

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



## **Mémoire de Fin d'Études**

**Pour l'obtention du diplôme de Master 2**

**Option : Construction Mécanique**

**Présenté par : CHIHEB Imad Eddine**

=====

**Etude de la rugosité de surface et des vibrations lors de l'usinage d'un alliage réfractaire (Inconel 718)**

=====

Sous la Direction de :

- **Dr. BELHADI Salim**
- **Pr. YALLESE Med Athmane**

**Année universitaire : 2019/2020**

# *Je dédie ce travail à*

*A mon père et ma mère ;*

*Mes frères et ma sœur ;*

*Toute ma famille ;*

*Mes chers amis ;*

*Et tout personne à contribuer dans ce travail.*

# *Remerciement*

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

*Je tiens à exprimer toute mes reconnaissances aux Dr. Belhadi*

*Salim et Pr. Yallese Mohamed Athmane qui ont su diriger ce  
mémoire avec intérêt et compétences, tout au long de cette période.*

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

## Résumé

Les alliages à base de nickel (Inconel 718) sont largement utilisés dans les domaines de la technologie spatiale, des moteurs de fusées, des réacteurs nucléaires, de la pétrochimie, des sous-marins, des centrales électriques et autres. En raison de ses propriétés mécaniques élevées, caractérisé par une faible conductivité thermique et d'autres caractéristiques, ce dernier est un matériau difficile à usiner.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet des conditions de coupe telles que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ), la profondeur de passe ( $a_p$ ) et le rayon de bec de l'outil ( $r$ ) sur le critère de rugosité de surface ( $R_a$ ) et la vibration tangentielle ( $V_{tng}$ ) pendant le tournage à sec de l'Inconel 718 avec un outil en carbure métallique revêtu (Carbure à grain fin avec revêtement PVD TiAlN GC1105), suivant un plan d'expérience de Taguchi L27.

La Méthodologie de la surface de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) ont été utilisées pour développer des modèles mathématiques de prédiction et pour déterminer les conditions de coupe optimales en utilisant l'analyse relationnelle grise (GRA) et la fonction de désirabilité (DF) dans le but de minimiser la rugosité de surface et la vibration tangentielle ( $V_{tng}$ ).

**Mots-clés :** Inconel 718, ANOVA, RSM ; Taguchi ; GRA ; DF.

# Abstract

Nickel-based alloys (Inconel 718) are widely used in the fields of space technology, rocket engines, nuclear reactors, petrochemicals, submarines, power plants and others. Due to its high mechanical properties, characterized by low thermal conductivity and other characteristics, the latter is a difficult material to machine.

The main objective of this work is to study the effect of cutting conditions such as cutting speed ( $V_c$ ), advance ( $f$ ), pass depth ( $a_p$ ) and beak radius of the tool ( $r$ ) on the surface roughness criterion ( $R_a$ ) and tangential vibration ( $V_{tng}$ ) during the dry turning of the Inconel 718 with a coated metal carbide tool (Fine-grained carbide with TiAlN GC1105 PVD coating), following a plan of experience of Taguchi L27.

Response Area Methodology (RSM) and Variance Analysis (ANOVA) were used to develop mathematical prediction models and to determine optimal cutting conditions using Gray Relational Analysis (GRA) and Desirability Function (DF) to minimize surface roughness and tangential vibration ( $V_{tng}$ ).

**Keywords :** Inconel 718, ANOVA ; RSM ; Taguchi ;GRA ; DF.

## Liste de figures

Figure I.1 Principe de la coupe des métaux dans le tournage

Figure I.2 Vitesse de coupe

Figure I.3. Avance par tour et Profondeur de passe ap

Figure I.4. Caractéristiques du profil

Figure I.5. Les critères de la rugosité

Figure I.6. Profil de surface tournée

Figure I.7. Composantes de l'effort de coupe

Figure I.8. Formes d'usure sur les outils de coupe.

Figure I.9. Relation Usure – Temps

Figure I.10 a-d Conditions de traitement optimales avec l'approche de l'analyse relationnelle de Taguchi et du gris de Taguchi pour les meilleures conditions de paramètres

Figure I.11 a-d Conditions de traitement optimales avec l'approche de l'analyse relationnelle de Taguchi et du gris de Taguchi pour les pires conditions de paramètres

Figure I.12 vibration du porte outil dans la direction tangentielle

Figure I.13 vibration du porte outil dans la direction axial

Figure I.14 Comparaison entre la sortie du modèle et la vibration de l'outil de coupe mesurée directement

Figure I.15 Comparaison entre Ra prédictive et réelle

Figure I.16 Comparaison entre l'usure d'outil prédictive et réelle

Figure I.17 Comparaison la puissance utile prédictive et réelle

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

Figure II.2. Variateur de vitesse, Modèle ABB série ACS355

Figure II.3. Capteur de vitesse de rotation de la broche

Figure II.4. Éprouvette utilisée en essais (Inconel 718)

Figure II.5. Plaquettes de coupe GC1105 en Carbure revêtu (SANDVIK)

Figure II.6. Porte plaquette ISO : PSBNR2525K12 (SANDVIK)

Figure II.7. Rugosimètre 2D modèle SurfTest SJ- 210 de Mitutoyo avec logiciel d'exécution

Figure II.8. Vibromètre Modèle VM-6360

Figure II.9 Acquisition des mesures

Figure II.10. Interface de logiciel MiniTAB18

Figure II.11. Interface de logiciel Design Expert 10 développé par Stat-ease

Figure III.1. Graphique des effets principaux pour (Ra)

Figure III.2. Diagramme de Pareto des effets pour la rugosité de surface (Ra)

Figure III.3. Probabilité normale des résiduelles de réponse (Ra)

Figure III.4. Comparaison entre les valeurs calculées et prédites du Ra

Figure III.5. Surface 3D de (Ra) en fonction de (a : f ; r), (b : Vc ; r), (f ; r), (c : ; ap), (d : Vc ; f) (eVc : Vc ; ap) et (ff : f ; ap)

Figure III.6. Graphique des effets principaux pour (Vtng)

Figure III.7. Diagramme de Pareto des effets pour vibration (Vtng)

Figure III.8. Probabilité normale des résiduelles de réponse Vtng

Figure III.9. Comparaison Comparaison entre les valeurs calculées et prédites du Vtng

Figure III.10. Surface 3D de (Vtng) en fonction de (a : Vc ; r) (b : (f ; r), (c : r ; ap), (d : Vc ; f) (e : Vc ; ap) et (f : f ; ap)

Figure IV.1 Graphique des effets principaux de  $r$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur (  $\left[ \frac{S}{B} \right]_{Ra}$  )

Figure IV.2 Graphique des effets principaux de  $r$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur (  $\left[ \frac{S}{B} \right]_{V_{tng}}$  )

Figure IV.3 Graphique des effets principaux de la qualité grise (Grey Grade)

Figure IV.4: Résultat optimales des paramètres étudiés

Figure IV.5 Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques

Figure IV.6. La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

## Liste de tableaux

Tableau I.1 Matrice de conception et réponses expérimentales

Tableau I.2 Les données pour 27 séquences de comparabilité

Tableau I.3 Le coefficient relationnel de gris calculé et la note relationnelle de gris pondérée pour 27 séquences de comparabilité

Tableau II.1. Composition chimique de l'Inconel 718

Tableau II.2. Caractéristiques de porte outil utilisé

Tableau II.3. Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 27

Tableau II.4. Les trois niveaux de condition de coupe

Tableau III.1. Résultats expérimentaux d'usinage de l'inconel 718

Tableau III.2. Résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra)

Tableau III.3. Résultats de l'ANOVA pour vibration (Vtng)

Tableau IV.1. Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées

Tableau IV.2. Moyenne des ratios S/B(Ra) pour chaque niveau des facteurs

Tableau IV.3. Moyenne des ratios S/B(Vtng) pour chaque niveau des facteurs

Tableau IV.4. Résultats de la Méthode de Taguchi

Tableau IV.5. Résultats expérimentale normalisé  $x_i^0(k)$

Tableau IV.6. Coefficients du GR ( $\xi_i(k)$ ) et Niveau relationnel gris (Grey Relationnel Grade (GRG))

Tableau IV.7. Résultats des valeurs optimales des paramètres étudié

Tableau IV.8. différents résultats des trois cas étudiés

## Liste des abréviations

r	:	Rayon de bec de l'outil (mm).
V <sub>c</sub>	:	Vitesse de coupe (m/min).
f	:	Avance par tour (mm/tr).
a <sub>p</sub>	:	Profondeur de passe (mm).
R <sub>a</sub>	:	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
V <sub>tng</sub>	:	Vibration tangentielle (m/s <sup>2</sup> ).
α	:	Angle de dépouille principal (degré).
γ	:	Angle d'attaque (degré).
λ	:	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).
χ	:	Angle de direction principal (degré).
R <sup>2</sup>	:	Coefficient de corrélation.
Cont%	:	Pourcentage de contribution (%).
ANOVA	:	Analyse de la variance.
RSM	:	Méthodologie de surface de réponse.
GRA	:	Analyse Relationnelle Gris.
DF	:	Fonction désirabilité.

# Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------	---

## Chapitre I : ETUDE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION	3
I.2. USINABILITE	3
I.3. COUPE DES METAUX	4
I.4. PARAMETRES DE COUPE EN TOURNAGE	4
I.4.1. La vitesse de coupe	4
I.4.2. Avance par tour (f)	6
I.4.3. Profondeur de passe (ap)	6
I.5. LES OUTILS DE COUPE	7
I.5.1. Acier rapide (AR)	7
I.5.2. Carbure de tungstène cémenté	7
I.5.3. Céramiques	8
I.5.4. Nitrure de bore cubique (CBN)	8
I.5.5. Diamant polycristallin (PCD)	8
I.6. PARAMETRES TECHNOLOGIQUES DE L'USINAGE	8
I.6.1. Etat de surface des pièces mécaniques	8
I.6.2. Vibrations	11

I.6.3. Efforts de coupe	13
I.6.4. Usure des outils de coupe	14
I.7. ETAT DE L'ART	17
I.8. CONCLUSION	25

## **Chapitre II : PROCEDURE ET EQUIPEMENT D'EXPERIENCE**

II.1. INTRODUCTION	26
II.2. EQUIPEMENTS UTILISE	26
II.2.1. Machine-outil	26
II.2.2. Matériau à usiner	27
II.2.3. Outils de coupe	28
II.2.4. Porte outil utilisé	28
II.2.5. Rugosimètre 2D pour la mesure de la rugosité	29
II.2.6. Acquisition des vibrations	30
II.2.7. Autres Moyens exploités	32
II.3. PLANIFICATION DES EXPERIENCES DE TAGUCHI	33
II.4. CONCLUSION	35

## **Chapitre III : ANALYSE ET MODELISATION DES RESULTATS**

III.1. INTRODUCTION	36
III.2. RESULTATS DES ESSAIS	36
III.3. ANALYSE DE VARIANCE ET METHODOLOGIE DES	

SURFACES DE REPONCE	37
III.3.1. Analyse de variance (ANOVA)	37
III.3.2. Méthodologie des surfaces de réponses	38
III.4. ANALYSE DE LA VARIANCE ANOVA POUR Ra	40
III.4.1. Graphique des effets principaux pour Ra	41
III.4.2. Diagramme de Pareto des effets pour Ra	42
III.4.3. Analyse de régression pour Ra	42
III.4.4. Test de concordance entre les valeurs prévue et expérimentale	42
III.4.5. Surface en 3D de Ra	44
III.5. ANALYSE DE LA VARIANCE ANOVA POUR Vtng	45
III.5.1. Graphique des effets principaux pour Vtng	46
III.5.2. Diagramme de Pareto des effets pour Vtng	47
III.5.3. Analyse de régression pour Vtng	48
III.5.4. Test de concordance entre les valeurs prévue et expérimentale	48
III.5.5. Surface en 3D de Vtng	49
III.6. CONCLUSION	51

## **Chapitre IV : OPTIMISATION DES CONDUCTIONS DE COUPE**

IV.1. INTRODUCTION	52
IV.2. OPTIMISATION PAR LA METHODE DE TAGUCHI	52
IV.2.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra)	54
IV.2.2. Analyse des effets principaux sur la vibration (Vtng)	55
IV.3. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF PAR LA METHODE D'ANALYSE RELATIONELLE GRISE	56

IV.3.1. La normalisation	56
IV.3.2. Calcul des Coefficients du Relationnel Gris (GRC)	57
IV.3.3. Calcul du GRG (Grey Relationnel Grade)	58
IV.4. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF PAR LA METHODE DE LA FONCTION DESARIBILITE (DF)	59
IV.4.1. Introduction	59
IV.4.2. Application de la méthode de maximisation de la fonction désirabilité	61
IV.5. CONCLUSION	64
CONCLUSION GENERALE	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

## INTRODUCTION GENERALE

L'Inconel est une marque désignant différents alliages de métaux. Cette marque est utilisée comme préfixe pour environ 25 alliages, considéré par l'industrie métallurgique comme faisant partie de la gamme des superalliages, c'est-à-dire un alliage contenant une grande quantité de nickel et de chrome. Les plus couramment utilisés sont l'Inconel 600, l'Inconel 625 et l'Inconel 718.

L'Inconel 718 est un superalliage utilisé à des températures comprises entre 450 et 700°C, sans que ses propriétés de résistance mécanique ne soient modifiées de façon préjudiciable, même après une longue exposition à de très hautes et très basses températures.

Pour cela, ce matériau est choisi pour la fabrication des pièces où des hautes et/ou basses températures sont en jeu, et dans des environnements sévères.

Les pièces en Inconel 718 sont généralement réalisées par un procédé d'usinage : tournage, fraisage ou perçage. Les caractéristiques métallurgiques et mécaniques de l'alliage rendent ces opérations de mise en forme critiques et grâce à ses propriétés, l'alliage est connu comme étant parmi les plus difficiles à usiner. Cette difficulté de mise en forme impose généralement l'utilisation des quantités importantes de fluides de coupe induisant un coût financier, sanitaire et environnemental non négligeable.

Considérant ces contraintes, l'industrie moderne s'oblige de s'adapter avec les caractéristiques de ce matériau et de se migrer vers l'usinage à sec ; le tournage dur et l'usinage à grande vitesse. Cependant, à cause de sa mauvaise usinabilité, les surfaces usinées sont affectées ou endommagées durant l'opération d'usinage sous l'impact de plusieurs phénomènes physiques liés principalement à une très grande déformation plastique due aux efforts de coupe et la génération d'une importante chaleur dans la zone de coupe affectant ainsi l'intégrité de surface de la pièce usinée. Afin d'en assurer une qualité satisfaisant des produits finis, une attention particulière doit être portée sur l'optimisation des conditions de coupe permettant d'améliorer la qualité et la productivité en utilisant les méthodes statistiques. Une étude physique est aussi à faire pour les différents types des d'outils de coupe utilisés en investiguant le comportement tribologique du couple Outil-Pièce.

Ce travail est organisé en quatre chapitres distincts.

*Le premier chapitre* est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux et sur un état d'art concernant l'usinage de l'Inconel 718 en s'appuyant sur les divers articles, revues et thèses. Dans ce chapitre nous avons présenté une introduction sur l'usinabilité et la coupe des métaux, suivie par les matériaux à outil et les différents phénomènes intervenant lors de la coupe.

*Dans le second chapitre*, nous exposons les équipements utilisés et les conditions expérimentales pour mener cette recherche. Les dispositifs de mesure et le couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale des phénomènes de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expériences sont également exposés.

*Dans le troisième chapitre*, nous exposons les résultats expérimentaux des essais réalisés pour un plan de Taguchi (L27) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiées, ces modèles exprimant la relation entre les paramètres de sortie (Ra et Vtng) et les paramètres d'entrée (r, Vc, f et ap). Nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse RSM et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (r, Vc, f, et ap) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Pour cela nous avons utilisé deux logiciels de statistique appelé « Design-Expert-11 » et « Minitab-18 » Pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse.

*Dans le quatrième chapitre*, nous appliquons deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objectif, en utilisant la méthode de Taguchi avec l'analyse signal/bruit pour les paramètres technologiques d'usinage (Ra et Vtng), et l'optimisation multi-objectif, en utilisant l'analyse relationnelle grise (Grey Relational Analysis GRA) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) en utilisant l'approche de la fonction désirabilité (DF) pour optimiser la productivité et la qualité de surface simultanément. Ainsi, les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs d'optimisation ont été calculées pour chacun des paramètres technologiques d'usinage (rugosité de surface et vibration tangentielle).

Finalement, nous avons terminé notre mémoire par une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques utilisées.

# **Chapitre I**

## **ETUDE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE**

### I.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est dédié à l'étude bibliographique, qui, est divisée en deux parties. La première dans laquelle on expose les définitions de l'usinabilité, le principe de la coupe des métaux, les différents paramètres de coupe en tournage, ainsi que les outils de coupe. Également dans cette partie, nous parlons des paramètres technologiques de l'usinage.

La seconde partie concerne l'état de l'art.

### I.2. USINABILITE

L'usinabilité est l'aptitude d'un matériau solide à se faire usiner.

Plusieurs Caractéristiques des matériaux influencent l'usinabilité et ce, de plusieurs façons :

- Dureté
- Propriétés mécaniques
- Composition chimique
- Microstructure
- Rigidité de la pièce
- Susceptibilité à l'écrouissage
- Degré de travail à froid
- Forme et dimension de la partie usinée

L'usinabilité est évaluée sur plusieurs critères parmi eux :

- La durée de vie des outils
- Les forces impliquées (sur l'outil, la machine, et la consommation d'énergie)
- La qualité du fini de surface

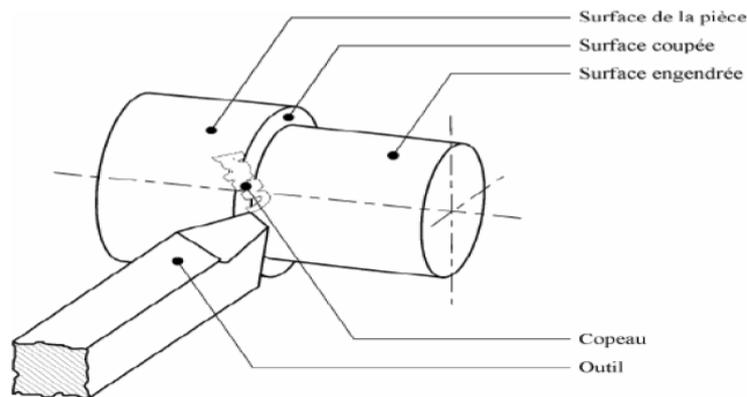
L'usinabilité n'a pas de définition formelle basée sur les nuances ou sur des chiffres. Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe et la formation des copeaux qui la caractérise. Dans ce sens, un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier inoxydable austénitique. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers inoxydables [1].

Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil correcte. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables.

D'autres facteurs tels que la micro-structure, la tendance au collage, la machine-outil utilisée, la stabilité, le bruit, la durée de vie d'outil, etc. sont aussi pris en compte.

### I.3. COUPE DES METAUX

Afin de mieux placer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux consiste à façonner et finir une surface de pièce de configuration donnée par un ensemble d'opérations à effectuer à l'aide de machines-outils **figure I.1**. Cette technique ancienne est souvent appelée coupe onéreuse, dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux). Dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage, objet de notre étude, représente à lui seul 33% du domaine de l'usinage par enlèvement de copeaux [2].



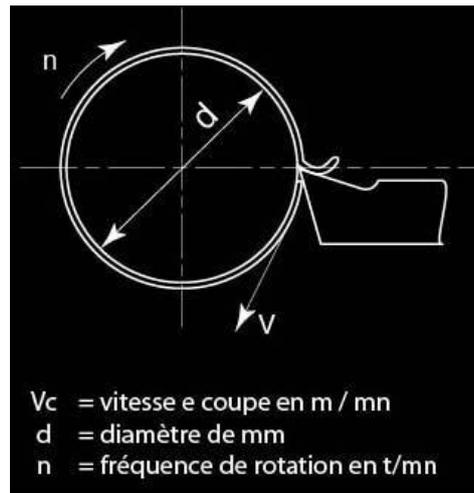
**Figure I.1** Principe de la coupe des métaux dans le tournage [3]

### I.4. PARAMETRES DE COUPE EN TOURNAGE

#### I.4.1. La vitesse de coupe

Pour le tournage, la vitesse de coupe est le chemin parcouru en mètres par minute, par un point placé sur le diamètre extérieur de la pièce **figure I.2**. Ce que l'on appelle en usinage "vitesse de coupe" correspond en cinématique à la vitesse circonférentielle uniforme, elle est régie par la formule suivante : [4]

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot d} \quad (\text{I.1})$$



**Figure I.2** Vitesse de coupe [4]

La vitesse est donc une distance dans une unité de temps. Le choix des vitesses de coupe dépend des facteurs suivants : [4]

- **De la matière à usiner** généralement, plus la matière est tendre, plus la vitesse est élevée.

- **De la nature de la matière de l'outil de coupe**

- **Du genre d'usinage**

Ébauche, finition, tournage, filetage ... etc...

- **De la profondeur de passe**

Plus la quantité de matière est importante moins la vitesse de coupe est grande.

- **De la forme de la pièce et de sa fixation, du serrage de l'outil de coupe**

La rigidité du montage de l'outil de coupe ainsi que le bon serrage de la pièce (tenir compte de la forme pour des raisons de déformations) ont une influence sur les vitesses de coupe.

- **Du lubrifiant**

Une abondante lubrification permet d'augmenter la vitesse de coupe

• **Du type de machine**

Une machine robuste peut supporter des vitesses de coupe plus élevée par rapport à une machine de construction plus légère.

**I.4.2. Avance par tour (f)**

En tournage, l'avance est le déplacement en millimètre de l'outil pendant un tour de la pièce. C'est aussi l'épaisseur du copeau **figure I.3**. Comme pour le choix de la vitesse de coupe, le choix des avances dépend de la matière à usiner, mais aussi de la profondeur de passe, nature du métal de l'outil de coupe, l'état de surface à obtenir...etc... [4]

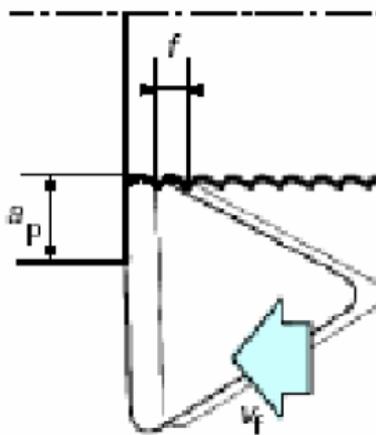
La relation permettant de définir la vitesse d'avance est :  $V_f = f \times N$  **(I.2)**

$V_f$  en mm/min,  $f$  l'avance par tour en mm/tr, et  $N$  en tr/min

$f$  correspond à la distance que l'arête de coupe va parcourir à chaque tour de la pièce.

**I.4.3. Profondeur de passe (ap)**

En chariotage, la profondeur de passe ( $a_p$ ) **figure I.3** est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée Perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [3]



**Figure I.3.** Avance par tour et Profondeur de passe  $a_p$  [3].

## I.5. LES OUTILS DE COUPE

Un outil de coupe doit être tenace pour résister aux chocs rencontrés lors de l'usinage, il ne doit pas se déformer plastiquement et sa déformation élastique doit être minimale afin de garantir une bonne précision de coupe, il doit être dur pour résister à l'usure et doit supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe.

Le choix d'un matériau pour un outil est le résultat d'un certain nombre de compromis. La modification des conditions de coupe, du procédé d'usinage ou du matériau de la pièce suffit à bouleverser ce compromis. C'est pourquoi il existe une grande variété de matériau de coupe. Les différents matériaux pour outils de coupe peuvent être regroupés selon différentes catégories :

- Les aciers rapides (AR),
- Les carbures,
- Les cermets,
- Les céramiques,
- Les matériaux ultra-durs (Nitrure de bore cubique CBN, diamant polycristallin PCD). [5]

### I.5.1. Acier rapide (AR)

Est utilisé depuis le début du siècle et il constitue encore aujourd'hui un matériau très utilisé. Il possède la ténacité la plus élevée et demeure donc un choix privilégié pour les opérations instables et à coupe interrompue. De plus, il permet des arêtes très tranchantes, qui permettent la réalisation d'usinage sans bavures, à cet égard il est particulièrement intéressant pour l'usinage des polymères. [5]

### I.5.2. Carbure de tungstène cémenté

Est devenu le matériau le plus utilisé. Ce substrat cémenté est obtenu par frittage de poudres métalliques constituées d'une « matière » dure (à base de carbure de tungstène WC) et d'un liant fusible lors du frittage (cobalt). Il présente un bon compromis dureté-ténacité et peut être utilisée à des températures supérieures à celles de l'acier rapide. En plus du carbure de tungstène (WC) et du Co, le carbure peut contenir dans des proportions variables des carbures additifs : souvent du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de Niobium (NbC) pour les plus utilisés. Ces carbures additionnels permettent de diminuer l'usure en cratère qui survient lors de l'usinage de l'acier. Le cobalt confère au substrat sa ténacité.

Le mot cermet provient de la contraction des mots céramique et métal CERAmique / METal. Dans l'application qui nous intéresse ici, **cermets**, est le nom générique utilisé pour les carbures à base de titane, parmi lesquelles figurent le carbure de titane TiC, le carbonitrure de titane TiCN et le nitrure de titane TiN. Comparé aux carbures cémentés, les cermets possèdent une meilleure thermique mais au détriment de la ténacité.

### I.5.3. Céramiques

Sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevée. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$  ou de nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ ). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage.

### I.5.4. Nitrure de bore cubique (CBN)

Possède une dureté extrêmement élevée, devancée seulement par le diamant. A chaud, cette dureté demeure excellente et il peut être utilisé jusqu'à  $2000^{\circ}C$ . Moins fragile que la céramique, il possède une excellente résistance à l'usure par abrasion. Son coût élevé le limite principalement à la production en série. Les cristaux de CBN, similaires à ceux du diamant synthétique, sont maintenus par un liant céramique ou métallique. Un liant céramique offre une ténacité faible mais une meilleure stabilité chimique et une excellente résistance à l'usure. Le liant métallique offre les caractéristiques inverses (bonne ténacité et moins résistant à l'usure). On recommande le CBN pour l'usinage de pièces dont la dureté est supérieure à 48HRC.

### I.5.5. Diamant polycristallin (PCD)

Est un diamant synthétique qui possède une dureté proche de celle du diamant naturel (dureté 10 dans l'échelle de Mohs). Ce matériau est très onéreux et ses applications sont limitées à l'usinage des matériaux non-ferreux. La haute résistance à l'usure par abrasion les rend économiquement viables pour l'usinage des matériaux hautement abrasifs tels que les composites et le graphite. [5]

## I.6. PARAMETRES TECHNOLOGIQUES DE L'USINAGE

### I.6.1. Etat de surface des pièces mécaniques

#### a) Définitions de la rugosité

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, ... etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [6, 7].

✓ **Surface géométrique**

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

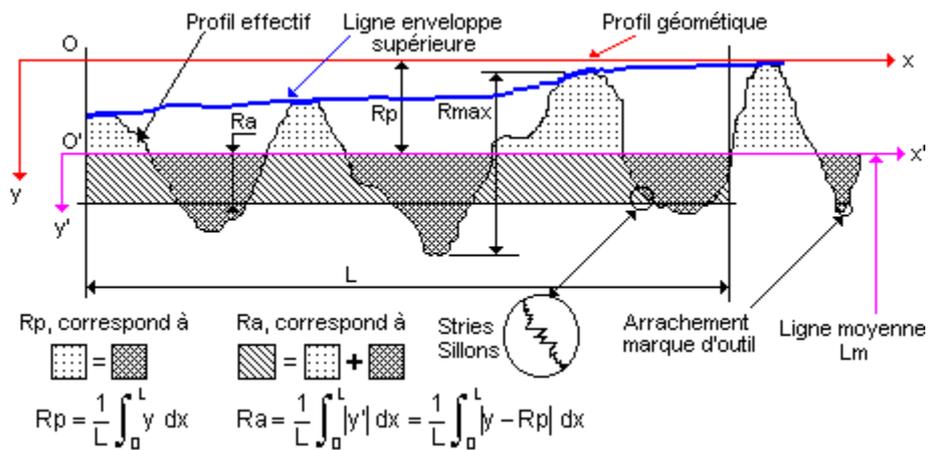
✓ **Surface spécifiée**

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

✓ **Surface mesurée**

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

✓ **Surface réelle** Surface obtenue au cours de la fabrication (**Figure I.4**).



**Figure I.4.** Caractéristiques du profil

- ❖ L Longueur de base du profil moyen
- ❖  $R_p$  Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée  $y$  de tous les points du profil sur la longueur de base  $L$ .
- ❖  $R_a$  Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée  $y'$  (entre chaque point de la courbe et l'axe  $Ox'$ ).

**b) Caractéristiques de la surface**

La nouvelle norme ISO 25178 définit l'analyse en 3D de l'état de surface, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface [9].

➤ **Paramètres caractéristiques des états de surface**

- ❖ **Rugosité moyenne arithmétique  $R_a$** : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation  $l_m$

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \tag{I.3}$$

- ❖ **Rugosité moyenne profondeurs  $R_z$** : Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluations successives  $l_e$

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \tag{I.4}$$

- ❖ **Hauteur maximale des pics  $R_p$** : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation  $l_m$

$$R_p = R_{p3} \tag{I.5}$$

- ❖ **Profondeur maximale des vallées  $R_v$** : Profondeur maximale du profil de rugosité R en dessous de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation  $l_m$

- ❖ **Rugosité maximale  $R_t$** : Ecart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité R, sur la longueur totale d'évaluation  $l_m$  (**Figure I.5**) [10].

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \tag{I.6}$$

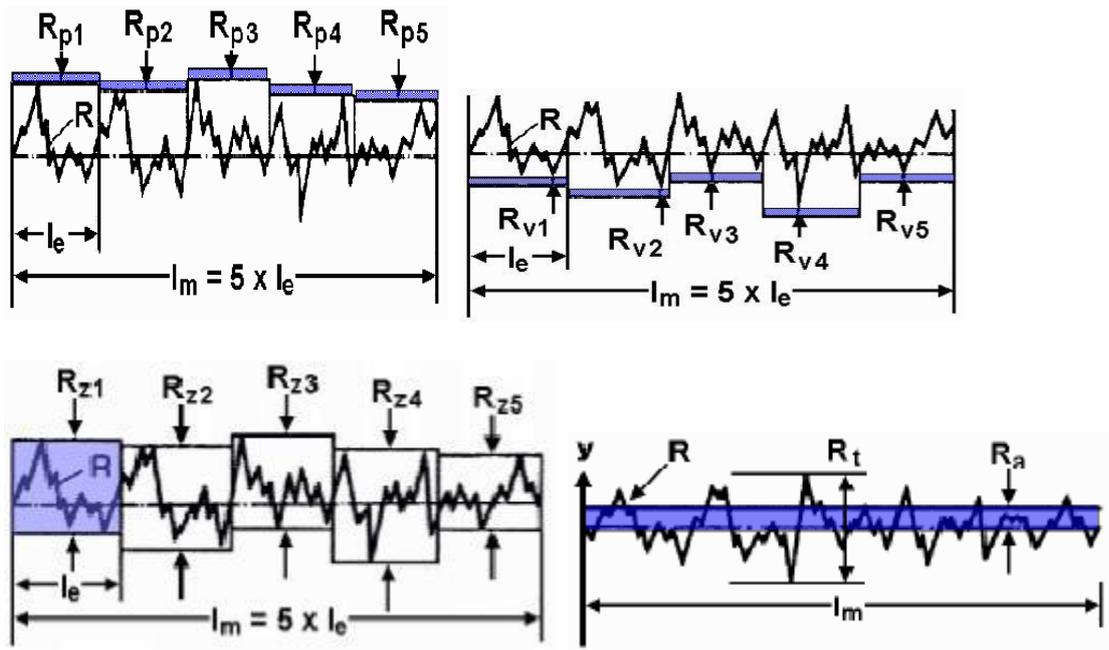


Figure I.5. Les critères de la rugosité

### c) État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la **Figure I.6**. Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité  $R_{max}$  et donné par [8] :

$$R_{max} = \frac{f^2}{8 \times r} \quad (I.7)$$

$R_{max}$  : la rugosité maximale en millimètre ;

$f$  : l'avance en millimètre;

$r$  : le rayon de l'outil de coupe maximal en millimètre ;

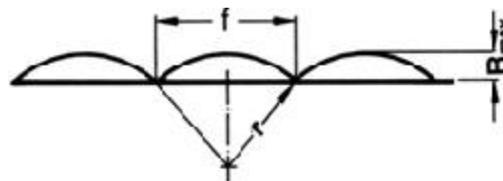


Figure I.6. Profil de surface tournée

### I.6.2 Vibrations

Les vibrations, phénomène dit aussi broutement, du système machine- montage- outil pièce dégradant la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Un broutement important diminue la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil.

La compréhension et la maîtrise de ces problèmes ont suscité de nombreuses recherches scientifiques, principalement focalisées sur l'instabilité de la coupe dont la principale manifestation est le broutement. Elles ont permis d'identifier les causes de ces phénomènes et de proposer des modèles prédictifs. Ainsi, elles ont révélé l'existence de plages de vitesses de rotation de l'outil où le comportement vibratoire de l'usinage est satisfaisant, en particulier aux hautes vitesses et ce même pour de fortes conditions d'engagement des outils de coupe. Suivant leurs origines, elles peuvent être classées en deux types : les vibrations forcées et les vibrations auto excitées (générées par le processus de la formation du copeau) [11]

#### a) Les vibrations forcées

Les vibrations forcées sont propres à la coupe discontinue comme le fraisage, mais elles peuvent éventuellement apparaître lors du tournage de pièces n'ayant pas de symétrie de révolution. Provoquées par une source dans la machine-outil ou en dehors, mais agissant indépendamment de l'opération de coupe. Ce genre apparaît sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

- la variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe intermittente (tournage d'un arbre à rainure longitudinale par exemple) ou à une surépaisseur variable,
- les forces centrifuges d'inertie (effets de balourds) dues au manque d'équilibre des masses en rotation (ébauche, mandrin, poulies, rotors des moteurs électriques, de roulements défectueux ....etc.),
- la transmission d'ébranlements vibratoires par les machines avoisinantes,
- les chocs dus aux vibrations ou à la précision insuffisante des surfaces actives des pièces des organes de transmission (usure des pièces d'un mécanisme, manque de précision des engrenages), aux engagements et aux changements de régimes brusques.

Il est à noter qu'il existe d'autres sources de vibrations forcées au sein même de la coupe, on peut citer entre autres : l'hétérogénéité de la matière usinée, les irrégularités géométriques de la surface à usiner, Mais ces causes sont la plupart du temps du second ordre par rapport à la cause première qu'est la discontinuité de la coupe. La répercussion sur la qualité de l'usinage est dans ce cas gênante, mais on peut y remédier par une installation adéquate de la machine-outil, par des équilibrages mieux exécutés par une construction plus rigide du bâti de la machine, etc.....

Les vibrations forcées sont à l'origine de mauvais usinages quand la fréquence d'excitation est égale à ou un sous-multiple de fréquence propre de la structure. La valeur du coefficient d'amortissement est alors déterminante pour limiter l'amplitude de vibration.

### **b) Les vibrations auto-excitées (broutement)**

Les vibrations auto-excitées, aussi appelées auto-vibrations ou vibrations régénératives, provenant du phénomène de coupe lui-même. Ces vibrations, néfastes pour la coupe, sont la principale cause du broutement. Elles sont à éviter absolument en usinage car elles dégradent fortement la qualité de la surface usinée et peuvent induire des efforts de coupe élevés. Ces vibrations apparaissent quand le système usinant n'a plus la capacité de suivre la dynamique imposée par la coupe. Ses causes essentielles sont :

- la variation de la force de frottement du copeau glissant sur l'outil et de l'outil taillant l'ébauche,
- l'écrouissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur,
- les variations dimensionnelles de l'arête rapportée qui modifient en cours d'usinage l'angle de coupe et la surface de la section droite de la tranche cisillée,
- le contact avec frottement sur la face de dépouille de l'outil et de la variation de l'épaisseur de matière enlevée. Ces variations excitent le mouvement vibratoire de la structure qui en retour, entretient les fluctuations de ces phénomènes.

L'intensité des vibrations auto-excitées est définie par le métal en œuvre et ses propriétés mécaniques, les facteurs mécaniques d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil et la raideur du système machine-montage-outil-pièce. Les difficultés d'application des bases théoriques pour prévoir complètement les conditions d'apparition du broutage ; viennent d'abord de la complexité des systèmes mécaniques réels qui possèdent un grand nombre de degrés de liberté et qui se modifient au cours du travail de la machine-outil (déplacements des chariots, usure des outils, échauffements des paliers,...) En outre, les structures des machines comportent des non linéarités (des pièces en contact discontinu, frottements solides, variation des efforts avec l'amplitude de déplacement) et des variations de caractéristiques dans le temps (amortissements, serrages ...) qui s'échappent au calcul.

Le perçage vibratoire auto-excité constitue une exception car, dans cette technologie les vibrations sont mises à profit pour fragmenter les copeaux et faciliter ainsi leur évacuation. [11]

### I.6.3. Efforts de coupe [12]

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire : l'effort double environ quand la vitesse d'avance double).

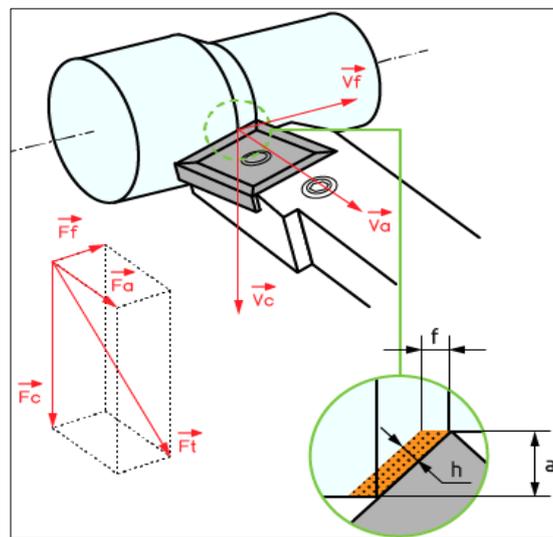
#### a) Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe  $F_t$ , peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes (**Figure I.7**).

- $F_c$  : composante dans le sens de  $V_c$ , appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

- $F_a$  : composante dans le sens de  $V_a$ , appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.

- $F_f$  : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.



**Figure I.7.** Composantes de l'effort de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe, aussi elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les

conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau.

D'après la figure I.7, la force de coupe résultante  $F_t$ , étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression.

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_a^2 + F_f^2} \quad (\text{I.8})$$

L'évaluation des composantes peut être donnée à travers des modèles empiriques, de différentes formes, ces modèles sont déterminés par des méthodes statistiques à partir de résultats expérimentaux.

#### **I.6.4. Usure des outils de coupe**

L'usure est définie par la matière qui sort définitivement du contact outil – pièce. L'usure de l'outil est la conséquence directe des sollicitations très sévères que subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces sollicitations sont de nature mécanique, accentuées par les effets thermiques. [13]

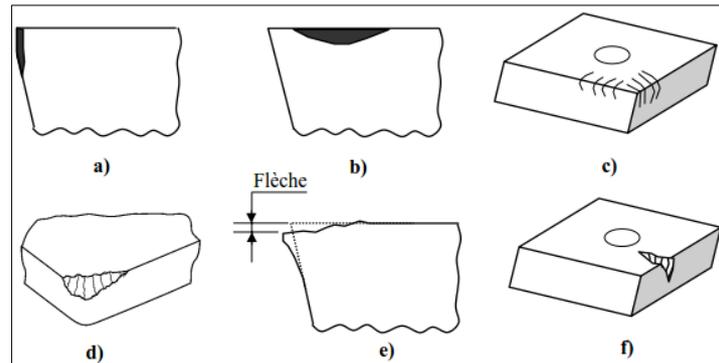
##### **a) Principaux types d'usure des outils [14]**

En fonction des conditions d'usinage (la nature de l'outil, du matériau usiné, du type d'usinage et des conditions de coupe) nous pouvons avoir les types d'usures suivantes :

- Usure en dépouille : Ou usure frontale due aux frottements de la surface de coupe de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête tranchante de l'outil (figure I.8 (a)).
- Usure suivant la surface d'attaque : elle se caractérise par une cuvette dite "cratère " formée sur la surface d'attaque de l'outil suite au frottement du copeau sur celle-ci (figure I.8 (b)). Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quant à l'enroulement et la fragmentation du copeau.
- Fissuration de l'arête : On observe l'apparition de fissures sur l'arête coupante dans le cas des usinages avec des chocs mécaniques ou thermiques, ou avec des vibrations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue. Elle est propre aux outils en carbure métalliques (figure I.8 (c)).
- Rupture (cassure) de la pointe : c'est la destruction totale du bec de l'outil (Observée dans le cas des outils en acier rapide), (figure I.8 (d)).
- Déformation plastique : la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe. Cette

déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée, (figure I.8 (e)).

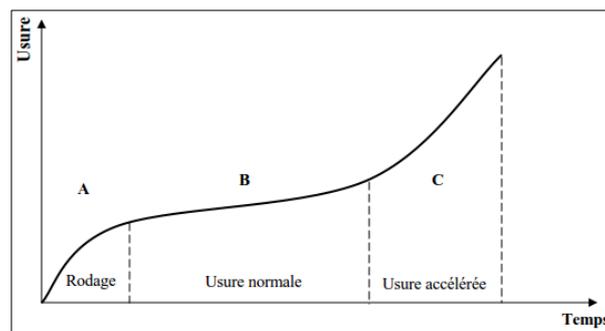
- Entaille : Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure, (figure I.8 (f)).



**Figure I.8.** Formes d'usure sur les outils de coupe.[15]

### b) Evolution de l'usure en fonction du temps d'usinage [16]

La relation entre la valeur de l'usure et le temps d'usinage est représentée par la courbe illustrée sur la figure I.9 ; que l'on peut scinder en trois parties A, B et C.



**Figure I.9.** Relation Usure – Temps

- La partie A : Représente la période d'usure initiale, on la désigne aussi par la période de rodage. Cette usure est provoquée par l'élimination des aspérités laissées après le réaffûtage de l'outil.

- La partie B : Représente la période d'usure normale. Durant cette période l'usure évolue lentement est influencée par les conditions de coupe. C'est la période principale qui caractérise la vie d'un outil.

- La partie C : on assiste à l'usure catastrophique de l'outil. L'union de l'usure sur la face en dépouille et celle sur la face d'attaque provoque l'émoussage de l'arête tranchante, et par conséquent l'outil perd ces capacités de coupe.

### I.7. ETAT DE L'ART

#### Estimation de la rugosité de surface à l'aide des paramètres de coupe, de la force, du son et des vibrations dans le tournage de l'Inconel 718

Yogesh Deshpande , Atul et Neelesh [17] ont proposé un travail qui vise à estimer en cours de processus, la rugosité de surface en utilisant des paramètres de coupe ainsi que l'effort de coupe, le son et les vibrations lors du le tournage de l'Inconel 718 avec des plaquettes en carbure traitées cryogéniquement et non traitées. Les auteurs ont développé des modèles de prédiction par analyse de régression en utilisant uniquement les paramètres de coupe, puis en utilisant uniquement la force, le son et les vibrations (Tableau I.1). Par la suite, les auteurs ont modifié les modèles pour inclure tous les paramètres après avoir effectué une analyse de corrélation pour déterminer les paramètres significatifs. Il est trouvé aussi que l'analyse de régression multiple est un outil capable de l'estimation de la rugosité de surface avec une précision souhaitable pour deux types d'inserts utilisés pour la surveillance en cours de fabrication.

Tableau I.1 Matrice de conception et réponses expérimentales

Run order	$v$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$d$ (mm)	(Untreated/cryo treated)			
				$F_c$ (N)	$S$ (Pa)	$V_f \times 10^{-4}$ (m/sec)	$R_a$ ( $\mu$ m)
1	90	0.18	1.07	200/190	0.270/0.260	13/12	1.78/1.79
2	9.5	0.115	0.785	617/602	0.794/0.780	37/36	2.30/2.40
3	30	0.18	0.5	463/456	0.531/0.633	33/23	2.20/2.20
4	60	0.01	0.785	231/225	0.210/0.209	16/15	0.99/1.00
5	60	0.115	0.785	455/445	0.472/0.462	26/25	0.93/0.99
6	60	0.115	1.264	404/390	0.501/0.487	23/24	1.49/1.80
7	110.45	0.115	0.785	163/160	0.190/0.189	13/13	0.62/0.60
8	30	0.18	1.07	590/580	0.791/0.781	36/35	2.20/2.30
9	60	0.115	0.785	459/551	0.660/0.652	27/25	0.93/0.98
10	60	0.115	0.785	461/555	0.691/0.686	29/26	0.99/0.95
11	90	0.18	0.5	279/270	0.130/0.123	19/17	1.25/1.21
12	90	0.05	1.07	190/185	0.198/0.192	12/11	0.52/0.75
13	60	0.224	0.785	444/440	0.509/0.491	32/30	2.40/2.50
14	60	0.115	0.785	464/461	0.521/0.511	28/27	0.99/1.10
15	30	0.05	1.07	447/442	0.422/0.412	29/28	1.60/1.60
16	30	0.05	0.5	436/432	0.421/0.419	27/26	1.90/1.36
17	60	0.115	0.785	471/476	0.567/0.559	28/26	0.92/1.10
18	60	0.115	0.305	300/295	0.321/0.312	26/24	1.30/1.35
19	60	0.115	0.785	451/445	0.563/0.558	30/29	0.93/1.17
20	90	0.05	0.5	150/147	0.161/0.158	12/11	0.72/0.76

**Modèles trouvés :**

$$F_c = 517.1 - 4.589v + 753f + 70.4d \quad (1)$$

$$(R^2 = 81.20\%) \text{ } (R^2_{adj} = 77.67\%),$$

$$F_c = 524.5 - 4.542v + 734f + 64.7d \quad (2)$$

$$(R^2 = 70.73\%) \text{ } (R^2_{adj} = 65.24\%),$$

$$S = 0.518 - 0.00591v + 1.154f + 0.190d \quad (3)$$

$$(R^2 = 67.60\%) \text{ } (R^2_{adj} = 61.53\%),$$

$$S = 0.546 - 0.00612v + 1.232f + 0.156d \quad (4)$$

$$(R^2 = 69.80\%) \text{ } (R^2_{adj} = 64.14\%),$$

$$V_v = 0.003589 - 0.000027v + 0.00547f - 0.000166d \quad (5)$$

$$(R^2 = 86.74\%) \text{ } (R^2_{adj} = 84.25\%),$$

$$V_v = 0.003122 - 0.000024v + 0.00412f + 0.000239d \quad (6)$$

$$(R^2 = 76.79\%) \text{ } (R^2_{adj} = 72.43\%),$$

$$R_a = 1.56 - 0.0158v + 5.77f + 0.090d \quad (7)$$

$$(R^2 = 73.3\%) \text{ } (R^2_{adj} = 68.3\%),$$

$$R_a = 1.21 - 0.0146v + 6.33f + 0.428d \quad (8)$$

$$(R^2 = 78.8\%) \text{ } (R^2_{adj} = 74.8\%).$$

**Optimisation multi-objectifs de la rugosité de surface et des forces de coupe dans le tournage à grande vitesse de l'Inconel 718 en utilisant l'analyse relationnelle du gris de Taguchi (TGRA)**

Raju Shrihari Pawade & Suhas S. Joshi [18] ont une nouvelle approche efficace, Taguchi l'analyse relationnelle grise (TGRA) à des afin d'optimiser l'usinage à grande vitesse de l'Inconel 718 en tenant compte de multiples mesures de performance. Cette méthode est adoptée pour déterminer les meilleurs paramètres de processus qui donnent des efforts e coupe moins importantes ainsi que des surfaces rugosité. Les auteurs affirment que Les paramètres : vitesse de coupe, 475 m/min ; avance par tour, 0,10 mm/tour ; profondeur de coupe, 0,50 mm ; et la géométrie d'arête de coupe CW2, ont le plus haut degré de gris relationnel et sont donc les valeurs optimales des paramètres produisant

un meilleur tournage en termes d'efforts de coupe et de rugosité de surface (tableau I.2 et I.3). Les résultats ont prouvé aussi l'avance par tour est la plus forte corrélation avec l'effort de coupe et la rugosité de la surface. Aussi Les surfaces usinées présentent davantage d'altérations (dépôts de microparticules, débris, couche de frottement, et micropuces fragments) à une vitesse de coupe plus faible. Cependant, la majorité des altérations effacées à des vitesses de coupe plus élevées (Fig. I.10 a-d, Fig. I.11 a-d).

Tableau I.2 Les données pour 27 séquences de comparabilité

Experimental run (comparability sequences)	Deviation sequence $\Delta 0_i(k) =  x_0^*(k) - x_i^*(k) $			
	Cutting force $\Delta 0_1(k)$	Feed force $\Delta 0_2(k)$	Radial force $\Delta 0_3(k)$	Surface roughness $\Delta 0_4(k)$
1	0.080880	0.027780	0.014179	0.406250
2	0.295499	0.432301	0.132351	0.656250
3	0.646961	1	0.183823	0.562500
4	0.466557	0.420144	0.274159	0.070312
5	0.813371	0.460063	0.377626	0.898438
6	1	0.142365	1	0
7	0.520992	0.324666	0.162289	0.109375
8	0.771386	0.602446	0.11187	0.171875
9	0.800936	0.244792	0.030987	0.070312
10	0	0	0.009452	0.500000
11	0.130650	0.076390	0.112392	0.164063
12	0.209954	0.140623	0.044117	0.429688
13	0.222404	0.164937	0.094009	0.031250
14	0.502332	0.671868	0.057774	0.148438
15	0.653187	0.421868	0.054618	0.117188
16	0.303269	0.045144	0.095589	0.328125
17	0.762056	0.510415	0.221639	0.507813
18	0.782261	0.376742	0.029933	1
19	0.111974	0.076390	0.160714	0.609375
20	0.497668	0.532987	0.051467	0.234375
21	0.395023	0.553818	0.163864	0.062500
22	0.298604	0.192716	0.004199	0.171875
23	0.311038	0.062509	0	0.109375
24	0.396583	0.194440	0.018905	0.125000
25	0.472783	0.114585	0.003151	0.117188
26	0.457227	0.137157	0.028357	0.148438
27	0.706061	0.307301	0.024685	0.250000

Tableau I.3 Le coefficient relationnel de gris calculé et la note relationnelle de gris pondérée pour 27 séquences de comparabilité

Experimental run (comparability sequences)	Grey relational coefficient $\gamma(x_0(k), x_i(k))$				Weighted Grey relational grade
	Cutting force	Feed force	Radial force	Surface roughness	
1	0.860763	0.947365	0.972425	0.551724	0.16607
2	0.628536	0.536307	0.7907	0.432432	0.12456
3	0.435934	0.333333	0.731183	0.470588	0.11986
4	0.5173	0.543393	0.645862	0.876712	0.19609
5	0.3807	0.520799	0.569719	0.357542	0.09935
6	0.333333	0.778374	0.333333	1	0.21113
7	0.48972	0.606306	0.754957	0.820513	0.18986
8	0.393272	0.453537	0.817166	0.744186	0.17183
9	0.384339	0.671328	0.941643	0.876712	0.20336
10	1	1	0.981446	0.5	0.16204
11	0.792833	0.867468	0.816471	0.752941	0.19368
12	0.704271	0.780491	0.91892	0.537815	0.15421
13	0.692133	0.751951	0.841739	0.941176	0.22185
14	0.498836	0.426669	0.89642	0.771084	0.18049
15	0.433581	0.542377	0.901522	0.810127	0.18871
16	0.622457	0.917188	0.839505	0.603774	0.16514
17	0.396179	0.494846	0.692868	0.496124	0.12642
18	0.389936	0.570293	0.943516	0.333333	0.10593
19	0.817028	0.867468	0.756758	0.450704	0.13990
20	0.501169	0.484033	0.906672	0.680851	0.16645
21	0.558645	0.474465	0.753166	0.888889	0.20021
22	0.626093	0.721796	0.991671	0.744186	0.18872
23	0.616494	0.888875	1	0.820513	0.20622
24	0.557673	0.720004	0.963568	0.8	0.19603
25	0.513989	0.813557	0.993738	0.810127	0.19980
26	0.522342	0.784736	0.946329	0.771084	0.19127
27	0.414573	0.619347	0.952953	0.666667	0.16634

Taguchi Grey Relational Analysis

**Best Conditions**

Response	<i>V</i>	<i>f</i>	<i>d</i>	<i>EG</i>
Cutting Force	300	0.05	0.50	CH
Feed Force	475	0.05	0.75	CW1
Radial Force	475	0.05	1.00	CW2
Surface Roughness	475	0.10	0.50	CW2
<b>Cutting Force</b>		<b>Feed force</b>	<b>Radial Force</b>	<b>Surface Roughness</b>

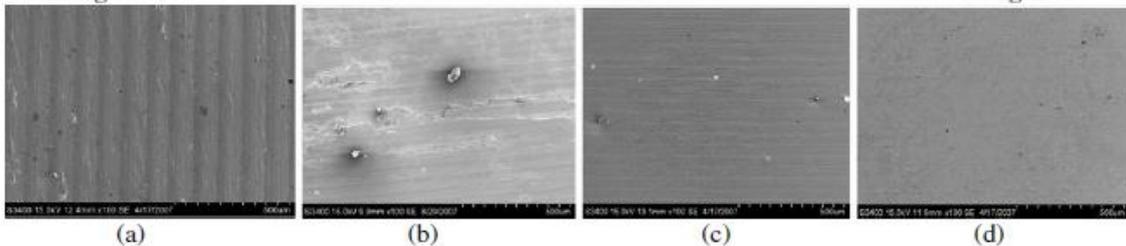


Fig. I.10 a-d Conditions de traitement optimales avec l'approche de l'analyse relationnelle de Taguchi et du gris de Taguchi pour les meilleures conditions de paramètres

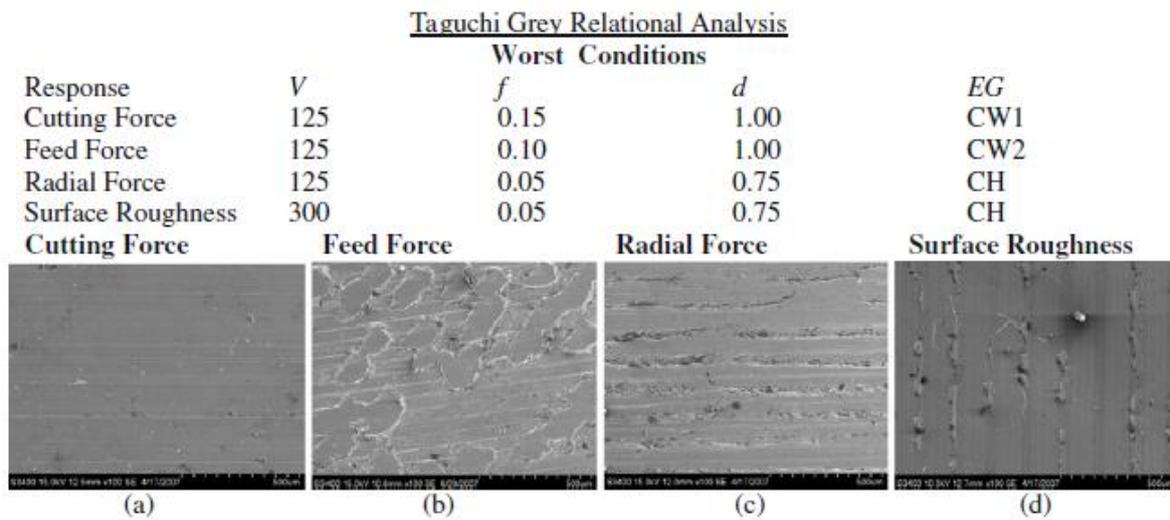


Fig. I.11 a-d Conditions de traitement optimales avec l'approche de l'analyse relationnelle de Taguchi et du gris de Taguchi pour les pires conditions de paramètres

### Prévision et contrôle de la vibration de l'outil de coupe dans les tours à commande numérique avec ANOVA et Ann.

Au cours de cette étude, des expériences ont été menées sur un tour à commande numérique avec un insert de carbure CCGT-0930FL. Des variables d'usinage, telles que la vibration tangentielle et axiale de l'outil de coupe, ont été mesurées dans des processus d'usinage CNC basés sur le signal de vibration collecté via un système d'acquisition de données LabVIEW. Et contrôlé en utilisant du néoprène en matériau viscoélastique (VEM).

L'effet des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, la profondeur de coupe et le taux d'avance sur les variables d'usinage est évalué. D'après les résultats des tests, S. S. Abuthakeer et al [19] ont pu tirer ces conclusions :

- D'après l'analyse modale, les pics de signaux présentent une réponse dans une plage de fréquences propres particulière de 3 400 Hz sans aucun amortisseur. Les fréquences propres ont été décalées à 2150 Hz avec un amortisseur en néoprène.

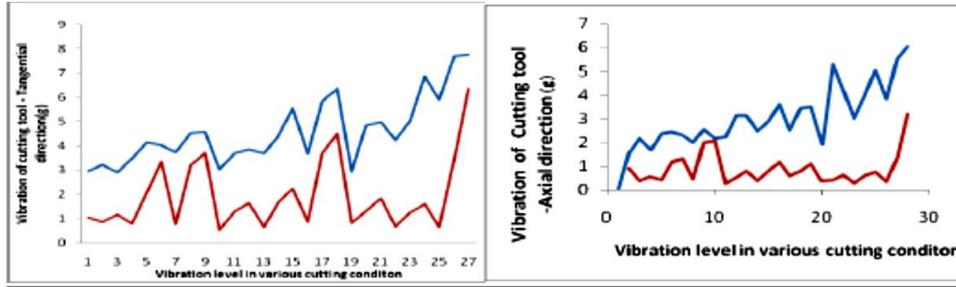
□ On observe que la fréquence propre s'éloigne de la fréquence de fonctionnement, évitant ainsi la condition de résonance de l'outil de coupe.

□ Le rapport d'amortissement de l'outil de coupe a été amélioré de 0,0149 à 0,06976 avec un coussinet en néoprène, ce qui indique que l'utilisation d'un coussinet pour outil de coupe contribue à améliorer la durée de vie de l'outil.

□ Les vibrations dans les directions tangentielle et axiale ont été réduites de 60% et de 78,5% avec le coussinet d'amortissement en néoprène.

□ L'amortissement passif peut offrir des avantages substantiels en termes de performances dans de nombreux types de structures et de machines, souvent sans pénalité significative en termes de poids ou de coûts.

Les *figures I.12 et I.13* ci-dessous montrent les résultats :



**Legend:** The upper curve shows vibration signal without damping and lower curve is with damping.

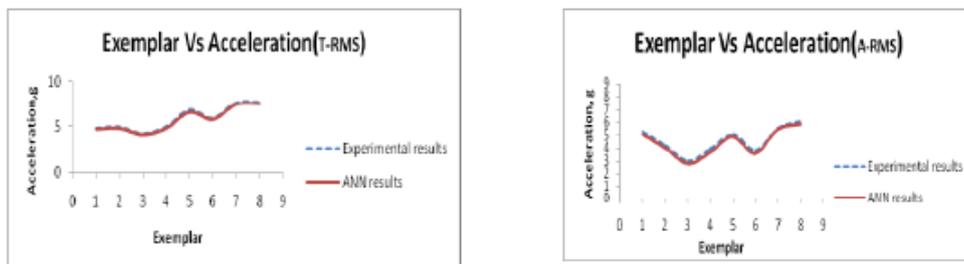
*Figure I.12* vibration du porte outil dans la direction tangentielle.

*Figure I.13* vibration du porte outil dans la direction axial.

Les auteurs ont signalé aussi que :

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée et il a été constaté que la profondeur de coupe (contribution de 38%), la vitesse de coupe (contribution de 35%) et le taux d'alimentation (contribution de 27%) avaient une influence plus grande sur la vibration de l'outil de coupe. Les résultats expérimentaux démontrent que la profondeur de coupe et la vitesse de coupe sont les principaux paramètres des trois facteurs contrôlables (profondeur de coupe, vitesse de coupe et vitesse d'avance) qui influencent la vibration de l'outil de coupe lors du tournage de l'aluminium Al 6063.

Les résultats du modèle de réseau neuronal ont montré une correspondance étroite entre la sortie du modèle et la vibration de l'outil de coupe mesurée directement. Cette méthode semble également présenter des potentiels de prédiction pour les profils non expérimentaux. La méthodologie ANN consomme moins de temps pour une précision accrue.



*Figure I.14* Comparaison entre la sortie du modèle et la vibration de l'outil de coupe mesurée directement.

**Modélisation prédictive des opérations de tournage à l'aide des méthodes RSM, ANN et SVR**

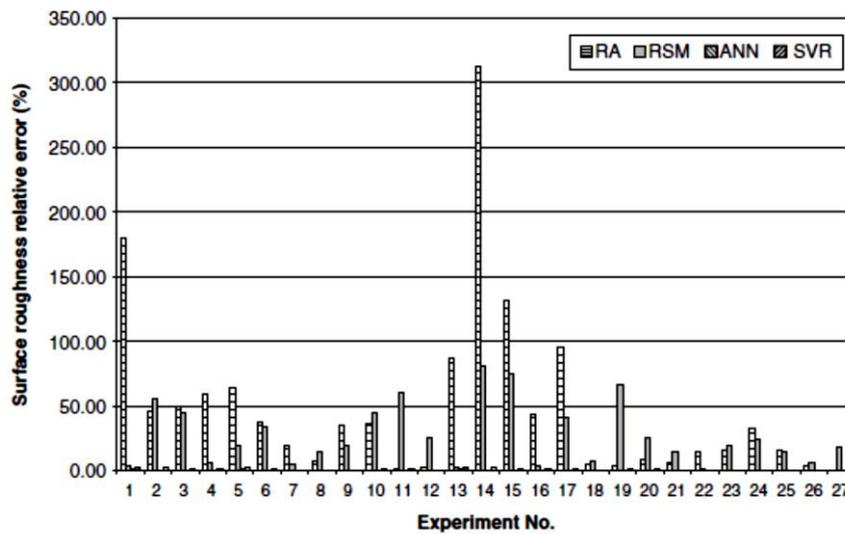
Amit Kumar Gupta [20], a développé des modèles empiriques de prévision de la rugosité de surface, de l'usure des outils et la puissance requise à partir d'expériences de retournement.

La méthodologie de surface de réponse, les réseaux de neurones artificiels et la régression du vecteur de support ont été utilisés pour construire de nouveaux modèles de prédiction.

Les méthodologies de RA, RSM, ANN et SVR ont été discuté dans cette étude, et ont été comparés et évalués à l'aide de statistiques descriptives et de tests d'hypothèses.

Il a été constaté que les modèles ANN et SVR sont bien meilleurs que les modèles RA et RSM pour prévoir :

□ **La rugosité de surface**



*Figure I.15 Comparaison entre Ra prédictive et réelle.*

□ L'usure des outils

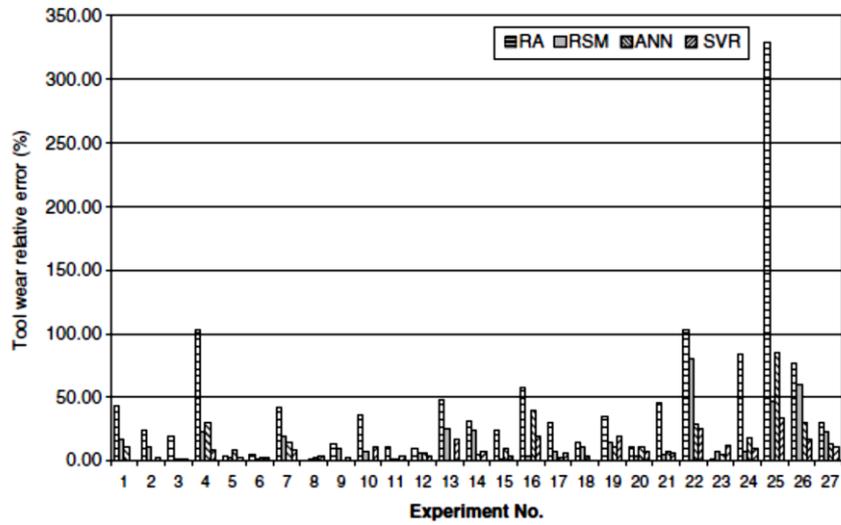


Figure I.16 Comparaison entre l'usure d'outil prédictive et réelle.

□ La puissance requise

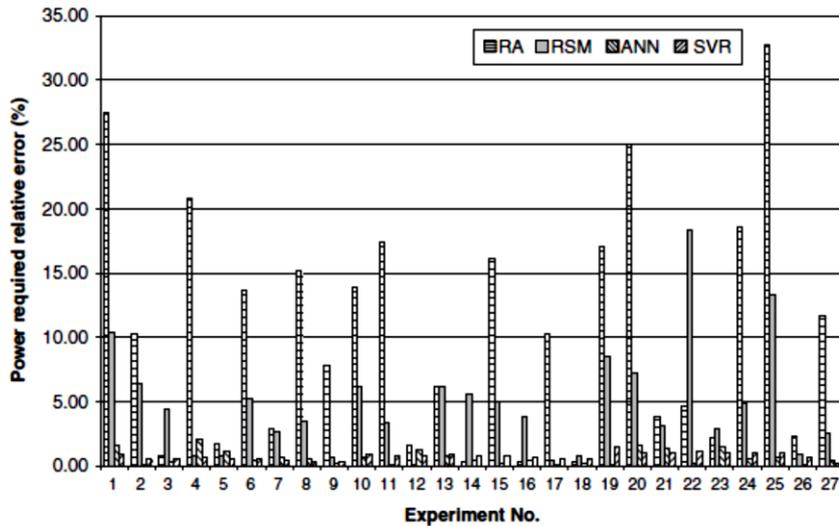


Figure I.17 Comparaison la puissance utile prédictive et réelle.

Les méthodes de modélisation et les modèles ainsi développés dans cet article peuvent aider la simulation, la prédiction, l'optimisation et l'amélioration des paramètres de réponse et sélection des paramètres de processus en opérations de tournage.

## I.8. CONCLUSION

Nous avons présenté dans cette recherche bibliographique les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. Ce chapitre entame également dans sa première partie, un rappel des bases scientifiques et les différents procédés de mise en forme par enlèvement de matière ainsi que ses conséquences tels que :

La définition de l'usinabilité, de la coupe des métaux, la rugosité, vibration et l'usure... La deuxième partie de cette étude traite l'état de l'art concernant l'usinage du super alliage réfractaire (Inconel 718). A cet effet, nous avons présenté un résumé de plusieurs travaux scientifiques de recherche.

Le prochain chapitre présente la méthodologie de recherche proposé pour réaliser cette étude ainsi que l'ensemble des équipements utilisés.

**Chapitre II**  
**PROCEDURE ET**  
**EQUIPEMENT**  
**D'EXPERIENCE**

### 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 l'usinabilité du super alliage réfractaire (Inconel 718). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés qui ont servi au suivi de l'évolution de la rugosité des surfaces obtenues, des efforts de coupe générés, de l'usure et de la température de 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)*, département de génie mécanique (Université 08 Mai 1945 de Guelma).

### II.2. EQUIPEMENTS UTILISE

#### II.2.1. Machine-outil

Les essais de tournage ont été exécutés à sec sur un tour conventionnel « TOS TRENCIN », modèle SN40C (**Figure II.1**), de puissance sur la broche égale à 6.6 KW, équipé du variateur de vitesse, modèle ABB série ACS355 (**Figure II.2**), avec un capteur de vitesse permettant le contrôle de la vitesse de rotation de la broche (**Figure II.3**), 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; 0.10, 0.11; 0.12; 0.14; 0.16, 0.18, 0.20; 0.22, 0.24 ...0.8) mm/tr.



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



**Figure II.2.** Variateur de vitesse, Modèle ABB série ACS355



**Figure II.3.** Capteur de vitesse de rotation de la broche

### II.2.2. Matériau à usiner

L'Inconel 718 est un alliage qui doit être durci par vieillissement. Il est très résistant et convenable à des températures variant de  $-423^{\circ}$  à  $1300^{\circ}\text{F}$ . La résistance à la fatigue de l'alliage 718 est élevée. En plus, l'Inconel 718 possède des propriétés excellentes contre la rupture sous tension jusqu'à  $1300^{\circ}\text{F}$ , de même qu'une résistance à l'oxydation jusqu'à  $1800^{\circ}\text{F}$ . Cet alliage offre une bonne résistance à la corrosion dans une grande variété d'environnements.

La meilleure caractéristique de l'Inconel 718 est sa réaction lente au durcissement par vieillissement. La réaction lente permet au matériau d'être soudé et recuit sans durcir spontanément à moins d'être refroidi lentement. L'Inconel 718 peut également être réparé par soudure même après durcissement par vieillissement. Les applications typiques sont : moteurs à réaction, pièces de pompe et pompes, moteurs de fusée et inverseurs de poussée, vaisseaux spatiaux. Les Compositions chimiques de l'Inconel 718 sont données au **tableau II.1**.

**Tableau II.1.** Composition chimique de l'Inconel 718 [20]

Élément	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al
Qté %	50-55	17-21	15-21	4.75-5.5	2.8-3.3	0.65-1.15	0.2-0.8

L'éprouvette utilisée est une barre cylindrique de diamètre de 60 mm et de longueur 400 mm (**Figure II.4**).



**Figure II.4.** Éprouvette utilisée en essais (Inconel 718)

### II.2.3. Outils de coupe

Le substrat se compose d'un carbure dur à grains fins avec 6 % de Co pour une résistance à chaud élevée et une bonne résistance à la déformation plastique. Le nouveau revêtement PVD, constitué d'une fine couche de TiAlN offrant une excellente adhérence, même sur les arêtes de coupe vives, garantit ténacité, usure en dépouille régulière et hautes performances. Convient pour la finition des aciers inoxydables à grandes vitesses. (**Figure II.5**)



**Figure II.5.** Plaquettes de coupe GC1105 en Carbure revêtu (SANDVIK) [21]

### II.2.4. Porte outil utilisé

Afin de réaliser les essais, le choix du porte plaquette s'est effectuée sur le porte outil de désignation PSBNR2525K12 (**Figure II.6**), dont la géométrie de la partie active de l'outil, est matérialisée par les angles définis sur le **Tableau II.2**.

La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

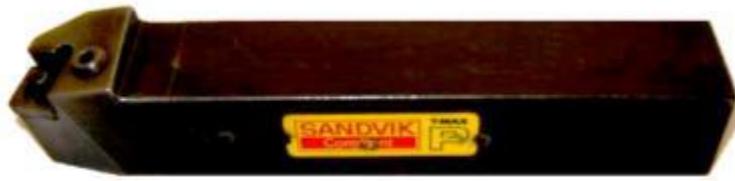


Figure II.6. Porte plaquette ISO : PSBNR2525K12 (SANDVIK)

Tableau II.3. Caractéristiques de porte outil utilisé

Porte outil	Section (mm <sup>2</sup> )	$\chi^\circ$	$\alpha^\circ$	$\gamma^\circ$	$\lambda^\circ$
PSBNR2525K12	25x25	75°	6°	-6°	-6°

### II.2.5. Rugosimètre 2D pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure de la rugosité moyenne arithmétique ( $R_a$ ) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) de type MITUTOYO modèle SJ-210 (Figure II.7), Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur) de 5  $\mu\text{m}$  et se déplaçant linéairement (axialement) sur la surface usinée, les différents critères de la rugosité de surface ont été obtenus instantanément après chaque passage de l'outil. Les mesures ont été répétées trois fois sur trois lignes de cylindre axial séparées à 120° et la moyenne de la mesure a été retenue.

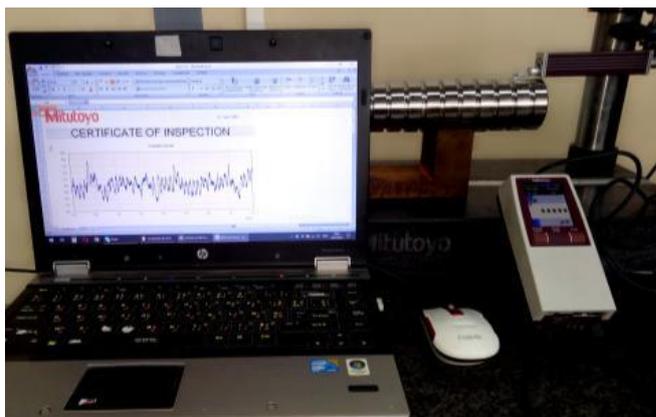


Figure II.7. Rugosimètre 2D modèle SurfTest SJ- 210 de Mitutoyo avec logiciel d'exécution.

Ce dernier est doté :

- D'un menu intuitif avec fonctions multiples personnalisables (Ra, Rc, Ry, Rz, Rt...).
- D'une capacité -200  $\mu\text{m}$  à +150  $\mu\text{m}$ .
- D'une sonde en diamant.
- D'un écran couleur 2.4''
- D'une mémoire de 10 configurations et de 39 rugosités.
- D'une force de mesure 0,75 mN, angle 60°, rayon 2  $\mu\text{m}$
- D'une course du palpeur 17,5 mm
- D'une sortie RS232C, SPC, USB.
- D'un poids 500 g.

### II.2.6. Acquisition des vibrations

Les effets de vibrations ont pu être enregistrés grâce aux deux vibromètres, Modèle **VM-6360** (figure II.8), on a utilisé deux appareils afin de mesurer les effets dans les deux directions : tangentielle et radiale.



**Figure II.8.** Vibromètre Modèle VM-6360 [22]

L'acquisition des mesures s'est faite à l'aide du programme **Data collection system**



**Figure II.9** Acquisition des mesures [22]

Caractéristiques générales :

Capteur : accéléromètre piézoélectrique

Plage de mesure :

Acceleration: 0,1 ~ 400 m/S<sup>2</sup>, 0,3 ~ 1312 m/s<sup>2</sup>; 0,0 ~ 40 g - equivalent Peak

Vitesse: 0.01 ~ 400 mm/s, 0.004 ~ 40,6 cm/S, True RMS

Cylindrée : 0,001 ~ 4.0 mm, 0,04 ~ 160 mm ; équivalent peak-peak

Gamme de fréquence :

Accélération : 10 Hz ~ 1 K Hz, 10 Hz ~ 10 K Hz Vitesse : 10 Hz ~ 1 K Hz

Cylindrée : 10 Hz ~ 1 K Hz

Précision : 5% de la lecture + 2 chiffres

Conversion métrique/impérial

Sortie analogique : Sortie AC 0 ~ 2 V Peak échelle totale (résistance à la charge : Au-dessus 10 K)

Max. Valeur tenue

Power Off : manuel ou Power Off Arrêt automatique

Indicateur de batterie : Indicateur de batterie faible

Sortie de données : USB, RS-232, Bluetooth

Conditions de fonctionnement : température : 0~50 degrés ; Humidité : moins de 90%

HR Alimentation : Batterie 4 x 1,5 V AAA (UM-4)

Dimensions : 124 x 62 x 30 mm

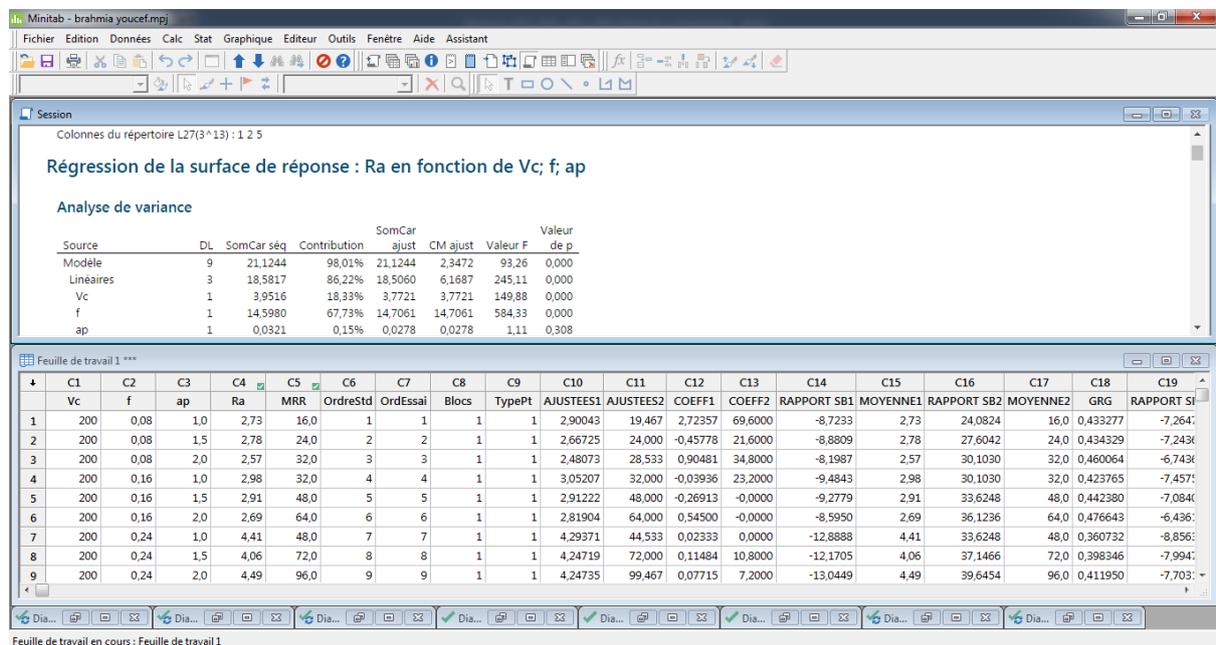
Poids : 120 g (sans les piles)

**II.2.7. Autres Moyens exploités**

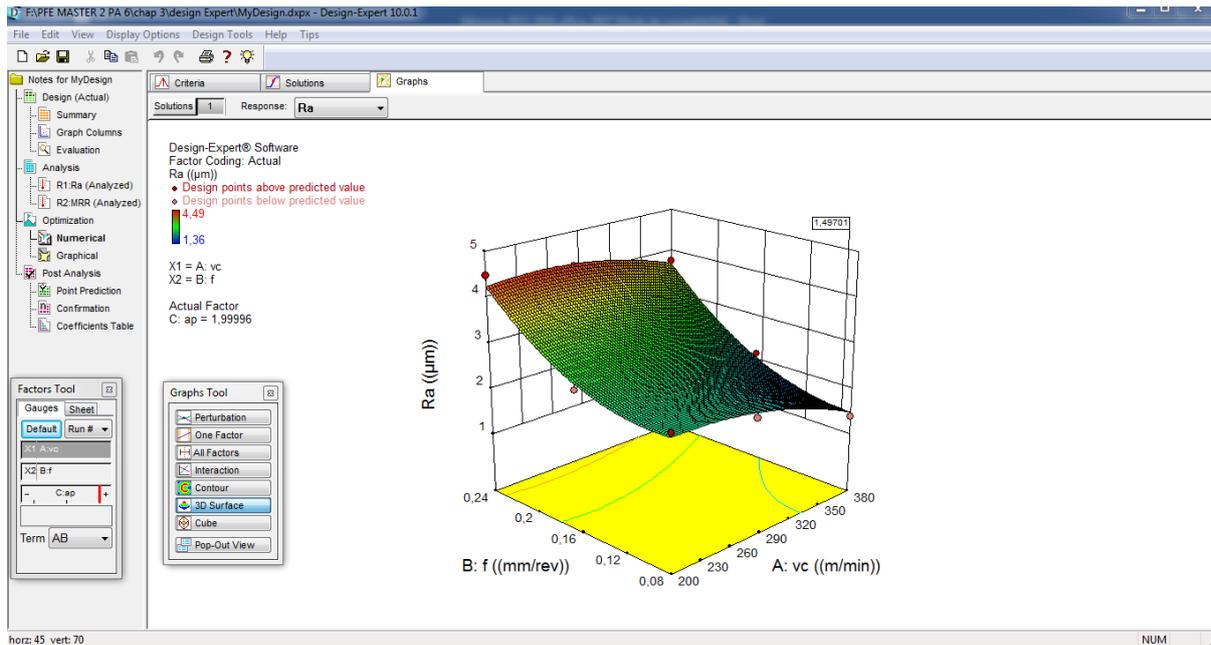
- ✓ Une appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.
- ✓ Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce.
- ✓ Nous avons utilisé des logiciels dans cette étude et qui sont :

Logiciel **MiniTAB18** pour la modélisation de la rugosité de surface et le débit de copeau enlevé pour obtenir les modèles de prédiction (**Figure II.10**).

Logiciel **Design Expert 11** qui est développé par la société de Stat-ease pour effectuer l'optimisation de la rugosité et l'optimisation du débit de copeau enlevé en utilise la méthodologie de surface de réponse (RSM) (**Figure II.11**).



**Figure II.10.** Interface de logiciel MiniTAB18



**Figure II.11.** Interface de logiciel Design Expert 11 développé par Stat-ease

### II.3. PLANIFICATION DES EXPERIENCES DE TAGUCHI

Un très grand nombre de facteurs agit sur les paramètres de sortie dans un processus de coupe, tels que la géométrie de l'outil ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\chi$ , ..., etc.), les paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), les caractéristiques du matériau usiné (dureté,  $R_r$ ), la composition chimique et les conditions de travail ... etc.

Ces facteurs représentent les paramètres d'entrée du système d'usinage. La précision, la rugosité de surface, les efforts, le volume de copeau, etc..., représentent les paramètres de sortie.

La méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires [23]. Elle a pour but de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. Elle permet d'obtenir des résultats en utilisant moins essais expérimentaux que les autres méthodes. Taguchi a montré que si ces essais expérimentaux sont choisis de manière appropriée, il n'est pas nécessaire de réaliser des matrices factorielles complètes. La base de la méthode de Taguchi est les tableaux orthogonaux, qui montrent que les niveaux de facteur doivent être choisis chaque fois pour faire le moins de passages possibles. L'idée principale est de se concentrer uniquement sur les quelques expériences qui sont essentielles pour l'analyse.

Les résultats obtenus ne peuvent pas être optimale, mais lorsque ces résultats sont mis en œuvre, le procédé est amélioré. Par conséquent, moins d'argent et de temps sont dépensés lorsque la méthode de Taguchi est employée.

Comme tout plan d'expérience, le plan de Taguchi implique le choix des paramètres d'entrée et l'identification des variables de sortie. Les paramètres d'entrée sont ceux qui

## Chapitre II : PROCEDURE ET EQUIPEMENT D'EXPERIENCE

changent suivant les essais. Leur nombre définit le nombre total d'essais du plan d'expériences. Les variables de sortie constituent l'ensemble des réponses.

La table orthogonale standard L27 ( $3^{13}$ ) de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale. Il contient 27 lignes correspondant au nombre de tests (26 degrés de liberté) avec 13 colonnes à trois niveaux. Les facteurs et les interactions sont attribués aux colonnes. Dans notre cas, La première colonne du tableau a été attribuée au rayon du bec de l'outil (r), la seconde à la vitesse de coupe (Vc), la cinquième à la vitesse d'avance (f), la huitième à la profondeur de coupe (ap). La matrice de planification, ainsi adoptée, donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe selon le plan de Taguchi comme sont illustrées dans le **Tableau II.4.**

**Tableau II.4.** Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 27

N° d'essais	Valeurs codées			
	r	Vc	f	ap
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0	0
3	-1	-1	1	1
4	-1	0	-1	0
5	-1	0	0	1
6	-1	0	1	-1
7	-1	1	-1	1
8	-1	1	0	-1
9	-1	1	1	0
10	0	-1	-1	-1
11	0	-1	0	0
12	0	-1	1	1
13	0	0	-1	0
14	0	0	0	1
15	0	0	1	-1
16	0	1	-1	1
17	0	1	0	-1
18	0	1	1	0
19	1	-1	-1	-1
20	1	-1	0	0
21	1	-1	1	1
22	1	0	-1	0
23	1	0	0	1
24	1	0	1	-1
25	1	1	-1	1
26	1	1	0	-1
27	1	1	1	0

Les niveaux choisis pour la conduite des essais sont présentés dans le **Tableau II.5**

**Tableau II.5** Les trois niveaux de condition de coupe

Paramètres d'entrée	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
r (mm)	0.8	1.2	1.6
Vc (m/min)	30	50	70
f (mm/tr)	0.08	0.12	0.16
ap (mm)	0.1	0.2	0.3

### II.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais.

Les propriétés techniques des éprouvettes et les caractéristiques de l'outil de coupe ont été définies, les instruments de mesure utilisés, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous présentons les différents résultats de l'évolution de la rugosité de surface (Ra) et la vibration (Vtng) en fonction des paramètres de coupe.

**Chapitre III**  
**ANALYSE ET**  
**MODELISATION DES**  
**RESULTATS**

### III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est réservé à la détermination des modèles mathématiques des paramètres technologiques étudiés lors du tournage du l'inconel 718 afin de pouvoir faire des prédictions. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe ( $r$ ,  $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) et les paramètres technologiques considérés, à savoir, la rugosité de surface et la vibration tangentielle. Le traitement des résultats est réalisé en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) qui a pour objectif de déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, aussi pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques. Les modèles trouvés serviront d'une part, à la prédiction des paramètres étudiés pour des combinaisons du régime de coupe, dans l'intervalle de réalisation des essais, et d'autre part, à l'optimisation des conditions de coupe en utilisant la fonction de désirabilité (DF). Le traitement des résultats a été réalisé par deux logiciels de statistique : « MINITAB18 » et « Design Expert 11 ».

### III.2. RESULTATS DES ESSAIS

**Le Tableau III.1** présente les valeurs expérimentales de la rugosité de surface ( $R_a$ ) du éprouvettes usinée et la vibration tangentielle ( $V_{tng}$ ) en fonction des quatre paramètres principaux de coupe ( $r$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ), Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan orthogonal de Taguchi (L27) lors de tournages du l'inconel 718.

Le plan contient deux paramètres de sortie :

- ✓ La rugosité de surface arithmétique ( $R_a$ ).
- ✓ La vibration ( $V_{tng}$ ).

**Tableau III.1.** Résultats expérimentaux d'usinage de l'inconel 718

Essais	Paramètres d'entrée				Réponses	
	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Vtng (m/s <sup>2</sup> )
1	0,8	30	0,08	0,1	0.401	2,077
2	0,8	30	0,12	0,2	0.571	2,247
3	0,8	30	0,16	0,3	0.672	2,691
4	0,8	50	0,08	0,2	0.328	1,334
5	0,8	50	0,12	0,3	0.349	2,142
6	0,8	50	0,16	0,1	0.787	1,603
7	0,8	70	0,08	0,3	0.280	1,828
8	0,8	70	0,12	0,1	0.338	1,484
9	0,8	70	0,16	0,2	0.435	2,106
10	1,2	30	0,08	0,1	0.457	2,870
11	1,2	30	0,12	0,2	0.431	3,537
12	1,2	30	0,16	0,3	0.582	3,728
13	1,2	50	0,08	0,2	0.386	2,865
14	1,2	50	0,12	0,3	0.433	2,673
15	1,2	50	0,16	0,1	0.649	2,037
16	1,2	70	0,08	0,3	0.428	2,428
17	1,2	70	0,12	0,1	0.282	2,012
18	1,2	70	0,16	0,2	0.476	2,440
19	1,6	30	0,08	0,1	0.394	3,393
20	1,6	30	0,12	0,2	0.390	3,683
21	1,6	30	0,16	0,3	0.464	3,535
22	1,6	50	0,08	0,2	0.434	2,157
23	1,6	50	0,12	0,3	0.445	2,839
24	1,6	50	0,16	0,1	0.457	2,400
25	1,6	70	0,08	0,3	0.433	2,579
26	1,6	70	0,12	0,1	0.357	2,383
27	1,6	70	0,16	0,2	0.284	2,588

L'analyse des résultats du **Tableau III.1** montre que la rugosité de surface (Ra) est enregistrée dans l'intervalle des valeurs comprise entre [0.28 et 0.787] µm.

On remarque aussi que la vibration (Vtng) varie dans l'intervalle [1.334 et 3.728] m/s<sup>2</sup>.

### III.3. ANALYSE DE VARIANCE ET METHODOLOGIE DES SURFACES DE REPONCE

#### III.3.1. Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA) est utile pour évaluer l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le processus d'usinage, elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie [24]. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par *P-value* et *F-value* d'ANOVA.

Dans le tableau d'ANOVA, *P-value* est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

Pour un niveau de confiance de 95% :

- ✓ Si  $P > 0,05$ , le paramètre est statistiquement insignifiant
- ✓ Si  $P < 0,05$ , le paramètre est statistiquement significatif

La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale. Il est exprimé par l'équation :

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III.1})$$

Où :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i : \text{La moyenne des réponses.}$$

$y_i$  : la réponse moyenne observée dans les expériences.

$N$  : nombre total d'expériences.

$N_{nf}$  : niveau de chaque facteur  $f$ .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté.

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{III.2})$$

La troisième colonne du tableau d'ANOVA (Cont %), montre la contribution des facteurs sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$Cont. \% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

#### III.3.2. Méthodologie des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques mathématiques qui se base sur la conception expérimentale pour déterminer la portée des variables d'entrée indépendantes. Cette méthode permet, grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie ( $Y$ ), et les variables d'entrée {le rayon de bec de l'outil ( $r$ ), vitesse de coupe ( $Vc$ ), l'avance par tour ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $ap$ )} pour optimiser les paramètres du procédé (dans notre cas, c'est le tournage) afin d'atteindre des réponses souhaitables. Dans cette méthode, la réponse peut s'écrire sous la forme suivante [25]

$$Y = \varphi(r \times V_c \times f \times ap) \quad (\text{III.4})$$

Où :  $\varphi$  est la fonction de réponse.

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est une procédure qui comprend six étapes :

- ✓ Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées.
- ✓ Adopter un plan de conception expérimentale.
- ✓ Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de RSM.
- ✓ Analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse.
- ✓ 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.
- ✓ Optimiser les paramètres d'entré et faire les tests de confirmation afin de vérifier les performances prédites.

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, effort de coupe tangentiel, effort spécifique tangentiel et puissance de coupe...), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs),  $X_1, X_2, \dots, X_k$  (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 suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1} a_i X_i + \sum_{i=1} a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \quad (\text{III.5})$$

- $Y$  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.
- $X_i$  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).
- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  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  $R^2$  est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (III.6).

$$R^2 = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{\sum(\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$y_i$  : valeur de la réponse calculée à la  $i^{\text{ème}}$  expérience.

$\bar{y}_i$  : Valeur mesurée à la  $i^{\text{ème}}$  expérience.

$\bar{y}$  : Valeur moyenne des réponses mesurées.

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour tester la validité du modèle, ainsi qu'examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérés statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le  $R^2$  approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réelles (expérimentales) [25-26].

### III.4. ANALYSE DE LA VARIANCE ANOVA POUR Ra

D'après L'analyse (ANOVA) de la rugosité de surface (Ra) **Tableau III.2**, l'avance par tour (f) a une grande influence sur (Ra), avec une contribution de 23.39%, suivi par la vitesse de coupe, avec une contribution de 16.09%, et vient ensuite le rayon de bec de l'outil avec une contribution de 3.7%, en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 0.02%. L'interaction  $r \times f$  montre une contribution significative de 19,42% et  $V_c \times ap$  avec une contribution de 4,97%. Les autres interactions  $V_c \times f$ ,  $r \times V_c$  et  $r \times ap$  n'ont pas de contribution significative.

**Tableau III.2.** Résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra)

Source	DL	SomCar séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	13	0,349701	92,02	0,349701	0,026900	11,53	0,000
<b>Linéaires</b>	<b>4</b>	<b>0,164163</b>	<b>43,20</b>	<b>0,173202</b>	<b>0,043301</b>	<b>18,57</b>	<b>0,000</b>
r	1	0,014056	3,70	0,014056	0,014056	6,03	0,029
Vc	1	0,061133	16,09	0,061133	0,061133	26,21	0,000
f	1	0,088901	23,39	0,094864	0,094864	40,67	0,000
ap	1	0,000072	0,02	0,017248	0,017248	7,40	0,018
<b>Carré</b>	<b>4</b>	<b>0,051927</b>	<b>13,66</b>	<b>0,021784</b>	<b>0,005446</b>	<b>2,33</b>	<b>0,110</b>
r*r	1	0,003408	0,90	0,003408	0,003408	1,46	0,248
Vc*Vc	1	0,013728	3,61	0,013728	0,013728	5,89	0,031
f*f	1	0,024704	6,50	0,004544	0,004544	1,95	0,186
ap*ap	1	0,010086	2,65	0,000003	0,000003	0,00	0,973

<b>Interaction à 2 facteurs</b>	<b>5</b>	<b>0,133612</b>	<b>35,16</b>	<b>0,133612</b>	<b>0,026722</b>	<b>11,46</b>	<b>0,000</b>
r*Vc	1	0,014491	3,81	0,014491	0,014491	6,21	0,027
r*f	1	0,073790	19,42	0,073790	0,073790	31,64	0,000
r*ap	1	0,010740	2,83	0,010740	0,010740	4,60	0,051
Vc*f	1	0,015708	4,13	0,031417	0,031417	13,47	0,003
Vc*ap	1	0,018883	4,97	0,018883	0,018883	8,10	0,014
Erreur	13	0,030321	7,98	0,030321	0,002332		
Total	26	0,380022	100				

### III.4.1. Graphique des effets principaux pour Ra

La figure III.1 illustre les principaux facteurs affectant le paramètre (Ra), où il est montré que l'avance par tour (f) et la vitesse de coupe (Vc) ont un effet important sur la rugosité de surface (Ra) suivis par le rayon de bec de l'outil. Il est à remarquer que l'augmentation de la vitesse de coupe et du rayon du bec, contribue à la diminution du critère de rugosité Ra, alors que l'augmentation de l'avance par tour conduit une augmentation de Ra. La profondeur de passe n'a pas d'effet significatif sur le développement de la rugosité (Ra).

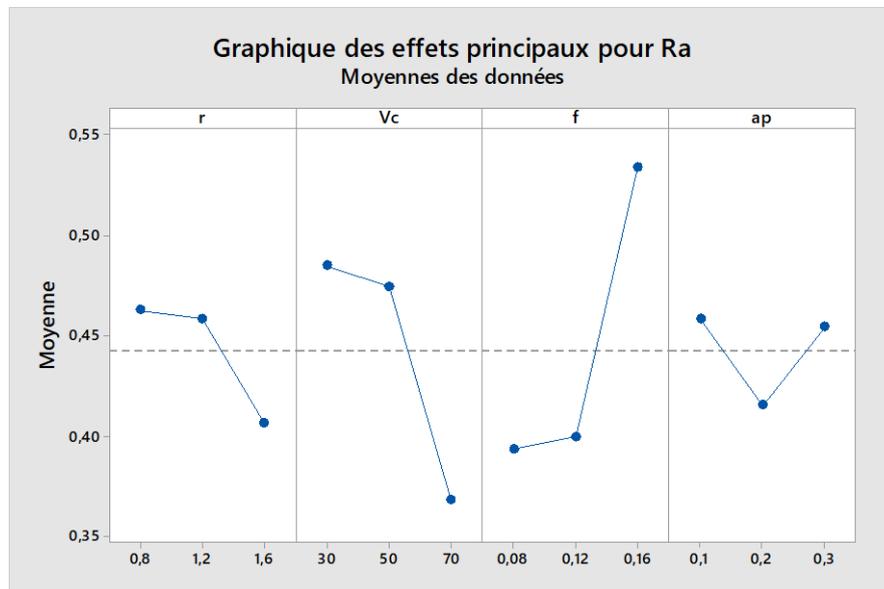


Figure III.1. Graphique des effets principaux pour (Ra)

### III.4.2. Diagramme de Pareto des effets pour Ra

La figure III.2 présente l'analyse de Pareto, technique permettant de hiérarchiser la résolution de problèmes en classant les effets décroissants des paramètres de coupe et leurs interactions sur la rugosité de surface (Ra). Pour que les effets soient bons, ils doivent être supérieurs à 2,16.

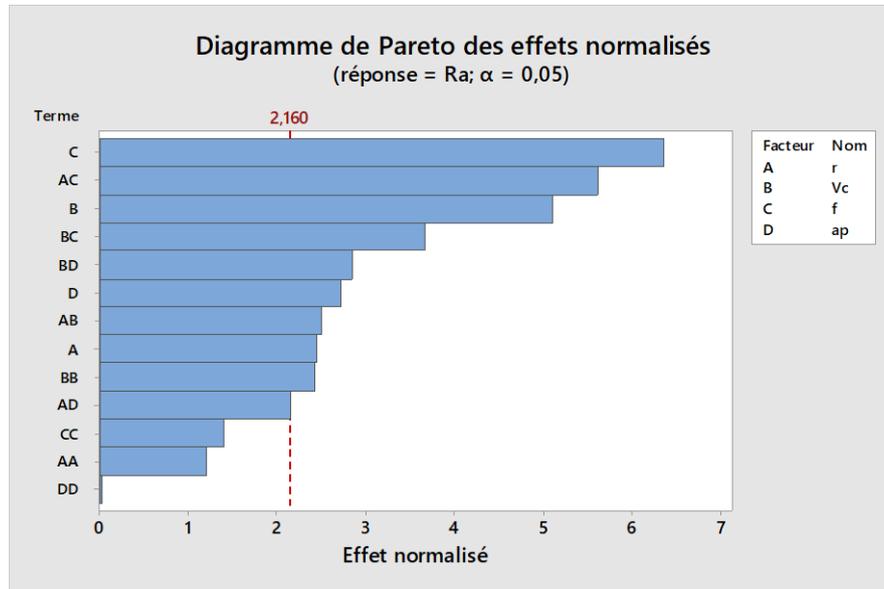


Figure III.2. Diagramme de Pareto des effets pour la rugosité de surface (Ra)

D'après le diagramme on remarque que les facteurs les plus influents sur la rugosité sont : l'avance f, suivi par l'interaction rxf et la vitesse de coupe Vc. Par contre les termes carrés f×f, r×r et ap×ap n'ont pas une influence sur la rugosité, est c'est ce que confirme les résultats trouve dans l'analyse ANOVA.

### III.4.3. Analyse de régression pour Ra

L'équation de régression quadratique représente la relation entre les facteurs et la réponse Ra. Elle est obtenue et donnée par l'équation (III.7) avec un coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) de 92.02% :

$$Ra = - 0.320 + 0.509 r + 0.00989 Vc + 8.90 f - 2.92 ap - 0.149 r*r - 0.000120 VcVc + 19.9 f*f - 0.08 ap*ap + 0.00434 r*Vc - 4.901 r*f + 0.748 r*ap - 0.1044 Vc*f + 0.0324 Vc*ap \quad (III.7)$$

### III.4.4. Test de concordance entre les valeurs prévue et expérimentale

La vérification diagnostique du modèle a été effectuée en utilisant l'analyse résiduelle pour le modèle développé et les résultats sont présentés dans La figure III.3. Dans cette figure, les points de couleur représentent les valeurs de la rugosité de surface de chaque essai des 27 essais.

La figure III.3 montre la probabilité normale des résiduelles de réponse (Ra). Elle indique que les valeurs résiduelles tombent généralement sur une ligne droite impliquant que les erreurs sont proches de la ligne de 45°.

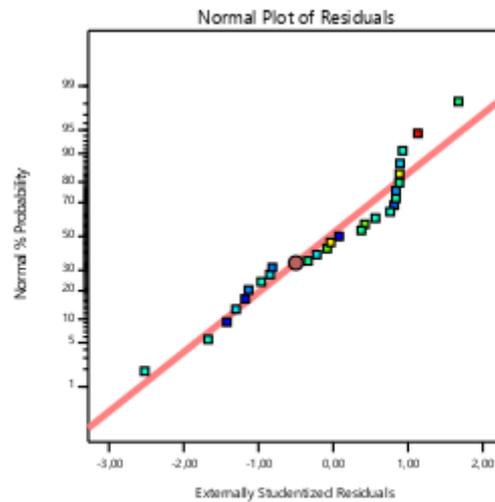


Figure III.3. Probabilité normale des résiduelles de réponse Ra

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra) est présentée dans la figure III.4.

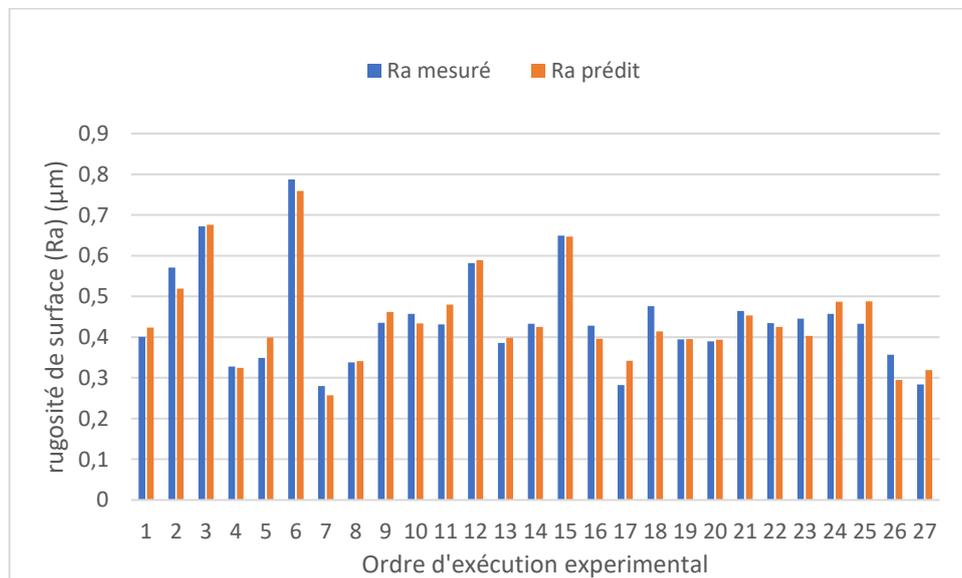


Figure III.4. Comparaison entre les valeurs calculées et prédites du Ra

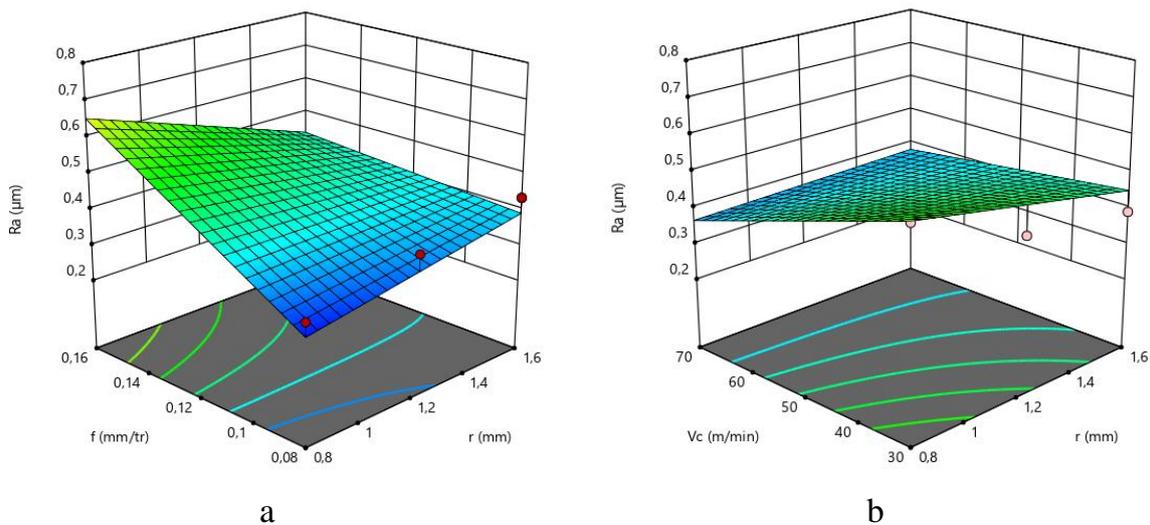
On remarque que les valeurs mesurées et les valeurs prédites sont assez proches

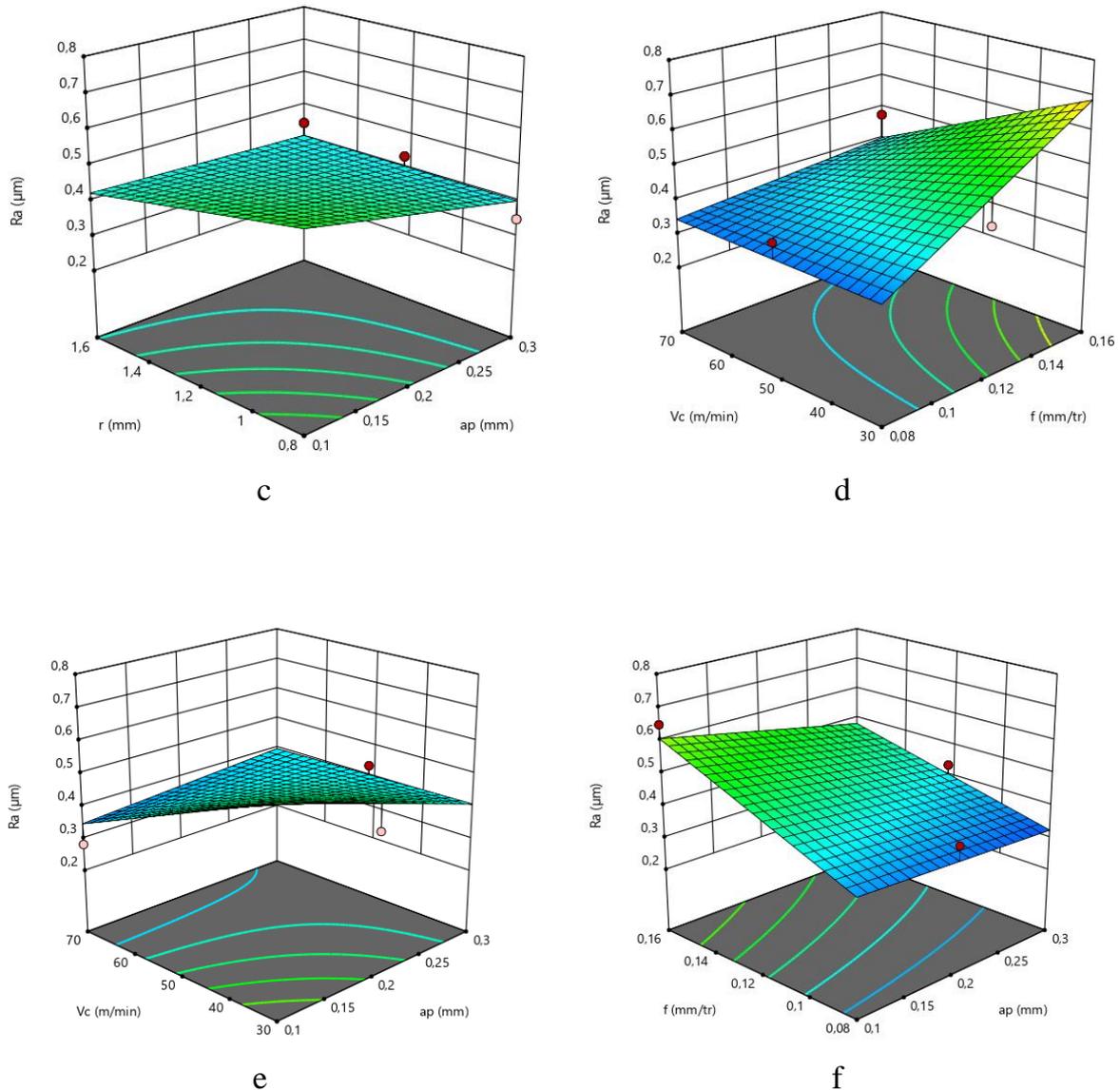
### III.4.5. Surface en 3D de Ra

Les diagrammes de surface 3D sont représentés sur **La figure III.5**. Ces diagrammes permettent d'évaluer l'influence simultanée de ( $V_c ; r$ ) ( $f ; r$ ), ( $r ; a_p$ ), ( $V_c ; f$ ) ( $V_c ; a_p$ ) et ( $f ; a_p$ ) sur le critère de rugosité de surface ( $R_a$ ).

Les surfaces de réponse indiquent que la pente de l'avance ( $f$ ) est la plus importante suivie par celle de la vitesse de coupe ( $V_c$ ), puis du rayon de bec de l'outil ( $r$ ), et enfin de la profondeur de passe ( $a_p$ ). Ce qui confirme les résultats trouvés par l'ANOVA.

En plus, ces courbes montrent l'existence de fortes interactions entre différents facteurs. En effet sur la figure III-5a on remarque que pour une avance par tour de 0.08 mm/tr le rayon du bec d'outil n'a pas d'influence sur la rugosité  $R_a$ , alors que pour une avance de 0.16 mm/tr, le critère de rugosité  $R_a$  diminue considérablement avec l'augmentation de l'avance. Un constat similaire est observé pour le couple Vitesse de coupe ( $V_c$ ) et avance par tour ( $f$ ), fig.III-5d.





**Figure III.5.** Surface 3D de (Ra) en fonction de (a : f ; r), (b : Vc ; r), (c : r ; ap), (d : Vc ; f) (e : Vc ; ap) et (f : f ; ap)

### III.5. ANALYSE DE LA VARIANCE ANOVA POUR V<sub>tng</sub>

Le **tableau III.3** illustre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour la vibration (V<sub>tng</sub>). L'analyse du tableau montre que le rayon de bec de l'outil a une grande influence sur V<sub>tng</sub> avec une contribution de 32.41%, Et puis la vitesse de coupe avec une contribution de 31.36%, et vient ensuite la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 8.77%, en dernier lieu l'avance par tour (f) avec une contribution de 1.28%

**Tableau III.3.** Résultats de l'ANOVA pour vibration (Vtng)

Source	DL	SomCar séq	Cont %	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	13	10,3120	92,96	10,3120	0,79323	13,20	0,000
<b>Linéaires</b>	<b>4</b>	<b>8,1885</b>	<b>73,82</b>	<b>8,0258</b>	<b>2,00645</b>	<b>33,40</b>	<b>0,000</b>
r	1	3,5957	32,41	3,5957	3,59567	59,85	0,000
Vc	1	3,4786	31,36	3,4786	3,47864	57,90	0,000
f	1	0,1417	1,28	0,0851	0,08507	1,42	0,255
ap	1	0,9725	8,77	0,6861	0,68614	11,42	0,005
<b>Carré</b>	<b>4</b>	<b>1,7962</b>	<b>16,19</b>	<b>1,7675</b>	<b>0,44188</b>	<b>7,36</b>	<b>0,003</b>
r*r	1	0,6916	6,23	0,6916	0,69156	11,51	0,005
Vc*Vc	1	1,0442	9,41	1,0442	1,04417	17,38	0,001
f*f	1	0,0333	0,30	0,0310	0,03100	0,52	0,485
ap*ap	1	0,0272	0,25	0,0025	0,00252	0,04	0,841
<b>Interaction à 2 facteurs</b>	<b>5</b>	<b>0,3272</b>	<b>2,95</b>	<b>0,3272</b>	<b>0,06545</b>	<b>1,09</b>	<b>0,411</b>
r*Vc	1	0,1786	1,61	0,1786	0,17861	2,97	0,108
r*f	1	0,0490	0,44	0,0490	0,04902	0,82	0,383
r*ap	1	0,0432	0,39	0,0432	0,04320	0,72	0,412
Vc*f	1	0,0551	0,50	0,0343	0,03432	0,57	0,463
Vc*ap	1	0,0013	0,01	0,0013	0,00130	0,02	0,885
Erreur	13	0,7810	7,04	0,7810	0,06008		
Total	26	11,0930	100,00				

Par ailleurs nous constatons d'après le tableau ANOVA que les différents termes d'interaction n'ont pas d'effet significatif sur la vibration

### III.5.1. Graphique des effets principaux pour Vtng

La figure III.6 expose les graphiques des effets principaux pour la vibration (Vtng), l'analyse des graphes montre que la vitesse de coupe (Vc) et le rayon de bec de l'outil (r) ont un effet important sur la vibration (Vtng), suivie par la profondeur de passe (ap). Il est remarqué que l'augmentation du rayon de bec et de l'avance par tour, contribue à l'augmentation du critère du vibration (Vtng), alors que l'avance (f) n'a pas d'effet significatif sur le développement du vibration (Vtng).

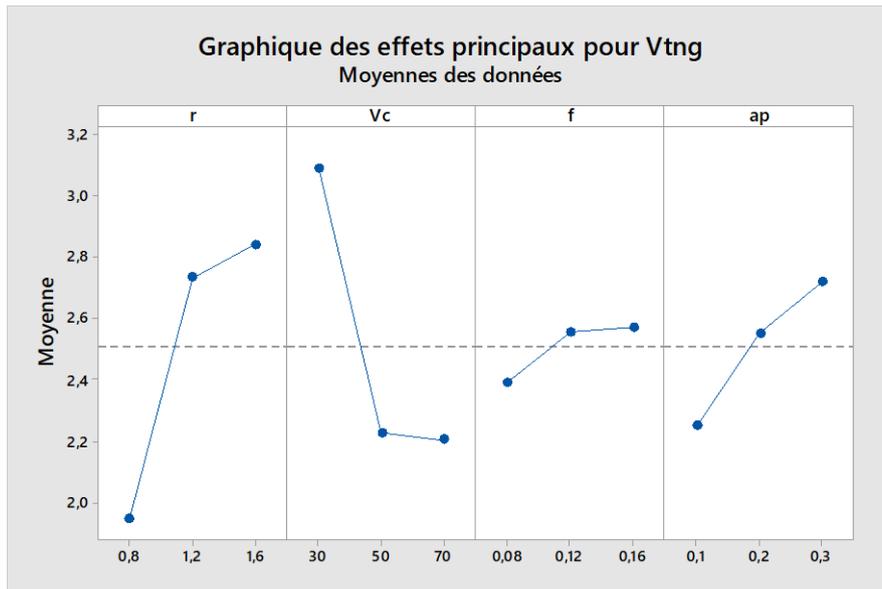


Figure III.6. Graphique des effets principaux pour (*Vtng*)

### III.5.2. Diagramme de Pareto des effets pour *Vtng*

La figure III.7 présente l'analyse de Pareto, des effets sur la vibration (*Vtng*), d'après ce diagramme on remarque que les facteurs les plus effectuant sur la vibration sont : le rayon de bec de l'outil et la vitesse de coupe *Vc*. Par contre les interactions  $Vc \times f$ ,  $f \times f$ ,  $ap \times ap$  et  $Vc \times ap$  n'ont pas une influence sur la vibration, est c'est ce que confirme les résultats trouve dans l'analyse ANOVA.

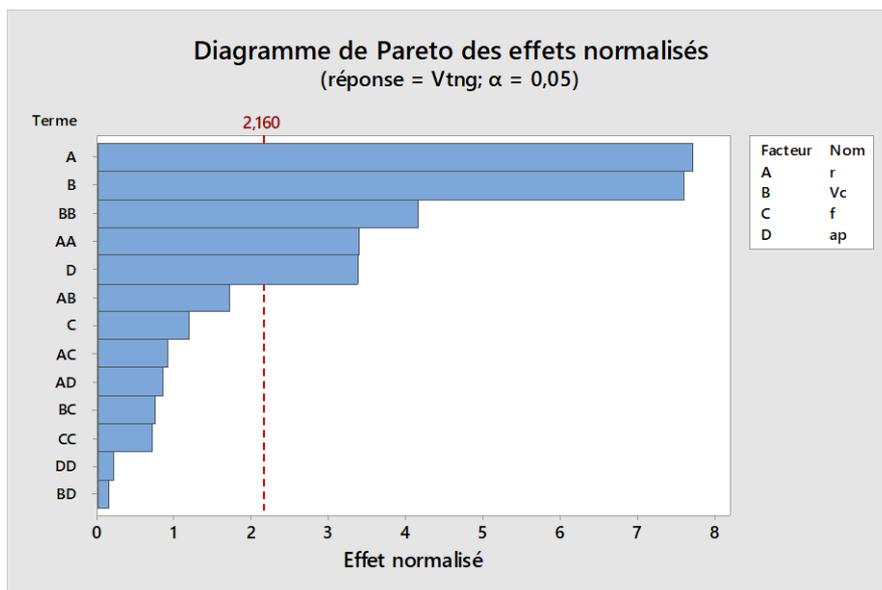


Figure III.7. Diagramme de Pareto des effets pour vibration (*Vtng*)

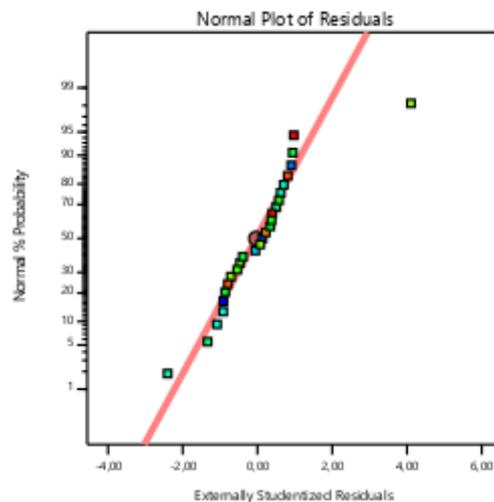
### III.5.3. Analyse de régression pour Vtng

L'équation de régression quadratique représente la relation entre les facteurs et la réponse Vtng. Elle est obtenue et donnée par l'équation (III.8) avec des coefficients de détermination (R<sup>2</sup>) de 92.96% :

$$\begin{aligned} Vtng = & -0,96 + 7,75 r - 0,1228 Vc + 14,2 f + 5,08 ap - 2,122 r*r \\ & + 0,001043 Vc*Vc - 51,9 f*f - 2,4 ap*ap - 0,01525 r*Vc - 3,99 r*f - 1,50 r*ap \\ & + 0,109 Vc*f + 0,0085 Vc*ap \end{aligned} \quad (III.8)$$

### III.5.4. Test de concordance entre les valeurs prévue et expérimentale

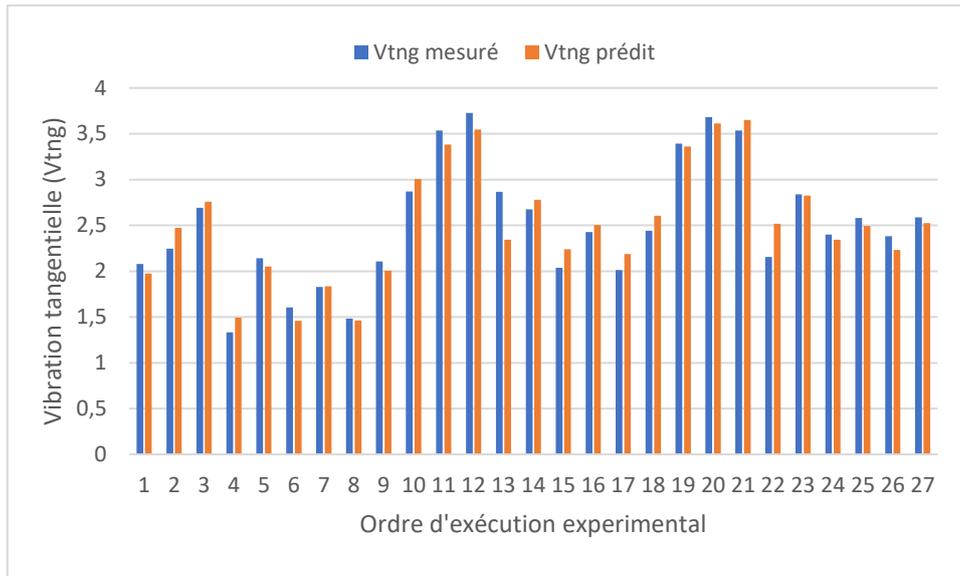
La vérification diagnostique du modèle a été effectuée en utilisant l'analyse résiduelle pour le modèle développé et les résultats sont présentés dans **La figure III.8**.



**Figure III.8.** Probabilité normale des résiduelles de réponse Vtng

Dans cette figure, les points de couleur représentent les valeurs de la rugosité de surface de chaque essai des 27 essais **La figure III.8** montre la probabilité normale des résiduelles de réponse (Vtng). Elle indique que les valeurs résiduelles tombent généralement sur une ligne droite impliquant que les erreurs sont proches de la ligne de 45°.

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la vibration (Vtng) est présentée dans **la figure III.9**.

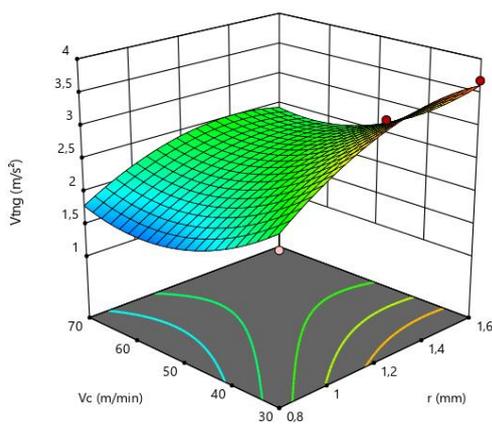


**Figure III.9.** Comparaison entre les valeurs calculées et prédites du Vtng

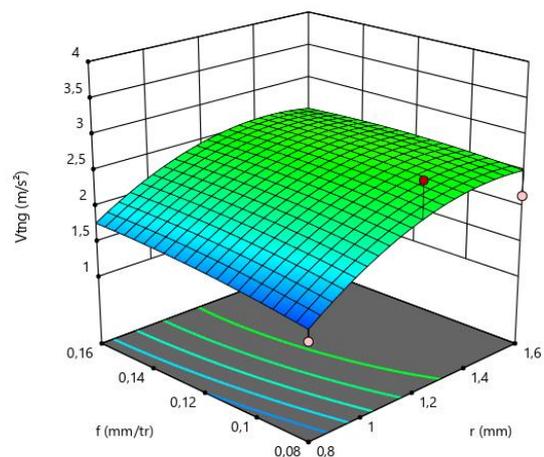
On remarque que les valeurs mesurées et les valeurs prédites sont assez proches.

### III.5.5. Surface en 3D de Vtng

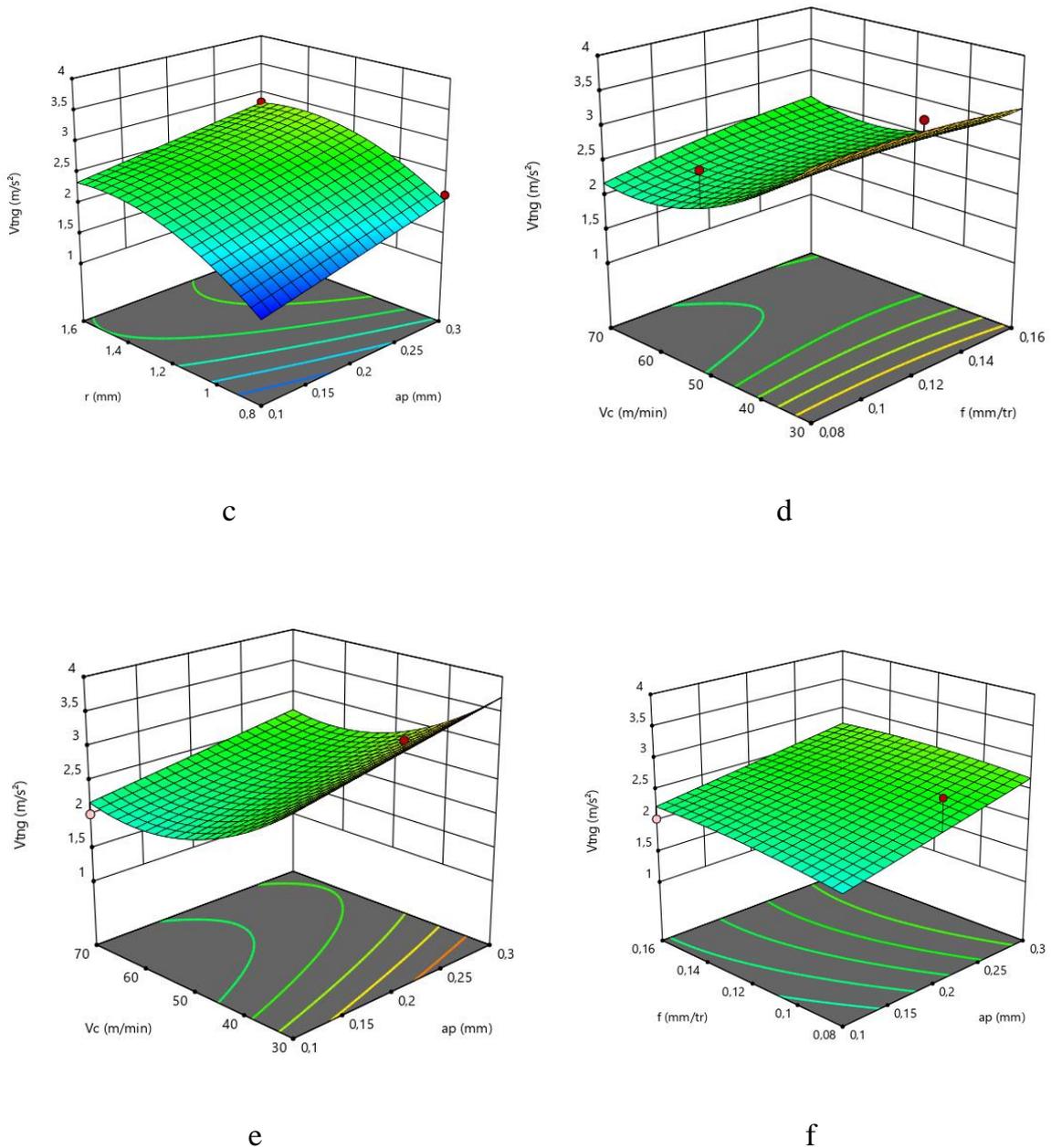
Les diagrammes de surface 3D sont représentés sur **La figure III.10**. Ces diagrammes permettent d'évaluer l'influence simultanée de ( $V_c$  ;  $r$ ) ( $f$  ;  $r$ ), ( $r$  ;  $ap$ ), ( $V_c$  ;  $f$ ) ( $V_c$  ;  $ap$ ) et ( $f$  ;  $ap$ ) sur la vibration ( $V_{tng}$ ), indiquant que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) la plus importante suivie par le rayon de bec de l'outil ( $r$ ), puis du la profondeur de passe ( $ap$ ), et enfin de l'avance ( $f$ ).



a



b



**Figure III.10.** Surface 3D de ( $V_{tng}$ ) en fonction de (a :  $V_c$  ;  $r$ ) (b :  $f$  ;  $r$ ), (c :  $r$  ;  $ap$ ), (d :  $V_c$  ;  $f$ ) (e :  $V_c$  ;  $ap$ ) et (f :  $f$  ;  $ap$ )

Ces différentes courbes 3D, prouvent l'inexistence d'effet d'interactions entre les différents paramètres d'entrée considérés sur la variation de la vibration tangentielle. Chose déjà trouvée par l'analyse ANOVA.

### III.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale qui est consacré à la détermination du degré d'influence des paramètres de coupe (le rayon de bec ( $r$ ), vitesse de coupe ( $V_c$ ), avance par tour ( $f$ ) et la profondeur de passe ( $a_p$ )) sur le critère de rugosité ( $R_a$ ) et la vibration ( $V_{tng}$ ), elle a permis de déterminer les modèles mathématiques et les coefficients de détermination de chacun des paramètres.

L'analyse de la variance ANOVA à l'aide de logiciel Design-Expert 11, et l'Analyse des effets principaux à l'aide de logiciel Minitab-18 du critère de rugosité ( $R_a$ ) montre que l'avance par tour est le facteur qui a l'influence la plus significative sur ce critère, suivi par la vitesse de coupe, suivis par le rayon de bec, alors que la profondeur de passe n'a pas d'influence significative sur le critère de rugosité. Par ailleurs les différents résultats montrent que le rayon de bec est le facteur la plus significative sur la vibration, suivi par la vitesse de coupe et la profondeur de passe, alors que l'avance n'a pas d'influence significative sur le critère de vibration ( $V_{tng}$ ). Les modèles mathématiques obtenus permettent de donner des prédictions qui sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales.

**Chapitre IV**

**OPTIMISATION DES  
CONDUTIONS DE COUPE**

## IV.1. INTRODUCTION

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant le choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées d'une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération. Donc, l'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation de différentes méthodes d'optimisation.

Trois méthodes d'optimisation ont été exploitées dans ce chapitre, une méthode mono-objective qui est la méthode de Taguchi et deux autres méthodes multi-objectifs, à savoir, l'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis GRA) et maximisation de la fonction de désirabilité.

## IV.2. OPTIMISATION PAR LA METHODE DE TAGUCHI

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/B). Le premier terme de ce rapport (signal), représente la variable principale à l'entrée du procédé et le second terme (bruit), représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie. Le rapport (S/B) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées. Selon le cas étudié, le rapport (S/B) qu'il soit le plus faible ou le plus élevé est le paramètre décisif du niveau optimal des paramètres du processus de coupe. Dans cette étude, Le plus faible effort tangentiel, rugosité de surface et la vibration tangentielle. La caractéristique (S/B) la plus petite est la meilleure (*smaller-the-better*) a été utilisé pour (Ra, Vtng), les résultats sont affichés dans le **tableau IV.1**. Les caractéristiques de qualité (S/B), sont calculées avec les équations suivantes : [5]

- a) L'optimum est une valeur minimale (*plus petit c'est meilleur*) : la valeur cible ( $m$ ) est égale à zéro, on vise la minimisation de la caractéristique de performance. La caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Taguchi recommande l'utilisation de la fonction représentée par l'équation (IV.1) [5]

$$\frac{S}{B} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i^2) \right] \quad \text{IV.1}$$

Où :  $y_i$  = valeur mesurée de la réponse, Avec :  $i = 1, 2, \dots n$ .  
 $n$  = nombre de mesures effectuées

- b) L'optimum est une valeur maximale (*plus grand c'est meilleur*) : la valeur cible ( $m$ ) est égale à l'infini, on vise la maximisation de la caractéristique de performance.

Maximiser Y revient à minimiser  $1/Y$  et, Taguchi recommande l'utilisation de l'équation (IV.2) [6]

$$\frac{S}{B} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad \text{IV.2}$$

- c) L'optimum est une valeur ciblée : la valeur cible est égale à une valeur nominale  $m_0$  (Nominal c'est meilleur), la fonction de perte augmente quand (Y) s'éloigne de la valeur nominale  $m_0$ , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (IV.3) [6]

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \left( \frac{y_j^2}{y_j^2} \right) \right] \quad \text{IV.3}$$

**Tableau IV.1.** Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées

N	S/N (Ra)	S/N (Vtng)
1	7,93711255	-6,34872993
2	4,86727784	-7,03206145
3	3,45261454	-8,59827396
4	9,68252313	-2,50311659
5	9,14349146	-6,61638933
6	2,08050535	-4,09867045
7	11,0568394	-5,23952383
8	9,42166599	-3,42867802
9	7,23021486	-6,46916734
10	6,801676	-9,15763793
11	7,3104546	-10,9727012
12	4,70154031	-11,4295181
13	8,26825391	-9,14249253
14	7,27024207	-8,53997918
15	3,75510606	-6,17982058
16	7,37112462	-7,70497365
17	10,9950178	-6,07255953
18	6,44786095	-7,74779653
19	8,09007556	-10,6116772
20	8,17870786	-11,3240344
21	6,66964039	-10,9677884
22	7,25020541	-6,6770029
23	7,03279978	-9,06330785
24	6,801676	-7,60422483
25	7,27024207	-8,22902684
26	8,94663568	-7,54248085
27	10,9336332	-8,25928544

IV.2.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra)

Le tableau IV.2 affiche les paramètres d’usinage (r, Vc, ap, f) qui ont un effet sur le rapport S/B de la rugosité de surface (Ra). La plus importante influence correspond à la vitesse de coupe (Vc) avec un effet de 2,407, en seconde position vient l’avance par tour (f) avec 2,406 d’effet, suivie du rayon de bec de l’outil (r) avec un effet de 0,917, et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec un effet de 0,689.

Tableau IV.2. Moyenne des ratios S/B(Ra) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	r	Vc	f	ap
1	7,208	6,445	8,192	7,203
2	6,991	6,809	8,130	7,797
3	7,908	8,853	5,786	7,108
Delta	0,917	2,407	2,406	0,689
Rang	3	1	2	4

Selon l’approche de Taguchi, l’optimum de la réponse (Ra) correspond aux niveaux r3, Vc3, f1 et ap2. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (Ra) sont donc, le plus grand rayon de bec d’outil r = 1.6mm, la plus grande vitesse de coupe Vc = 70 m/min, la plus faible avance par tour f = 0,08 mm/tr et la profondeur de passe moyenne ap = 0.2mm. Les paramètres d’usinage optimaux ont été mis en évidence dans des cercles (figure IV.1).

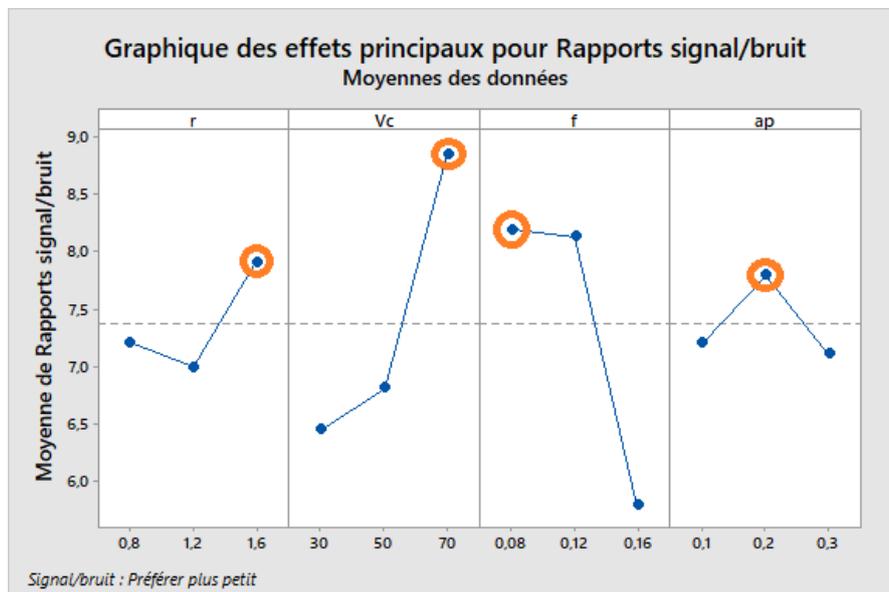


Figure IV.1 Graphique des effets principaux de r, Vc, f et ap sur (S/B<sub>Ra</sub>)

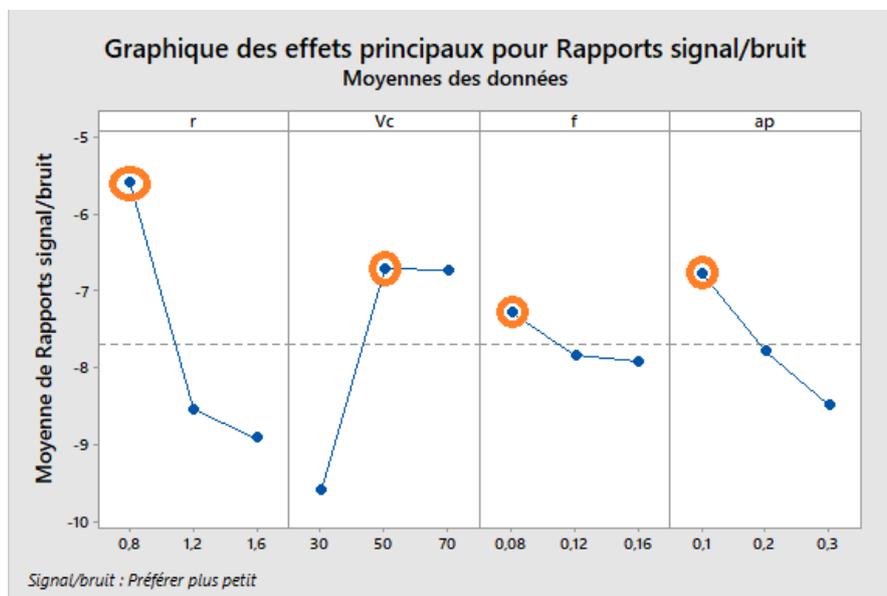
**IV.2.2. Analyse des effets principaux sur la vibration ( $V_{tng}$ )**

Le **tableau IV.3** affiche les paramètres d’usinage ( $r$ ,  $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ ) qui ont un effet sur la vibration ( $V_{tng}$ ). La plus importante influence correspond au rayon de bec de l’outil ( $r$ ) avec un effet de 3,327, en seconde position vient la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec 2,891 d’effet, suivie du lieu la profondeur de passe ( $a_p$ ) avec un effet de 1,705, et en dernier l’avance par tour ( $f$ ) avec un effet de 0,638.

**Tableau IV.3.** Moyenne des ratios  $S/B_{(V_{tng})}$  pour chaque niveau des facteurs

Niveau	r	Vc	f	ap
1	<b>-5,593</b>	-9,605	<b>-7,290</b>	<b>-6,783</b>
2	-8,550	<b>-6,714</b>	-7,844	-7,792
3	-8,920	-6,744	-7,928	-8,488
Delta	3,327	2,891	0,638	1,705
Rang	1	2	4	3

Selon l’approche de Taguchi, l’optimum de la réponse ( $V_{tng}$ ) correspond aux niveaux  $r_1$ ,  $V_{c2}$ ,  $f_1$  et  $a_{p1}$ . Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la vibration ( $V_{tng}$ ) sont donc, le plus faible rayon de bec d’outil  $r = 0.8\text{mm}$ , la vitesse de coupe moyenne  $V_c = 50\text{ m/min}$ , la plus faible avance par tour  $f = 0,08\text{ mm/tr}$  et la plus faible profondeur de passe  $a_p = 0.1\text{mm}$ . Les paramètres d’usinage optimaux ont été mis en évidence dans des cercles (**figure IV.2**).



**Figure IV.2** Graphique des effets principaux de  $r$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur ( $S/B_{V_{tng}}$ )

Les résultats obtenus par la Méthode de Taguchi pour une optimisation mono-objective sont présentés dans le **tableau IV.4**.

**Tableau IV.4.** Résultats de la Méthode de Taguchi

	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Vtng (m/s <sup>2</sup> )
Ra min	1.6	70	0.08	0.2	0.334	2.356
Vtng min	0.8	50	0.08	0.1	0.408	1.269

### IV.3. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF PAR LA METHODE D'ANALYSE RELATIONNELLE GRISE

L'analyse relationnelle grise (GRA) est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique dans le but d'atteindre une combinaison optimale de niveaux de paramètres pour l'amélioration simultanée de multiples caractéristiques d'usinage [29]. Le but de la méthode d'analyse relationnelle grise est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser la rugosité de surface (Ra) et vibration (Vtng).

Les étapes suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) :

#### IV.3.1. La normalisation

La première étape de l'analyse relationnelle grise est de normaliser (dans l'intervalle 0 et 1) les données expérimentales selon le but de l'optimisation [27].

Pour la minimisation du critère (rugosité de surface Ra), la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.4})$$

Le but de la normalisation est rendu toutes les réponses en même grandeur, les données traitées par la normalisation sont données dans le **tableau IV.5**. Les valeurs normalisées ont été arrangés entre zéro et un.

**Tableau IV.5.** Résultats expérimentale normalisé  $x_i^0(k)$

N° d'essai (i)	La Normalisation	
	Ra*	Vtng*
Valeur idéal	1	1
1	0,76134122	0,68964077
2	0,4260355	0,61862991
3	0,22682446	0,43316625
4	0,90532544	1
5	0,86390533	0,66248956
6	0	0,88763576
7	1	0,79365079

8	0,88560158	0,93734336
9	0,69428008	0,67752715
10	0,65088757	0,35839599
11	0,70216963	0,07978279
12	0,40433925	0
13	0,79092702	0,36048454
14	0,69822485	0,44068505
15	0,27218935	0,70634921
16	0,70808679	0,54302423
17	0,99605523	0,71679198
18	0,61341223	0,5380117
19	0,77514793	0,13993317
20	0,78303748	0,01879699
21	0,63708087	0,08061821
22	0,69625247	0,65622389
23	0,67455621	0,37134503
24	0,65088757	0,55472013
25	0,69822485	0,47994987
26	0,84812623	0,56182122
27	0,99211045	0,47619048

### IV.3.2. Calcul des Coefficients du Relationnel Gris (GRC)

Le coefficient relationnel gris décrit la corrélation entre les résultats expérimentaux idéaux et obtenus. La formule mathématique du coefficient relationnel gris ( $\xi_i(k)$ ) est donnée comme suit [27] :

$$\xi_i = \frac{\Delta_{min} + \psi \Delta_{max}}{\Delta_{0i} + \psi \Delta_{max}} \quad (IV.5)$$

Où :

$\Delta_{0i}(k)$  : La différence en valeur absolue entre  $x_0^k(k)$  et  $x_i^k(k)$

$\Delta_{min}$  : La plus petite valeur de  $\Delta_{0i}(k)$

$\Delta_{max}$  : La plus grande valeur de  $\Delta_{0i}(k)$  coefficient de distinction (sa valeur entre 0 à 1).

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (IV.6)$$

$$\Delta_{min} = \min_{j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (IV.7)$$

$$\Delta_{max} = \max_{j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (IV.8)$$

La valeur de  $\psi$  est en générale égale à (0,5) [30].

La valeur du coefficient  $\psi$  a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris relationnel Coefficients" est présenté dans le **tableau IV.5**.

**IV.3.3. Calcul du GRG (Grey Relationnel Grade)**

GRG représente la corrélation entre les séries, elle est donnée par la formule suivante :

$$a_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \tag{IV.9}$$

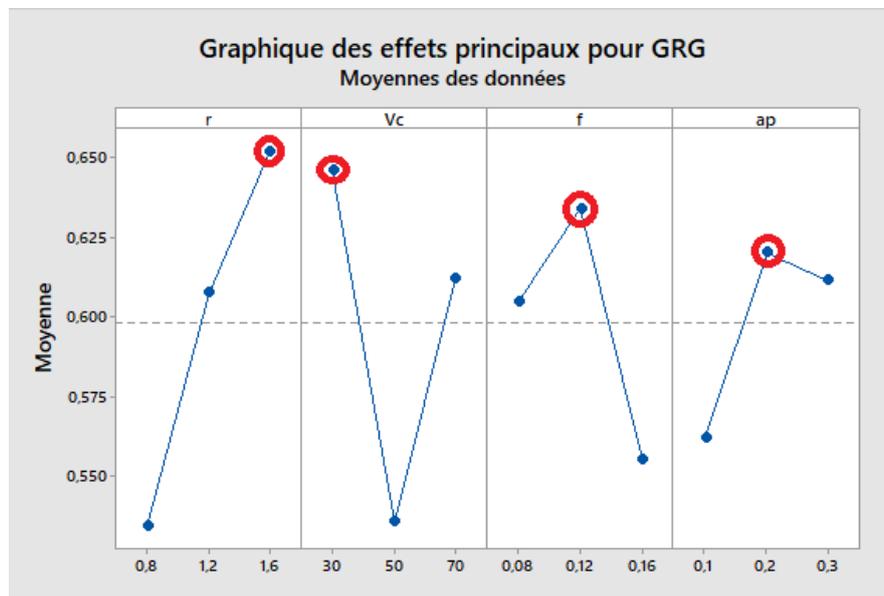
Où : n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas n=2).

Après le calcul du GRG, la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite en fonction du tableau (Grey relationnel grade (*GRG*)). La plus grande valeur de GRG qui se trouve à proximité de la valeur normalisée idéale correspond à la combinaison optimale. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres du processus est le niveau avec la plus grande valeur GRG. **Tableau IV.6.**

**Tableau IV.6.** Coefficients du GR ( $\xi_i(k)$ ) et Niveau relationnel gris (Grey Relationnel Grade (*GRG*)).

N° Essai (i)	$\xi_{Ra}$	$\xi_{vtng}$	GRG
1	0,67690254	0,42029494	0,54859874
2	0,46556474	0,44697535	0,45627005
3	0,39271882	0,53581021	0,46426451
4	0,84079602	0,33333333	0,58706468
5	0,78604651	0,43011139	0,60807895
6	0,33333333	0,36032511	0,34682922
7	1	0,38650307	0,69325153
8	0,81380417	0,34786399	0,58083408
9	0,62056304	0,42461866	0,52259085
10	0,58885017	0,58248175	0,58566596
11	0,62669963	0,86239193	0,74454578
12	0,45634563	1	0,72817282
13	0,70514604	0,58106796	0,643107
14	0,62361624	0,53152753	0,57757188
15	0,40722892	0,41447368	0,4108513
16	0,63138232	0,47937525	0,55537878
17	0,99217221	0,41091658	0,7015444
18	0,56395996	0,48169014	0,52282505
19	0,68979592	0,78133159	0,73556376
<b>20</b>	<b>0,69738652</b>	<b>0,96376812</b>	<b>0,83057732</b>
21	0,57942857	0,86115108	0,72028983
22	0,62208589	0,4324422	0,52726404
23	0,60573477	0,5738255	0,58978014
24	0,58885017	0,47405941	0,53145479
25	0,62361624	0,51023018	0,56692321
26	0,76701967	0,47088906	0,61895437
27	0,98446602	0,51219512	0,74833057

Le niveau correspondant au maximum des valeurs moyennes de "la qualité relationnelle grise" c'est le niveau optimal des paramètres, La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage de l'inconel 718 est déduite de la **figure IV.3**.



**Figure IV.3** Graphique des effets principaux de la qualité grise (Grey Grade)

Donc la combinaison optimale (pour les deux réponses) des paramètres est : r3, Vc1, f2 et ap2. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : le rayon du bec d'outil  $r = 1,6$  (mm), la vitesse de coupe  $Vc = 30$  (m/min), l'avance  $f = 0,12$  (mm/tr) et la profondeur de passe  $ap = 0,2$  (mm). Ce qui permet d'obtenir une rugosité  $Ra = 0,36 \mu\text{m}$  et une vibration  $V_{\text{tng}} = 3,63 \text{ m/s}^2$ .

## IV.4. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF PAR LA METHODE DE LA FONCTION DESIRABILITE (DF)

### IV.4.1. Introduction

L'approche de la fonction désirabilité est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'optimisation multi-objective des réponses grâce à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [28]. 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'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 réponse. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant de faire un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité « DF » qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire « di » variant entre 0 et 1

## Chapitre IV : OPTIMISATION DES CONDUCTIONS DE COUPE

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.

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective,  $F(x)$ , est définie comme suit [31] :

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (\text{IV.10})$$

$$F(x) = -DF$$

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 :

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

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad (\text{IV.11})$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \text{ si } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.12})$$

$$d_i = 1 \text{ si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

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

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

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.13})$$

$$d_i = 1 \text{ si } Y_i \leq \text{Sup}_i$$

Pour un objectif de rechercher un minimum la désirabilité peut être définie par les formules suivantes :

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

$$d_i = \left[ \frac{\text{Sup}_i - Y_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.14})$$

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

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 F(x).

Les étapes 1 à 5 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 à l'étape 6 (Optimisation).

**IV.4.2. Application de la méthode de maximisation de la fonction désirabilité**

Dans notre étude, nous avons étudié trois cas d'optimisation qui sont : (1) compromis entre rugosité et vibration, (2) Rugosité minimale, (3). Vibration minimale.

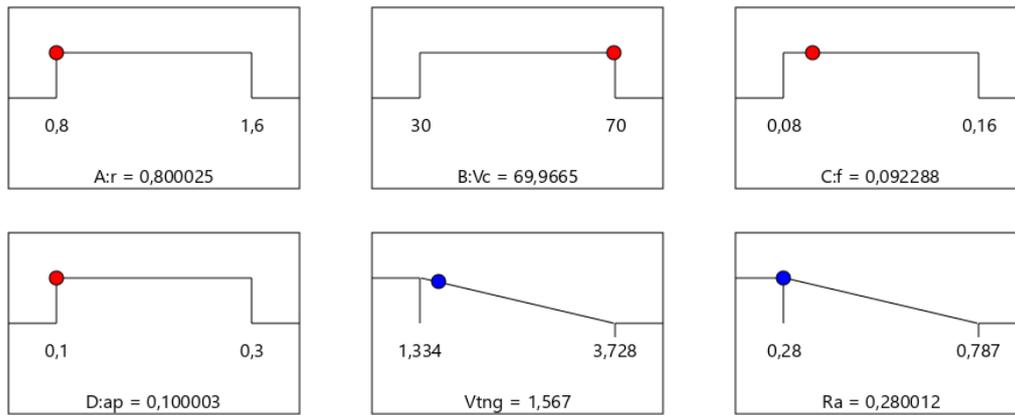
Les résultats du premier cas, où nous recherchons un compromis entre un bon état de surface (Ra mini ) et un minimum de vibration (Vtng mini) sont présentés dans **le tableau IV.7**, Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs minimales de critère de rugosité considéré, d'une faible vibration, le régime de coupe à adopter correspond à un rayon de bec de l'outil (r) de 0,8 mm, une vitesse de coupe (Vc) de 69,967 m/min, une avance par tour de 0.092 mm/tr et une valeur de 0.1 mm pour la profondeur de passe.

**Tableau IV.7.** Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.

	<b>r (mm)</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>f (mm/tr)</b>	<b>ap (mm)</b>	<b>Ra (µm)</b>	<b>Vtng (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Désirabilité</b>	
<b>1</b>	<b>0,800</b>	<b>69,967</b>	<b>0,092</b>	<b>0,100</b>	<b>0,280</b>	<b>1,567</b>	<b>0,950</b>	<b>Selected</b>
2	0,800	70,000	0,092	0,101	0,280	1,568	0,950	
3	0,801	69,987	0,092	0,100	0,280	1,568	0,950	
4	0,800	70,000	0,092	0,102	0,280	1,570	0,949	
5	0,801	70,000	0,092	0,100	0,278	1,570	0,949	
6	0,800	69,740	0,092	0,100	0,280	1,572	0,949	
7	0,806	70,000	0,092	0,100	0,280	1,574	0,949	
8	0,800	70,000	0,092	0,104	0,280	1,575	0,948	
9	0,800	69,577	0,092	0,100	0,280	1,575	0,948	
10	0,800	70,000	0,093	0,100	0,282	1,565	0,948	

## Chapitre IV : OPTIMISATION DES CONDUCTIONS DE COUPE

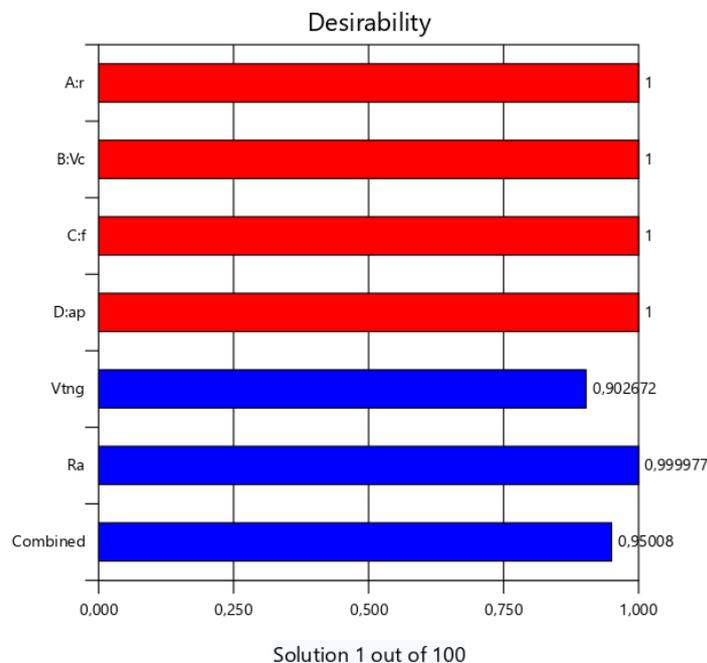
Le régime sélectionné est présenté sous forme de rampe par la figure IV.4.



Desirability = 0,950  
Solution 1 out of 100

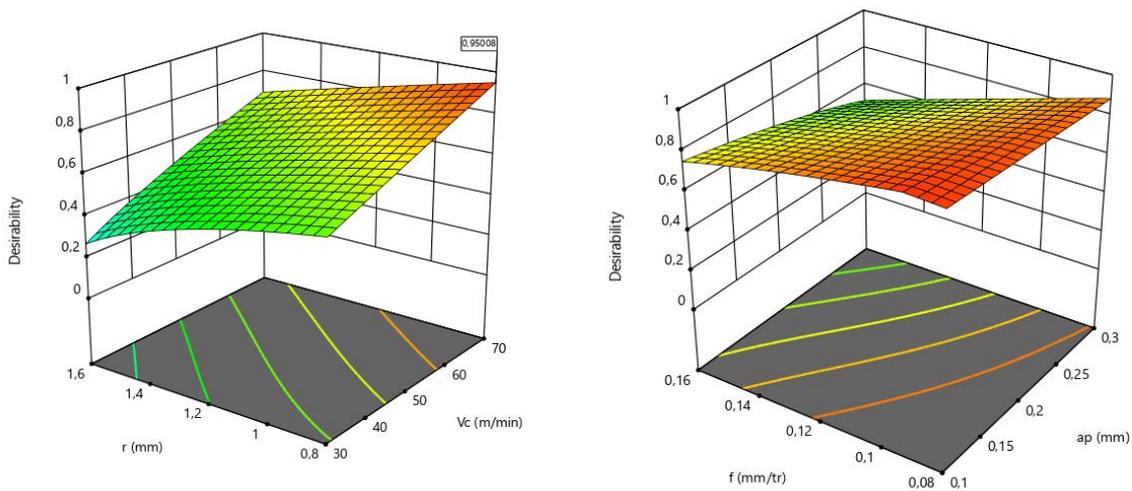
**Figure IV.4:** Résultat optimales des paramètres étudiés

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0,950) (**fig. IV.5**). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à une valeur intermédiaire entre la désirabilité de Ra mini et celle de Vtng min.



**Figure IV.5** Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques

La figure IV.6 présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe ( $r$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ).



**Figure IV.6.** La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure montre que la désirabilité est maximale pour une vitesse de coupe maximale et un faible rayon de bec de l'outil, ainsi que des valeurs minimales de l'avance et de la profondeur de passe.

Il est à noter que pour ce cas les deux paramètres ont eu la même importance de 3 (+++). Afin de considérer différents cas, nous avons modifié le degré d'importance de chaque paramètre.

En effet pour favoriser un paramètre nous lui attribuons une importance de 5 (+++++) tout en donnant une importance de 1 (+) au deuxième paramètre.

Le tableau IV.8 présente un récapitulatif des différents résultats.

**Tableau IV.8.** Différents résultats des trois cas étudiés

Cas étudié	$r$ (mm)	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$a_p$ (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{tng}$ ( $\text{m/s}^2$ )	Désirabilité
Combiné $R_a$ et $V_{tng}$	0.8	70	0.09	0.1	<b>0.28</b>	<b>1.56</b>	0.95
$R_a$ favorisé	0.8	70	0.09	0.1	<b>0.277</b>	1.569	0.982
$V_{tng}$ favorisé	0.8	70	0.12	0.1	0.37	<b>1.46</b>	0.922

On remarque que les trois cas ont les mêmes valeurs du rayon de bec de l'outil  $r = 0,8$  mm, de la vitesse de coupe  $V_c = 70$  m/min, et de la profondeur de passe  $a_p = 0,1$  mm. En revanche on a deux valeurs d'avance  $f = 0,09$  et  $0,12$  tr/min.

D'après les résultats du tableau on a une rugosité minimale dans les deux premiers cas  $Ra = 0,28$  et  $0,277 \mu\text{m}$ . On constate aussi que pour le premier cas (compromis  $Ra \text{ min} - V_{\text{tng}} \text{ min}$ ) et le cas de la minimisation de  $Ra$ , la valeur de vibration est  $V_{\text{tng}} = 1,56$ , alors que pour le cas où l'objectif est de favoriser la minimisation de la vibration tangentielle on obtient  $V_{\text{tng}} = 1,46 \text{ m/s}^2$ .

### IV.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté l'application de deux méthodes d'optimisation : mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser la rugosité arithmétique ( $Ra$ ) et la vibration tangentielle ( $V_{\text{tng}}$ ), cette approche est basée sur la maximisation du rapport S/N correspondant à des caractéristiques de meilleure qualité, et l'optimisation multi-objective en appliquant deux méthodes différentes : la méthode Grise (Grey Relationnel Analysais) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF) pour optimiser la rugosité ( $Ra$ ) et la vibration ( $V_{\text{tng}}$ ) simultanément. Cette optimisation est basée sur trois critères choisis qui sont la qualité, la productivité et une optimisation combinée entre les deux cités en même temps. En fin on peut conclure que La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse. Par contre les méthodes (GRA) et (DF) sont employées pour l'optimisation multi-objective.

## Conclusion générale

La recherche expérimentale conduite dans ce travail a permis de modéliser les paramètres de performances d'usinage (la rugosité de surface et la vibration) et optimiser les conditions de coupe (le rayon de bec de l'outil, la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe) lors du tournage de l'inconel 718 avec une plaquette en Carbure revêtu (**GC1105**). Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

✓ L'analyse ANOVA de la rugosité de surface ( $R_a$ ) pour un niveau de confiance de 95% montrent que l'avance ( $f$ ) est le facteur le plus important qui affecte ( $R_a$ ), sa contribution est de 23.39% suivie par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec 16.09% de contribution, le rayon de bec de l'outil ( $r$ ) avec une contribution de 3.7% et la profondeur de passe ( $ap$ ) avec 0.02% de contribution. Les interactions  $r \times f$ ,  $V_c \times ap$ ,  $V_c \times f$ ,  $r \times V_c$  et  $r \times ap$  ont des contributions de (19,42, 4,97, 4,13, 3,81 et 2,83) % respectivement.

✓ L'analyse ANOVA des résultats pour la vibration tangentielle ( $V_{tng}$ ) indique que l'avance ( $f$ ), le rayon de bec de l'outil ( $r$ ) est le premier paramètre qui affecte la vibration ( $V_{tng}$ ) avec pourcentage de contribution 32.41% puis la vitesse de coupe ( $V_c$ ) de 31.36% suivie par la profondeur de passe ( $ap$ ) de 8.77%, en dernier lieu l'avance par tour ( $f$ ) avec une contribution de 1.28%. Les interactions n'ont pas d'effet significatif sur la vibration.

✓ Les modèles mathématiques basés sur la méthodologie de surface de réponse (*RSM*) pour la rugosité de surface et le débit de copeau enlevé, ayant un ( $R^2$ ) de 92.02% et 92.96%, respectivement, présentent la bonne concordance avec les données expérimentales.

✓ les surfaces de réponse ont permis d'estimer l'influence simultanée de deux des paramètres de coupe et de mettre en évidence l'existence d'effet d'interaction entre les facteurs d'entrée considéré.

✓ Les résultats obtenus par la *Méthode de Taguchi* pour une optimisation mono-objective sont :

- Pour une rugosité minimale :  $r = 1,6 \text{ mm}$ ,  $V_c = 70 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ , et  $ap = 0,2 \text{ mm}$

- Pour vibration minimale :  $r = 0,8 \text{ mm}$ ,  $V_c = 50 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$  et  $ap = 0,1 \text{ mm}$

- ✓ Les résultats de l'optimisation multi-objectifs (rugosité de surface et une vibration mini), obtenus par *L'Analyse Relationnelle Grise (GRA)* sont : le rayon de bec d'outil  $r = 1,6$  mm, vitesse de coupe  $V_c = 30$  m/min, avance  $f = 0,12$  mm/tr, et une profondeur passe  $a_p = 0,2$  mm, la rugosité  $R_a = 0,36$   $\mu\text{m}$  et vibration  $V_{tng} = 3,63$  m/s<sup>2</sup>.
- ✓ L'optimisation multi-objectif basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF) a permis d'aboutir aux régimes optimaux suivants, pour trois cas choisis:
  - **(La rugosité ( $R_a$ ) minimisée)** :  $r = 0,8$  mm,  $V_c = 70$  m/min,  $f = 0,09$  mm/tr et  $a_p = 0,1$  mm. La rugosité de surface optimisée et la vibration sont les suivants ( $R_a = 0,277$   $\mu\text{m}$ ,  $V_{tng} = 1,569$  m/s<sup>2</sup>) avec une désirabilité de 0,982.
  - **(La vibration ( $V_{tng}$ ) minimisée)** :  $r = 0,8$  mm,  $V_c = 70$  m/min,  $f = 0,12$  mm/tr et  $a_p = 0,1$  mm. La rugosité de surface optimisée et la vibration sont les suivants ( $R_a = 0,37$   $\mu\text{m}$ ,  $V_{tng} = 1,46$  m/s<sup>2</sup>) avec une désirabilité de 0,922.
  - **Compromis entre la rugosité ( $R_a$ ) et la vibration ( $V_{tng}$ )** :  $r = 0,8$  mm,  $V_c = 70$  m/min,  $f = 0,09$  mm/tr et  $a_p = 0,1$  mm. Les valeurs optimisées sont les suivants ( $R_a = 0,28$   $\mu\text{m}$ ,  $V_{tng} = 1,56$  m/s<sup>2</sup>) avec une désirabilité de 0,95.
- ✓ La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse, par contre les méthodes GRA et DF sont les meilleurs pour l'optimisation multi-objectif.
- ✓ L'examen des valeurs de la rugosité  $R_a$  et de la vibration  $V_{tng}$ , permet de constater que les régimes optimaux proposés par la fonction de désirabilité (DF) sont meilleurs que ceux obtenus par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise (GRA).

## Références

- [1] **Olivier Oullé**, *Éléments d'usinage et métrologie dimensionnelle*, TEC 040, ESTML Québec, 2009.
- [2] **C. Bedrin**. Généralités sur la coupe des métaux. Conférences CAST, Lyon, INSA de Lyon, pp.5-7 (1971).
- [3] **Madani Mohammed Saïd et Ghouini Rabah** Amélioration des paramètres Technologiques de coupe en tournage, Master
- [4] **Utilisation d'un tour** <http://serge79.over-blog.com/article-la-vitesse-de-coupe-45528985.html>
- [5] **Lakhdar BOUZID**, Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13 thèse doctorat -(2015)
- [6] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [7] Etats de sur face des pièces mécaniques Sciences industrielles pour l'ingénieur PT – Lycée Lislet Geoffroy : <http://pt.llg.free.fr/13/S2I/etats%20de%20surface.pdf>
- [8] **CLAUDE B, LIONEL G**, Memotech productique matériaux et usinage, Editions casteilla, PARIS, Septembre 1999.
- [9] Archive multilingue, Actionnées par WorldLingo.  
[http://www.multilingualarchive.com/ma/frwiki/fr/Etat\\_de\\_surface#Rugosit.C3.A9](http://www.multilingualarchive.com/ma/frwiki/fr/Etat_de_surface#Rugosit.C3.A9)
- [10] **HUGHES L**, Etude de l'influence de la rugosité sur l'écoulement de fluide dans les fissures rocheuses, Thèse acceptée par la Faculté Polytechnique de Mons, L'obtention du grade de docteur en Sciences Appliquées, 2006.
- [11] **HESSAINIA ZAHIA**, Etude de l'impact des paramètres affectant la rugosité des surfaces et les efforts de coupe en usinage des pièces traitées thermiquement. Thèse doctorat, Université de Guelma
- [12] **Belhadi S**, Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie, Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2009.
- [13] **Lakhdar BOUZID**, Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13 thèse doctorat, Université de Guelma -(2015)

[14] **Mahfoudi F**, Etude de l'influence de la machine-outil sur les, paramètres technologiques en particulier lors de, l'usinage des matériaux durs, Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2010.

[15] **Remadna M**, Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN, Thèse de Doctorat, Laboratoire de Conception et Analyse de Systèmes Mécaniques (C.A.S.M) de l'INSA de Lyon, 2001.

[16] **Barlier C**, Mémotech productique, A. Casteila, Paris, 1986.

[17] **Yogesh Deshpande , Atul et Neelesh**, Estimation de la rugosité de surface à l'aide des paramètres de coupe, de la force, du son et des vibrations dans le tournage de l'Inconel 718, 2017

[18] **Raju Shrihari Pawade & Suhas S. Joshi**, Optimisation multi-objectifs de la rugosité de surface et des forces de coupe dans le tournage à grande vitesse de l'Inconel 718 en utilisant l'analyse relationnelle du gris de Taguchi (TGRA), 2011

[19] **Abuthakeer, S. S., P. V. Mohanram, and G. Mohan Kumar**. "Prediction and control of cutting Tool vibration in CNC Lathe with ANOVA and ANN." *International Journal of Lean Thinking* 2.1 (2011): 1-23.

[20] **Amit Kumar Gupta**, Predictive modelling of turning operations using response surface methodology, artificial neural networks and support vector regression *International Journal of Production Research*, 48:3, 763-778

[21] **Gael Le Coz**. Usinage de l'Inconel 718 : Intégrité de surface, mesure de température et modèle ana-lytique du fraisage périphérique. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Lorraine,2012.

[22]. **TEBASSI HAMID**, Investigation expérimentale sur le comportement à l'usure des outils de coupe lors de l'usinage des supers alliages réfractaires. Thèse doctorat, Université de Guelma (2016).

[23] **HASSANI Kahina**, Modélisation et optimisation des paramètres technologiques d'usinage en tournage de l'acier inoxydable AISI 304 par la méthodologie de surface de réponse (RSM), Master, Université de Guelma (2019)

[24] **Technique d'ingénieur f1006**. Plans d'expériences méthode de Taguchi (2007).

[25] **Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G.L**. Somestudies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coatedcarbide tool. *Measurement*, 45, pp.1872–1884 (2012).

[26] **Bouزيد, L., Yallese, M. A., Chaoui, K., Mabrouki, T., & Boulanouar,** L.Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 229(1), 45-61,(2015).

[27] **Aouici, H., Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Elbah, M., & Fnides, B.** Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73(9-12), 1775-1788. (2014).

[28] **Noorul H.A, Marimuthu P, Jeyapaul R.** Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the taguchi method. Int J Advanced Manufacturing Technology, 37, pp. 250–255, (2008).

[29] **M. CHAHAL, V. SINGH, R. GARG,** Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-13 (2016).

[30] **Dabade UA,** Multi-objective Process Optimization to Improve Surface Integrity on Turned Surface of Al/SiCp Metal Matrix Composites Using Grey Relational Analysis, *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 7 299 – 304, 2013.

[31] **Tosun.** Determination of optimum parameters for multi performance characteristics in drilling by using grey relational analysis. Int J Advanced Manufacturing Technology, 28, pp. 450–455 (2006).

[32] **Myers R.S, Montgomery D.C.** Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc. : New York, (2002).