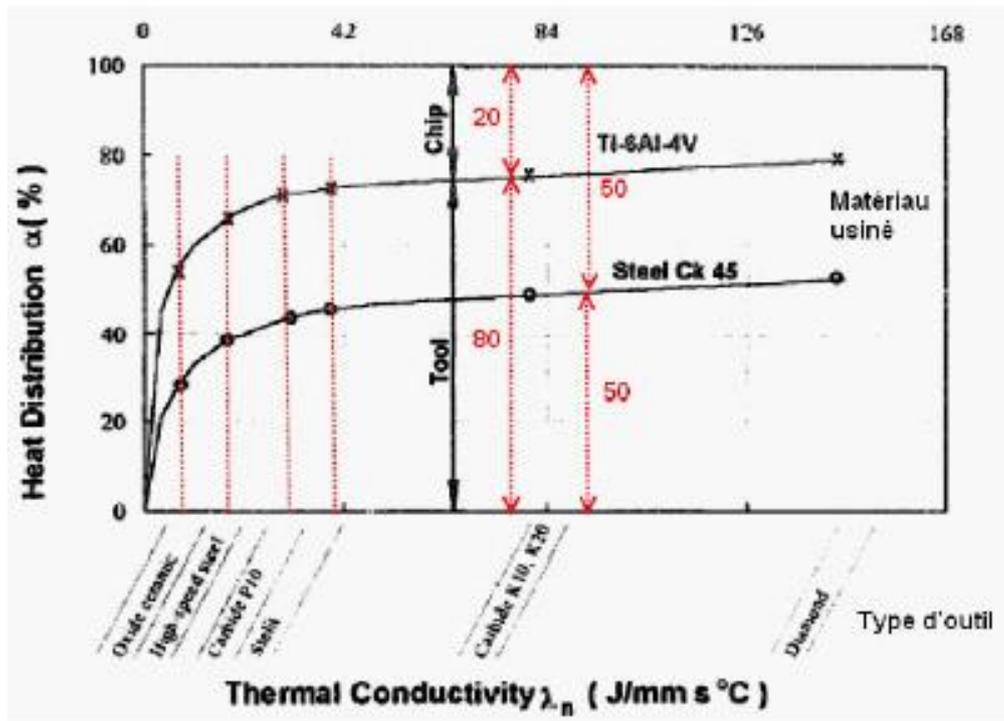


Figure 1.1 – Distribution du chargement thermique lors de la coupe du TA6V et d’un acier

[9]

– La formation du copeau arrive par un cisaillement adiabatique ou thermoplastique catastrophique.

La zone de contact outil-copeau est relativement petite (environ 8  $\mu\text{m}$  comparée au 50  $\mu\text{m}$  pour un acier, avec les mêmes conditions de coupe) ce qui génère des températures élevées pouvant aller jusqu’à environ 1100 °C;

– Lors de l’usinage la zone de contact outil-copeau étant très réduite (due à la formation de copeaux segmentés), les efforts de coupe étant élevés (comparables aux efforts obtenus lors de l’usinage de l’acier), la zone de contact étant très faible, les contraintes surfaciques sont beaucoup plus importantes et localisées à proximité de l’arête. König [9] a relevé des

contraintes plus élevées sur l’outil en usinant le TA6V qu’en usinant le Nimonic 105 (alliage base nickel) et l’acier Ck53N (3 à 4 fois plus élevées pour ce dernier, figure 1.2) ;

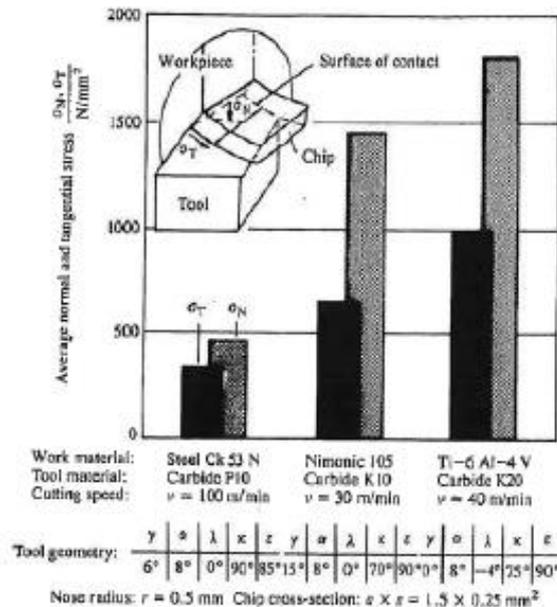


Figure 1.2 – Contraintes normales et tangentielles lors de l’usinage du TA6V, Nimonic 105 et l’acier Ck53N [9]

– Coefficient de frottement important entre le copeau et l’outil mais assez similaire à celui obtenu lors de l’usinage de nombreux aciers ; – Le broutage est principalement causé par le faible module d’élasticité. Lors de l’usinage, soumis à des efforts de coupe très élevés, le matériau subit une déflexion de près de deux fois celle de l’acier. Par conséquent le retour élastique du matériau derrière l’outil produit une usure prématurée de la face de dépouille de l’outil, des phénomènes vibratoires et une élévation considérable de la température. Une autre explication de l’apparition du broutage réside dans le processus de formation du copeau : les bandes de cisaillement adiabatiques impliquent des variations dans les efforts de coupe. Tous ces problèmes pris séparément ou combinés causent une usure rapide, un écaillage voire même la destruction de l’outil.

### 1.4.2 Processus de formation du copeau pour les alliages de titane

Selon la nature des matériaux usinés et usinant, les conditions de coupe et les caractéristiques de la machine-outil, différents types de copeaux peuvent être obtenus. Ces copeaux sont classiquement classés en trois grandes familles [10] :

- copeaux continus : l'état de déformation plastique est stable dans le temps, les champs mécaniques et thermiques sont quasi constants (figure 1.3(i)). A l'échelle de la formation du copeau, on parle de coupe stable.
- copeaux continus avec formation d'une arête rapportée : la zone de stagnation de la matière en pointe de l'outil peut être le lieu d'une adhésion de la matière usinée sur l'outil. Une nouvelle arête de coupe se forme plus ou moins périodiquement entraînant de fortes perturbations sur l'état de surface de la pièce finale (figure 1.3 (ii)).
- copeaux discontinus : l'état de déformation n'est pas stationnaire. Soit le copeau est formé par une suite de copeaux élémentaires issus principalement d'un mécanisme de rupture (cas de l'usinage de fonte par exemple) ; soit la localisation plus ou moins importante de la déformation plastique conduit à un copeau dentelé, on parle aussi de copeaux festonnés ou segmentés ou encore de copeaux à dents de scies (figure 1.3 (iii)). A l'échelle de la formation du copeau, on parle de coupe instable.

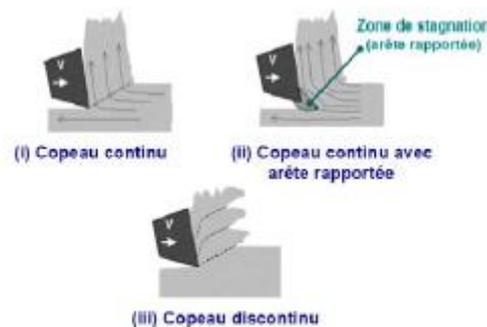


Figure 1.3 – Classification d'Ernst des différents types de copeaux [11]

### 1.4.3 Outils de coupe pour l'usinage des alliages de titane

#### \_ Critères d'un matériau pour outil

Une des principales exigences pour ces matériaux d'outils lors de l'usinage des alliages de titane est de posséder une dureté à chaud importante afin de résister aux températures élevées générées pendant l'usinage. La plupart des matériaux d'outils perdent en dureté à température élevée à la suite de l'affaiblissement des liaisons chimiques, ce qui entraîne une accélération de

l'usure de l'outil. Le tableau 1.5 montre la température d'adoucissement de quelques matériaux d'outils de coupe utilisés pour l'usinage des alliages réfractaires [5].

Matériau de l'outil	Température d'adoucissement (°C)
Acier rapide	600
Carbure de tungstène (WC)	1100
Oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ )	1400
Nitride de bore cubique (CBN)	1500
Diamant	1500

Tableau 1.5 – Température d'adoucissement de certains matériaux d'outils

Les qualités requises pour les matériaux d'outils de coupe sont [7] :

- une dureté importante à des températures élevées pour résister aux fortes contraintes générées lors de la coupe ;
- une bonne conductibilité pour minimiser les gradients et les chocs thermiques sur l'outil ;
- une faible réactivité chimique ;
- une ténacité et une résistance à la fatigue bonne pour résister au processus de formation de copeaux segmentés ;
- une résistance à la traction, au cisaillement et à la compression élevée.
- une taille de grains suffisamment grande.

Les températures élevées et les efforts de coupe importants au niveau de l'arête de coupe vont entraîner différents types d'usure.

### 1.5 Les revêtements utilisés pour les alliages de titane

Les alliages de titane sont généralement usinés avec des carbures cémentés non revêtus (WCCo).

Le pourcentage de carbure de tungstène (WC) est de 94%, celui du cobalt est de 6% mais peut varier entre 5 et 12%. D'autres carbures (TiC, TaC, NbC) peuvent être ajoutés au WC pour modifier les propriétés mécaniques de l'outil. Par exemple le carbure de titane (TiC) est plus dur que le WC et son ajout améliore la résistance à l'usure. Son pourcentage est compris entre 5 et 25%.

Au-delà de 25% de TiC, la ténacité diminue. L'addition de carbure de tantale (TaC) augmente la dureté à chaud des outils réduisant ainsi les déformations plastiques de l'arête de coupe pour de grandes vitesses de coupe [12].

L'utilisation d'un revêtement sur l'outil de coupe améliore ses propriétés. Généralement ce sont des matériaux durs et ils offrent une bonne résistance à l'abrasion. Ils ont de bonnes

propriétés à haute température tels que la résistance à l'usure par diffusion et une dureté élevée à chaud. Les revêtements sont soit monocouche ou multicouches, déposés par CVD ou PVD, de composition TiC, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiCN, TiAlN, TiZrN, TiB<sub>2</sub> et récemment des revêtements diamant sont utilisés [Ezugwu et al., 2003].

Les revêtements tels que le TiC, TiCN, TiN-TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC, TiN-Ti (C, N)-TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfN, TiB<sub>2</sub> ont montré des taux d'usure plus importants que les carbures non revêtus [7].

## 1.6 Travaux de recherche dans ce domaine

L'utilisation d'alliages de titane a augmenté de jour en jour dans les domaines de la médecine, de l'aérospatiale, de la marine et de l'automobile. Industries en raison de sa résistance à la corrosion, de son rapport résistance / poids élevé et de sa résistance à la fatigue. Titane et ses alliages sont considérés comme des matériaux difficiles à usiner par rapport à l'aluminium et à l'acier. Ti-6Al-4V est un alliage de titane largement utilisé contenant 6% d'aluminium et 4% de vanadium et relevant de la catégorie alpha-bêta. Ezugwu et al [7] ont examiné l'usinabilité des alliages de titane, ils se sont concentrés sur l'usinage du titane et de l'outil porté associé à elle. Les outils de coupe droits en carbure de tungstène ont obtenu des résultats supérieurs.

Rahman et al. [13] ont examiné l'usinage à haute vitesse des alliages de grade 5, il a été constaté que l'outil avancé des matériaux tels que le PCD et le nitrure de bore cubique (CBN) sont capables d'usiner des alliages de titane à forte vitesse de coupe.

Arrazola et al [14] a présenté une étude sur les alliages de titane spécialement Ti-6Al-4V et Ti555.3. Un effort a été fait étudier l'usinabilité du Ti555.3 et les mécanismes d'usure des outils. Une plus grande difficulté a été rencontrée pendant l'usinage de Ti555.3 par rapport à Ti-6Al-4V. Il a également montré une corrélation entre les propriétés mécaniques de matériau de travail, usure de l'outil et forces de coupe .

Sahin et Riza Motorcu [15] a développé une rugosité de surface modèle pour l'usinage d'acier doux avec des outils en carbure revêtu. Des outils de coupe au carbure revêtus de TiN ont été utilisés pour expérimentation. Des modèles mathématiques de premier et de second ordre ont été développés pour la rugosité de surface données expérimentales utilisant la méthode de surface de réponse (RSM). ANOVA pour le modèle de second ordre a montré que les termes d'interaction et les termes carrés étaient statistiquement non significatifs. On a également vu que dans un seul ordre le modèle, la vitesse de coupe et le taux d'avance étaient significatifs, alors que la profondeur de coupe était non significative.

La rugosité de la surface varie avec l'usure croissante de l'outil et des vibrations de l'outil de coupe peuvent se produire en raison de l'impact sur pièce, vibrations de la machine, broutements, usure des outils et déséquilibre du montage de la pièce.

Abouelatta et Madl [16] mis au point un modèle de prévision de la rugosité de surface basé sur les paramètres de coupe et les vibrations de l'outil lors du tournage opérations. Un analyseur FFT a été utilisé pour mesurer les signaux de vibration dans les directions radiale et d'alimentation.  $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_{sk}$  les paramètres de rugosité de surface ont été utilisés en fonction des paramètres de coupe et des vibrations de l'outil.  $R_t$  qui est paramètre hauteur maximale, dépend principalement de la vitesse de coupe et du diamètre de la pièce.

Tel que présenté par Dimla [17] développé une corrélation des caractéristiques du signal de vibration avec usure des outils de coupe dans les opérations de tournage des métaux Les résultats ont montré l'importance de l'utilisation de signaux de vibration pour contrôle de l'usure des outils et de l'usure.

Salgado et al. [12] suggéré dans le système de prévision de la rugosité de la surface de traitement utilisant des vibrations de coupe en tournage.

Upadhyay et al. [18] étudié les paramètres de coupe et les signaux de vibration pendant la prédiction de la rugosité de surface pour Ti-6Al-4V.

Hessainia et al. [19] étudié la prédiction de rugosité de surface en tournage dur en fonction des paramètres de coupe et des vibrations de l'outil. Les résultats ont indiqué que le flux le taux était le facteur dominant affectant la rugosité de la surface et les vibrations dans la force de coupe radiale et principale les directions n'avaient que peu d'effet sur la rugosité de la surface. Grynal D'Mello et SrinivasaPai [20], ont résumé que le RSM est efficace pour prédire et optimiser la rugosité de surface. Lors de l'usinage de divers métaux et alliages. Dans leur travail, les paramètres d'usinage tels que la vitesse de coupe et l'alimentation taux d'usure et de vibrations de l'outil de coupe (signal acquis dans le sens de la vitesse ( $V_y$ )) ont été pris en compte pour prédire la rugosité de surface à l'aide de RSM lors du tournage à grande vitesse de Ti-6Al-4V. Les modèles de régression multiple ont été développés pour  $R_a$  et  $R_t$ . Les modèles ont été développés en tenant compte de tous les paramètres, en négligeant l'usure des flancs et les vibrations de l'outil de coupe.

# *Chapitre II*

## *Etude expérimentale*

**II.1 Introduction :**

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des outils et équipements mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le souci d'étudier le tournage dur de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. Pour cela une présentation des différents équipements utilisés qui servent au suivi de l'évolution de la rugosité des surfaces obtenues, des efforts de coupe générés jugé nécessaire pour la compréhension du phénomène de la coupe. Nous présentons également la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées au laboratoire de Mécanique et Structures (LMS) et au département de génie mécanique (Université 08 Mai 1945 de Guelma).

**II.2 Equipements utilisés :****II.2- 1 Machine-outil :**

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un tour à charioter et à fileter, modèle SN40C (figure II.1). Il est équipé d'un moteur électrique de puissance 6,6KW, les fréquences disponibles sur la machine sont (45, 63; 90, 125, 180, 250, 355, 500,710; 1000; 1400, 2000) tr/min et les avances sont: (0.08; 0.9, 0.11; 0.12; 0.14; 0.16, 0.18, 0.20; 0.22, 0.24 ...0.8) mm/tr.



*Figure II.1: Tour à charioter et à fileter modèle SN40C*

**II.2- 2 Outil de coupe utilisé :**

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte outil sur les quels on fixe les plaquettes mécaniquement par trou central. La géométrie du porte outil est donné dans le tableau II.1 et la plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte outil. Une cale-support en carbure métallique vissé et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette (figure II.2).

Porte outil	Section (mm <sup>2</sup> )	$\chi_r^\circ$	$\alpha^\circ$	$\gamma^\circ$	$\lambda^\circ$
PSBNR2525K12	25*25	75°	6°	-6°	-6°

Tableau II.1: Caractéristiques géométriques de porte outil



Figure II.2: Porte outil utilisé

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée à fixation par trou centrale. Elles sont de marque Sandvik et de désignation Carbure non revêtu CCMT 060202-KF H13A avec une composition chimique (Carbure de tungstène) et avec une géométrie SNMG120408-MR (figure II.3) et angle de dépouille (7°). Ces plaquettes possèdent une bonne résistance à l'usure par abrasion et bonne ténacité. Bon choix, pour opérations de la semi-finition à l'ébauche d'aciers réfractaires et d'alliages de titane.



Fig. II.3. Plaquette de coupe utilisée

**II.2- 3 Matériau à usiner :**

Les opérations de chariotage relatives aux essais de tournage dure effectuées sur des éprouvettes rondes en alliage de titane Ti-6Al-4V, de diamètre 50 mm et de longueur 253 mm. Les alliages de titane Ti-6Al-4V sont des métaux à une résistance mécanique élevée, une faible densité et une excellente résistance à la corrosion

L'alliage Ti-6Al-4V, également appelé TA6V ou Ti64 présente une structure mixte  $\alpha+\beta$  stabilisée par l'aluminium (6%), élément  $\alpha$  stabilisant, le vanadium (4%), élément  $\beta$  stabilisant et 90% de titane. Les principaux éléments d'impuretés sont soit des interstitiels comme l'oxygène, l'azote, l'hydrogène et le carbone, soit des éléments de substitution comme le fer et le silicium. Le Ti-6Al-4V est également disponible en version ELI (Extra-Low Interstitiel) ayant des teneurs en interstitiels très faibles Sa composition chimique est donnée comme suit (Tableau II.2) :

Elément	Al	V	O	N	Ti	Fe	C
%	6,00	4,00	< 0,20	< 0,07	Base	< 0,30	< 0,08

Tableau II.2 : Composition chimique des alliages Ti-6Al-4V



Figure II.4: Eprouvettes utilisées

Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit :

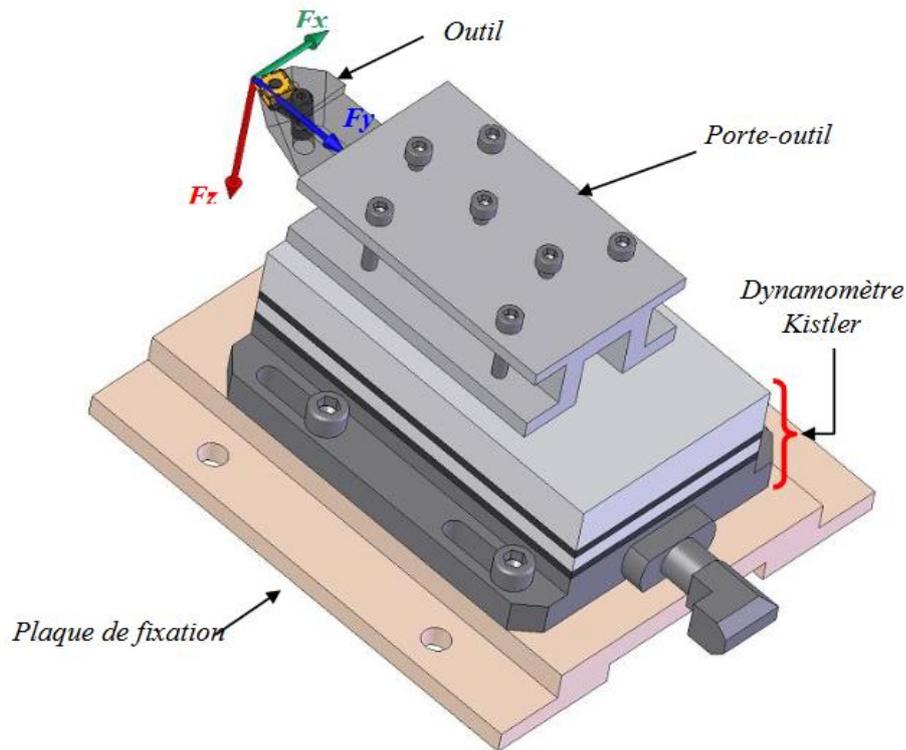
1. Densité : 4,3
2. Module d'élasticité: -à 20 °C :  $110 \times 10^3$  N/mm
3. Module de torsion en  $N/mm^2$ : 45000
4. Conductivité thermique. °C: -à 20 °C : 6,7 W/m.K
5. Résistance :  $1100 N/mm^2$
6. Limite d'élasticité à 0,2 % :  $1040 N/mm^2$
7. Allongement sur 5d : 10 %
8. dureté 36 HRC
9. module d'Young 106-114 GPA
10. Température de fusion 1650-1675 °C

### II.3 Appareillages de mesure utilisés :

#### II.3- 1 Mesure des efforts de coup :

La mesure des trois composantes de l'effort de coupe c'est effectué à l'aide d'un dynamomètre Kistler.

La (figure II.5 illustre le montage du dynamomètre sur le chariot du tour.



La figure II.5: illustre le montage du dynamomètre sur le chariot du tour

Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin une imprimante pour tracer les courbes.

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

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques. Ces dernières sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier.

Un logiciel (Dynoware) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

1. force axiale :  $F_a$  ( $F_x$ ).
2. force radiale :  $F_r$  ( $F_y$ ).
3. force tangentielle :  $F_t$  ( $F_v$  ou  $F_z$ ).

La figure II.6. Représente la Chaîne de mesure des efforts de coupe

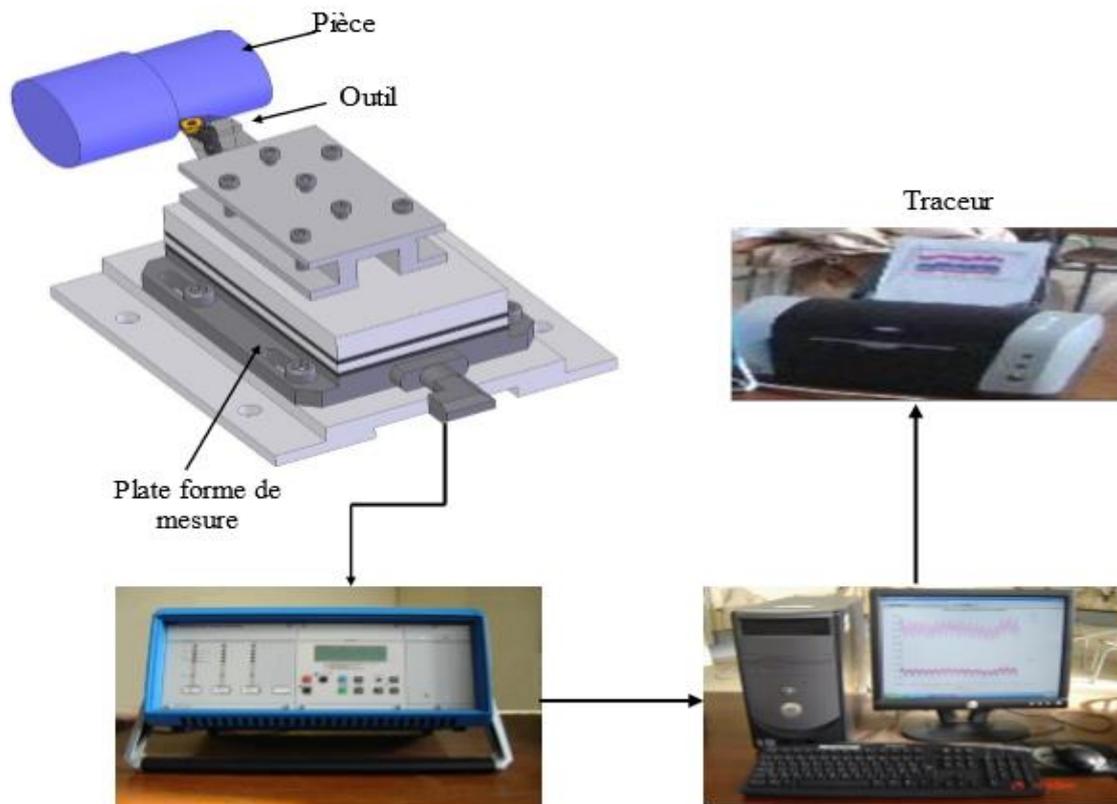


Fig. II.6. Chaîne de mesure des efforts de coupe

### II.3- 2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité :

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ) nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) SurfTest 301 (Mitutoyo) avec une résolution de  $0,1\mu\text{m}$  (figure II.7). Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur) avec un rayon de pointe de  $5\mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de 4 mm avec une longueur de base de 0.8mm (0.8x5). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à  $40\mu\text{m}$ ) pour  $R_a$  et de (0.3 à  $160\mu\text{m}$ ) pour  $R_t$  et  $R_z$



*Figure II.7 : Mesure de rugosité avec démontage de la pièce*

### **II.3.3 Schenck (Smart Balancer) :**

Pour la mesure des vibrations de l'outil nous avons utilisé un appareil de mesure « Schenck » (Smart Balancer 2), ce dernier est un instrument pour faire l'équilibrage des rotors sur site et l'analyse des vibrations, il contient 2 canaux analogiques de mesure simultanés (capteurs piézoélectriques) dont la plage de fréquence s'étend de: 0,5 Hz jusqu'à 40 kHz, et d'une fréquence d'échantillonnage jusqu'à 131 kHz par canal. Il peut mesurer les signaux temporels tels que : accélération, vitesse, déplacement ; Spectre des fréquences ; Amplitude max; RMS; la valeur crête (figure II.8).

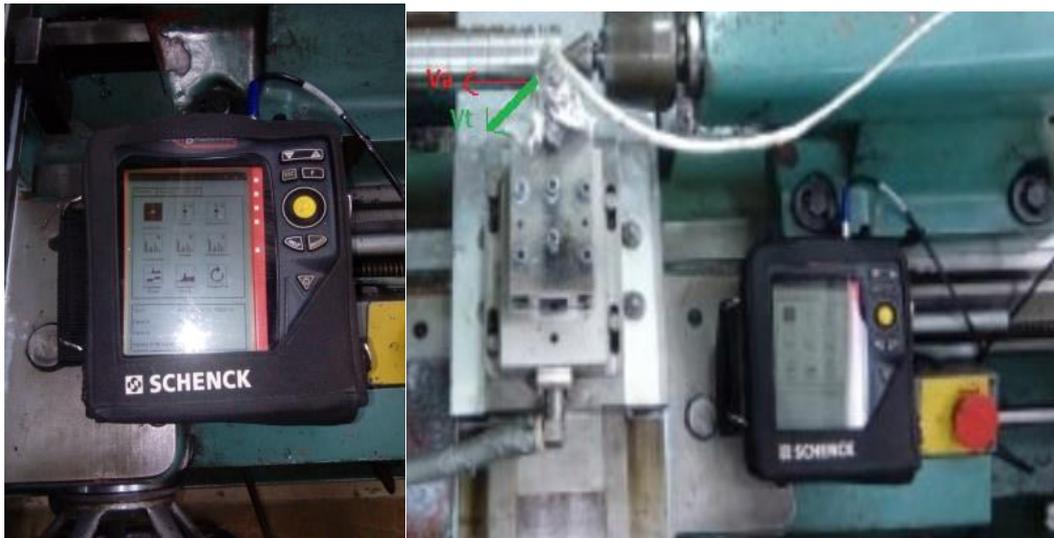


Figure II.8 : Positionnement de l'accéléromètre sur le porte outil

### II.3- 4 Autres équipements :

- Le pied à coulisse pour mesurer les différentes dimensions de la pièce concernée
- Un appareil photo numérique pour prendre des photos.

### 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 paramètres du régime de coupe ( $V_c, a_p, f$ ), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil ( $r, \lambda, \beta, \gamma, \epsilon, \dots$ ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. Les efforts de coupe, les vibrations d'usinage, les pressions de coupe, la puissance de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité, le volume de copeau enlevé et l'usure en dépouille de l'outil représentent les paramètres de sortie.

#### II.4-2 Méthodologie de recherche :

Un très grand nombre de facteurs agit sur l'usinabilité d'un matériau, tels que les paramètres du régime de coupe ( $V_c, a_p, f$ ), la géométrie de l'outil ( $\alpha, \beta, \gamma, \epsilon, \chi, \dots$ , etc.), les caractéristiques du matériau usiné (dureté,  $R_r, \%C, \%$  des éléments d'addition, etc.) et les conditions de travail, etc. Ces facteurs représentent les paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, l'usure, la précision, les efforts, etc., représentent les paramètres de sortie

#### II.4-3 Méthode de planification des expériences :

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

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 (Vc, f, ap) sur les diverses fonctions d'optimisation (rugosité et efforts de coupe),

Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots (II.1) \text{ Où:}$$

- N: nombre d'essais ;
- q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;
- k: nombre de facteurs de base. Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base (k=3) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur (3), niveau moyenne (2) et un niveau inférieur (1)).

Nous avons alors:  $N=3^3 =9$

Les essais sont numérotés de 1 à 9. 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 II.3.

N° d'essai	Facteurs		
	ap (mm)	Vc (m/mn)	f (mm/tr)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X1	X2	X3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Tableau II.3 Matrice de planification pour un plan 3<sup>3</sup>

L'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment obtenir les bonnes informations

dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ? L'utilisation des plans d'expériences, et en particulier les tables orthogonales de Taguchi, a permis la détermination de l'influence des effets simultanés et de l'interaction des paramètres opératoires sur les efforts de coupe et la rugosité

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats

## II.5 Conditions de coupe

Les essais de chariotage sont effectués sur un L'alliage de titan Ti6Al-4v , par un matériau à outil en carbure non revêtu, A la fin de chaque opération d'usinage, on mesure: , Ra, Fx,Fy et Fz. Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage). La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé avec lubrification sous les conditions de coupe indiquées dans les tableaux II.4

- Essai de courte durée tableau II.4

Niveau	Profondeur de passe $a_p$ (mm)	Vitesse de coupe $V_c$ (m/mn)	Avance $f$ (mm/tr)
1	0.2	50	0.08
2	0.4	75	0.12
3	0.6	100	0.18

**Tableau II.4:** Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan  $3^3$

## II. 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé (machine-outil, éprouvettes plaquette de coupe, porte-outil, ,4Schenck (Smart Balancer) Plateforme KISTLER et rugosimètre ). La planification des expériences et les conditions de coupe ont été établies.

## ***Chapitre III***

### ***Modélisation et optimisation des paramètres technologiques lors de l'usinage du Ti 6Al-4v***

### III-1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents Phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du Régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) et les paramètres Étudiés (rugosité, efforts de coupe,). On a choisi un plan Orthogonal L9 de Taguchi et à l'aide de la méthode de la surface de la réponse, l'analyse de la Variance et la détermination des constantes des modèles mathématiques et le coefficient de Corrélacion de chaque modèle ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface ont été fait, nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statiquement significatif sur Ra, Fx,Fy,Fz La méthodologie de surface de réponse (RSM) est une procédure qui comprend six étapes:

- 1) définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- 2) adopter un plan de conception expérimentale ;
- 3) effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de RSM ;
- 4) analysé par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- 5) déterminer la situation du modèle quadratique de RSM et de décider si le modèle de RSM à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;
- 6) optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédite.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y, dite variable de réponse (rugosité de la surface, efforts de coupe Fx,Fy,Fz .), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X1, X2, ..., Xk ( vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse.

On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad \text{III.1}$$

- Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- Xi représente le niveau attribué au facteur i. C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- a0, ai, aij, aii représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences. Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation.

$$R^2 = \frac{\sum (Y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{Y}_i - \bar{y})^2} \quad \text{III-2}$$

Avec

$Y_i$  : valeur de la réponse calculée à la  $I^e$  expérience ;

$\bar{Y}_i$  : valeur mesurée à la  $I^e$  expérience ;

$\bar{Y}$  : valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse des variances (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. ANOVA permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés (Ra, Fx Fy Fz).

### III-2 TEST DE VALIDITÉ DES MODÈLES

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (ANOVA) : est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de coupe. Comme les facteurs sont en général exprimés dans des unités différentes, leurs effets ne soient comparables que s'ils sont codés.
- Coefficients d'ajustement des modèles : Le coefficient de détermination  $R^2$  est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression. Le coefficient  $R^2$  peut s'interpréter comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, d'où  $R^2$  varie entre 0 et 1. Une valeur de  $R^2$  proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression  $R^2$  est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation.

III.3

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{Erreur}}}{SS_{\text{total}}}$$

- Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles utiles pour vérifier les hypothèses des modèles et peuvent être affichés pour tous les plans et ils sont déterminées par l'évaluation de l'équation.

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$$

III.4

Où :

$y_{ij}$  : l'observation correspondante des valeurs non ajustées.

$\hat{y}_{ij}$  : l'observation des valeurs ajustées.

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles

- Test de normalité d'Anderson Darling : le test d'Anderson Darling est utilisé pour tester si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Ce test est une alternative au test de chi carré ou de Kolmogorov-Smirnov. Il est basé sur ce dernier mais il est plus puissant. Le test Anderson Darling est défini comme suit :

• L'hypothèse nulle  $H_0$  : Les données proviennent d'une population distribuée normalement.

• L'hypothèse alternative  $H_1$  : Les données ne proviennent pas d'une population distribuée normalement.

La statistique du test d'Anderson Darling est donnée par :

$$A^2 = -N - S$$

III.5

Où : N est la taille de l'échantillon.

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad \text{III.6}$$

Où : F est la fonction de répartition de la distribution spécifiée.

Les valeurs critiques dépendent des distributions (normale, log-normale, exponentielle...). Les valeurs de P sont souvent utilisées dans les tests d'hypothèses dans lesquels on peut ou non rejeter une hypothèse nulle. La valeur de P représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la valeur de P est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une valeur limite de 0.05 est utilisée. Autrement dit, rejetez l'hypothèse nulle si la valeur de P est inférieure à 0.05. Pour prendre une décision, on choisit le niveau de signification,  $\alpha$  (alpha), avant le test :

- Si P est inférieur ou égal à  $\alpha$ , on rejette H0.
- Si P est supérieur à  $\alpha$ , on ne rejette pas H0

### III-3 OPTIMISATION :

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (RSM) a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (RSM) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (Ra) et l'efforts de coupe (Fx Fy Fz) souhaitées avec les paramètres de coupe optimaux. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (Ra), l'efforts de coupe pour le carbure non revêtu. Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, F(x), est définie comme suit

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad \text{III.7}$$

$$F(x) = -DF$$

Où :  $d_i$  est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et  $w_i$  est la fonction de pondération de  $d_i$ .

Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité  $d_i$  est définie dans différentes formes. Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de  $T_i$ , la désirabilité  $d_i$  est :

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad \text{III.8}$$

Pour un objectif de trouver un maximum, la désirabilité est montrée comme suite :

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad \text{III.9}$$

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Pour un objectif de chercher un minimum, la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$d_i = 1 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{\text{Sup}_i - Y_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad \text{III.10}$$

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Donc, l'objectif de notre étude est de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimisé Ra, Fx,Fy,Fz

### III-4 Analyse par la méthode de la surface de réponse pour Ti 6Al-4V :

L'influence des paramètres de régime de coupe sur la rugosité, l'effort de coupe, l'effort spécifique et la puissance de coupe obtenus pendant le tournage de titane Ti 6AL-4V est présentée dans le tableau III-1.

Paramètres de coupe				caractéristique de l'usinabilité			
N=test	ap (mm)	Vc (mm/tr)	f, (mm/tr)	Ra ( $\mu$ m)	Fx (N)	Fy (N)	Fz(N)
1	0.2	50	0.08	0.613	7.23	34.15	16.12
2	0.2	75	0.12	0.972	15.9	47.32	42.7
3	0.2	100	0.16	1.215	21.69	60.1	50.55
4	0.4	50	0.08	0.688	30.71	74.1	47.65
5	0.4	75	0.12	0.471	33.06	81.48	71.58
6	0.4	100	0.16	1.250	30.67	93.94	81.33
7	0.6	50	0.08	0.860	46.87	96.23	90.24
8	0.6	75	0.12	1.343	54.57	103.4	110.6
9	0.6	100	0.16	0.942	39.48	80.94	65.78

Tableau III-1 : Plan orthogonal pour les différentes réponses pour un plan de Taguchi L9

### III-5 Analyse de la variance

#### III.5- 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra

Les Tableau III-2 présentent les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour l'état de la surface, l'effort de coupe et. En plus les mêmes tableaux présentent le degré de liberté, somme des carrées F-value et P-value qui sont des indices statistiques utilisés pour l'analyse de la variance. On dit qu'un terme a une signification statistique si la valeur P-value de ce terme est inférieure à 0.05. La signification de tous les paramètres de coupe a été prouvée alors que les P- value de tous les paramètres étaient inférieures à 0,05. Par conséquent, il semble être important d'étudier les effets de chaque condition de coupe sur les caractéristiques d'usinage. La contribution des différents facteurs et leurs interactions ont également été présentées.

D'après les résultats de l'analyse ANOVA présentés dans le tableau III-2, il est a noté que la vitesse de coupe a un effet significatif sur la rugosité de la surface, sa contribution est d'environ 47.17% suivie par la l'avance par une contribution de 35.93 % et une petite contribution de 3.63 % pour la profondeur de passe. En plus le terme f\*f a une contribution de 4.02% sur la réponse Ra.

Source	DL	Seq s	Contr %	S-C ajust	CM Ajuste	Value- F	Value-p
Ap	1	0.0199	3.63	0.0199	0.019	0.73	0.550
Vc	1	0.259	47.17	0.022	0.022	0.81	0.533
F	1	0.197	35.93	0.0482	0.048	1.76	0.411
Carré	3	0.045	4.21	0.0396	0.0132	0.48	0.754
ap*ap	1	0.019	1.50	0.0192	0.0192	0.70	0.556
Vc*Vc	1	0.004	0.08	0.003	0.0035	0.13	0.780
F*f	1	0.025	4.02	0.017	0.0178	0.65	0.567
Inte a 2 fac	1	0.0003	0.07	0.00039	0.0003	0.01	0.924
Ap*Vc	1	0.0003	0.07	0.00039	0.0003	0.01	0.924
Erreur	1	0.027	3.32	0.0273	0.0273		
Total	12	0.549	100				

Tableau III-2 : ANOVA pour Ra

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans les figures III-1. A partir de cette figure, on peut visualiser et comparer le degré d'influence de divers facteurs sur la réponse étudiée. La courbe qui a la pente la plus élevée signifie que le facteur a la plus grande influence sur la réponse.

Il apparaît clairement que l'avance par tour (f) affecte fortement la rugosité de surface (Ra) suivie par la vitesse de coupe (Vc). Par contre, la profondeur de passe (ap) a une très faible influence sur (Ra).

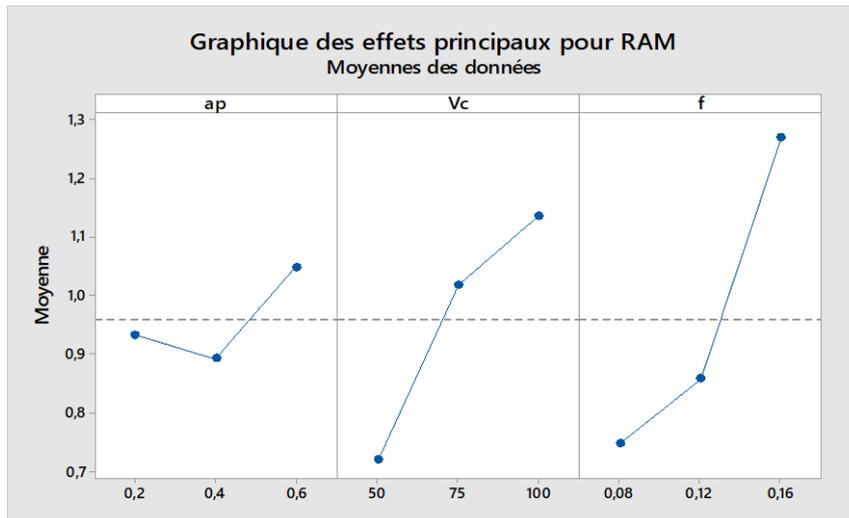


Figure III.1. Graphiques des effets principaux pour la rugosité (Ra).

### III.5-1.1 Analyse de régression de (Ra) en fonction de Vc, f et ap

La relation entre les facteurs d'entrée et de sortie est modélisée par une régression quadratique. Le modèle de régression obtenu est donné ci-dessous par l'équation (III.11) avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 95.02\%$

$$RA = 0,91 - 1,37 ap + 0,0213 Vc - 18,0 f + 2,45 ap*ap - 0,000109 Vc*Vc + 96 f*f - 0,0040 ap*V \quad \text{III.11}$$

Afin de mieux comprendre l'effet d'interaction des paramètres de coupe tel que l'avance par tour (f), la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (Vc) sur la rugosité de surface (Ra), les surfaces en 3D ont été tracés sur la figure (III.2) à partir de l'équation du modèle (Equation III.8). Les figures (a) et (b) montrent que l'effet de la vitesse de coupe (Vc) sur la rugosité de surface (Ra) est moindre par rapport aux effets de l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap). La figure (c) montre que l'augmentation de l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) provoquent une augmentation de la rugosité (Ra). Cependant, il est noté que l'effet de l'avance est plus important, comme l'ont démontré [55]. Il convient de noter que la rugosité de surface minimale est survenue pour la combinaison des deux valeurs faibles des paramètres (f, ap) et la valeur maximale de (Vc)

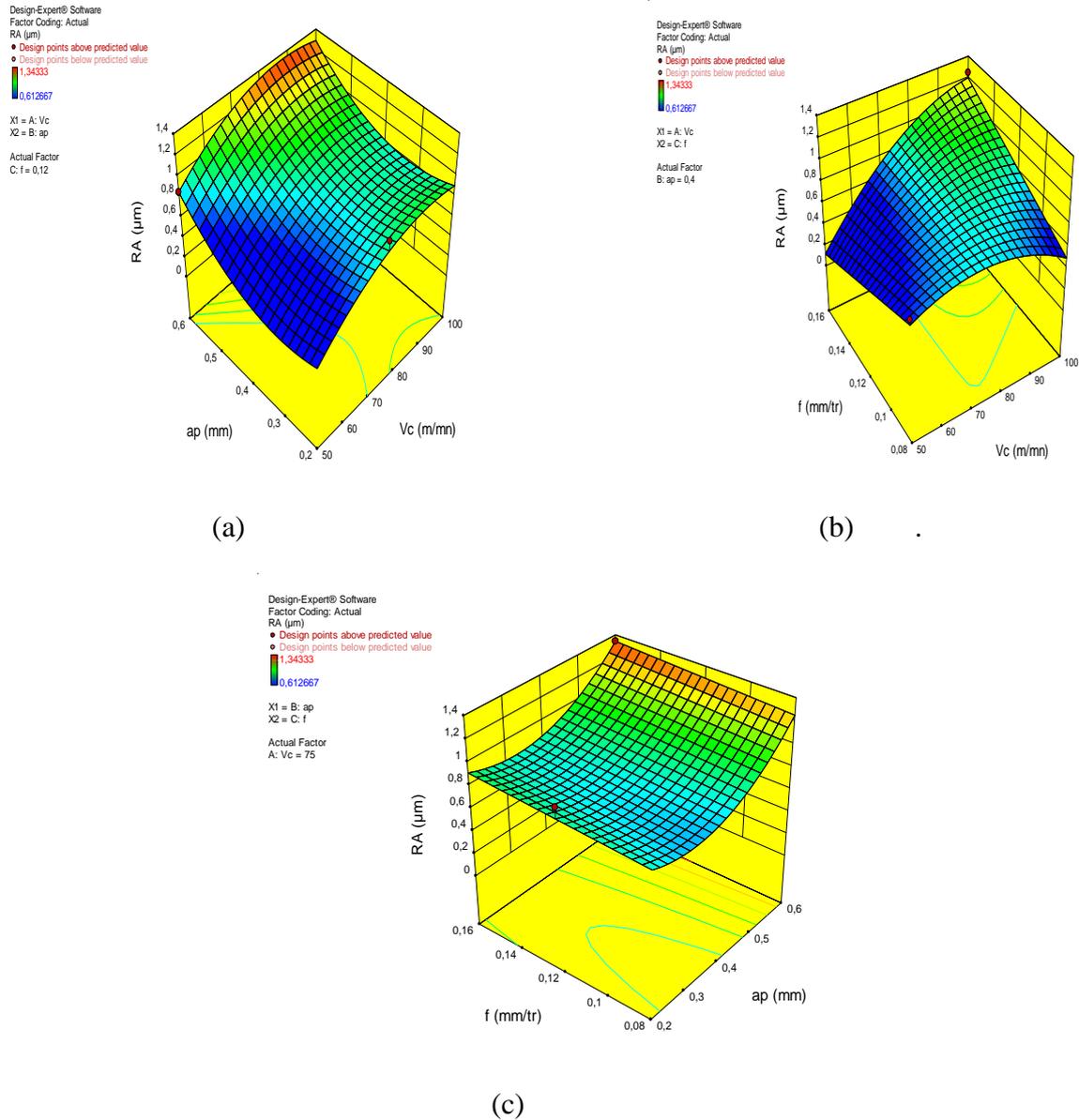


Figure III.2. Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité de surface (Ra).

### III.5.1.2. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La figure III.3 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et celles prédites à l'aide du modèle trouvé par l'analyse RMS. En analysant cette figure, nous pouvons remarquer que les points d'intersection entre les valeurs expérimentales et estimées sont très proche à la ligne moyenne ce qui prouve l'efficacité du modèle soit pour les valeurs destinées à l'apprentissage ou celles destinées pour la validation du modèle

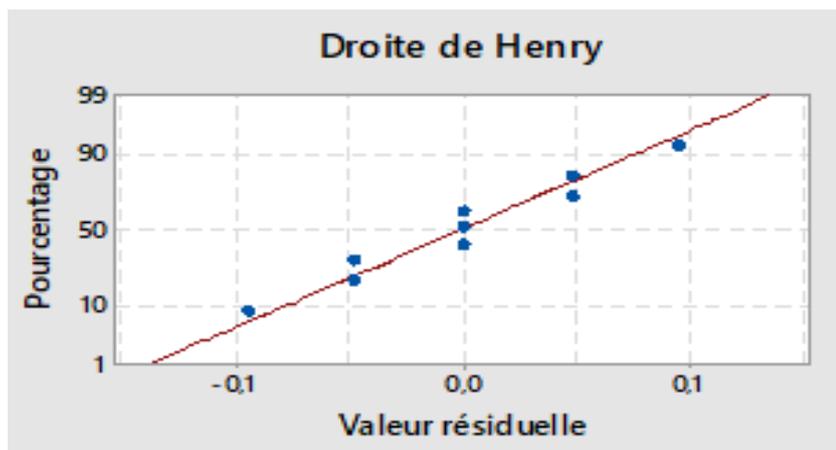


Figure III.3. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra)

### III.5- 2. Analyse de la variance (ANOVA) pour Fx

Le tableau III-3 présente les résultats de l'influence des paramètres de régime de coupe sur l'effort axial Fx . On peut remarquer que la profondeur de passe influe légèrement sur Fx comparativement à l'avance et la vitesse de coupe. L'analyse de la variance montre que ap et f ont des contributions de 87.09 % et 8.52%, mais la vitesse de coupe présente seulement une contribution de 0.47%.

Source	DL	Seq s	Contr %	S-C ajust	CM Ajuste	Value- F	Value-p
Ap	1	1539.2	87.09	1539.20	1539.20	5338.89	0.009
Vc	1	8.24	0.47	0.11	0.11	0.38	0.647
f	1	150.16	8.52	0.05	0.05	0.18	0.744
Carré	3	12.84	0.31	55.19	18.40	63.81	0.092
ap*ap	1	0.55	0.03	0.55	0.55	1.90	0.4
Vc*Vc	1	10.69	0.61	54.24	54.24	188.14	0.046
F*f	1	1.60	0.09	32.51	32.51	112.78	0.06
Inte a 2 fac	1	52.56	0.28	52.56	52.56	182.32	0.047
Ap*Vc	1	52.56	2.58	52.56	52.56	182.32	0.047
Erreur	1	0.29	0.02	0.29	0.29		
Total	8	1763.29	100				

tableau III-3 ANOVA pour Fx

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la figure III.4, à partir de cette figure, On peut dire que la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'effort axial de coupe (Fx), suivie par l'avance par tour (f) puis la vitesse de coupe (Vc). L'étude du graphique des effets principaux concorde avec les résultats des surfaces de réponse.

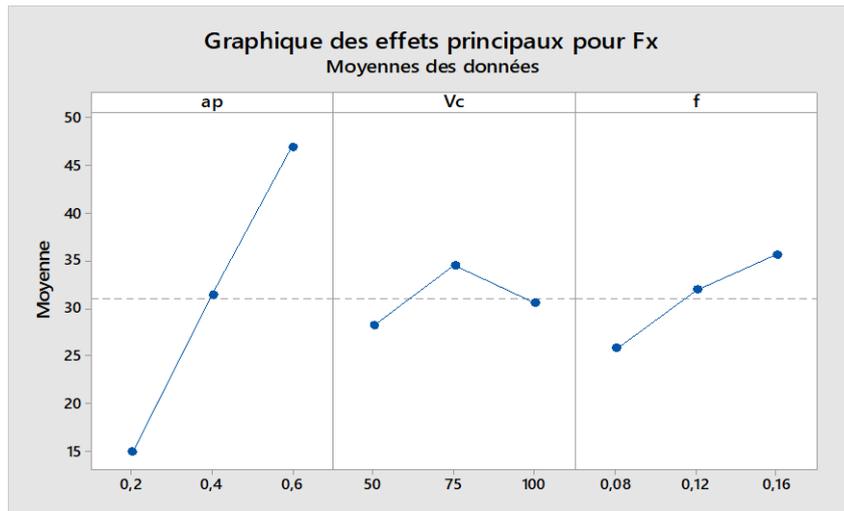


Figure III.4. Graphiques des effets principaux pour l'effort de coupe (Fx).

### III.5-2.1 Analyse de régression de (Fx) en fonction de Vc, f et ap

L'équation de régression obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (III.12) avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 98.89$

$$F_x = -61,96 + 199,3 ap + 2,612 V_c - 985,0 f - 13,08 ap*ap - 0,013500 V_c*V_c + 4083 f*f - 1,450 ap*V_c \quad \text{III.12}$$

La figure III.5. (a, b, et c) présente les surfaces de réponses en 3D. La figure (a) illustre l'effet de l'interaction entre la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f). Comme il a été prévu, on remarque que l'effort axial de coupe augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance par tour. Ceci est dû à l'élargissement de la section de coupe. Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe est plus importante. Les figures (b) et (c) révèle que la vitesse de coupe (Vc) a un effet moindre sur l'effort axial de coupe (Fx) ce qui confirme les résultats présentés dans le tableau III.3.

Sur le plan pratique, pour une profondeur de passe minimale (ap=0.2 mm) et une avance par tour aussi minimale (f=0,08 mm/tr), l'effort axial de coupe est minimale (Fx=10,99 N), et pour une profondeur de passe maximale (ap=0.6mm) et une avance maximale (f=0.16 mm/tr), l'effort axial de coupe (Fx) est maximale (Fx=54.57 N).

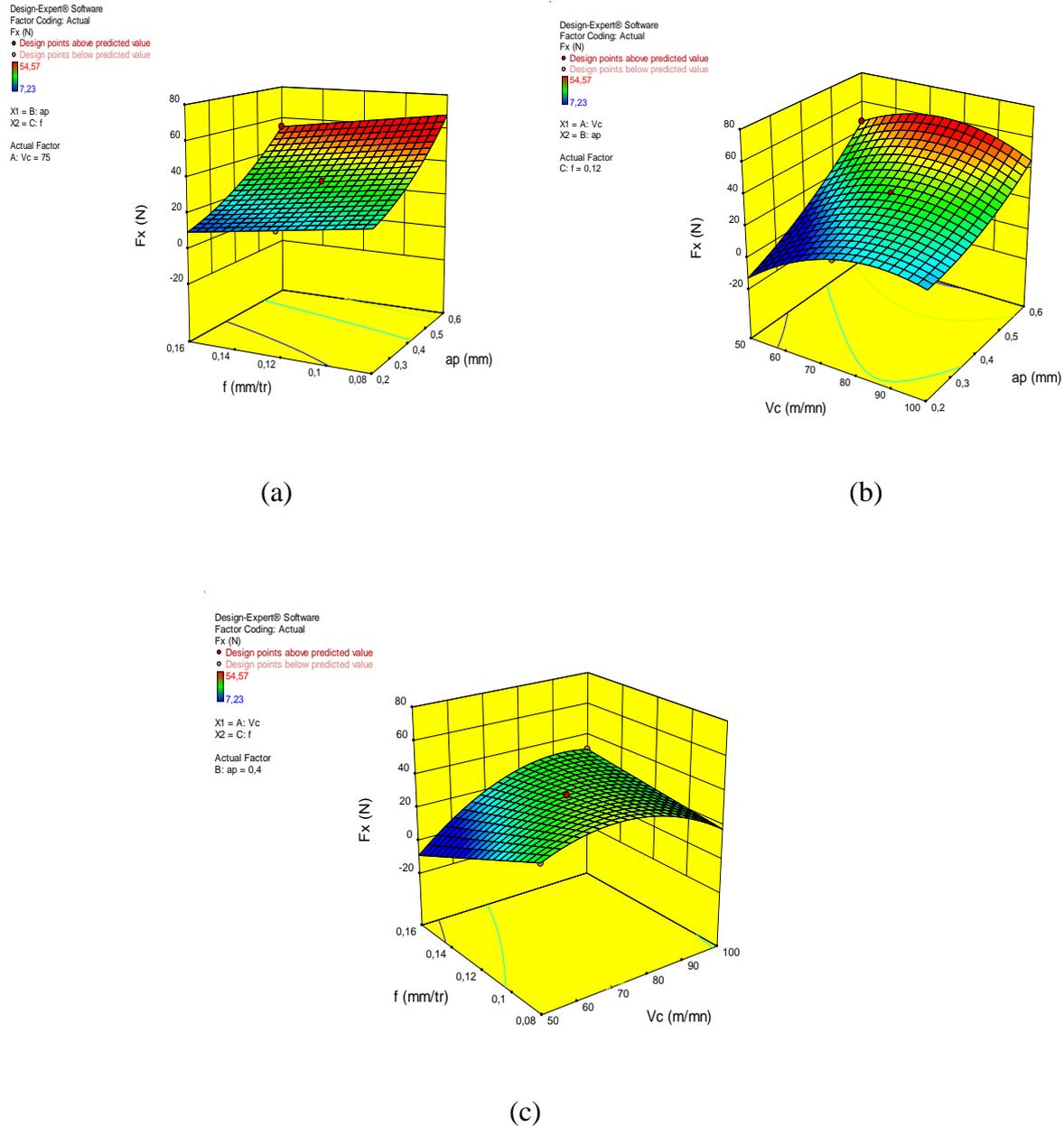


Figure III.5. Surface de réponse estimée pour l'effort de coupe ( $F_x$ ) selon  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ .

### III.5.2.2 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

Les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'effort tangentiel de coupe ( $F_x$ ) sont exposées dans la figure III.6. La comparaison des résultats montre que les valeurs prédites et celles mesurées sont proches ce qui prouve la fiabilité du modèle. De manière générale on remarque que la courbe des valeurs prédites épouse la forme de la courbe des valeurs expérimentales excepté quelques points d'essai où nous pouvons noter une petite divergence.

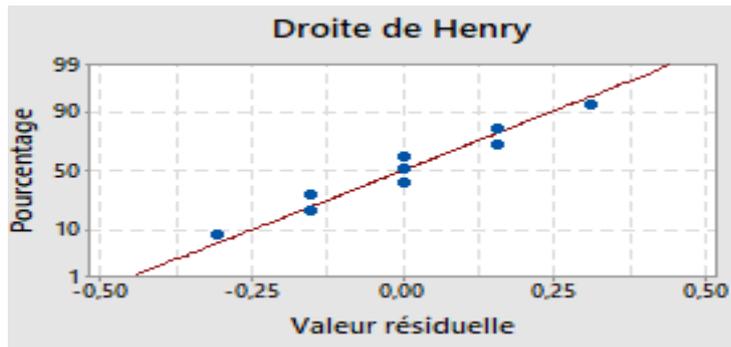


Figure III.6. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (F<sub>x</sub>)

### III.5- 3. Analyse de la variance (ANOVA) pour F<sub>z</sub>

le tableau III-4 présente les résultats de l'influence des paramètres de régime de coupe sur l'effort tangentiel F<sub>z</sub>. On peut remarquer que la profondeur de passe influe légèrement sur F<sub>z</sub> comparativement à l'avance et la vitesse de coupe. L'analyse de la variance montre que ap et f ont des contributions de 64.16% et 27.75%, mais la vitesse de coupe présente seulement une contribution de 4.25%.

Source	DL	Seq s	Contr %	S-C ajust	CM Ajuste	Value- F	Value-p
Ap	1	4121.78	64.16	421.78	421.78	2389.15	0.013
Vc	1	317.17	4.25	7.88	7.88	4.57	0.297
F	1	1844.88	27.75	417.12	417.12	241.78	0.041
Carré	3	130.28	2.03	42.9	42.9	24.87	0.041
ap*ap	1	35.06	0.55	35.06	35.06	20.32	0.146
Vc*Vc	1	87.27	1.36	28.04	28.04	16.25	0.139
F*f	1	7.95	0.12	3.56	3.56	2.06	0.155
Inte a 2 fac	1	0.14	00	0.14	0.14	0.08	0.387
Ap*Vc	1	0.14	00	0.14	0.14	0.08	0.823
Erreur	1	1.73	0.03	1.73	1.73		
Total	12	6416.36	100				

Tableau III.4- ANOVA pour F<sub>z</sub>

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la figure IV.7, à partir de cette figure, On peut dire que la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'effort axial de coupe (F<sub>z</sub>), suivie par l'avance par tour (f) puis la vitesse de coupe (Vc). L'étude du graphique des effets principaux concorde avec les résultats des surfaces de réponse

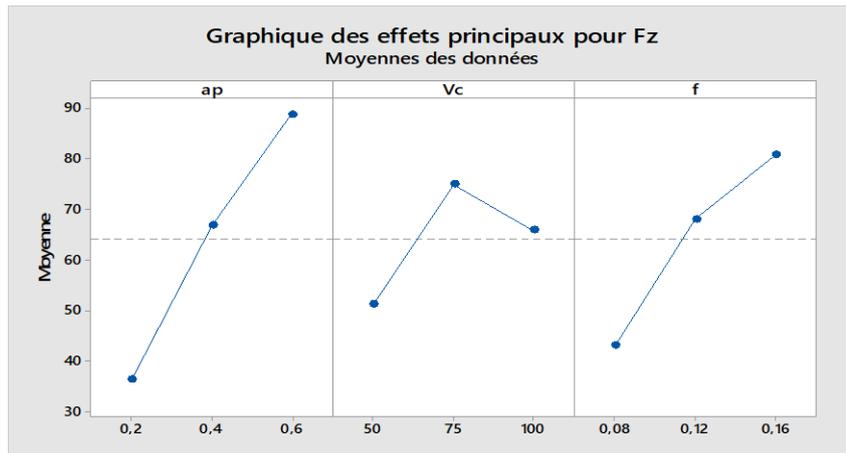


Figure III.7. Graphiques des effets principaux pour l'effort de coupe (Fz).

### III.5-3.1 Analyse de régression de (Fz) en fonction de Vc, f et ap

L'équation de régression obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (IV.12) avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 96.95$

$$Fz = -123,6 + 220,4 ap + 1,423 Vc + 784 f - 104,7 ap*ap - 0,00971 Vc*Vc - 1351 f*f - 0,075 ap*Vc$$

La figure .III.8 (a, b, et c) présente les surfaces de réponses en 3D. La figure (a) illustre l'effet de l'interaction entre la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f). Comme il a été prévu, on remarque que l'effort tangentiel de coupe augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance par tour. Ceci est dû à l'élargissement de la section de coupe. Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe est plus importante. Les figures (b) et (c) révèle que la vitesse de coupe (Vc) a un effet moindre sur l'effort tangentiel de coupe (Fz) ce qui confirme les résultats présentés dans le tableau III.4.

Sur le plan pratique, pour une profondeur de passe minimale (ap=0.2mm) et une avance par tour aussi minimale (f=0,08 mm/tr), l'effort tangentiel de coupe est minimale (Fz=13.10 N), et pour une profondeur de passe maximale (ap=0.6mm) et une avance maximale (f=0,16 mm/tr), l'effort tangentiel de coupe (Fz) est maximale (Fz=110.61 N).

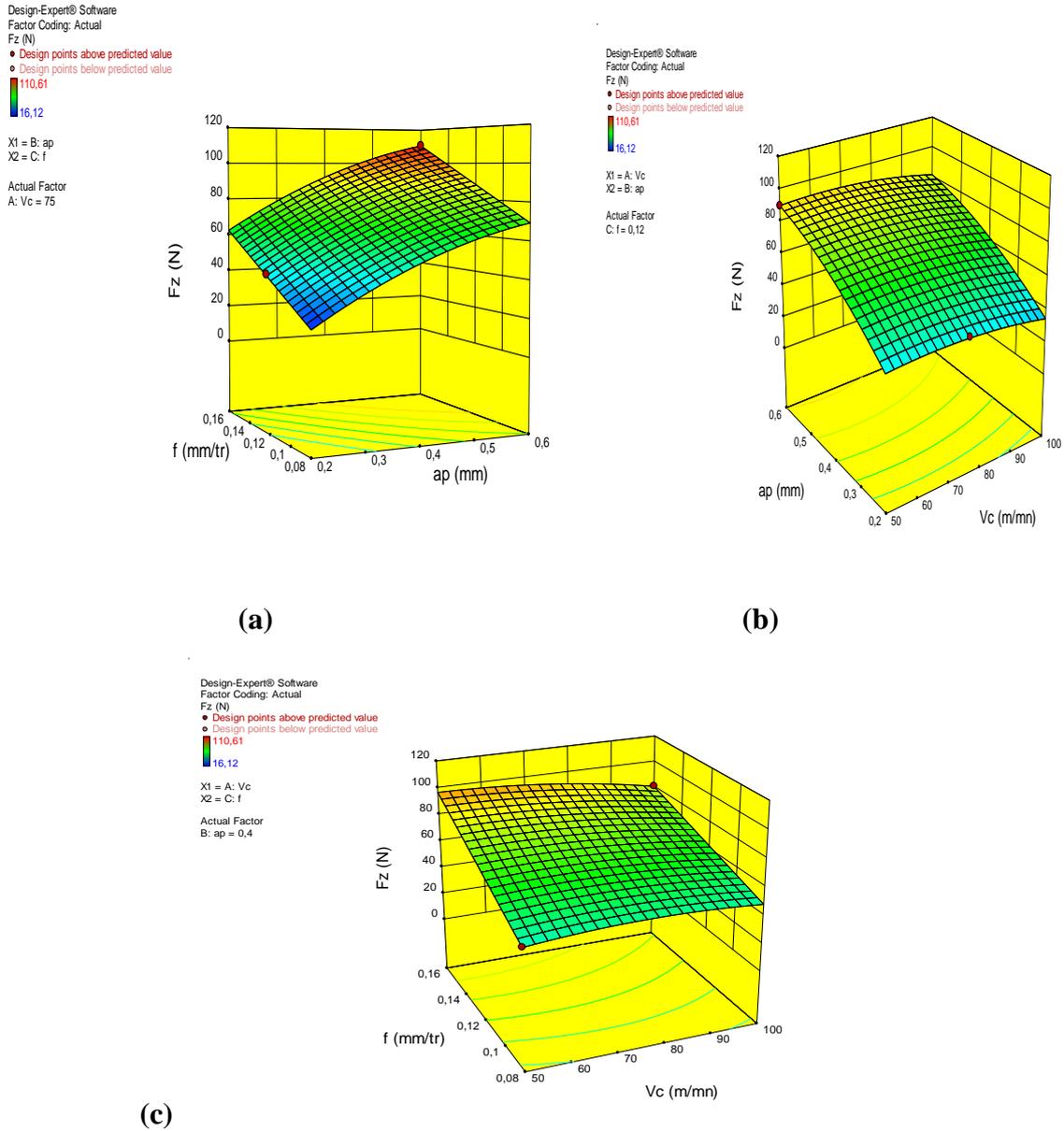


Figure III.8. Surface de réponse estimée pour l'effort de coupe ( $F_z$ ) selon  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$

### III.5.3.2 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

Les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'effort tangentiel de coupe ( $F_z$ ) sont exposées dans la figure III.9. La comparaison des résultats montre que les valeurs prédites et celles mesurées sont proches ce qui prouve la fiabilité du modèle. De manière générale on remarque que la courbe des valeurs prédites épouse la forme de la courbe des valeurs expérimentales excepté quelques points d'essai où nous pouvons noter une petite divergence.

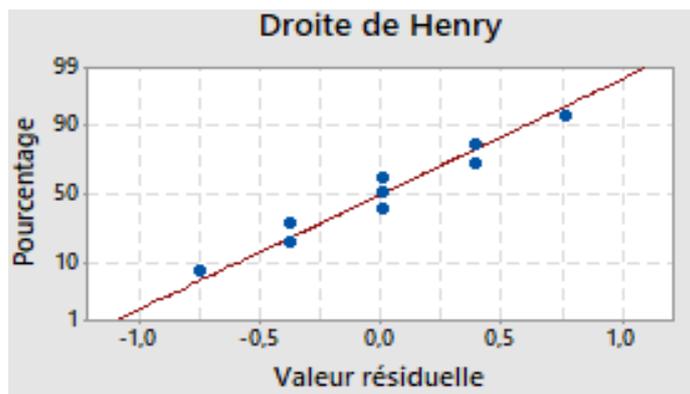


Figure III.9. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de ( $F_z$ ).

### III.5- 4. Analyse de la variance (ANOVA) pour $F_y$

le tableau III-5 présente les résultats de l'influence des paramètres de régime de coupe sur l'effort radial  $F_y$ . On peut remarquer que la profondeur de passe influe légèrement sur  $F_y$  comparativement à l'avance et la vitesse de coupe. L'analyse de la variance montre que  $a_p$  et  $f$  ont des contributions de 74.03% et 14.06%, mais la vitesse de coupe présente seulement une contribution de 3.26%

le tableau III-5 ANOVA pour  $F_y$

source	DL	Seq s	Contr %	S-C ajust	CM Ajuste	Value- F	Value-p
$A_p$	1	3221.56	74.03	3221.56	3221.56	.1292.03	0.018
$V_c$	1	155.04	3.26	00	00	00	0.997
$f$	1	624.93	14.06	121.23	121.23	48.62	0.091
Carré	3	338.13	4.77	330.14	330.14	44.13	0.110
$a_p*a_p$	1	328.28	3.18	328.28	328.28	131.66	0.055
$V_c*V_c$	1	6.70	0.15	0.13	0.13	0.05	0.855
$F*f$	1	3.15	0.07	0.43	0.43	0.17	0.749
Inte a 2 fac	1	9.33	0.21	9.33	9.33	3.74	0.304
$A_p*V_c$	1	9.33	0.21	9.33	9.33	3.74	0.304
Erreur	1	2.49	0.06	2.49	2.49		
Total	8	4351.48	100				

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la figure III.9, à partir de cette figure, On peut dire que la profondeur de passe ( $a_p$ ) affecte fortement l'effort radial de coupe ( $F_y$ ), suivie par l'avance par tour ( $f$ ) puis la vitesse de coupe ( $V_c$ ). L'étude du graphique des effets principaux concorde avec les résultats des surfaces de réponse

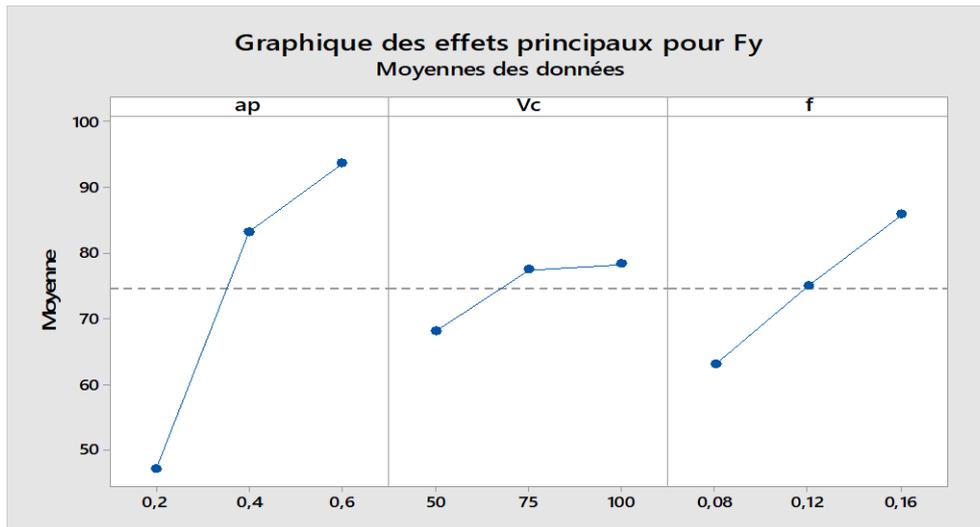


Figure III.10. Graphiques des effets principaux pour l'effort de coupe (F<sub>x</sub>).

### III.5-4.1 Analyse de régression de (F<sub>y</sub>) en fonction de V<sub>c</sub>, f et ap

L'équation de régression obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (III.12) avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 99.94$

$$F_y = -52,7 + 417,9 ap + 0,144 V_c + 135 f - 320,3 ap*ap + 0,00067 V_c*V_c + 471 f*f - 0,611 ap*V_c$$

La figure III.16 (a, b, et c) présente les surfaces de réponses en 3D. La figure (a) illustre l'effet de l'interaction entre la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f). Comme il a été prévu, on remarque que l'effort radial de coupe augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance par tour. Ceci est dû à l'élargissement de la section de coupe. Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe est plus importante. Les figures (b) et (c) révèle que la vitesse de coupe (V<sub>c</sub>) a un effet moindre sur l'effort radial de coupe (F<sub>y</sub>) ce qui confirme les résultats présentés dans le tableau III.5.

Sur le plan pratique, pour une profondeur de passe minimale (ap=0.2mm) et une avance par tour aussi minimale (f=0,08 mm/tr), l'effort radial de coupe est minimale (F<sub>z</sub>=20.27 N), et pour une profondeur de passe maximale (ap=0.6mm) et une avance maximale (f=0,16 mm/tr), l'effort tangentiel de coupe (F<sub>y</sub>) est maximale (F<sub>y</sub>=113.40 N).

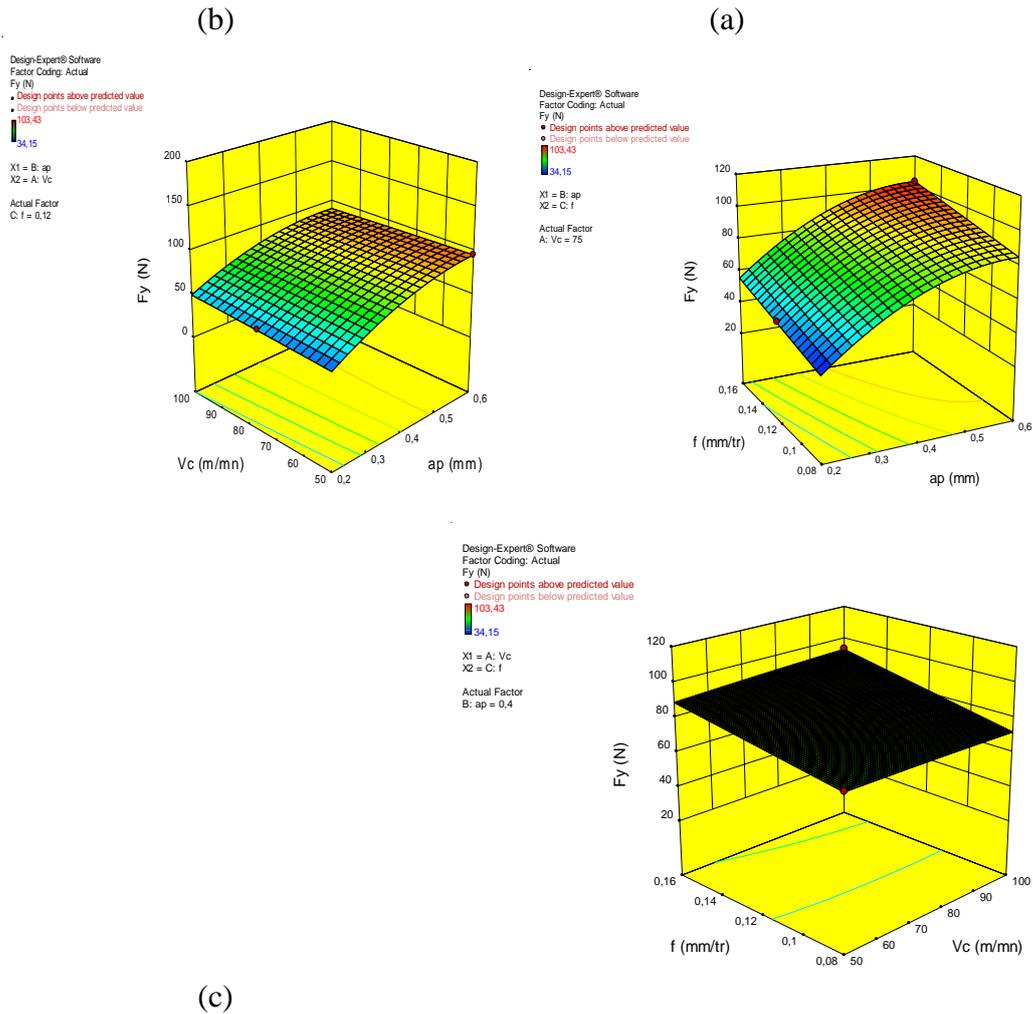
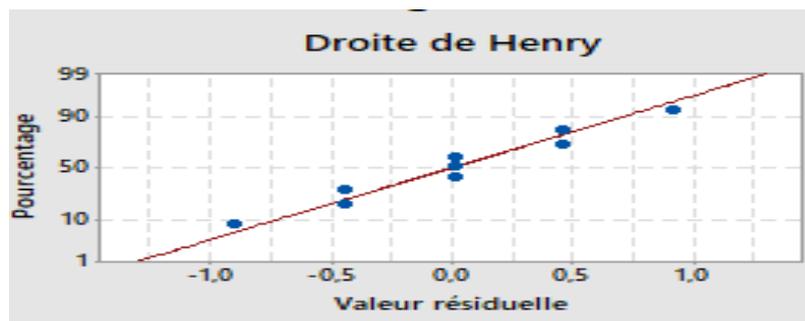


Figure III.11. Surface de réponse estimée pour l'effort de coupe ( $F_y$ ) selon  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$

### III.5.4.2 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

Les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'effort tangentiel de coupe ( $F_y$ ) sont exposées dans la figure IV.12. La comparaison des résultats montre que les valeurs prédites et celles mesurées sont proches ce qui prouve la fiabilité du modèle. De manière générale on remarque que la courbe des valeurs prédites épouse la forme de la courbe des valeurs expérimentales excepté quelques points d'essai où nous pouvons noter une petite divergence.



**Figure III.12.** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Fy).

### III.6. Optimisation des conditions de coupe :

L'objectif de l'optimisation multi-réponse est de déterminer les conditions sur les variables indépendantes qui conduisent à des valeurs optimales ou presque optimales des variables de réponse. La désirabilité semble avoir été proposée en premier lieu comme critère pour l'optimisation de la réponse par Harrington et autres [72] et popularisé par Derringer et Suich [17].

Les plages souhaitables entre 0 et 1 et la désirabilité de 0, c'est-à-dire qu'une désirabilité élémentaire prenant la valeur zéro, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente l'idéal du cas

La fonction objective simultanée est une moyenne géométrique de toutes les réponses transformées :

Où  $d_i$  est la désirabilité définie pour la  $i$ ème sortie ciblée et  $n$  est le nombre de réponses dans la mesure. Pour l'optimisation simultanée, chaque réponse doit avoir une valeur basse et élevée assignée à chaque but.

Lors de l'optimisation, le logiciel propose pour chaque réponse cinq choix pour définir le but désiré. Sur la feuille de travail, le champ de "but" doit être donc rempli par un des choix suivants :

- Aucun
- Maximum
- Minimum
- Cible
- Dans la gamme

Les significations des paramètres de but sont :

- Dans le cas de la recherche d'un maximum, la désirabilité est réécrite comme suit : **III.16**

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 0 \text{ si la réponse} < \text{la valeur basse} \\ 0 \leq d_i \leq 1 \text{ si la réponse varie entre la valeur basse et la valeur haute} \\ d_i = 1 \text{ si la réponse} > \text{la valeur élevée} \end{array} \right.$$

- Dans le cas de la recherche d'un minimum, la désirabilité est réécrite comme suit : **III.17**

$d_i = 1$  si la réponse < la valeur basse

$1 \geq d_i \geq 0$  si la réponse varie entre la valeur basse et la valeur haute

$d_i = 0$  si la réponse > la valeur élevée

### III.6.1 Optimisation par la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) en utilisant la fonction de désirabilité (DF) :

L'approche de la fonction désirabilité est l'une des méthodes les plus utilisées par pour l'optimisation multi-objective des réponses grâce à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [90]. La désirabilité permet d'évaluer en fonction des réponses calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés. L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (Ra) et les efforts de coupes souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour l'optimisation semblé être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (Ra) et les efforts de coupes (Fx,Fy,Fz) lors de l'usinage du titane.

Les étapes de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour les différents paramètres étudiés ont été exposées dans le chapitre III. Dans ce chapitre on s'intéresse seulement au résultat de l'optimisation.

Le tableau III.6 présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (RSM) de la rugosité de surface (Ra) et les efforts de coupe (Fx, Fy, Fz)

Les graphiques de contour sont présentés dans la figure III.13, ils présentent les valeurs optimales des paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap).

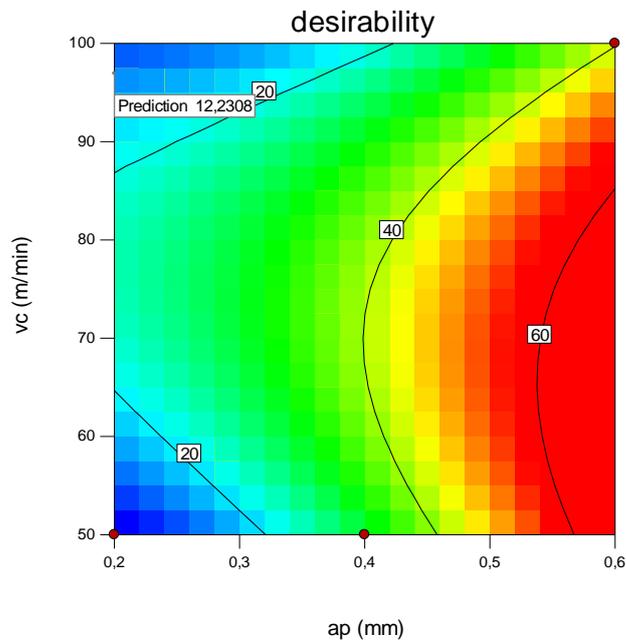
**Tableau III.6.** Optimisation par RSM de (Ra) et (Fx Fy Fz)

Ap (mm)	Vc (m/mn)	F(mm/t)	Ra (µm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Desirability
0.2	96.921	0.080	0.618	12.231	38.994	19.217	0.952
0.2	99.995	0.087	0.624	10.024	41.11	21.35	0.948
0.2	55.276	0.105	0.478	2.446	40.12	32.99	0.941
0.2	50	0.108	0.613	-6.727	39.94	33.82	0.939
0.23	100	0.108	0.516	2.094	40.92	35.02	0.932
0.203	56.056	0.107	0.613	9.580	46.25	24.23	0.931

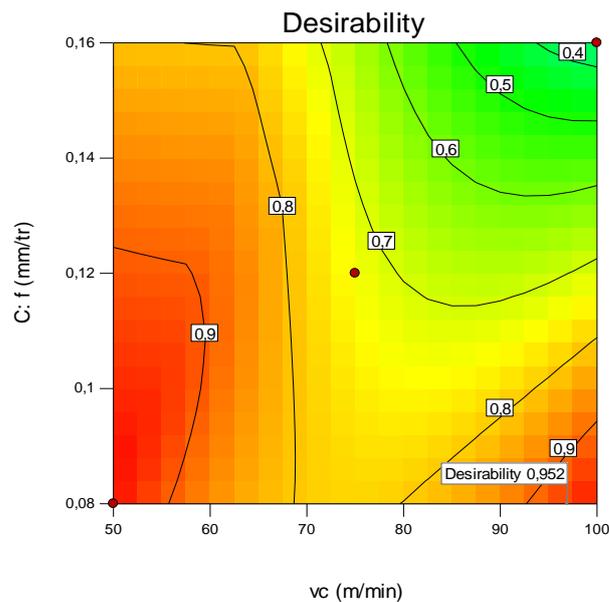
0.43	50	0.118	0.612	11.119	41.45	34.97	0.928
------	----	-------	-------	--------	-------	-------	-------

Les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe  $V_c = 96.921$  (m/min), l'avance par tour  $f = 0,08$  (mm/tr) et la profondeur de passe ( $a_p$ ) = 0.2 (mm). La rugosité de surface optimisée est  $R_a = 0.618$  ( $\mu\text{m}$ ) et les efforts de coupe  $F_x = 12.231$   $F_y = 38.994$  et  $F_z = 19.217$  (N)

Design-Expert® Software  
 Factor Coding: Actual  
 Fx (N)  
 ● Design Points  
 54,57  
 7,23  
 X1 = A:  $a_p$   
 X2 = B:  $v_c$   
 Actual Factor  
 C:  $f = 0,0800001$



Design-Expert® Software  
 Factor Coding: Actual  
 Desirability  
 ● Design Points  
 1,000  
 0,000  
 X1 = B:  $v_c$   
 X2 = C:  $f$   
 Actual Factor  
 A:  $a_p = 0,200002$



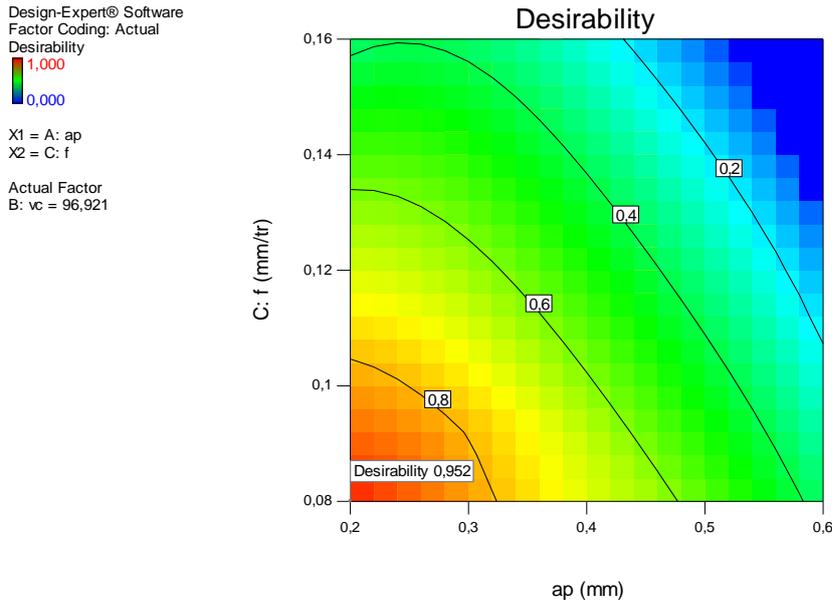


Figure III.13. Graphique de contour de désirabilité.

La figure III.14 présente les résultats de l'optimisation. Les valeurs des paramètres de coupe optimaux se révèlent comme suit :  $V_c = 96.92$  (m /min),  $f = 0,08$  (mm /tr) et  $a_p = 0.2$  (mm). La rugosité de surface optimisée et les efforts de coupe  $R_a = 0,618$  ( $\mu\text{m}$ ),  $F_z=19.217$  (N),  $F_x=12.231$ (N).  $F_y=38.99$ (N) La figure III.14 présente le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses ainsi que les désirabilités combinés=0,952.

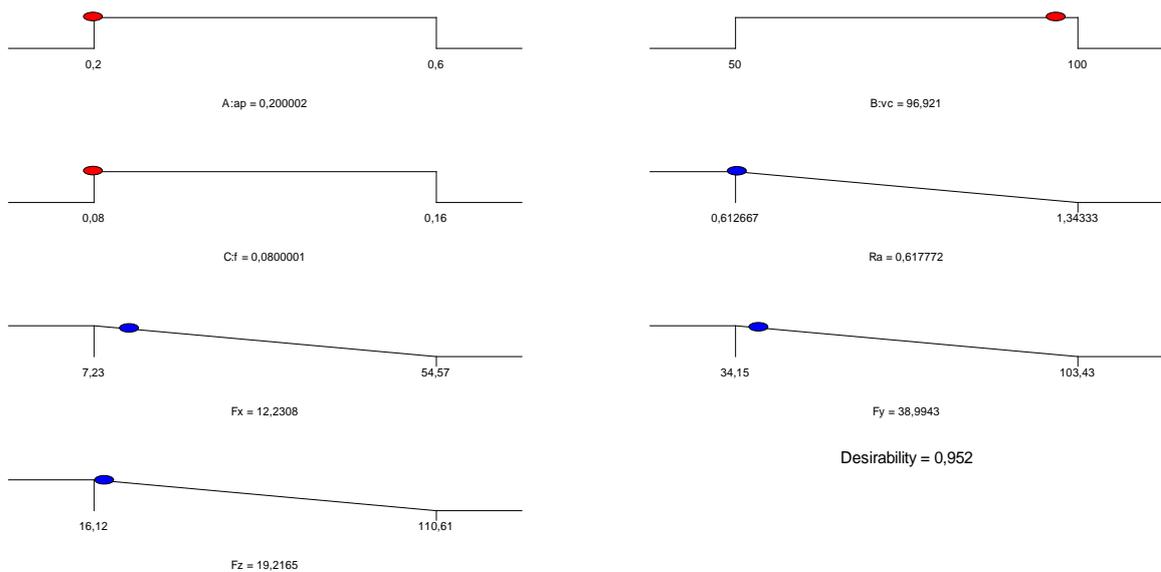


Figure III.14. Le graphique de fonction pour l'optimisation de ( $R_a$ ) et ( $F_x, F_y, F_z$ )

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des essais paramétriques lors du tournage du TI 6AL-4V

- Il ressort de cette étude que l'effet de l'avance est le plus sensible sur l'état de la surface usinée, suivi par la vitesse de coupe. la profondeur de passe n'a pas d'influence sur les critères de la rugosité de surface. D'autre part, l'augmentation des paramètres d'usinage tel que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe fait augmenter les efforts de coupe.
- l'application de l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression en tournage conventionnel du alliage de titane (Ti 6al-4V) avec un outil de coupe en carbure non revêtu H13A a permis d'obtenir des modèles mathématiques de la rugosité de surface arithmétique ( $R_a$ ), l'effort tangentiel de coupe ( $F_z$ ), l'effor radial et l'effort axial en fonction des paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ). Les modèles trouvés sont exploités pour l'optimisation suivant deux objectifs (rugosité minimale ; efforts de coupe minimale).
- nous avons appliqué un types d'optimisation dans laquelle nous avons utilisé la méthode des surfaces de réponse (RSM) basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF) pour optimiser la rugosité arithmétique de surface ( $R_a$ ) simultanément et les efforts de coupe ( $F_x, F_y, F_z$ ).

# *Conclusion Générale*

## Conclusion générale

L'objectif de ces travaux a été d'étudier l'influence des différents paramètres de régimes de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) sur les différents phénomènes rencontrés lors de la coupe tels que les efforts de coupe, la rugosité de la surface usinée. Notre étude a porté en particulier sur l'usinage de l'alliage de titane (Ti 6AL-4V) par un outil en carbure non revêtu (H13A)

En se basant sur les résultats obtenus dans tous les chapitres, les conclusions suivantes ont été tirées :

- la vitesse de coupe a un effet significatif sur la rugosité de la surface, sa contribution est d'environ 47.17% suivie par la l'avance par une contribution de 35.93 % et une petite contribution de 3.63 % pour la profondeur de passe
- On ce qui concerne les efforts de coupe, nous avons trouvé que :
- L'accroissement de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) fait diminuer les trois composantes ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) respectivement
- Lorsque la profondeur de passe ( $a_p$ ) augmente, les trois composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) augmentent de respectivement. Nous avons remarqué aussi que la valeur maximale de l'effort ( $F_y$ ) dépasse 100 (N) pour une profondeur de passe  $a_p=0.4$  et  $0.6$  (mm). D'autre part, la composante radiale  $F_y$  est la plus influencée par l'augmentation de la profondeur de passe  
-Les efforts de coupe sont influencés par l'avance, une augmentation de l'avance conduit à une élévation de la composante tangentielle de l'effort de coupe ( $F_z$ ) les deux autres composants ( $F_x$ ) et ( $F_y$ ) de successivement
- Les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface ( $R_a$ ) pour un niveau de confiance de 95% montrent que la vitesse de coupe est le facteur le plus important qui affecte ( $R_a$ ), sa contribution est de 47.17% suivie par la l'avance ( $f$ ) avec 35.93% de contribution, L'interaction ( $f \times f$ ) et le produit ( $f^2$ ) ont des contributions à 4.64%. Les autres termes peuvent être supposés non significatifs. Ces résultats sont confirmés avec les diagrammes de Pareto.
- Les résultats de l'ANOVA pour l'effort tangentiel de coupe ( $F_z$ )et l'effort radial ( $F_y$ ) et l'effort axial ( $F_x$ ) pour un niveau de confiance de 95% montrent que ( $a_p$ ) et ( $f$ ) ont un effet significatif sur (  $F_z$   $F_x$   $F_y$ ). Néanmoins, ( $a_p$ ) est le facteur le plus important avec une contribution de  $F_x=87.29\%$ . $F_y=74.03\%$  et  $F_z=64.24\%$
- Le facteur suivant le plus important influençant ( $F_x$ ,  $F_y$ .  $F_z$ ) est ( $a_p$ ) suivi par ( $f$ ), leurs contributions sont de pour  $F_x= 87.29\%$  et  $8.52\%$  respectivement. L'interaction ( $f \times f$ ) à  $4,31\%$  de contribution et le terme.  $F_y=74.03\%$  pour ( $a_p$ ) et  $14.36\%$  pour ( $f$ ) et le terme  $F_z=64.24\%$  pour ( $a_p$ ) et  $28.75\%$  pour ( $f$ ) Les autres termes ont une contribution inférieure à 1%
- les résultats de l'ANOVA indiquent que tous les paramètres d'entrée sont significatifs mais la profondeur de passe ( $a_p$ ) est le facteur le plus expressif
- Pour l'optimisation combinée (minimiser ( $R_a$ ) et ( $F_x$ ),( $F_y$ ),( $F_z$ ) ), les valeurs des paramètres de coupe optimaux se révèlent comme suit :  $V_c = 9.92\text{m} / \text{min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm} / \text{tr}$  et  $a_p = 0.2 \text{ mm}$ . La rugosité de surface optimisée et les efforts de coupe sont les suivants ( $R_a = 0,0.618 \mu\text{m}$ ,  $F_x=12.231 \text{ N}$   $F_y=38.994 \text{ N}$  et  $F_z=19.217$  avec une désirabilité combinée = 0,952

*Reference*  
*Bibliographie*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Lutjering, G. and Williams, J. C. (2003). Titanium. Springer, Berlin, New-York.
- [2] Leyens, C. and Peters, M. (2003). Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and applications.
- [3] Titane, A. (2012). Association Titane - The French Titanium.
- [4] Felder, E. (1997). Procédés d'usinage. Techniques de l'ingénieur, B7000.
- [5] Ezugwu, E. (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12-13) :1353–1367.
- [6] Siekman, H. (1955). How to machine titanium. *Tool Engineer*, pages 78–82.
- [7] Ezugwu, E. O., and Z. M. Wang. "Titanium alloys and their machinability—a review". *Journal of materials processing technology* 68.3 (1997): 262-274. [3] Nabhani, Farhad. "Machining of aerospace titanium alloys". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 17.1 (2001): 99-106.
- [8] Machado, A. R. and Wallbank, J. (1990). Machining of titanium and its alloys - Ia review. ARCHIVE : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture 1989-1996 (vols 203-210), 204(12) :53–60.
- [9] KONIG, W. (1978). Applied research on the machinability of titanium and its alloys. Proceedings of 47th Meeting of AGARD Structural and Materials Panel, Florence, Italy, pages 1.1–1.10.
- [10] Ernst, H. (1938). Physics of metal cutting, machining of metals. American Society for Metals, pages 1–34.
- [11] Burns, T. J. and Davies, M. A. (2002). On repeated adiabatic shear band formation during high-speed machining. *International Journal of Plasticity*, 18(4) :487–506.
- [12] Ezugwu, E. O., Bonney, J., and Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(2) :233–253.
- [13] Rahman, Mustafizur, Wang Zhi-Gang, and W. O. N. G. Yoke-San "A review on high-speed machining of titanium alloys". *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* 49.1 (2006): 11-20.
- [14] Arrazola, P-J., A. Garay, L-M. Iriarte, M. Armendia, SurendarMarya, and Felix Le Maitre. "Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3)". *Journal of materials processing technology* 209.5 (2009): 2223-2230.
- [15] Sahin, Yusuf, and A. RizaMotorcu. "Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool". *Materials & design* 26.4 (2005): 321-326.

[16] Abouelatta, O. B., and J. Madl. "Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations" .Journal of materials processing technology 118.1 (2001): 269-277.

[17] Dimla, Dimla Eric. "The correlation of vibration signal features to cutting tool wear in a metal turning operation".The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19.10 (2002): 705-713.

[18] Salgado, David Rodríguez, F. J. Alonso, I. Cambero, and A. Marcelo. "In-process surface roughness prediction system using cutting vibrations in turning".The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 43.1-2 (2009): 40-51.

[19] Hessainia, Zahia, Ahmed Belbah, Mohamed AthmaneYallese, TarekMabrouki, and Jean-François Rigal. "On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations".Measurement 46.5 (2013): 1671-1681.

[20] Grynald’Mello & SrinivasaPai Surface Roughness Modeling In High Speed Turning Of Ti-6Al-4V Using Response Surface Methodology P/ Materials Today: Proceedings 5 (2018) 11686–11696