

11/531.694

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



**Mémoire de fin d'études**  
**Pour l'obtention du diplôme de MASTER**

**Option : Conception et Production Industrielle**

**Présenté par : *SOUAMES IBED***

=====

***Prédiction de la rugosité de surface et des efforts de coupe lors de l'usinage de l'Inconel 718***

=====

Sous la Direction de :

***Pr. YALLESE.M.A & Dr. BENSOUILAH.H***

**Année universitaire 2014/2015**

Dédicace

*J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail ;*

*A ma très chère Mère quelle reçoit le témoignage ma profonde affection.*

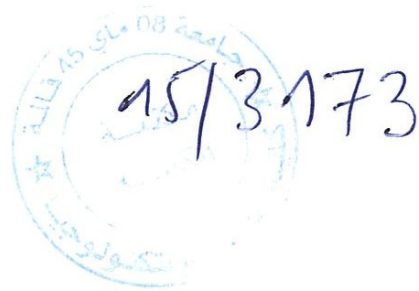
*A mon très cher père.*

*A ma chère sœur Inès et mon cher frère Chawki.*

*A mes très chers amis Wissem, Fethi, Chafik, Karim, Seif, Rida, Resak et à tous mes amis.*

*A tous mes collègues d'université de Guelma.*

*IBED SOUAMES*



## Remerciement

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

*En tout premier lieu je tiens à remercier **Pr.YALLESE.M.A** et  
**BENSOUILAH.H** d'avoir accepté de m'encadrer et diriger mes  
travaux*

*Les membres de jury d'avoir accepté de juger mon travail  
C'est difficile de citer tous les collaborateurs et je risquerai d'oublier  
Quelqu'un qu'il soit fortement remercié*

LISTE DES FIGURES

**Chapitre I :**

**Figure I.1:** Insert en CBN sur une plaquette.

**Figure I.2 :** représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences.

**Figure I.3:** Principaux modes de déposition de revêtement pour outils-coupants.

**Figure I.4 :** Statistique sur l'évolution de l'utilisation relative des revêtements pour outils coupants.

**Figure I.5:** Les conditions de coupe.

**Figure I.6:** Composantes de l'effort de coupe.

**Figure I.7:** Avance et profondeur de passe.

**Figure I.8:** Influence de la vitesse sur l'effort de coupe lors de l'usinage des matériaux ductiles

**Figure I.9:** Domaine d'utilisation de l'Inconel 718

**Figure I.10:** Système étudié « Boîte noire ».

**Figure I.11 :** Graphe des effets du facteur A.

**Figure I.12 :** Interactions entre deux facteurs A et B.

**Figure I.13:** Plaquette céramique mixte revêtue (PVD TiN).

**Figure I.14:** Micrographie en MEB pour les Conditions de coupes,  $V=150\text{m/min}$ ,  $f=.015\text{mm/tr}$  et  $t=20\text{min}$ .

**Figure I.15:** les valeurs expérimentales de l'usure en dépouille Par rapport aux valeurs prédites.

**Figure I.16:** Influence des paramètres de coupe sur Ra pour Ni-Hard avec 62 HRC.

**Figure I.17:** Influence des paramètres de coupe sur Ra pour Ni-Hard avec 50 HRC.

**Figure I.18:** Diagramme de réponse de MRR .

**Figure I.19:** Diagramme de réponse de la rugosité de surface.

**Figure. I.20:** rupture de la nuance KC732

**Figure I-21:** Ecaillage du revêtement et adhésion, de la nuance 7310

## Chapitre II :

**Figure II.1 :** Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

**Figure. II.2:** Porte outil utilisé

**Figure II.3:** Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

**Figure II.4:** Capteur d'effort de coupe KISTLER.

**Figure II.5.** Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

**Figure II.6:** mesure de la rugosité sans démontage de la pièce

**Figure II.7:** Plan composite pour deux facteurs

## Chapitre III

**Figure.III-1:** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique composite CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $f = 0.08$  mm/tr)

**Figure.III-2:** Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr)

**Figure.III-3: Evolution** de la rugosité en fonction de l'avance pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$ mm)

**Figure. III-4:** Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $f = 0.08$  mm/tr)

**Figure. III-5:** Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour la céramique CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr)

**Figure. III-6:** Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance pour la céramique CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $V_c = 110$  m/min)

**Figure. III-7:** Evolution des efforts spécifiques en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique composite CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $f = 0.08$  mm/tr)

**Figure. III-8:** Evolution des efforts spécifiques en fonction de l'avance pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min ,  $a_p = 0.15$  mm)

**Figure. III-9:** Evolution des efforts spécifiques en fonction de la profondeur de passe pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr)

**Figure. III-10:** Evolution de la puissance de coupe en fonction des conditions de coupe

**Figure III-11 :** Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour pour Ra

**Figure III-12:** Graphique des effets principaux pour Ra

**Figure III-13:** Diagramme d'interaction pour Ra.

**Figure III-14 :** Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites du Ra.

**Figure III-15 :** Graphique des effets principaux des efforts de coup : a) Fa, b) Fr et c) Fv

**Figure III-16 :** Graphique des effets principaux des efforts de coup : a) Fa, b) Fr et c) Fv

**Figure III-17 (a, b, c, d, e et f) :** Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour des efforts decoupe

**Figure III-18 :** Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour les efforts de coupe (a) Fa, (b) et Fr(c) Fv.

**Figure III.19 :** Résultat optimales des paramètres étudiés

**Figure III.20 :** Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques

LISTE DES TABLEAUX

**Chapitre I**

**Tableau I.1 :** Différents types de revêtements et leurs significations.

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

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

**Chapitre II**

**Tableau II.1:** Caractéristiques géométriques des portes outils

**Tableau II.2:** Informations relatives a la plaquette de coupe

**Tableau II-3:** Composition chimique et caractéristiques physiques de l’Inconel 718

**Tableau II.4:** Conditions de coupe utilisées

**Tableau II.5:** Matrice d’expériences d’un plan de composites centrés à quatre facteurs

**Tableau II.6** Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité

**Chapitre III**

**Tableau III-1** Résultats de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe.

**Tableau III-2:** Résultats de l’analyse de variance pour Ra.

**Tableau III-3:** Pourcentage d’erreur entre les valeurs expérimentales et prédites de Ra.

**Tableau III-4:** Résultats des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe

**Tableau III-5:** Résultats de l’analyse de variance des efforts de coup : **a)** Fa, **b)** Fr et **c)** Fv

**Tableau III-6:** Pourcentage d’erreur entre les valeurs expérimentales et prédites des efforts de coupe.

**Tableau III-7** Conditions d’optimisation

**Tableau III-8** Optimisation de la rugosité et des composantes de l’effort de coupe

SOMMAIRE**Chapitre I- Etude bibliographique sur la coupe des métaux**

Introduction générale	1
I. Généralité sur la coupe des métaux	2
I.1: Introduction sur la coupe des métaux	2
I.1.2: Définition de l'usinabilité	2
I.1.3 : Critère d'évaluation l'usinabilité	2
I.2: Les matériaux de coupe	3
I.2.1: Généralités	3
I.2.2 : Définitions des principaux types de matériaux pour outils de coupe	3
I.2.3 : Revêtement pour outils coupants	5
I.2.3.1 : Fonction d'un revêtement en usinage	6
I.2.3.2 : Propriétés des revêtements	6
I.2.3.3. Types de revêtements	7
I.3: L'usure des outils	10
I.3.1: Usure des arêtes de coupe	10
I.4: Les paramètres de coupe	13
I.4.1: les définitions principales	13
I.4.2: Réglage des paramètres de coupe	14
I.5: Les efforts de coupe	14
I.5.1: Intérêt de mesure des efforts de coupe	15
I.5.1.1: Influence de la profondeur de passe et de l'avance	15
I.5.1.2: Influence de la vitesse de coupe	16
I.6: Rugosité des surfaces usinées	16
I.7: Les super alliages réfractaires (Inconel)	17
I.7.1: Définition	17
I.7.2: Inconel - alliage 718	18
V 8 : La méthode des plans d'expérience	19
V.8.1 : Généralités	19
I.8.2 : Vocabulaire	20
V.8.3 : Type de plans	22



I.9 : Travaux de recherche	23
I.10 : Conclusion	28

## **Chapitre II- Procédure expérimentale**

II.1: Introduction	29
II.2: Equipements utilisés	29
II.2.1: Machine outil	29
II.2.2: Outils de coupe utilisés	29
II.3: Matériau à usiner	30
II.4: Appareillages de mesure utilisés	31
II.4- 1 : Mesure des efforts de coupe	31
II.4.2: Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	33
II.5: Conditions de coupe	33
II.6 : Planification des expériences	34
II.6.1: Plans composites centrés	34
II.6.2: Méthode de planification des expériences	35
II.6.2: Conditions de coupe	36
II.7: Conclusion	37

## **Chapitre III- Etude de l'usinabilité de l'Inconel 718 et modélisation des conditions de coupe et l'optimisation**

III-1.Introduction	38
III.a.1: Evolution de la rugosité en fonction des paramètres de coupe	38
III.a.2: Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe	41
III.a.3: Evolution des efforts spécifiques en fonction des paramètres de coupe	43
III.a.4 : Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe	46
III.b.1:Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe	48
III.b.1.1:Résultats des expériences	48
III.b.1.2:Analyse de la variance (ANOVA) et détermination du modèle mathématique	49
III.b.1.2.1:Analyse de la variance de Ra en fonction de Vc, f, ap, r	49
III.b.1.2.1.1:Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	50
III.b.1.2.1.2:Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	52

---

III.b.1.2.1.3:Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	53
III.b.2:Modèles des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe	55
III.b.2.1:1.Résultats des expériences	55
III.b.2.2:Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique	56
III.b.2.2.1:Analyse de la variance de $F_a$ , $F_r$ et $F_v$ en fonction de $V_c$ , $f$ , $a_p$ , $r$	56
III.b.2.2.1.1:Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	59
IV.b.2.2.1.2:Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	62
III.b.3-2-1-3.Comparaison entre les efforts de coup expérimentaux et prédites : a) $F_a$ , b) $F_r$ et c) $F_v$	69
III.b.4.Optimisation	73
III.b.4.1:Optimisation des conditions de coupe pour : $R_a$ , $F_a$ , $F_r$ et $F_v$ .	75
III-5.Conclusion	77
Conclusion générale	79
Références bibliographiques	80

# Chapitre I

Etude

bibliographique

sur

la coupe des

métaux

## INTRODUCTION GENERALE

Le super alliage réfractaire (Inconel 718) est largement utilisé dans les différents domaines à cause de sa résistance à chaud et à la corrosion. Les applications de l'Inconel 718 sont : les organes de moteurs à réaction, pièces de pompes, moteurs de fusées et inverseur et faisceaux spatiaux. Ce dernier présente des difficultés lors de l'usinage à cause de ses caractéristiques distinguées telles que la haute ductilité, le taux d'érouissage élevé, le coefficient de frottement élevé et la faible conductivité thermique.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'usinabilité de l'Inconel 718 en utilisant l'outil de céramique (CC670).

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. 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. En dernier lieu nous avons cité quelques travaux de recherche sur l'usinage de l'Inconel 718.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés, la planification des expériences et les conditions de coupe.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus lors des essais de la rugosité, des efforts de coupe, en utilisant l'outil de céramique (CC670). Le suivi d'évolution de la rugosité et les efforts de coupe a permis de cerner l'usinabilité de l'Inconel 718. En suite nous avons étudié l'impact des conditions de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$  et  $r$ ) sur la rugosité et les efforts de coupe en utilisant la méthodologie de surface de réponse. Cette étude a conduit à la détermination de modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres de sortie (efforts de coupe et rugosité) et les paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$  et  $r$ ). Le traitement des résultats nous permet aussi de faire une optimisation multi-objective des conditions de coupe et de cette manière déterminé le régime optimal.

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

## **I. Généralité sur la coupe des métaux**

### **I.1: Introduction sur la coupe des métaux :**

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

Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage [1].

#### **I.1.2: Définition de l'usinabilité :**

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

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

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

#### **I.1.3 : Critère d'évaluation l'usinabilité :**

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

- ❖ la durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps ;
- ❖ les conditions de coupe ;
- ❖ les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- ❖ le fractionnement du copeau ;
- ❖ l'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité ;
- ❖ la productivité [2].

## I.2: Les matériaux de coupe

### I.2.1: Généralités

Les matériaux de coupe contemporains sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement, les opérations d'usinage qui demandaient une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre actuellement moins d'une minute. Aujourd'hui on peut trouver sur le marché un matériau de coupe approprié pour chaque matériau usiné et pour chaque type d'opération d'usinage. L'importance des matériaux à outil de coupe ne peut pas être surestimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe. [3]



### I.2.2 : Définitions des principaux types de matériaux pour outils de coupe [4]

#### ✓ Carbures métalliques

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

Ils sont constitués :

– de substances dures (60 à 95 % du carbure) qui donnent la dureté et donc la résistance à l'usure.

Elles se composent de carbure de tungstène (WC) phase ( $\gamma$ ), de carbure de titane (TiC), de carbure tantale (TaC) et de carbure de niobium (NbC) (phase  $\gamma$ ).

de substances liantes qui donnent la ténacité au carbure. La plus employée est le cobalt (Co) car il dissout facilement les différents carbures (phase  $\beta$ ). On obtient différentes nuances de carbures en faisant varier le pourcentage des substances dures et liantes. Ces nuances présentent des tenues plus ou moins importantes à l'usure (selon la dureté) et aux chocs (selon la ténacité) en fonction de l'utilisation prévue.

La résistance à la chaleur et la conductivité thermique dépendent :

- de la taille des grains WC ;
- du % de Co ; du contenu de la phase  $\gamma$

#### ✓ **Céramiques**

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

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

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

#### ✓ **Nitrure de bore cubique (CBN)**

Le nitrure de bore cubique est un des matériaux de coupe des plus durs (dureté supérieure aux céramiques et aux carbures). Il s'agit de particules de nitrure de bore cubique et une matière liante céramique. Il se présente généralement sous la forme d'une pointe qui est brasée sur un support de carbure. Il peut également être fritté sur chaque pointe du support carbure, ce qui améliore la sécurité figure I.1. Les plaquettes peuvent être revêtues dépôt vapeur physique (PVD) de TiN, ce qui facilite la détection de l'usure. Une nuance additionnée de nitrure de titane, très dure, est principalement utilisée en finition pour les aciers trempés, les aciers trempés, les aciers cémentés et pour les fontes trempées. Une nuance de CBN pure, très résistante à l'usure, mais aussi très tenace est recommandée pour les aciers et les fontes trempées dans des conditions difficiles.

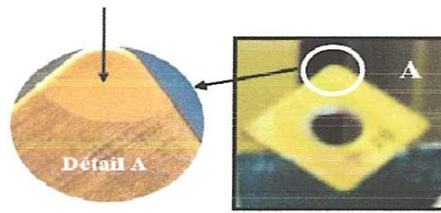


Figure I.1: Insert en CBN sur une plaquette. [5]

### ✓ Diamant poly cristallin (DP ou PCD)

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

### I.2.3 : Revêtement pour outils coupants

Depuis plus de dix ans, l'utilisation d'outils coupants non-revêtus en usinage tend à disparaître au profit d'outils revêtus. Cette tendance, d'abord instaurée en tournage, est peu à peu généralisée pour tous les outils coupants (fraisage, taillage et perçage) et ce, quelque que soit le matériau substrat (acier rapide ou carbure) [6].

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

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

Comme nous pouvons le voir sur la figure I.2, le rôle recherché pour le revêtement est complexe. Il doit à la fois protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), faire office de barrière thermique, résister à la fissuration et tout ceci grâce à un dépôt d'épaisseur très faible.



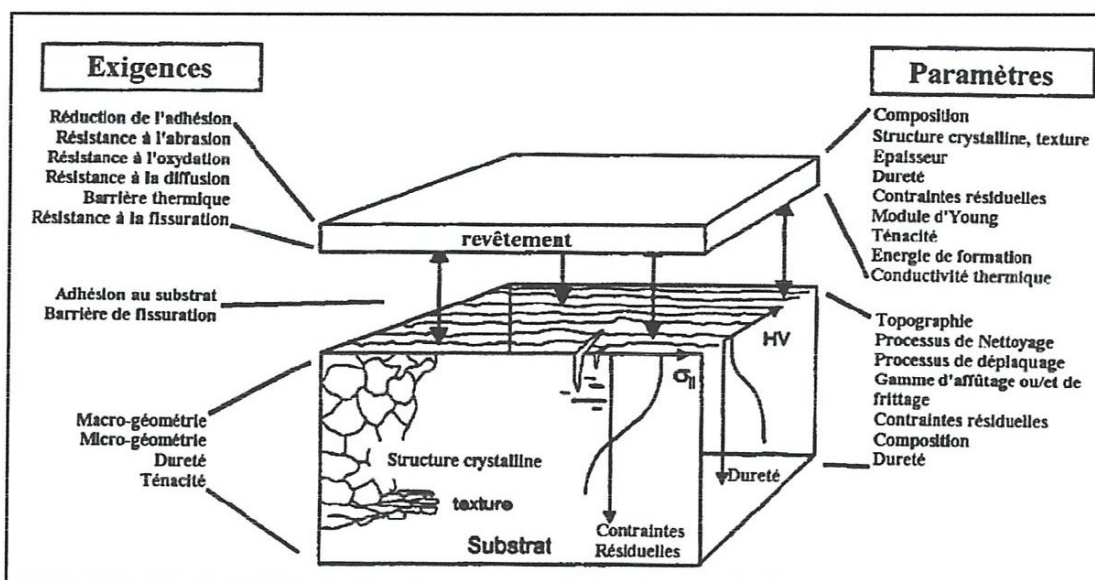


Figure I.2 : représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences.

### I.2.3.1 : Fonction d'un revêtement en usinage

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage. Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre [7].

### I.2.3.2 : Propriétés des revêtements

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent en définitif se traduire par des objectifs opérationnels, en lien avec des propriétés physiques quantifiables et/ou qualifiables. Ainsi, il est possible de demander au système substrat + revêtement de répondre au cahier des charges suivant :

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

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

### I.2.3.3. Types de revêtements

Les revêtements déposés industriellement peuvent se décomposer en 2 familles distinctes : les revêtements déposés par voie physique (Physical Vapor Deposition: PVD) et les revêtements déposés par voie chimique (Chemical Vapor Deposition: CVD) figure I.3.

Chacune de ces familles possède une variété importante de sous-familles en constante évolution depuis quelques années. Ainsi, les procédés PVD sont basés sur trois types de technologie : l'évaporation, la pulvérisation et le dépôt ionique (ou 'ion-plating'). Chacune de ces sous-familles connaît également des variantes basées sur des moyens différents d'aboutir à l'évaporation ou à la pulvérisation des sources de matière : faisceau d'ions, effet joule, diode, etc.

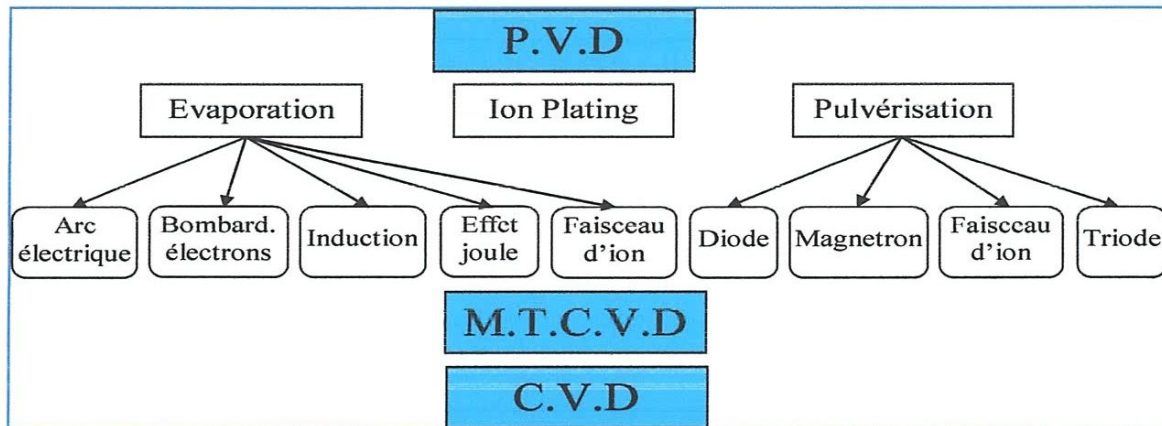


Figure I.3 : Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils-coupants.

L'ensemble de ces procédés permet de déposer des couches de compositions et d'aspects très voisins. Cependant, les modalités de dépôts peuvent entraîner des différences très importantes en termes de texture, adhésion, dureté, etc. Il est important de noter que les technologies de dépôt ont subi de très grandes évolutions ces dernières années. A tel point qu'il est difficile de donner un aperçu exhaustif de l'ensemble des variantes tableau I.1.

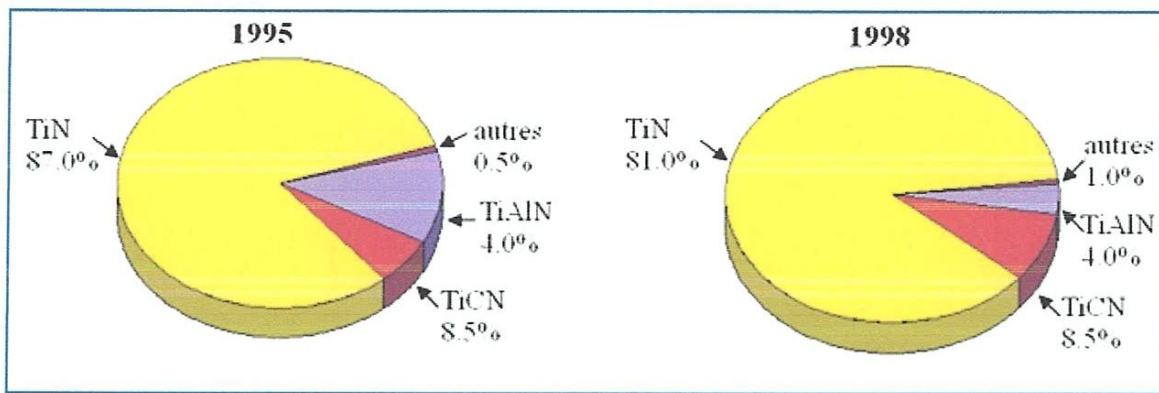
**Tableau I. 01 : Différents types de revêtements et leurs significations.**

Type	Signification	Température	Technique
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur	530°	La plus répandue
PVD	Dépôt physique en phase vapeur	200°	Courante
PCVD	Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma	315°	De plus en plus courante
MTCVD	Dépôt chimique en phase vapeur à moyenne température	425°	Récente

Les dépôts réalisés industriellement par PVD et CVD sont issus de familles très voisines, par contre leurs propriétés résultantes font que certains revêtements sont systématiquement réalisés par une des techniques. Ainsi, dans le domaine des outils-coupants, les procédés CVD produisent couramment les revêtements suivants :

- Revêtements à base de titane : TiC, Ti(C,N), TiN, TiB<sub>2</sub>
- Revêtements céramiques : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
- Revêtements ‘ultra-dur’ : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC)
- Les procédés PVD réalisent plutôt des revêtements du type :
- Revêtements à base de titane : TiC, Ti(C,N), TiN, TiB<sub>2</sub>, (Ti,Al)N
- Revêtements ‘ultra-dur’ : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC), cubic Boron Nitride (c-BN)
- Revêtements lubrifiants : MoS<sub>2</sub>, WC/C, CrC/C

Les revêtements de la famille des (TiN), (TiCN) et (TiAlN) sont de loin les plus répandus en usinage comme le montre la figure I.4. Ces revêtements doivent leur succès à leurs très bonnes propriétés moyennes dans l’ensemble des applications d’usinage et surtout leurs très bonnes adhésions aux substrats les plus couramment utilisés: acier rapide, carbures, cermet. Les revêtements céramiques se sont beaucoup moins développés du fait de leurs grandes fragilités et de leurs manques d’adhésion [7].



**Figure I.4 :** Statistique sur l'évolution de l'utilisation relative des revêtements pour outils coupants.

De plus, les revêtements à base de titane se déposent aussi bien par les procédés PVD que par les procédés CVD, alors que les revêtements céramiques sont très difficiles à réaliser en PVD. Cela limite ainsi toute une partie des applications sur les outils en acier rapide. Les avantages et les inconvénients des deux techniques sont regroupés dans le tableau I.2.

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

	Avantages	Inconvénients
<b>PVD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investissement limité</li> <li>Faible température de dépôt</li> <li>Bonne adhérence de dépôt</li> <li>Couches en contraintes compressives</li> <li>Nombreuses possibilités de dépôt</li> <li>Bonne acuité d'arête des outils</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessité de réaliser les dépôts sur des pièces de formes voisines</li> <li>Vitesse de dépôt faible</li> <li>Dépôts non uniformes</li> <li>Difficultés pour revêtir des outils à géométrie complexe</li> </ul>
<b>CVD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande pureté des dépôts</li> <li>Grande variété de composition</li> <li>Possibilité de dépôt sur des pièces complexes</li> <li>Bonne adhérence sur substrat carbure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Température de déposition élevée</li> <li>Investissement élevé</li> <li>Résidus toxiques de déposition</li> <li>Mauvaise acuité d'arête des outils</li> <li>Couches en contraintes de traction</li> <li>Risques d'attaque des substrats par les gazes corrosifs</li> </ul>

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

Pour les procédés à coupe interrompue (fraisage, taillage, etc.), il sera privilégié un revêtement tenace, résistant à l'oxydation et ayant des contraintes de compression. Ces conditions privilégient plutôt les revêtements obtenus par PVD. Cette analyse est à moduler avec l'apparition de revêtements MTCVD. Par ailleurs, cela nécessite d'avoir des arêtes

arrondies ce qui privilégie l'emploi des dépôts CVD, même si les dépôts PVD peuvent aussi s'appliquer sur des arêtes préalablement rodées. Les opérations de finition nécessitent des arêtes vives, ce qui privilégie plutôt l'emploi de revêtements PVD.

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

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

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

### I.3: L'usure des outils [8]

La qualité des surfaces obtenues est directement liée au degré d'usure de l'outil. Il est donc important de bien caractériser ce phénomène afin de le rendre observable.

L'usure provient des sollicitations mécaniques et thermiques engendrées par les mouvements relatifs entre la pièce, l'outil et le copeau, qui provoquent un transfert de métal entre les surfaces en contact (érosion ou abrasion mécanique et diffusion physico-chimique).

#### I.3.1: Usure des arêtes de coupe

Pour comprendre les avantages et les limites de chaque matière, il est important de connaître les différents mécanismes d'usure qui agissent sur les outils [9].

##### a) Usure en dépouille

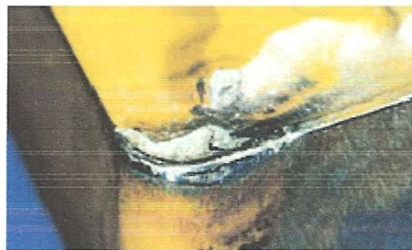
C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce.



*Usure par abrasion*

**b) Usure en cratère**

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



*Usure chimique*

**c) Arête rapportée**

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



*Usure par adhérence*

#### *d) Usure en entaille*

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



*Usure par adhérence*

#### *e) Déformation plastique*

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



*Usure thermique*

#### *f) Usure en peigne*

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



*Usure thermique*

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

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



Usure mécanique

## **I.4: Les paramètres de coupe**

### **I.4.1: les définitions principales [10]**

#### ✓ **La vitesse de coupe : $V_c$ [m/min]**

Elle correspond généralement au mouvement le plus rapide, son unité est : m/min. Sa valeur est déterminée expérimentalement et résulte d'un compromis lié notamment au coût de l'outil, au coût du changement d'outil, et au coût d'utilisation de la machine.

#### ✓ **La vitesse d'avance : $V_f$ [mm/min]**

Elle correspond à la vitesse de déplacement la plus lente. La trajectoire du mouvement d'avance associé au mouvement de coupe usine la forme souhaitée : Unité :  $V_f$  en mm/min  
Sa valeur sera déterminante pour la rugosité de la surface usinée.

#### ✓ **La profondeur de passe : $a$ [mm]**

La combinaison de  $V_f$  et  $a$  permet de déterminer le volume du copeau. La profondeur de passe est nécessaire afin de déterminer la quantité de matière qui va être séparée de la pièce sous forme de copeau.



### I.4.2: Réglage des paramètres de coupe

Sur la machine on agit que sur 3 paramètres :

$N$  : la fréquence de rotation de la pièce en tournage, ou de l'outil en fraisage et en perçage.

$V_f$  : la vitesse d'avance suivant la trajectoire d'usinage, en fait on détermine d'abord  $f_z$ .

$a$  : la profondeur de passe.

Il est donc nécessaire de déterminer les relations entre  $V_c$ ,  $V_f$  et  $N$ .

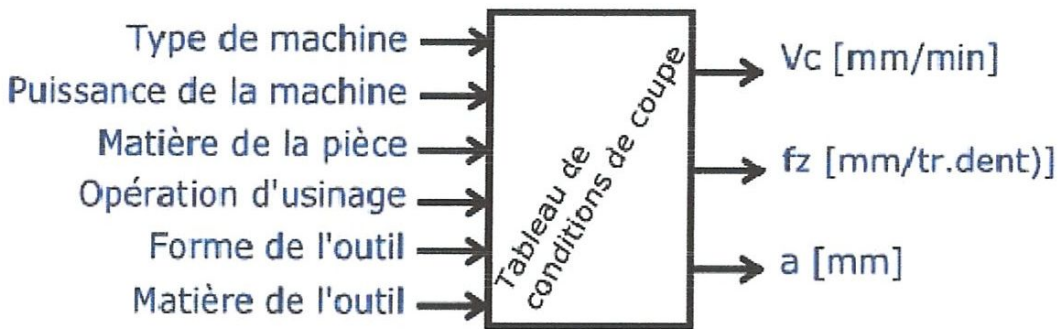


Figure I.5: Les conditions de coupe.

### I.5: Les efforts de coupe

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec certaine force dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des effort de coupe figure I.6 [11]. La résultante de coupe ( $F_{rés}$ ) est la somme de trois composantes suivantes :

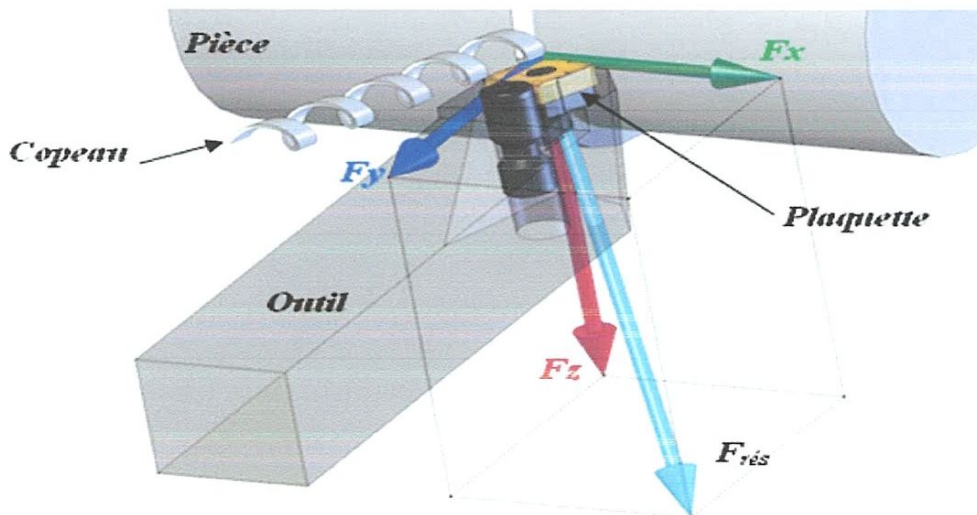


Figure I.6: Composantes de l'effort de coupe.

- **Fz** ou **Ft**: composante dans le sens de vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. C'est la composante qui a la plus grande valeur absolue.
- **Fx** ou **Fa**: composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- **Fy** ou **Fr**: composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

### Rapport des composantes:

La résultante de coupe  $F_{rés}$  étant une diagonale de parallélépipède est égale à :

$$F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}.$$

### I.5.1: Intérêt de mesure des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage.

#### I.5.1.1: Influence de la profondeur de passe et de l'avance

Avec l'augmentation des ces deux facteurs, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus fort à la formation du copeau et la valeur des composantes  $F_v$ ,  $F_a$  et  $F_p$  nécessaire pour assurer la coupe est plus importante. En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance. [12,13]

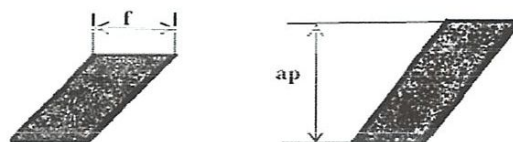
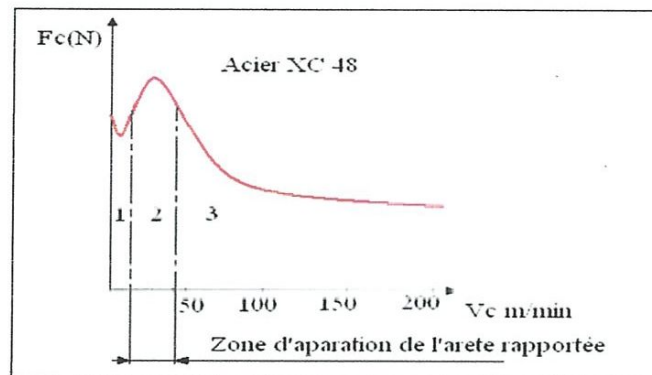


Figure I.7: Avance et profondeur de passe.

### I.5.1.2: Influence de la vitesse de coupe

Pour des vitesses de coupe situées dans la plage de formation de l'arête rapportée, l'effort de coupe accuse un maximum, puis diminue à nouveau figure I.8.

- **Zone 1** : À faible vitesse, le frottement outil copeau est faible,  $F_c$  est faible.
- **Zone 2** : L'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation des frottements et par suite de l'effort tangentiel de coupe.
- **Zone 3** : L'arête rapportée diminue quand  $V$  augmente,  $F_c$  diminue également et se stabilise vers 200m/min. [13]



**Figure I.8:** Influence de la vitesse sur l'effort de coupe lors de l'usinage des matériaux ductiles. [10]

### I.6: Rugosité des surfaces usinées

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 [14].

- **Surface géométrique**

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

- **Surface spécifiée**

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

- **Surface mesurée**

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

- **Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication.

- **L**

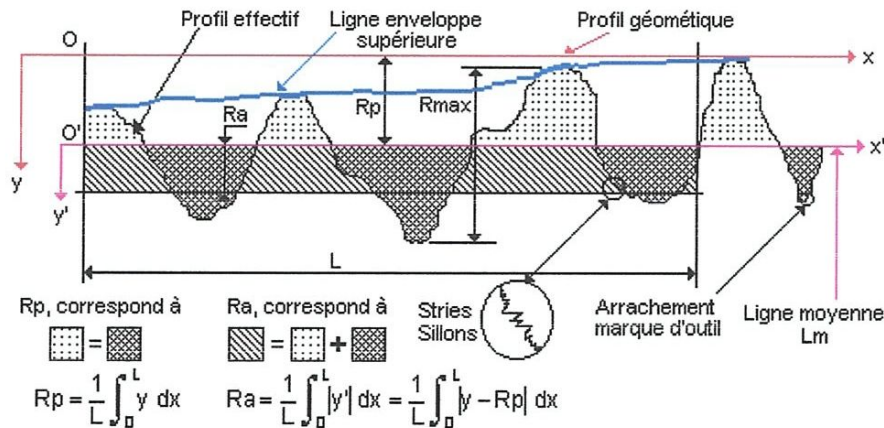
Longueur de base du profil moyen

- **Rp**

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

- **Ra**

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



## I.7: Les super alliages réfractaires (Inconel)

### I.7.1: Définition

Cette partie concerne les alliages à base de nickel, les alliages à base fer-nickel et à base cobalt résistant à des sollicitations sévères. Mis à part le cas du nickel peu allié et des alliages

nickel-cuivre, on emploie en général pour ces alliages le terme de superalliages. Les deux types de sollicitations suivantes sont à considérer.

**1. La corrosion humide.** On parle alors, d'une part du nickel et des alliages nickel, et d'autre part du prolongement de la famille des aciers inoxydables vers des nuances plus riches en nickel, et donc moins riches en fer, mais aussi plus riches en d'autres éléments comme le molybdène, qui augmentent la résistance à la corrosion de ces alliages. Un premier exemple de nuance peut représenter cette famille d'alliages telle que la nuance 625, dont la composition nominale est la suivante : **Ni :62% – Cr :21% – Fe :5% – Mo :9% – Nb + Ta :3%.**

**2. L'action conjuguée d'une haute température (plus de 550°C),** et de contraintes mécaniques suffisamment élevées pour poser des problèmes de résistance au fluage. Ces conditions d'emploi, dans l'air ou dans d'autres atmosphères comme, par exemple, les gaz de combustion des hydrocarbures, s'accompagnent en général d'une agression chimique de la surface des produits, c'est-à-dire de corrosion sèche dont l'oxydation est l'exemple le plus fréquent. Dans le cas de produits résistant à ce dernier type de sollicitation, on emploie indifféremment les termes de superalliages ou d'alliages super réfractaires. Il s'agit le plus souvent d'alliages à base de nickel-chrome mais aussi à base fer-nickel-chrome et plus rarement, à base cobalt chrome. Les nuances à base fer nickel-chrome constituent un prolongement de la famille des aciers réfractaires. Par ailleurs, en plus de la résistance aux sollicitations que nous venons d'envisager, on demande à certains produits des caractéristiques physiques particulières comme l'amagnétisme. Mais c'est surtout les deux grands groupes de sollicitations que nous venons de mentionner, qui caractérisent l'emploi des superalliages. Comme on le verra plus loin, les méthodes d'élaboration et de transformation des superalliages sont non seulement variées mais dépendent aussi de leur domaine d'application. Il est donc nécessaire de les classer en tenant compte d'une part de leur composition et d'autre part de leur méthode de fabrication [19].

### **I.7.2: Inconel - alliage 718**

L'Inconel 718 est un alliage qui doit être durci par vieillissement. Il est très résistant et convenable pour usages 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'alliage 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 inverseur de poussée; vaisseaux spatiaux figure I.9 [20].

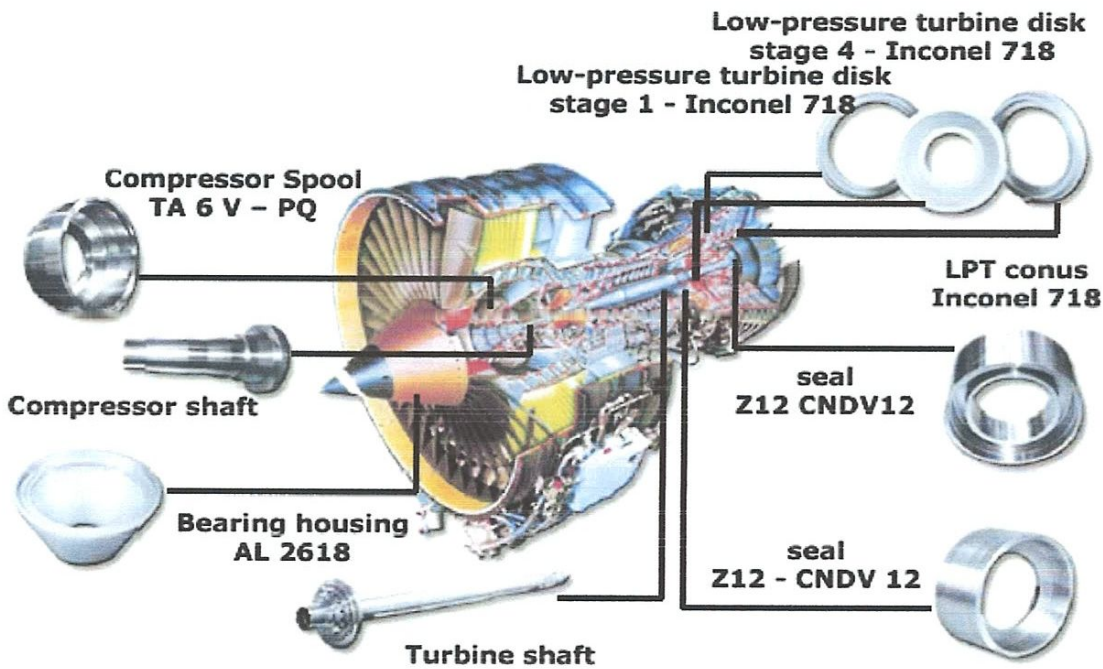


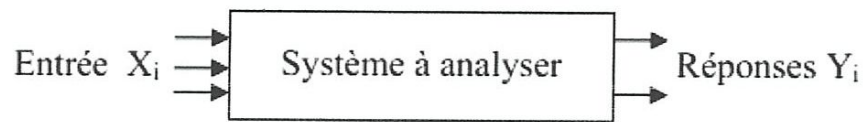
Figure I.9: Domaine d'utilisation de l'Inconel 718

## V 8 : La méthode des plans d'expérience [15]

### V.8.1 : Généralités

Les plans d'expériences permettent d'organiser, de planifier et d'optimiser la réalisation d'expériences dans un domaine quelconque. Ils répondent au besoin de comprendre et de modéliser un système considéré, comportant des entrées, appelées facteurs, notées  $X_i$  sur la figure I.10 et des sorties, appelées réponses, notées  $Y_i$ . En l'absence de méthode structurée, l'approche empirique et intuitive consiste à faire varier un seul facteur à la fois.

Cette méthode est simple mais inefficace car elle suppose que les effets des facteurs sur la réponse sont indépendants, ce qui est très rare dans la pratique.



**Figure I.10:** Système étudié « Boîte noire ».

Dans le contexte des plans d'expériences, il est nécessaire que la réponse s'exprime de manière quantitative et que les facteurs soient des grandeurs contrôlables. En outre, un facteur est de type quantitatif ou qualitatif, dans ce dernier cas, il doit être discrétisé pour être exploitable. Trois types de problématique sont abordés par les plans d'expériences

**Quantification ou évaluation :** le but est de quantifier et hiérarchiser l'influence des facteurs. La question de la signification des effets peut également être prise en compte par les plans d'expériences. Il s'agit alors de décider si les variations de la réponse sont dues aux variations des facteurs ou à des fluctuations aléatoires provoquées par la variabilité naturelle des facteurs. L'analyse de la variance et les tests statistiques sont utilisés pour répondre à ce type de question ;

- **Optimisation :** elle vise à ajuster un modèle de régression qui permet de prédire le comportement du système. Ce modèle est dans le cas le plus courant un modèle linéaire du premier ordre. La recherche d'un réglage optimal des facteurs est alors possible ;

- **Robustesse :** l'objectif vise à rendre la réponse insensible aux perturbations « bruits ». La particularité de cette approche développée par Taguchi consiste à prendre en compte non seulement le comportement moyen du système mais aussi la variabilité de celui-ci.

## I.8.2 : Vocabulaire

Trois termes propres au vocabulaire des plans d'expériences sont développés ci-dessous

- **Niveaux:** ce sont les valeurs possibles d'un facteur ;

- **Effet :** d'un facteur A sur une réponse R, est la variation de R en fonction des niveaux du facteur A. Soit, par exemple, un facteur A à deux niveaux notés 1 et 2, l'effet de ce facteur sur la réponse notée R est représenté en figure I.11.

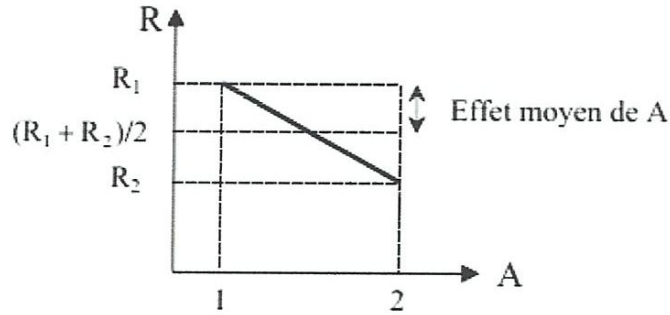


Figure I.11 : Graphe des effets du facteur A.

L'effet de A au niveau  $i$ , noté par  $E_{Ai}$  est par définition la différence entre la moyenne des réponses lorsque A est au niveau  $i$  et la moyenne générale des réponses.

• **Interaction** : deux facteurs A et B sont en interaction si l'effet de A dépend du niveau de B. A titre d'exemple, l'ajout d'un catalyseur dans une réaction chimique représente une interaction qui engendre un effet additif. La figure 3.4 représente graphiquement une interaction entre deux facteurs A et B, chacun à deux niveaux (1 et 2). Dans la figure I.12 (a), les droites représentant les effets sont parallèles, il n'y a donc pas d'interaction entre A et B. Par contre, dans la figure I.12(b), ces droites se croisent, les facteurs A et B sont en interaction.

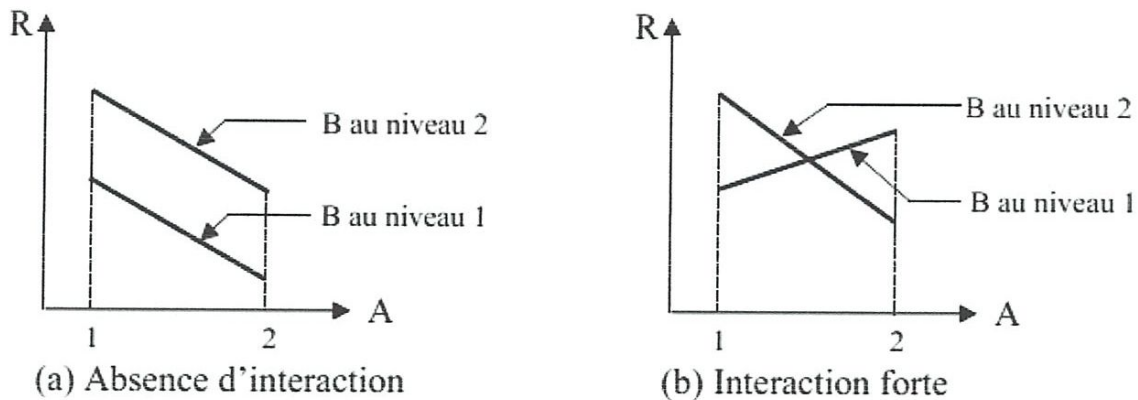


Figure I.12 : Interactions entre deux facteurs A et B.

L'interaction  $I_{AiBj}$  sera recherchée à partir des résultats moyens des essais réalisés lorsque le facteur A se trouve au niveau  $i$  et le facteur B au niveau  $j$ . Mais dans tous ces essais, l'effet principal  $E_{Ai}$  joue sur la réponse, de même que l'effet  $E_{Bj}$



### V.8.3 : Type de plans

Un plan d'expériences est un tableau ou une matrice dont les colonnes représentent des facteurs et les lignes des essais. La dernière colonne représente la réponse mesurée du système en se fixant un seul niveau de chaque facteur étudié. Il existe trois propriétés importantes des plans d'expériences :

- **Complet** : ils contiennent toutes les combinaisons des facteurs dans tous les niveaux possibles. Le nombre d'essais à réaliser devient rapidement non maîtrisable c'est-à-dire qu'il correspond au produit du nombre de niveaux de chaque facteur. C'est l'inconvénient majeur qui justifie la théorie de construction des plans.
- **Fractionnaire** : c'est une fraction du plan complet. Le nombre d'essais est réduit par rapport au plan complet. En contrepartie il ne permet d'analyser qu'un sous-ensemble du modèle complet car des effets peuvent être mélangés. Les plans d'expériences de Taguchi font partie de ces plans fractionnaires, mais avec un avantage important, la facilité de mise en pratique de ces plans grâce à quelques astuces qui simplifient la tâche de l'expérimentateur.
- **Orthogonal** : tous les niveaux de chaque facteur sont associés avec le même nombre de fois à tous les niveaux des autres facteurs. Cette propriété entraîne que chacun des effets peut être estimé sans que les autres biaisent cette estimation. Autrement dit, la contribution sur la réponse de chaque facteur du plan est indépendante des autres. De ce fait, un plan orthogonal devra être le plus petit commun multiple (PPCM) du produit du nombre de niveaux de toutes les actions disjointes prises deux à deux.

Un plan complet est nécessairement orthogonal. Cependant, un plan d'expériences fractionnaire doit être conçu de manière à respecter la propriété d'orthogonalité pour équilibrer les effets des différents facteurs considérés et permette ainsi une exploitation non biaisée des expériences réalisées sur le système. La construction d'un plan fractionnaire orthogonal n'est pas évidente dès que le nombre d'essais dépasse quatre. C'est pourquoi, des tables standards et des techniques d'adaptation à des situations spécifiques ont été élaborées pour simplifier la mise en œuvre des plans d'expériences : il s'agit principalement des tables de Taguchi.

### I.9 : Travaux de recherche

**Ashok Kumar Sahoo, et al [16]** ont développé un modèle de l'usure en dépouille (VBc) lors du tournage dur sans lubrification de l'acier EN 24 (34CrNiMo6) par des plaquettes en céramique mixte revêtue TiN (PVD), figure I.13. Ils ont donné aussi les effets des paramètres de coupe sur l'usure. Les chercheurs ont choisi un plan d'expérience complet  $L_{27}$ , fixant comme paramètre d'entrée la vitesse de coupe (V), l'avance (f) et le temps d'usinage (t), chaque paramètre disposant de trois niveaux, ils ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'analyse de la variances (ANOVA) pour analyser leurs résultats.

Les auteurs ont trouvé dans cette étude les conclusions suivantes :

-Par l'utilisation des micrographies en microscope électronique, les auteurs ont trouvé que l'abrasion et la diffusion sont les phénomènes les plus dominants en usinage dur de l'acier EN 24, (MEB), figure I.14.

le temps d'usinage est le paramètre le plus significatif de l'usure en dépouille suivie par la vitesse de coupe et l'avance. En outre, l'interaction de temps usinage/ vitesse de coupe et temps /avance d'usinage sont également significative.

-Le modèle de surface de réponse d'usure en dépouille proposé est significatif en raison de coefficient de détermination élevée ( $R^2=98\%$ ).

-Les résiduels se trouvent raisonnablement près d'une ligne droite impliquant que les limites mentionnées dans le modèle sont significatives dans la droite normale de probabilité.

-Les valeurs d'usure prédite à partir de modèles expérimentaux et les valeurs RSM sont très proches les uns des autres signifiant une bonne corrélation avec le modèle développé figure I.15.

- Les tracés des contours en deux dimensions, ont montré que la combinaison V1-f1-t1, donne la plus petite valeur de l'usure en dépouille, les deux tracés ont donné une bonne concordance avec le modèle quadratique développé par les auteurs.

- A la fin, les auteurs indiquent que le modèle élaboré peut être efficacement utilisé pour la prédiction de l'usure (VBc) en tournage dur en utilisant des plaquettes en céramique mixte.

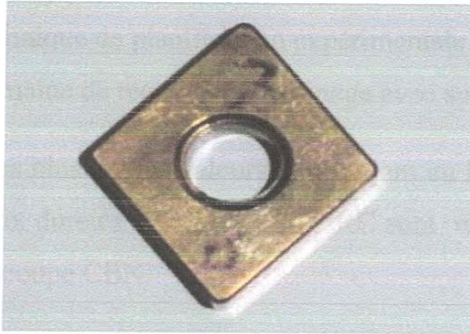


Figure I.13: Plaquette Céramique mixte revêtue (PVD TiN).

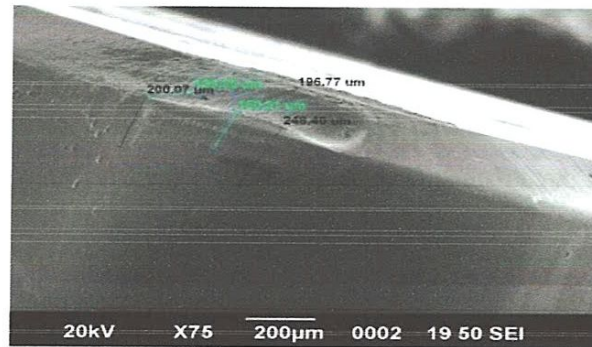


Figure I.14: Micrographie en MEB pour les Conditions de coupes,  $V=150\text{m/min}$ ,  $f=.015\text{mm/tr}$  et  $t=20\text{min}$ .

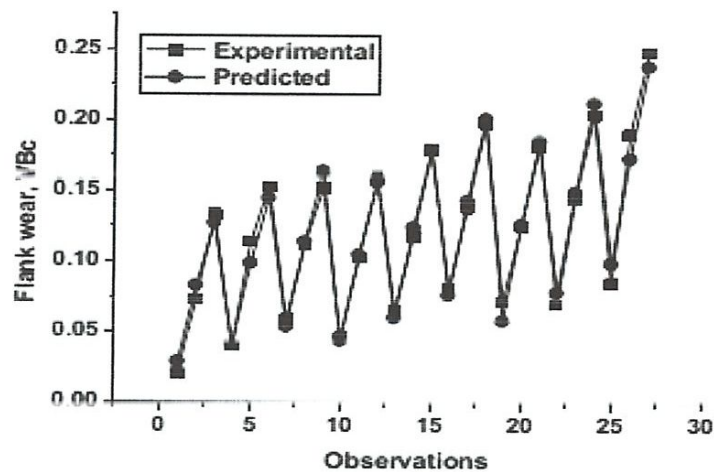
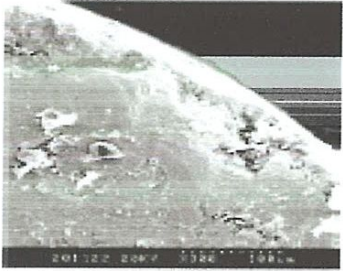


Figure I.15: les valeurs expérimentales de l'usure en dépouille Par rapport aux valeurs prédites.

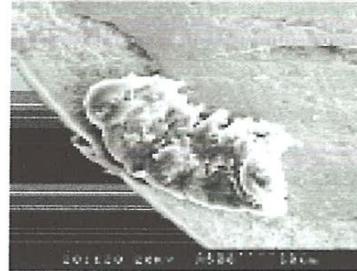
Mustafa Gunay et Emre Yucel [17] ont étudié les effets de paramètre de coupe sur la rugosité de la surface usinée ( $R_a$ ), et de trouver un régime de coupe optimale pour une rugosité de surface minimale. Les auteurs ont réalisé les essais en tournage dur de la fonte blanche (Ni-Hard) pour deux niveaux de dureté (50 HRC et 62 HRC) avec des outils de coupe du nitrure de bore (CBN) et céramique. Un plan de Taguchi de 18 essai ( $L_{18}$ ) a été réalisé, et une analyse en signal-bruit (S/N) ainsi que l'analyse de variance (Anova) ont été adoptés.

Les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs sont comme suit :

d'usure en dépouille et du nez. Les résultats des expériences prouvent que les carbures revêtus par PVD (KC7310) sont plus appropriés à l'usinage de l'inconel 718 que les carbures revêtus par CVD (KC935), et les plaquettes en céramique KY2000 avec un angle d'attaque négatif et KY2100 de type rond sont le choix le plus approprié pour le tournage à grande vitesse de l'inconel 718. Sur la base de l'équation de Taylor et le temps de production minimum, la vitesse optimale de coupe a été optimisée en tournage de l'inconel 718 pour chaque plaquette examinée (Fig I-16 et I-17).



**Figure. I.20:** rupture de la nuance KC732



**Figure I-21:** Ecaillage du revêtement et adhésion, de la nuance 7310

[22] et autres ont fait une étude sur la tenue et les mécanismes d'usure d'un outil CBN lors de l'usinage de l'Inconel 718.

Les outils en CBN sont la plupart du temps employés par l'industrie automobile en tournage dur, l'usure de ces outils n'est pas suffisamment connue lors de l'usinage des matériaux aérospatiaux. Cette recherche a donc pour but de connaître les mécanismes d'usure pendant les opérations de finition de l'Inconel 718 en utilisant des outils CBN. Il est montré qu'une faible teneur de CBN avec un liant en céramique et de petits grains donnent les meilleurs résultats. Les mécanismes d'usure sur la surface d'attaque et de dépouille de l'outil ont été étudiés aussi. L'observation au SEM et l'analyse chimique des plaquettes, montrent que les mécanismes dominants d'usure sont par adhérence et par diffusion dus à l'affinité chimique entre la pièce et la plaquette.

[23] et autres ont étudié l'effet de la vitesse de coupe et la géométrie d'outil sur les propriétés d'usinabilité de l'Inconel 718. À ce but, le super alliage à base de nickel (Inconel 718) est usiné à sec en utilisant le tour numérique avec outils de coupe en céramique de deux géométries différentes et de trois qualités différentes. Le processus d'enlèvement de métal est réalisé pour quatre vitesses de coupe différentes (150 m/min, 200 m/min, 250 m/min, et 300

m/min), tandis que la profondeur de passe et l'avance sont maintenues constantes ( $a_p=2\text{mm}$ ,  $f=0.20\text{ mm/tr}$ ). A partir des expériences, le plus faible effort de coupe est égal à 672 N avec l'outil en céramique de KYON 2100 SNGN 120712 et l'effort de coupe maximal est égal à 1346N avec l'outil de coupe en céramique ayant la géométrie de KYON 4300 RNGN 120700. Selon la vitesse de coupe, le plus faible effort est égal à 812 N à 250 m/min tandis que l'effort le plus élevé est égal à 955 N à 150 m/min. La déformation plastique, l'usure en dépouille, entaillage et l'arête rapportée sont remarquées dans des vitesses de coupe élevées.

### **I.10 : Conclusion**

Cette recherche a été réservée à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux en générale. Dans cette partie, nous avons présentés une introduction sur la coupe des métaux qui comporte la définition de l'usinabilité et son évaluation, suivie par les matériaux de coupe et leur classification, ainsi que les revêtements pour outils coupants. Nous avons présenté aussi l'endommagement et l'usure des outils de coupe et nous avons définie les Plans d'expériences .La fin de cette étude est réservée à un résumé des articles sur la coupe des métaux et particulièrement sur les méthodes d'optimisations.

# **Chapitre II**

## **Procédure expérimentale**

## II.1: Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des outils et équipements mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le souci d'étudier l'usinabilité de Inconel 718. Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés qui servent au suivi de l'évolution de la rugosité des surfaces obtenues, des efforts de coupe générés. 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 utilisés

### II.2.1: Machine outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN40C, La puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure II-1). Les fréquences de rotation disponibles sur le tour entre (22.5 à 2000) tr/min. Les avances disponibles pour la machine sont (0.08 à 0.8) mm/tr.

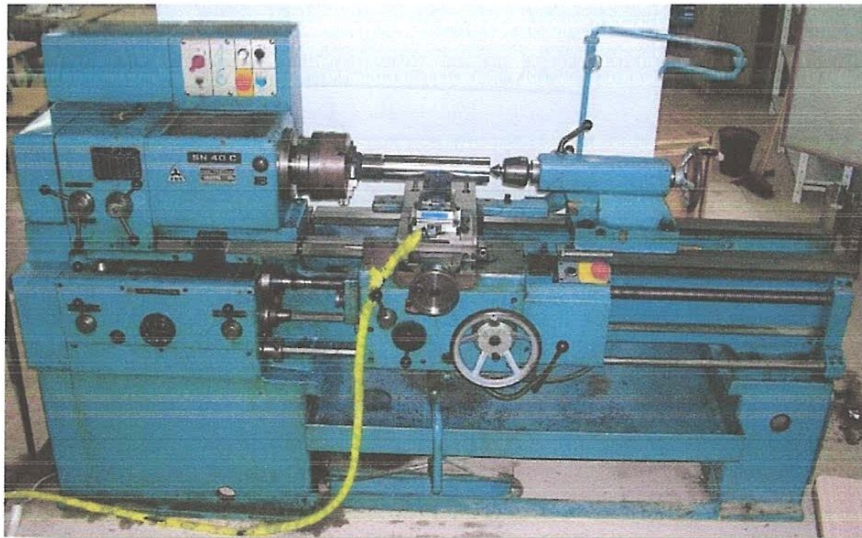


Figure II.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

### II.2.2: Outils de coupe utilisés

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil sur lequel on fixe les plaquettes mécaniquement par bride ou par trou central. La géométrie du porte outil est donnée dans le tableau II-1. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort

élément de serrage dans le porte outil. Une calle support en carbure métallique vissé et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

**Tableau.II.1:** Caractéristiques géométriques des portes outils

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



**Figure.II.2:** Porte outil utilisé

La plaquette utilisée est amovible de forme carrée à fixation par bride et trou centrale. Toutes les informations relatives à cette plaquette de coupe sont regroupées dans le tableau II-2.

**Tableau.II.2:** Informations relatives à la plaquette de coupe

Matériau de coupe	Désignation firme	Désignation ISO	Firme	Composition
Céramique composite	CC670	SNGN 120408	Sandvik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC

### II.3: Matériau à usiner

L'Inconel 718 est un alliage qui doit être durci par vieillissement. Il est très résistant à l'oxydation jusqu'à 1800°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 caractéristiques physiques et chimiques de l'Inconel 718 sont données au tableau II-3. et convenable à des températures variant de -423° à 1300°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°F, de même qu'une résistance

**Tableau.II-3:** Composition chimique et caractéristiques physiques de l'Inconel 718

<i>Els</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Sn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ni+Co</i>	<i>Cr</i>	<i>Co</i>	<i>Fe</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Cb+Ta</i>
%	0.08	0.35	0.35	0.015	0.015	55	21	1	20	3.3	1.15	0.15	0.8	5.5
<i>Max</i>														
% <i>Min</i>	-	-	-	-	-	50	17		18.5	2.8	0.65	-	0.35	4.75
<b>Dureté</b>	<b>36 HRC</b>													

## II.4: Appareillages de mesure utilisés

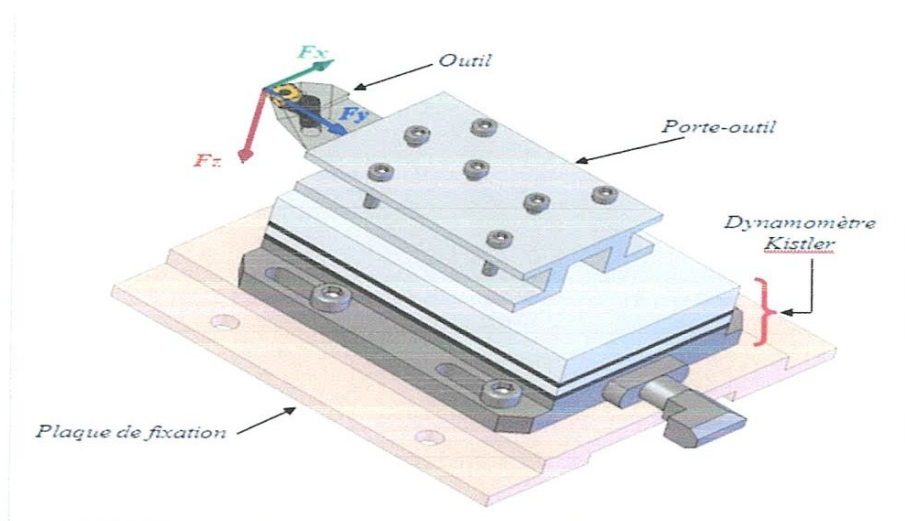
### II.4- 1 : Mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne (Plateforme KISTLER modèle 9257B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des efforts de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments qui sont :

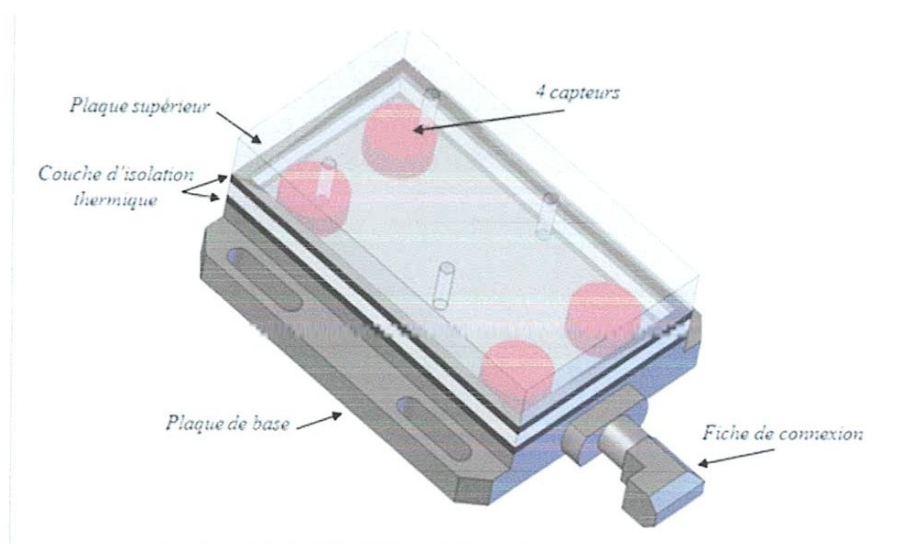
1. La plateforme.
2. L'amplificateur de signaux.
3. Le PC avec logiciel, et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce où l'outil reste fixé. Ce dernier est montré sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil.

La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz à trois éléments, qui sont assemblés sous hautes précontraintes, formant un dynamomètre qui peut mesurer trois composantes en même temps. Les efforts agissants sur cette plaque lors de la coupe sont convertis en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

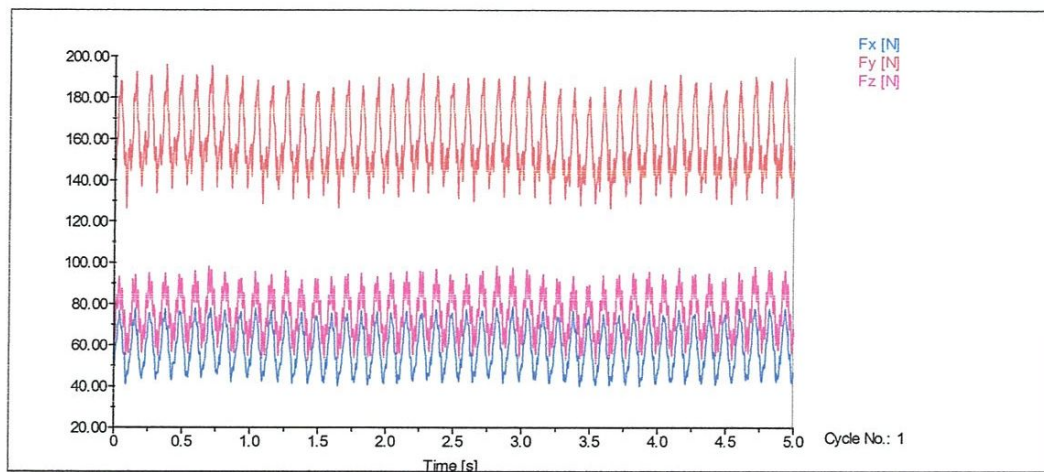


**Figure II.3:** Montage du dynamomètre sur la table de la machine.



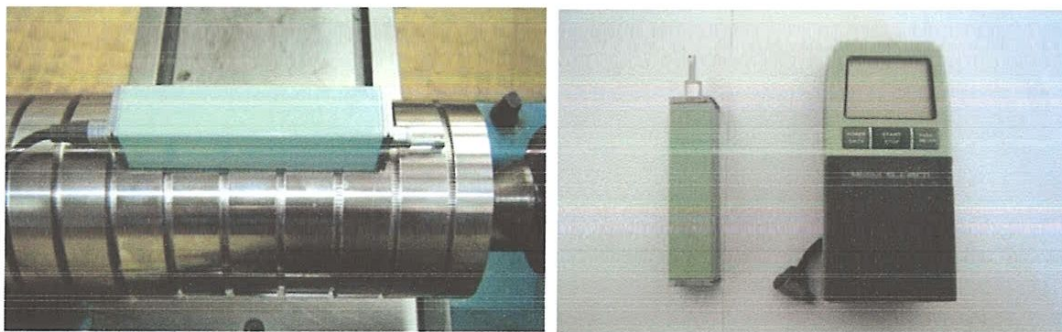
**Figure II.4:** Capteur d'effort de coupe KISTLER.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La figure II.5 présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes des efforts de coupe (Force axiale:  $F_a$ , Force radiale:  $F_v$  et Force tangentielle:  $F_r$ )



**Figure II.5.** Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

#### II.4.2: Rugosimètre pour la mesure de la rugosité



**Figure II.6:** mesure de la rugosité sans démontage de la pièce

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo), la plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40 $\mu\text{m}$ ) pour  $R_a$  et (0.3 à 160 $\mu\text{m}$ ) pour  $R_z$  et  $R_t$ , la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (figure II.6)

#### II.5: Conditions de coupe

Les essais d'usinage sont effectués sur le super alliage base nickel inconel 718, avec la plaquette Céramique composite.

A la fin de chaque opération d'usinage, on mesure la rugosité de surface usinée. Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage). La pièce est maintenue en montage

mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées au tableau II-4.

**Tableau .II.4:** Conditions de coupe utilisées

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	110	f (mm/tr)	0.08, 0.12, 0.14, 0.16, 0.2
ap (mm)	0.15		
Vc (m/min)	110	ap (mm)	0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35
f (mm/tr)	0.08		
ap (mm)	0.15	Vc (m/min)	75, 110, 145,220
f (mm/tr)	0.08		

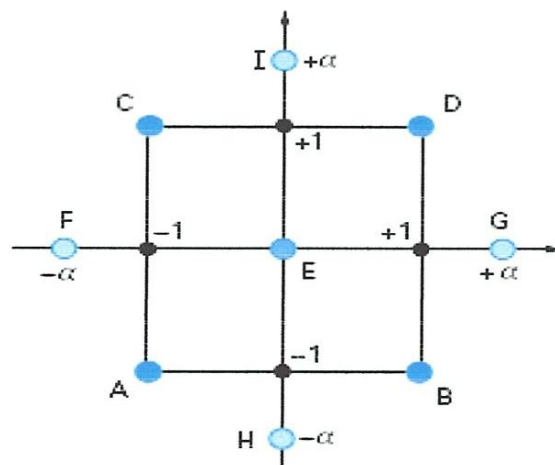
## II.6 : Planification des expériences

### II.6.1: Plans composites centrés

Un plan composite est constitué de trois parties :

- un plan factoriel dont les facteurs prennent deux niveaux ;
- au moins, un point expérimental situé au centre du domaine d'étude ;
- des points axiaux ; ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des facteurs.

La figure II-7 représente un plan composite pour deux facteurs :



**Figure II.7:** Plan composite pour deux facteurs

- les points A, B, C et D sont les points expérimentaux d'un plan factoriel  $2^2$  ; le point E est le point central. Ce point peut avoir été répliqué une ou plusieurs fois ;
- les points F, G, H et I sont les points axiaux. Ces quatre derniers points forment ce que l'on appelle le plan en étoile.

On réalise 9 essais et 6 coefficients doivent être déterminés. Il faut donc résoudre un système de 9 équations à 6 inconnues. Les coordonnées des points en étoile dépendent du critère d'optimalité choisi. En général, on retient le critère de presque orthogonalité ou le critère d'iso variance par rotation.

Les plans composites prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences correspondant aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble de toutes les expériences. Les plans composites sont parfaitement adaptés à l'acquisition progressive des résultats.

### II.6.2: Méthode de planification des expériences

Les paramètres de coupe ( $V_c, f, a_p$  et  $r$ ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences

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

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de cinq facteurs de base ( $V_c, f, a_p$  et  $r$ ) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe).

Les essais ont été numérotés de 1 à 28 (plan ccd). La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II.5.

**Tableau .II.5:** Matrice d'expériences d'un plan de composites centrés à quatre facteurs

<b>Table de Plans composites centrés</b>				
N°	<b>Facteurs</b>			
	<i>V<sub>c</sub></i> m/min	<i>f</i> mm/tr	<i>ap</i> mm	<i>r</i> mm
1	1	0	0	1
2	0	0	1	-1
3	0	0	-1	1
4	-1	0	-1	0
5	-1	1	0	0
6	0	1	0	1
7	0	-1	-1	0
8	1	-1	0	0
9	1	0	1	0
10	0	-1	1	0
11	0	0	0	0
12	0	1	1	0
13	0	-1	0	1
14	1	0	-1	0
15	0	0	0	0
16	0	0	1	1
17	0	1	-1	0
18	1	0	0	-1
19	0	0	-1	-1
20	-1	0	1	0
21	-1	-1	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	-1	0	-1
25	1	1	0	0
26	0	1	0	-1
27	-1	0	0	1
28	-1	0	0	-1

### II.6.2: Conditions de coupe

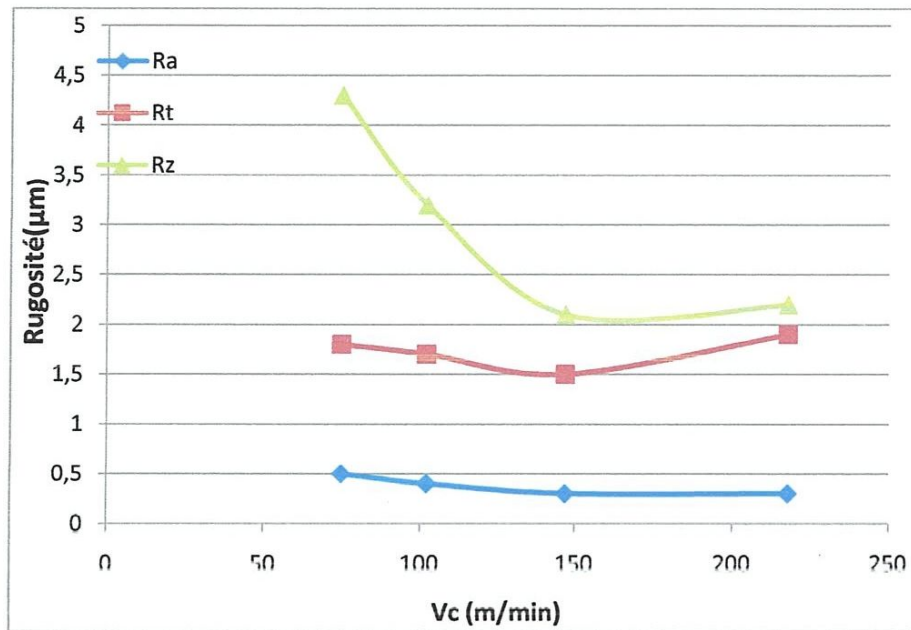
Les essais sont effectués en tournage, les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans le tableau II.6. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

**Tableau II.6** Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité

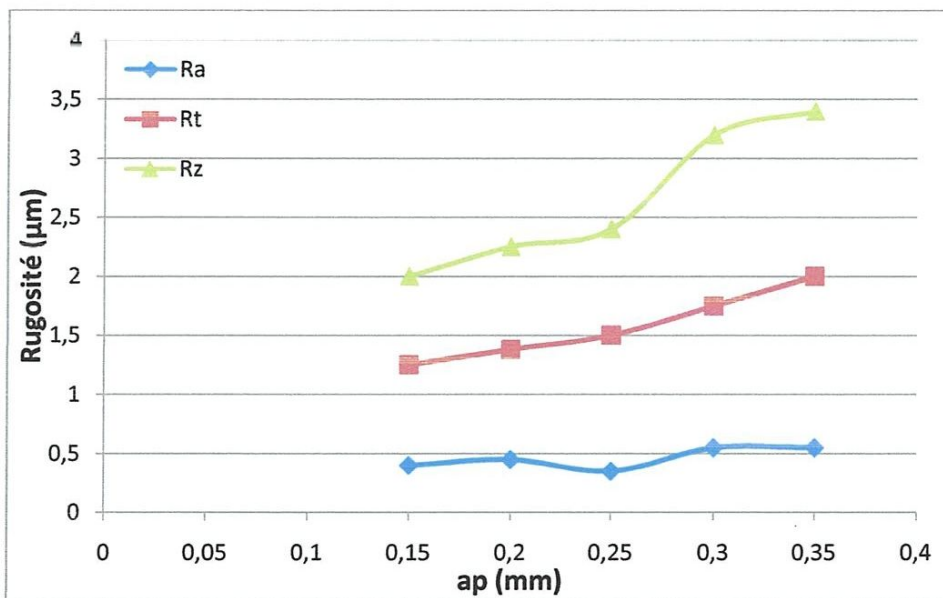
Les paramètres d'entrée	Paramètres de sortie
$V_c$ (m/min) = {100, 150, 200}	<ul style="list-style-type: none"><li>- La rugosité (Ra)</li><li>- Efforts de coupe</li></ul>
$f$ (mm/tr) = {0.08, 0.12, 0.16}	
$a_p$ (mm) = {0.1, 0.2, 0.3}	
$r$ (mm) = {0.8, 1.2, 1.6}	

## II.7: Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. La composition chimique des éprouvettes et les caractéristiques des matériaux de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

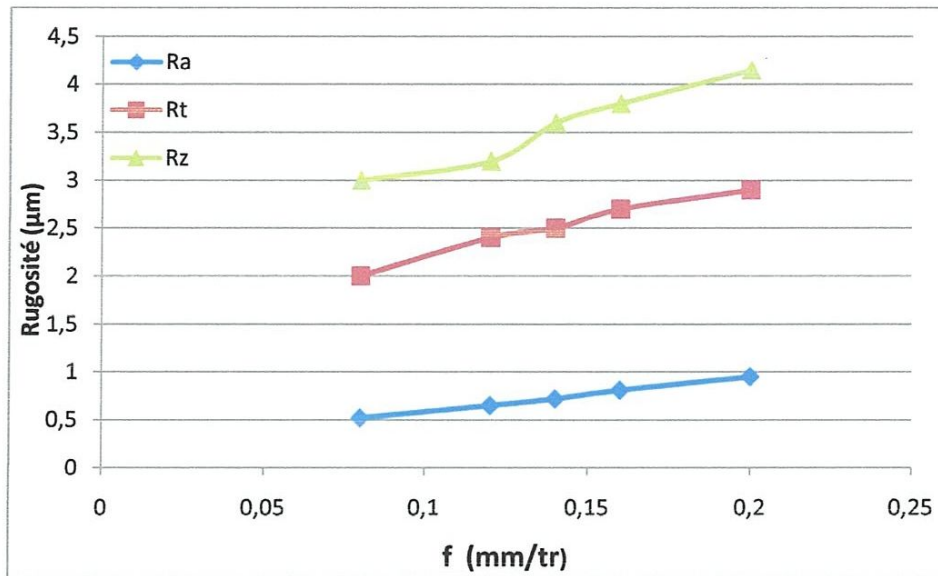


**Figure.III-1:** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique composite CC670 (ap = 0.15 mm, f = 0.08 mm/tr)



**Figure.III-2:** Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour la céramique composite CC670 (Vc = 110 m/min, f = 0.08 mm/tr)





**Figure.III-3: Evolution** de la rugosité en fonction de l'avance pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$ mm)

- ***Influence de la vitesse de coupe***

La figure III-1 montre que l'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de surface Ra de  $0.48 \mu\text{m}$  à  $V_c=75$  m/min jusqu'à  $0.32 \mu\text{m}$  à  $V_c= 145$  m/min qui est la plus basse valeur de rugosité enregistrée. Lors de l'usinage de l'Inconel 718 aux vitesses de coupe élevées, nous avons remarqué l'apparition du phénomène de soudage des micros copeaux sur la surface de la pièce. Ces micros copeaux dégradent la surface de la pièce aux vitesses élevées.

- ***Influence de la profondeur de passe***

La profondeur de passe a une influence moins considérable sur la rugosité. Comme le montre la figure III-2, on peut observer une légère augmentation de la rugosité Ra qui passe de la valeur de  $0.41 \mu\text{m}$  pour  $a_p = 0.15$  mm, à la valeur  $0.55 \mu\text{m}$  pour  $a_p = 0.35$  mm.

En réalité, la profondeur de passe peut influencer indirectement la rugosité des surfaces usinée en augmentant les efforts de coupe et par conséquent les vibrations. Ces vibrations peuvent à leur tour influencer la stabilité d'usinage.

- *Influence de l'avance*

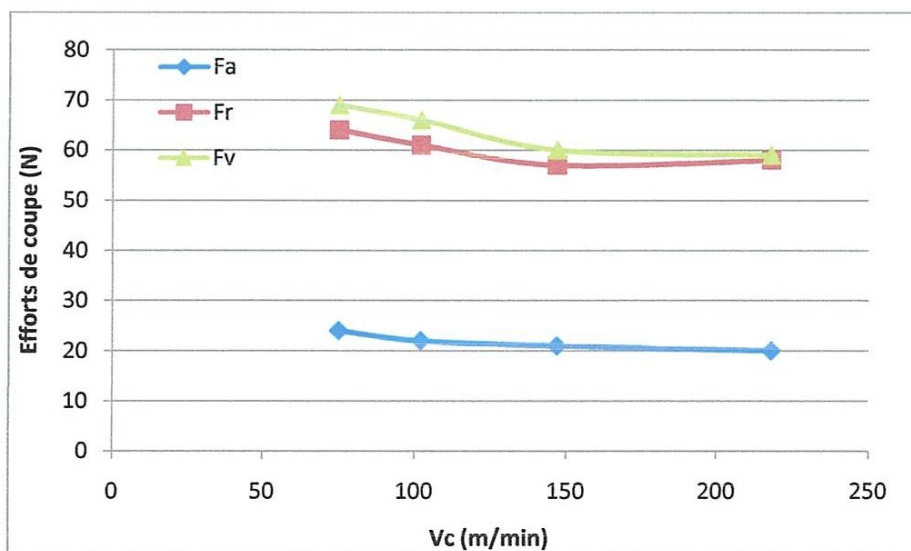
L'influence de l'avance sur la rugosité est importante. Comme la montre la figure III 3, l'augmentation de ce paramètre entraîne une augmentation des différents critères de la rugosité. En effet, l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.12 mm/tr augmente la rugosité Ra de 0.51 à 0.77  $\mu\text{m}$ . La valeur maximale de la rugosité Ra est de 0.98  $\mu\text{m}$  pour une avance de 0.2 mm/tr. En pratique une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.2 mm/tr induit une augmentation des trois critères de rugosité (Ra, Rt et Rz) successivement de (82,69%, 45% et 38.33%)

### III.a.2: Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe

Les figures III-4, III-5 et III-6 expriment l'influence des éléments du régime de coupe sur les efforts de coupe générés lors de l'usinage de l'Inconel 718 par la céramique CC670.

- *Influence de la vitesse de coupe.*

Comme le montre la figure III-4, la vitesse de coupe a une influence sur les efforts de coupe. En effet, l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution des trois composantes Fa, Fr et Fv. Cette augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une augmentation de la température générée dans la zone de coupe ce qui réduit considérablement la dureté de la pièce et facilite ainsi l'opération d'enlèvement de matière.

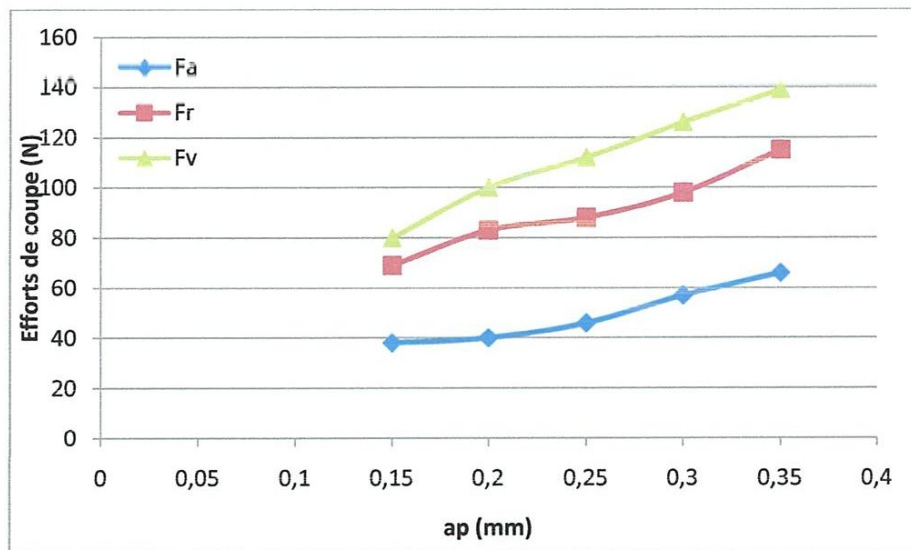


**Figure. III-4:** Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $f = 0.08$  mm/tr)

Cette tendance devient plus lente lorsque la vitesse de coupe se trouve entre 150 et 220 (m/min). Dans cet intervalle de vitesse, on remarque une stabilisation des trois composantes de l'effort de coupe. Les conséquences pratiques de l'augmentation de la vitesse de coupe de 75 à 220 m/min, conduisent à une diminution des trois composantes de l'effort de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ) successivement de (16.60, 9.37 et 14.49) %.

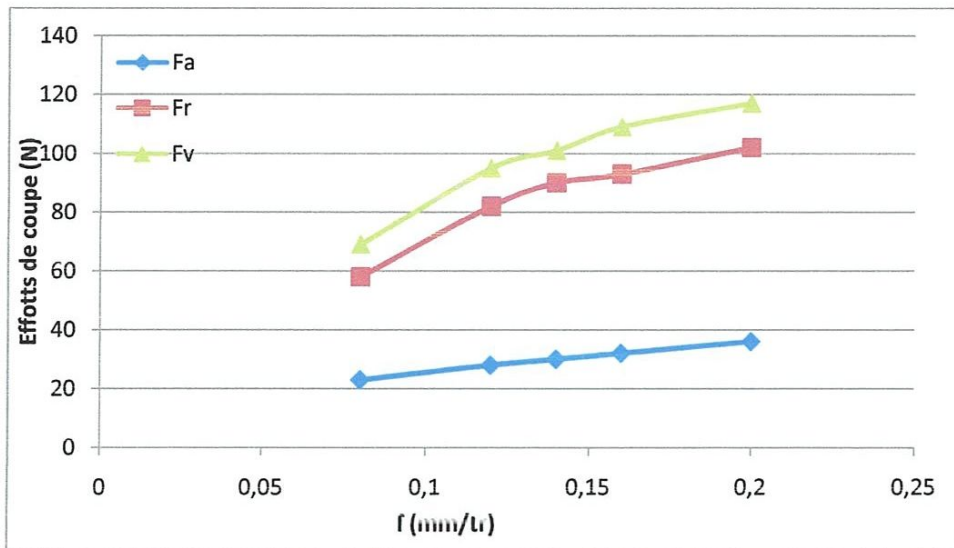
- **Influence de la profondeur de passe.**

L'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe prend un seul sens de variation. Comme le montre la figure III-5, l'accroissement des trois composantes des efforts reste continu jusqu'à une valeur maximale de  $F_v = 140$  N pour une profondeur de passe de 0.35 mm. Donc, l'augmentation de la profondeur de passe conduit à l'augmentation de la section du copeau et la puissance nécessaire pour l'enlèvement de matière ce qui implique des efforts de coupe plus élevés.



**Figure. III-5:** Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour la céramique CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr)

Les conséquences pratiques de l'augmentation de la profondeur de passe de 0,1 à 0,3 (mm), conduisent à une augmentation des trois composantes de l'effort de coupe  $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$  successivement de (73.68, 66.66 et 73.68)%.



**Figure. III-6:** Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance pour la céramique CC670  
( $a_p = 0.15$  mm,  $V_c = 110$  m/min)

- **Influence de l'avance.**

Comme le montre la figure III-6, l'effet de l'avance reste moins important que celui de la profondeur de passe. En effet, une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.2 mm/tr entraîne une augmentation jusqu'à 120 N pour  $F_v$ , 105 N pour  $F_r$  et 34 N pour  $F_a$ . Cette augmentation des efforts de coupe est expliquée par l'augmentation de la section du copeau. En conclusion, la profondeur de passe représente le paramètre principal qui influe sur les efforts de coupe.

### III.a.3: Evolution des efforts spécifiques en fonction des paramètres de coupe

La pression de coupe, aussi appelée effort spécifique, est une grandeur définie comme étant l'effort de coupe par unité de surface.

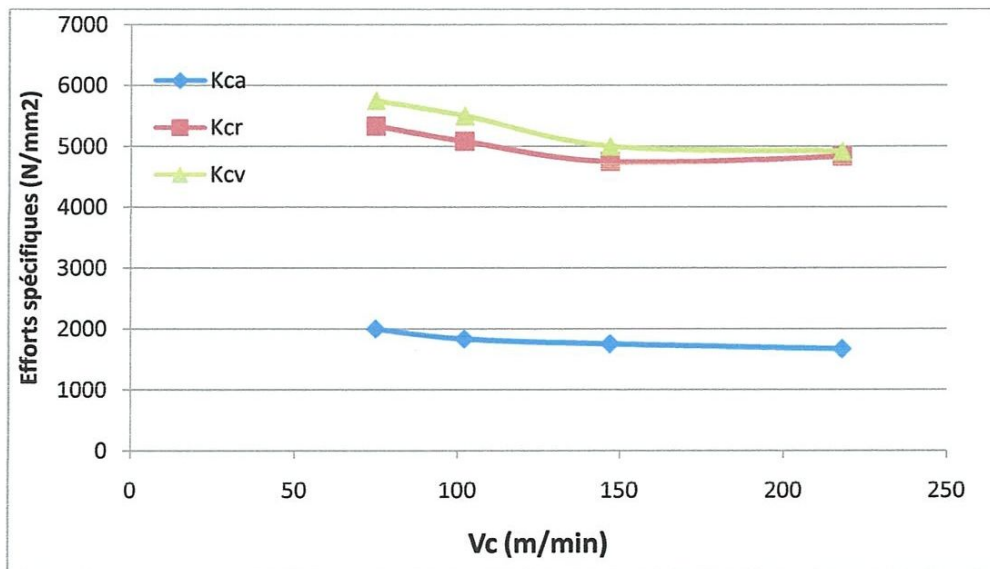
$$K_i = \frac{F_i}{f \times a_p} \quad (\text{III.1})$$

Avec  $K_i$  pression de coupe (N/mm<sup>2</sup>), avec  $i = (a, r \text{ et } v)$  ;  
 $F_a$  effort axial (N) ;  
 $F_r$  effort radial (N) ;  
 $F_v$  effort tangentiel (N) ;  
 $f$  avance (mm/tr) ;  
 $a_p$  profondeur de passe (mm).

### a) Influence de la vitesse de coupe

La figure III-7 illustre les courbes de l'évolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe  $V_c$  lors du tournage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670. Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution des pressions de coupe. A cet effet, on distingue deux périodes d'évolution différentes:

- La première période ( $V_c$  de 75 à 150) m/min est caractérisée par une diminution importante de l'effort spécifique qui correspond à un chargement important de l'arête de coupe. Les pressions enregistrées sont élevées dans cette zone, à titre d'exemple, à  $V_c = 75$  m/min, on enregistre des pressions  $K_{ca}$ ,  $K_{cr}$  et  $K_{cv}$  de l'ordre de (2083, 5333 et 5750)  $N/mm^2$ , la fin de cette période conduit à la détermination de la vitesse minimale du domaine d'utilisation du couple outil-matière.
- La deuxième période ( $V_c$  de 150 à 220) m/min est caractérisée par une plage où les pressions de coupe se stabilisent. En pratique cette zone constitue la plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe, elle se termine par la vitesse de coupe maximale. A  $V_c = 220$  m/min, les pressions spécifiques sont à leurs bas niveaux, ce qui est préférable à l'outil. On enregistre des pressions de coupe  $K_{ca}$ ,  $K_{cr}$  et  $K_{cv}$  de l'ordre de (1666, 4750 et 4916)  $N/mm^2$ .



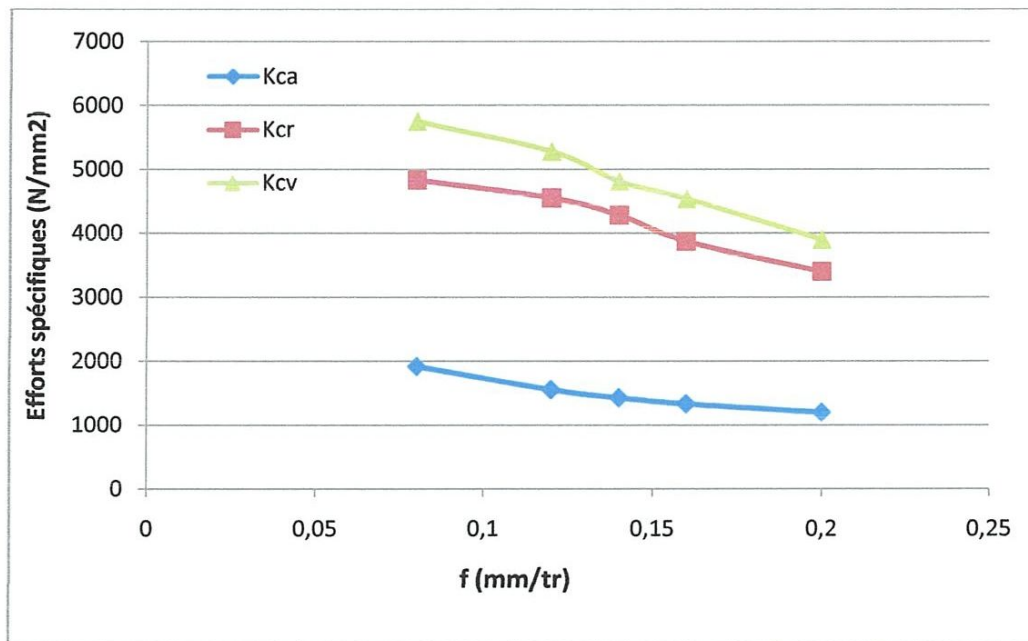
**Figure. III-7:** Evolution des efforts spécifiques en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique composite CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $f = 0.08$  mm/tr)

### b) Influence de l'avance

La figure III-8 présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance  $f$ . On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, les pressions de coupe ont un comportement décroissant similaire à celui de la vitesse de coupe dans sa première période. Pour les faibles avances, on enregistre des pressions extrêmement élevées.

Avec une avance de 0.08 mm/tr, les pressions de coupe  $K_{ca}$ ,  $K_{cr}$  et  $K_{cv}$  sont de l'ordre de (2000, 4833 et 5833) N/mm<sup>2</sup>.

Avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0.2 mm/tr, les pressions chutent successivement de 37 %, 28 % et 32 %. Ici, un compromis reste à faire entre la diminution des pressions de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.

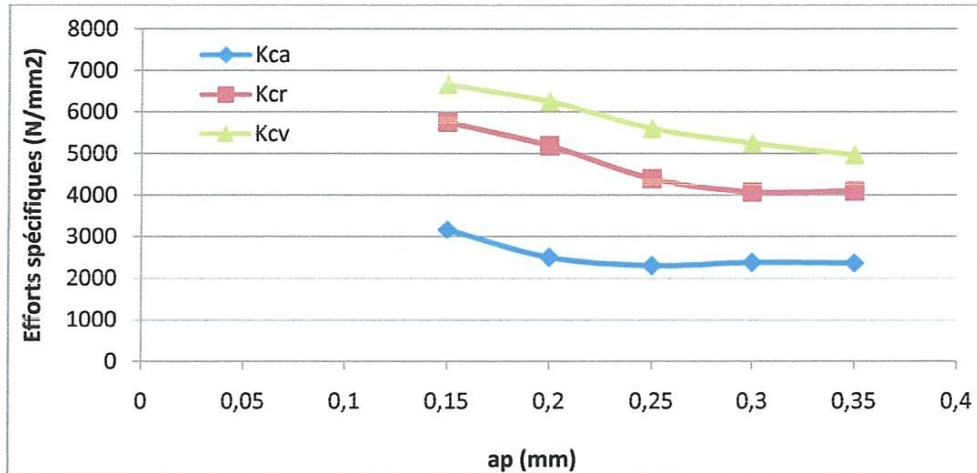


**Figure. III-8:** Evolution des efforts spécifiques en fonction de l'avance pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm)

### c) Influence de la profondeur de passe

La figure III-9 présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe  $a_p$ . Avec l'augmentation de cette dernière, on remarque une diminution des pressions de coupe jusqu'à  $a_p = 0.3$  mm. Au delà de cette valeur, on remarque une stabilité accompagnée avec une légère diminution de la pression  $K_{cv}$ .

L'analyse des résultats montre qu'aux faibles valeurs de la profondeur de passe on enregistre des pressions élevées ( $a_p = 0.15 \text{ mm}$  ;  $K_{cv} = 6666 \text{ N/mm}^2$ ). A cet effet, il est déconseillé de travailler aux faibles valeurs de la profondeur de passe, parce que l'arête de coupe subit des pressions énormes qui peuvent l'endommager.



**Figure. III-9:** Evolution des efforts spécifiques en fonction de la profondeur de passe pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ )

#### III.a.4 : Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe

Lors d'une opération d'usinage la connaissance de la puissance de coupe est nécessaire afin de s'assurer que les organes de la machine permettent la transmission de cette puissance et qu'elle soit inférieure à la puissance disponible sur la broche de la machine [21].

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60}, W \quad (\text{III.2})$$

$P_c$  : puissance de coupe (W).

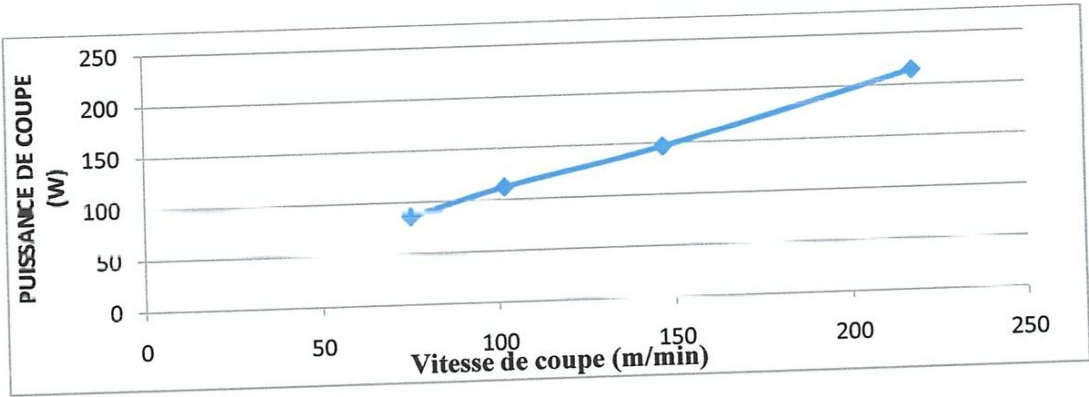
$F_c$  : effort principal de coupe (N).

$V_c$  : vitesse de coupe (m/min).

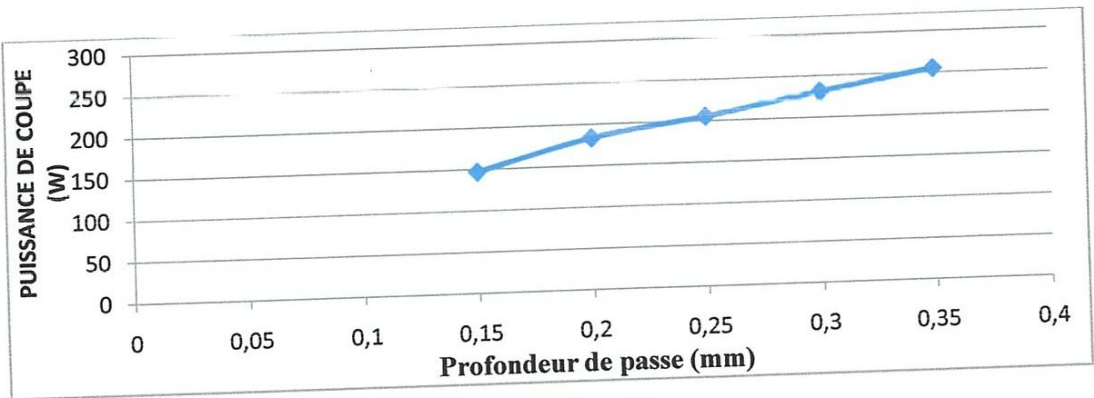
Les figures III-10 (a, b et c) montrent l'évolution de la puissance en fonction des paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) pour la céramique composite CC670.

L'analyse des figures montre une nette augmentation de la puissance de coupe avec l'augmentation des conditions la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe. Les conséquences de l'influence de la vitesse de coupe sur la puissance de coupe sont comme suit :

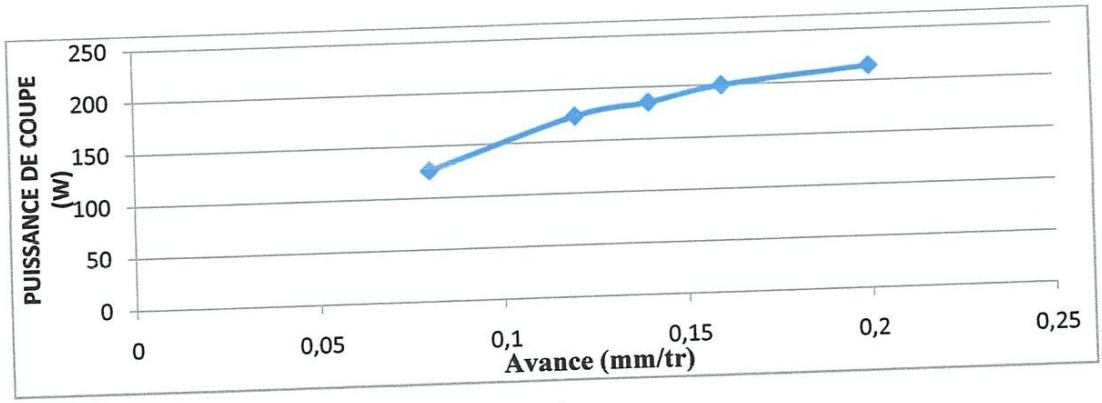
- L'augmentation de la vitesse de coupe de 75 à 220m/min, fait accroître la puissance de coupe de 149%.
- De la même manière l'élévation de la profondeur de 0,15 à 0,35 mm/tr, conduit à une élévation de la puissance de coupe de 76%.
- Aussi, l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,2 mm/tr, conduit à une élévation de la puissance de coupe de 70%.



a)



b)



c)

Figure. III-10: Evolution de la puissance de coupe en fonction des conditions de coupe



### III.b.1: Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

#### III.b.1.1: Résultats des expériences

Dans le tableau III.1 sont présentées les valeurs expérimentales du critère de rugosité (Ra). Ces valeurs sont obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de 28 essais avec 4 facteurs de 3 niveaux (un plan d'expérience composite centré (CCD)).

**Tableau III-1** Résultats de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe.

N° Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap(mm)	r(mm)	Ra (µm)
1	200	0,12	0,2	1,6	0,39
2	150	0,08	0,3	1,2	0,54
3	150	0,12	0,2	1,2	0,46
4	100	0,12	0,2	1,6	0,45
5	200	0,12	0,2	0,8	0,44
6	150	0,12	0,3	1,6	0,4
7	100	0,12	0,2	0,8	0,56
8	100	0,16	0,2	1,2	0,77
9	200	0,08	0,2	1,2	0,38
10	200	0,16	0,2	1,2	0,82
11	150	0,12	0,1	1,6	0,33
12	150	0,16	0,2	1,6	0,43
13	100	0,12	0,3	1,2	0,55
14	150	0,08	0,2	1,6	0,39
15	150	0,16	0,3	1,2	0,59
16	150	0,12	0,2	1,2	0,49
17	150	0,12	0,2	1,2	0,48
18	100	0,08	0,2	1,2	0,59
19	200	0,12	0,1	1,2	0,43
20	100	0,12	0,1	1,2	0,53
21	150	0,08	0,1	1,2	0,33
22	150	0,16	0,1	1,2	0,57
23	150	0,16	0,2	0,8	1,13
24	200	0,12	0,3	1,2	0,47
25	150	0,08	0,2	0,8	0,43
26	150	0,12	0,1	0,8	0,84
27	150	0,12	0,3	0,8	0,87
28	150	0,12	0,2	1,2	0,48

**III.b.1.2: Analyse de la variance (ANOVA) et détermination du modèle mathématique****III.b.1.2.1: Analyse de la variance de Ra en fonction de Vc, f, ap, r**

Les résultats présentés dans le tableau (III-1) sont analysés par le logiciel MINITAB16. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA), nous considérons un intervalle de confiance de 95% ( $\alpha=0.05$ ). L'analyse de la variance présentée sur le tableau (III-2) pour le critère de la rugosité ( $Ra$ ) montre que les termes (f, r) et (r\*f) ont un effet significatif sur le critère de la rugosité ( $Ra$ ). Le facteur le plus significatif pour la rugosité de surface ( $Ra$ ) et le rayon du bec de l'outil (r) car sa contribution est de 31.38% suivi par l'avance (f) avec une contribution 24.17% et en dernier lieu la vitesse de coupe (Vc), la profondeur de passe (ap) et les interactions (Vc\*Vc, ap\*ap, Vc\*ap, Vc\*r, f\*ap et ap\*r) sont non significatif avec des contributions de 1.35%, 2.40%, 0.18% , 0.021%, 0.01%, 0.095%, 0.96% et 0.04% respectivement.

**Tableau III-2: Résultats de l'analyse de variance pour Ra.**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	contribution%
<b>Regression</b>	14	0,737802	0,737802	0,052700	3,41	0,017	78,60
<b>Vc</b>	1	0,022533	0,022533	0,022533	1,46	0,249	2,40
<b>f</b>	1	0,226875	0,226875	0,226875	14,69	0,002	24,17
<b>ap</b>	1	0,012675	0,012675	0,012675	0,82	0,381	1,35
<b>r</b>	1	0,294533	0,294533	0,294533	19,07	0,001	31,38
<b>Vc*Vc</b>	1	0,001719	0,000337	0,000337	0,02	0,885	0,18
<b>f*f</b>	1	0,032202	0,039609	0,039609	2,56	0,133	3,43
<b>ap*ap</b>	1	0,000203	0,001584	0,001584	0,10	0,754	0,02
<b>r*r</b>	1	0,010837	0,010838	0,010838	0,70	0,417	1,15
<b>Vc*f</b>	1	0,016900	0,016900	0,016900	1,09	0,315	1,80
<b>Vc*ap</b>	1	0,000100	0,000100	0,000100	0,01	0,937	0,01
<b>V*r</b>	1	0,000900	0,000900	0,000900	0,06	0,813	0,095
<b>f*ap</b>	1	0,009025	0,009025	0,009025	0,58	0,458	0,96
<b>f*r</b>	1	0,108900	0,108900	0,108900	7,05	0,020	11,60
<b>ap*r</b>	1	0,000400	0,000400	0,000400	0,03	0,875	0,043
<b>Error</b>	13	0,200783	0,200783	0,015445			21,39
<b>Total</b>	27	0,938586					100

• **Modèle général de la rugosité dz surface**

Le modèle de la rugosité (Ra) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions, peut s'écrire comme suit :

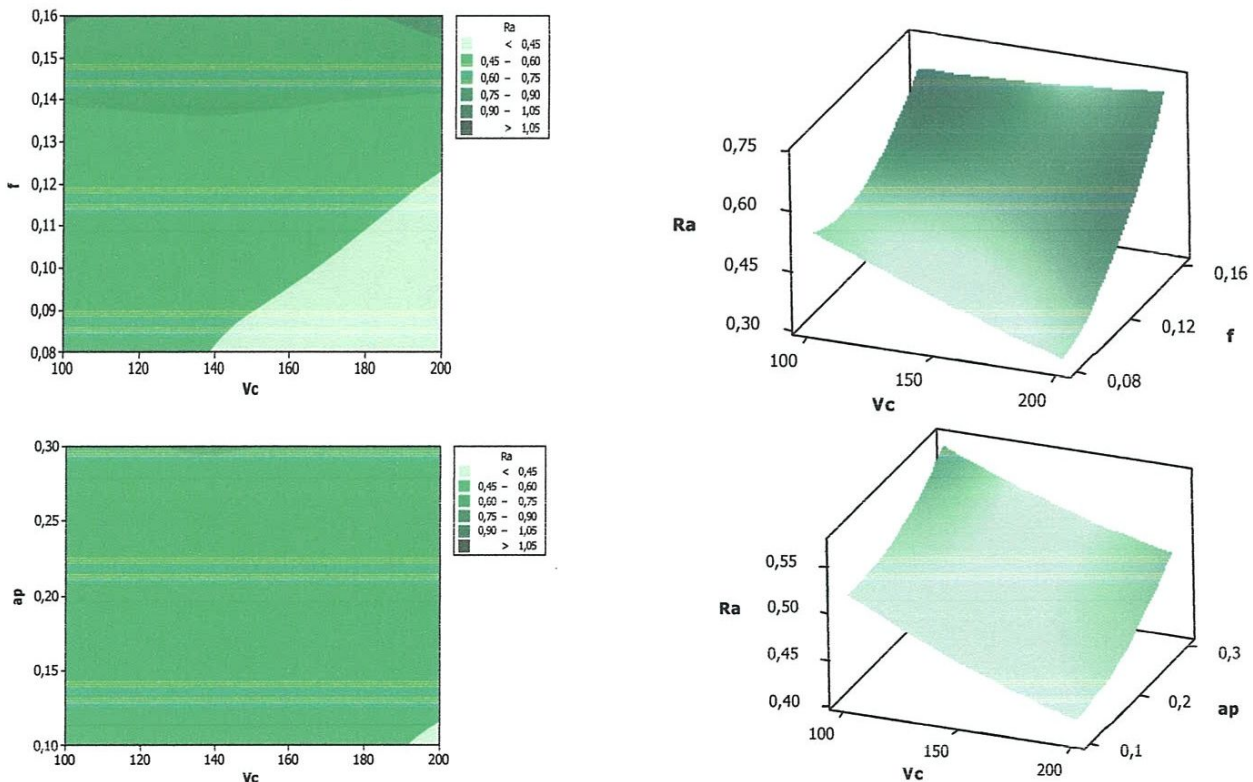
$$Ra = 0,88625 - 0,00676667 Vc + 1,125 f + 0,65 ap + 0,0458333 r + 3e-006 Vc*Vc + 0,0325 Vc*f + 0,001 Vc*ap + 0,00075 Vc*r + 50,7812 f*f - 11,875 f*ap - 10,3125 f*r + 1,625 ap*ap + 0,25 ap*r + 0,265625 r*r..... (III-3)$$

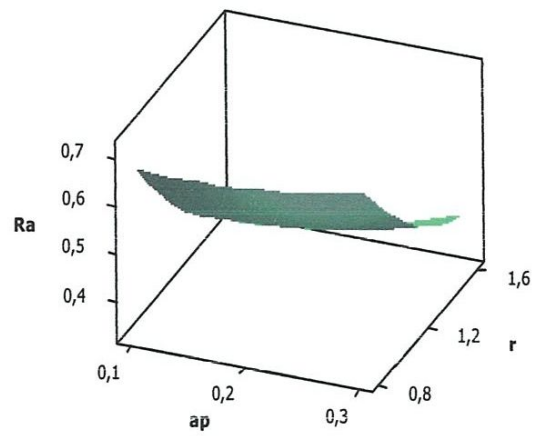
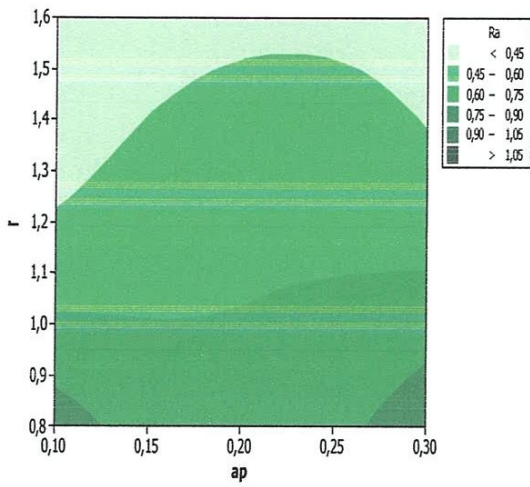
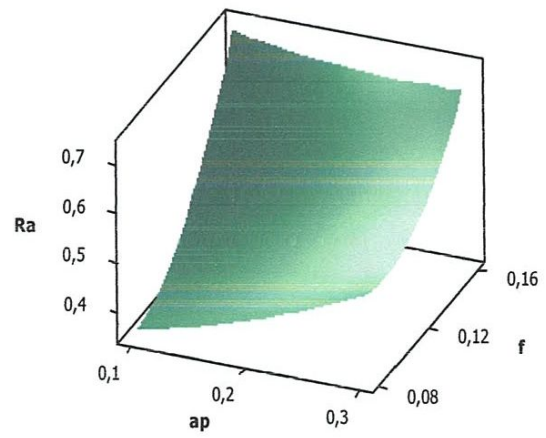
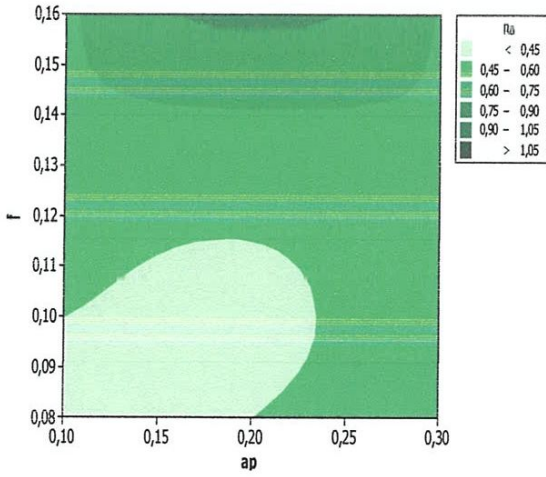
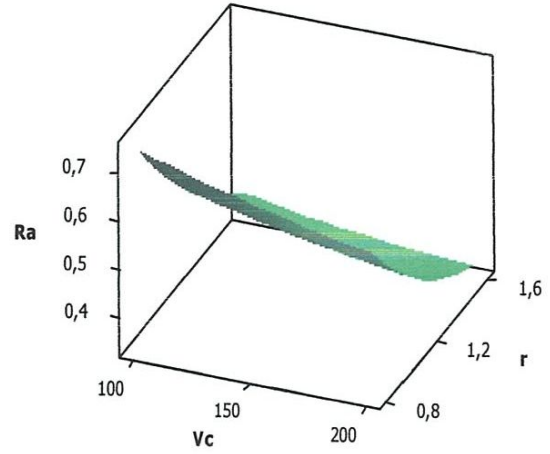
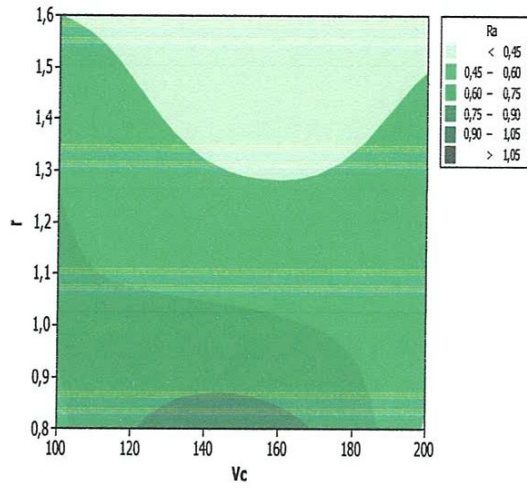
La valeur du coefficient de détermination pour le modèle de rugosité (Ra) est :  $R^2=78,61\%$ .

**III.b.1.2.1.1:Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour**

La réponse de la rugosité de surface (Ra) (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (figure III-11). Cette figure montre que la pente du rayon du bec de l'outil (r) est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité (Ra), suivi par l'avance (f), la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap).

Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.





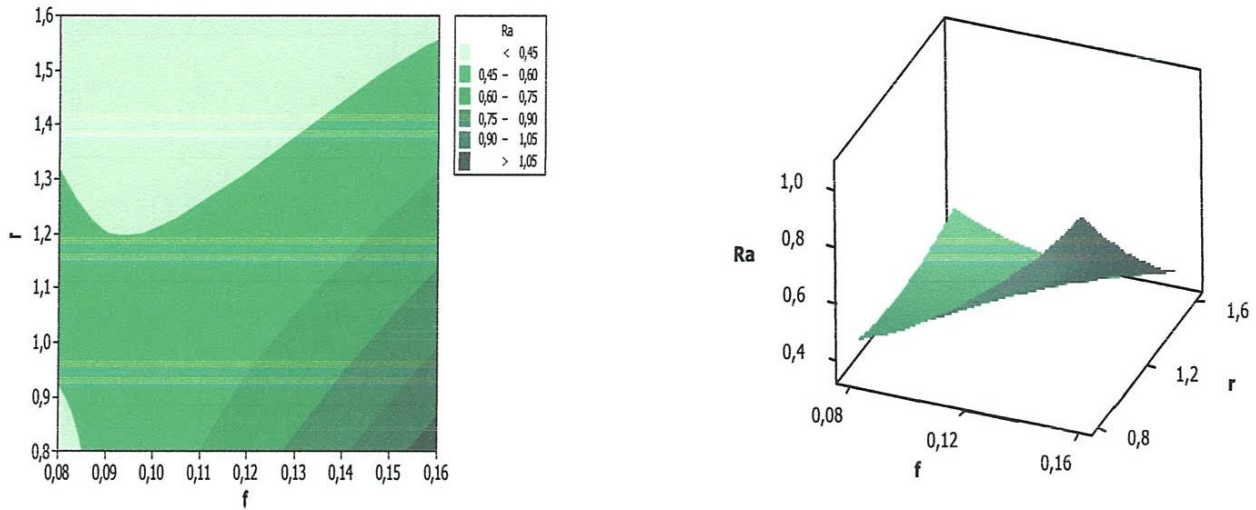


Figure III-11 : Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour pour Ra

### III.b.1.2.1.2: Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La figure (III-12) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité (Ra). On remarque que le rayon du bec de l'outil (r) est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ra) car il a la plus grande pente, il est suivi par l'avance. Cela confirme les résultats de l'ANOVA (tableau III.2).

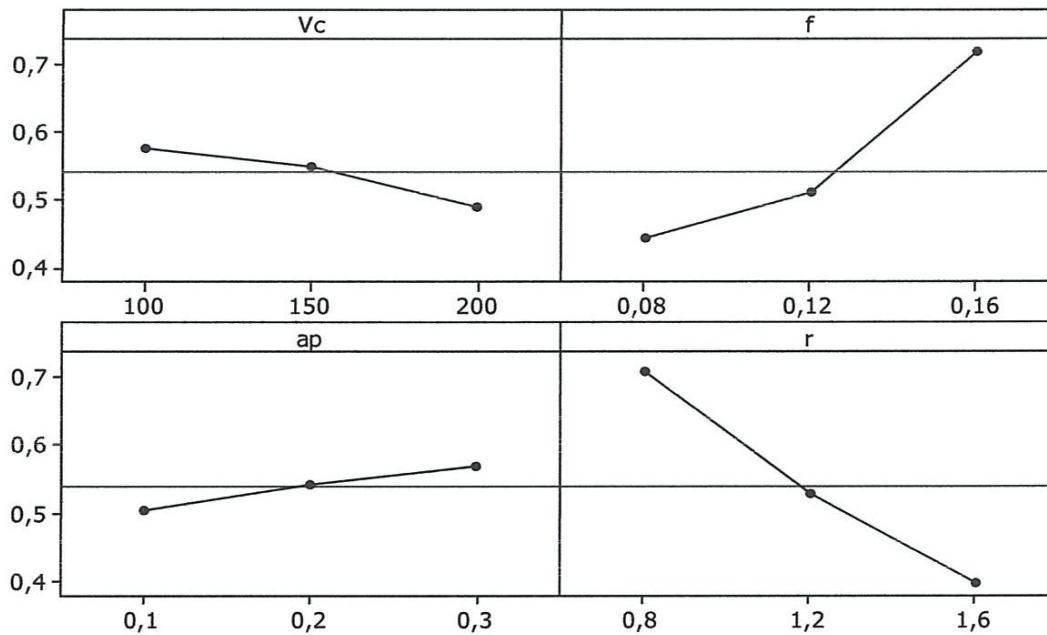


Figure III-12: Graphique des effets principaux pour Ra

La figure (III-13) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur la rugosité Ra. Cette figure montre qu'il y a des interactions entre les facteurs ( $r \cdot f$ ,  $V_c \cdot a_p$ ,  $V_c \cdot r$ ,  $f \cdot a_p$  et  $a_p \cdot r$ ). On remarque que toutes les lignes ne sont pas parallèles. Donc il existe des interactions entre les paramètres de coupe.

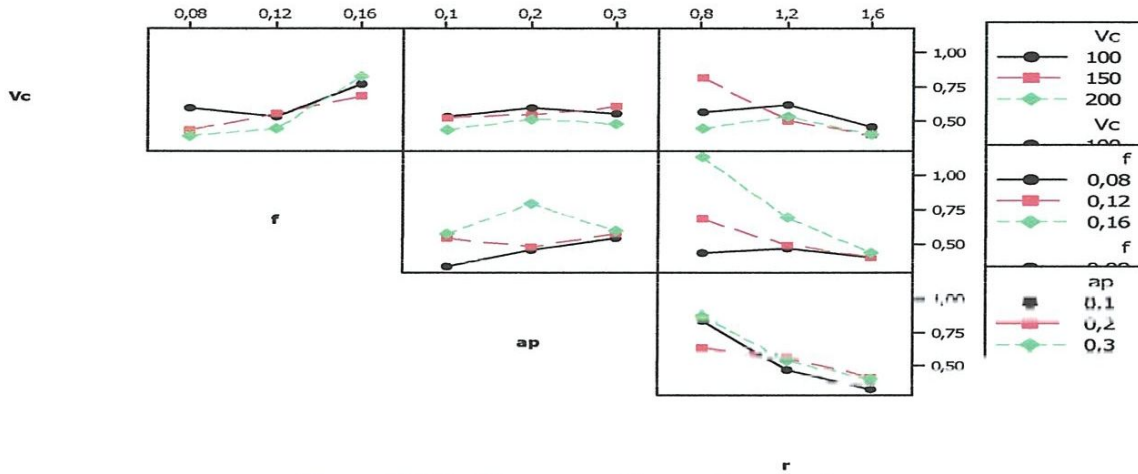


Figure III-13: Diagramme d'interaction pour Ra.

### III.b.1.2.1.3: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La figure (III-14) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de la rugosité (Ra). L'analyse de la figure (III-14) montre qu'il y a une adéquation entre les deux courbes de rugosité Ra (expérimentale et prédite).

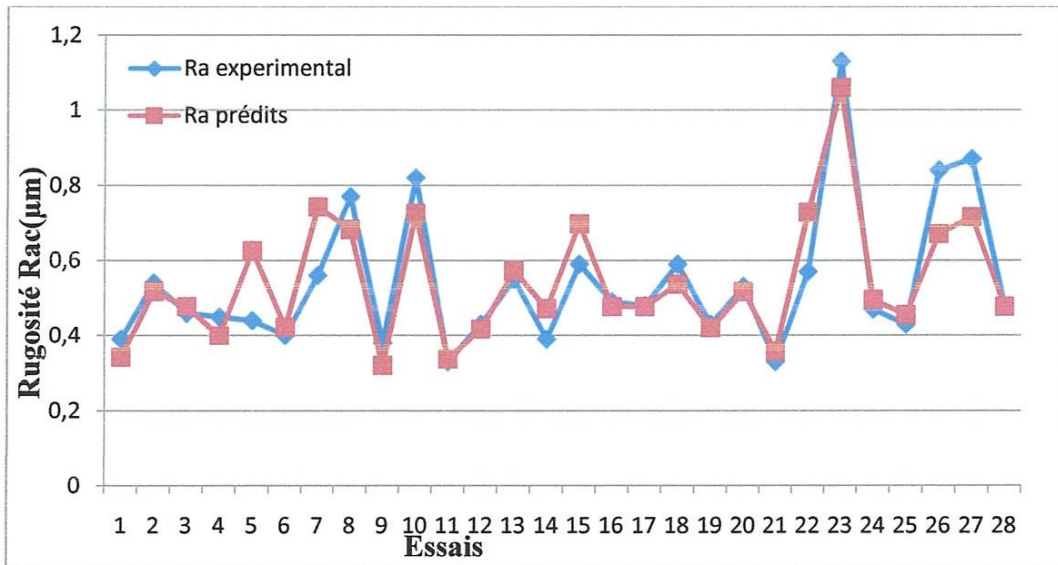


Figure III-14 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites du Ra.

Le tableau (III-3) sont présentées les valeurs expérimentales et prédites de la rugosité de surface (Ra) et le pourcentage d'erreur entre eux.

L'analyse de cette comparaison montre que l'erreur minimale (0,52%) est enregistrée à l'essai 17, et que l'erreur maximale (-42,23%) est enregistrée à l'essai 5.

**Tableau III-3:** Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites de Ra.

Essai	Ra expérimental	Ra prédit	Erreur
1	0,39	0,3425	12,1794
2	0,54	0,5175	4,1666
3	0,46	0,4775	-3,8043
4	0,45	0,3991	11,2962
5	0,44	0,6258	-42,2348
6	0,4	0,4833	-5,5208
7	0,56	0,7425	-32,5892
8	0,77	0,682	11,4177
9	0,38	0,3204	15,6798
10	0,82	0,7254	11,5345
11	0,33	0,337	-2,1464
12	0,43	0,417	3,0038
13	0,55	0,572	-4,0151
14	0,39	0,472	-21,047
15	0,59	0,6975	-18,2203
16	0,49	0,4775	2,551
17	0,48	0,4775	0,5208
18	0,59	0,537	8,9689
19	0,43	0,4204	2,2286
20	0,53	0,517	2,4371
21	0,33	0,3575	-8,3333
22	0,57	0,7275	-27,6315
23	1,13	1,0604	6,1578
24	0,47	0,4954	-5,4078
25	0,43	0,4554	-5,9108
26	0,84	0,6704	20,1884
27	0,87	0,7154	17,7681
28	0,59	0,6975	-18,2203

### III.b.2: Modèles des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe

#### III.b.2.1:1. Résultats des expériences

Dans le tableau (III-4) sont présentées les valeurs expérimentales des composantes de l'effort de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ). Ces valeurs sont obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de 28 essais avec 4 facteurs de 3 niveaux (un plan d'expérience composite centré (CCD)).

**Tableau III-4: Résultats des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe**

Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	r (mm)	Fa (N)	Fr (N)	Fv (N)
1	200	0,12	0,2	1,6	57,456	147,56	139,68
2	150	0,08	0,3	1,2	68,64	168,87	176,54
3	150	0,12	0,2	1,2	55,092	141,44	125,17
4	100	0,12	0,2	1,6	89,28	207,06	200,7
5	200	0,12	0,2	0,8	28,728	86,8	83
6	150	0,12	0,3	1,6	107,84	265,71	283,02
7	100	0,12	0,2	0,8	44,64	121,8	120,28
8	100	0,16	0,2	1,2	66,84	168,74	163,97
9	200	0,08	0,2	1,2	36,96	91,65	73,19
10	200	0,16	0,2	1,2	55,092	137,93	127,06
11	150	0,12	0,1	1,6	49,44	119	105,1
12	150	0,16	0,2	1,6	85,6	200,94	196,1
13	100	0,12	0,3	1,2	88,56	202,67	199,3
14	150	0,08	0,2	1,6	59,52	149,6	155,72
15	150	0,16	0,3	1,2	86,4	212,29	196,17
16	150	0,12	0,2	1,2	55,092	141,44	125,17
17	150	0,12	0,2	1,2	55,092	141,44	127,17
18	100	0,08	0,2	1,2	56,16	137,28	129,52
19	200	0,12	0,1	1,2	33,24	73,06	74,88
20	100	0,12	0,1	1,2	45,36	106,08	104,27
21	150	0,08	0,1	1,2	32,88	78	81,64
22	150	0,16	0,1	1,2	48	107,77	81,51
23	150	0,16	0,2	0,8	42,8	118,2	107
24	200	0,12	0,3	1,2	57,6	150,41	138,1
25	150	0,08	0,2	0,8	32	62,9	131,3
26	150	0,12	0,1	0,8	24,72	70	63
27	150	0,12	0,3	0,8	53,92	156,3	165,6
28	150	0,12	0,2	1,2	55,092	141,44	125,17



### III.b.2.2: Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique

#### III.b.2.2.1: Analyse de la variance de Fa, Fr et Fv en fonction de Vc, f, ap, r

Les tableaux III-5(a, b et c) présentent l'analyse des variances (ANOVA) des trois composantes de l'effort de coupe. Ces tableaux prouvent que les effets de la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f), la profondeur de coupe (ap) et le rayon du bec de l'outil (r) sur les composantes de l'effort de coupe axiale (Fa), l'effort de coupe radial (Fr) et l'effort de coupe tangentiel (Fv) sont significatives car leur pourcentage de contribution est supérieur à l'erreur associée.

**Tableau III-5:** Résultats de l'analyse de variance des efforts de coup : a) Fa, b) Fr et c) Fv

(a)	Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
	Regression	14	11079,7	11079,7	791,41	89,64	0,000	98,97
	Vc	1	1235,5	1235,5	1235,54	139,94	0,000	11,03
	f	1	809,7	809,7	809,7	91,71	0,000	7,23
	ap	1	4382,3	4382,3	4382,31	496,35	0,000	39,14
	r	1	4119,1	4119,1	4119,14	466,54	0,000	36,79
	Vc*Vc	1	27,8	11,4	11,37	1,29	0,277	0,24
	f*f	1	4	0	0	0	0,997	0,03
	ap*ap	1	59,6	61,8	61,79	7	0,02	0,53
	r*r	1	2,4	2,4	2,36	0,27	0,614	0,02
	Vc*f	1	13,9	13,9	13,88	1,57	0,232	0,12
	Vc*ap	1	88,7	88,7	88,74	10,05	0,007	0,79
	Vc*r	1	63,3	63,3	63,3	7,17	0,019	0,56
	f*ap	1	1,7	1,7	1,74	0,2	0,664	0,01
	f*r	1	58,4	58,4	58,37	6,61	0,023	0,52
	ap*r	1	213,2	213,2	213,16	24,14	0,000	1,90
	Error	13	114,8	114,8	8,83			1,02
	Total	27	11194,5					100

Les résultats présentés dans le tableau III.5-a montrent que la profondeur de coupe ( $a_p$ ) est le facteur le plus significatif sur ( $F_a$ ) car sa contribution est de 39,14% suivi par le rayon du bec de l'outil ( $r$ ) avec une contribution 36,79%, les termes ( $V_c$ ,  $f$ ) ont une contribution 11,03% et 7,23% respectivement. Pour les autres termes la contribution est inférieure 2%.

Le tableau III.5-b montre que la profondeur de coupe ( $a_p$ ) est le facteur le plus significatif sur ( $f_r$ ) avec une contribution 47,88%, suivi par le rayon du bec de l'outil ( $r$ ) avec une contribution 29,63%, suivi par les termes ( $f$ ,  $V_c$  et  $a_p*r$ ) avec des contributions 8,75%, 8,66% et 1,44% respectivement.

(b)	Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
	Regression	14	61936,7	61936,7	4424,1	47,90	0,000	98,09
	$V_c$	1	5470,7	5470,7	5470,7	59,23	0,000	8,66
	$f$	1	5528,5	5528,5	5528,5	59,86	0,000	8,75
	$a_p$	1	30234,5	30234,5	30234,5	327,34	0,000	47,88
	$r$	1	18712,7	18712,7	18712,7	202,60	0,000	29,63
	$V_c*V_c$	1	271,2	218,3	218,3	2,36	0,148	0,42
	$f*f$	1	333,9	190,9	190,9	2,07	0,174	0,52
	$a_p*a_p$	1	58,6	89,3	89,3	0,97	0,343	0,09
	$r*r$	1	66,2	66,2	66,2	0,72	0,413	0,10
	$V_c*f$	1	54,9	54,9	54,9	0,59	0,454	0,08
	$V_c*a_p$	1	92,5	92,5	92,5	1,00	0,335	0,14
	$V_c*r$	1	150,1	150,1	150,1	1,62	0,225	0,23
	$f*a_p$	1	46,6	46,6	46,6	0,50	0,490	0,07
	$f*r$	1	3,9	3,9	3,9	0,04	0,840	0,006
	$a_p*r$	1	912,3	912,3	912,3	9,88	0,008	1,44
	Residual Error	13	1200,7	1200,7	92,4			1,90
	Total	27	63137,4					100

Le tableau III.5-c montre que la profondeur de coupe (ap) est le facteur le plus significatif sur (Fv) avec une contribution 52,98%, suivi par le rayon du bec de l'outil (r) avec une contribution 21,14%, suivi par les termes (Vc et f) avec des contribution 10,03% et 1,93% respectivement, l'interaction (ap\*r) de 2,14%, l'interaction (f\*r) de 1,58%.

(c)	Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
	Vc	1	6633,1	6633,1	6633,1	28,16	0,000	10,03
	ap	1	35027,6	35027,6	35027,6	148,72	0,000	52,98
	r	1	14017,9	14017,9	14017,9	59,52	0,000	21,20
	Vc*Vc	1	805,8	212,5	212,5	0,9	0,359	1,218
	f*f	1	65,9	30,9	30,9	0,13	0,723	0,09
	ap*ap	1	92	428	428	1,82	0,201	0,13
	r*r	1	2079,6	2079,6	2079,6	8,83	0,011	3,14
	Vc*f	1	94,3	94,3	94,3	0,4	0,538	0,14
	Vc *ap	1	253	253	253	1,07	0,319	0,38
	Vc*r	1	140,9	140,9	140,9	0,6	0,453	0,21
	f*ap	1	97,6	97,6	97,6	0,41	0,531	0,14
	f*r	1	1045,9	1045,9	1045,9	4,44	0,055	1,58
	ap*r	1	1418,3	1418,3	1418,3	6,02	0,029	2,14
	Residual Error	13	3061,8	3061,8	235,5			4,63
	Total	27	66112,9					100

• **Modélisation des efforts de coupes**

Les modèles des efforts de coupe ( Fa, Fr et Fv ) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions, peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}
 F_a = & 7,98817 + 0,27752 Vc - 253,217 f - 34,7667 ap + 1,59583 r - 0,000550533 \\
 & Vc*Vc + 0,9315 Vc*f - 0,942 Vc*ap - 0,1989 Vc*r - 2,70833 f*f + 165 f*ap \\
 & + 238,75 f*r + 320,917 ap*ap + 182,5 ap*r + 3,91979 r*r..... \quad \text{(III-4)}
 \end{aligned}$$

$$Fr = -85,9575 + 0,634467 Vc + 1008,54 f - 63,5 ap + 26,7542 r - 0,002413 Vc*Vc + 1,8525 Vc*f - 0,962 Vc*ap - 0,30625 Vc*r - 3525,78 f*f + 853,125 f*ap - 61,875 f*r + 385,75 ap*ap + 377,562 ap*r + 20,7578 r*r..... (III-5)$$

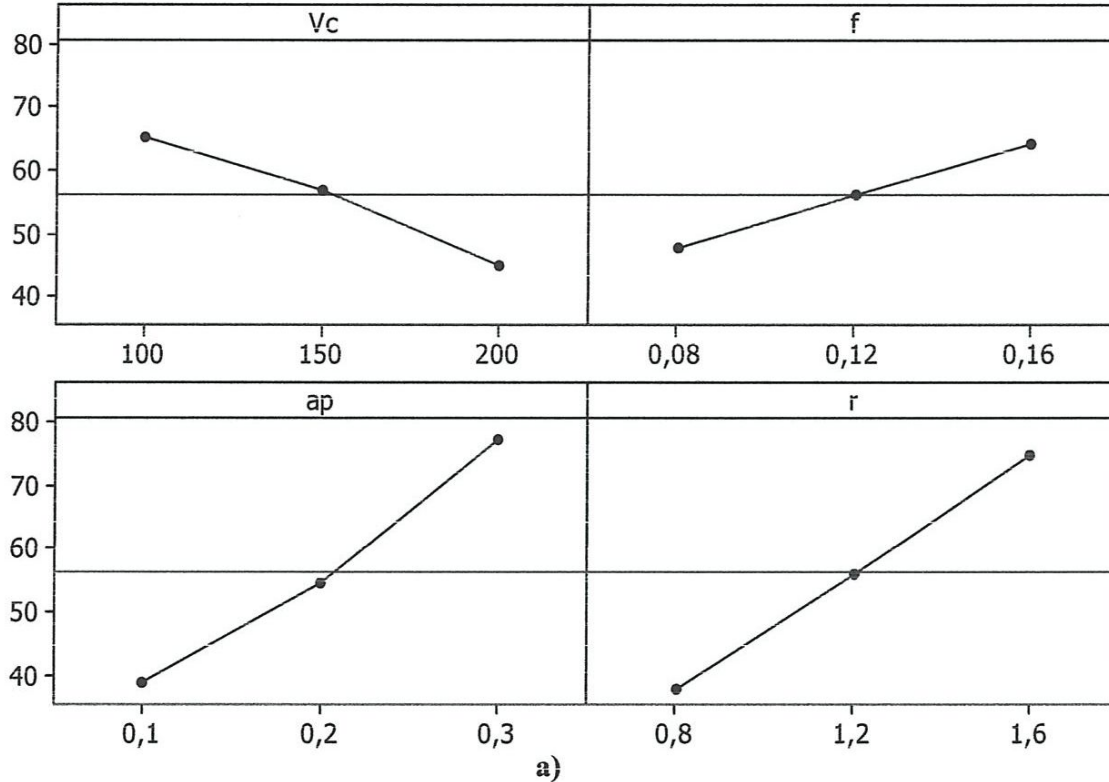
$$Fv = 353,551 + 0,626883 Vc - 1906,19 f - 272,083 ap - 364,723 r - 0,00238067 Vc*Vc + 2,4275 Vc*f - 1,5905 Vc*ap - 0,29675 Vc*r + 1418,49 f*f + 1235 f*ap + 1010,63 f*r + 844,583 ap*ap + 470,75 ap*r + 116,357 r*r..... (III-6)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des composantes de l'effort de coupe Fa, Fr et Fv sont :  $R^2 = 98,97\%$ ,  $R^2 = 98,10\%$  et  $R^2 = 95,37\%$ , respectivement.

### III.b.2.2.1.1: Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

Les graphiques des effets principaux sont présentés sur les figures III-15 (a, b et c). Ces graphiques affichent les moyennes des efforts de coupe pour chaque niveau de chaque facteur.

Une ligne horizontale représente la moyenne générale. Les effets sont les différences entre les moyennes et cette ligne de référence. L'importance de la pente relative III-15 (a, b et c) de chaque paramètre donne une information sur l'importance de l'influence de ce paramètre.



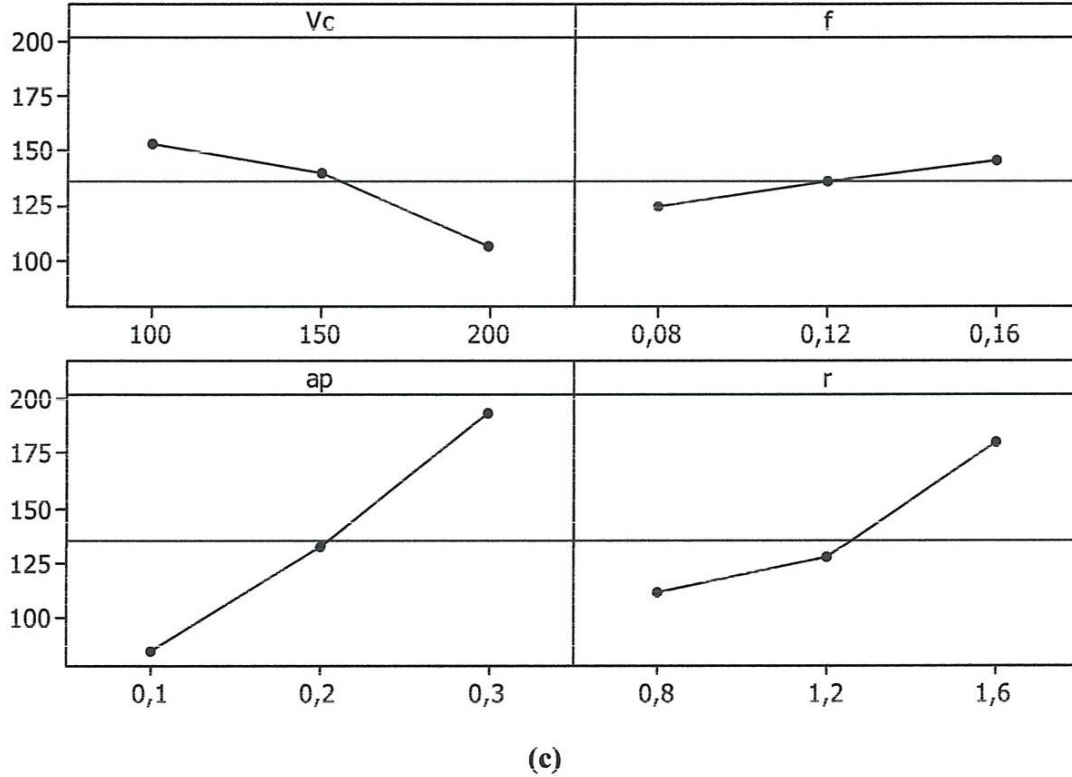
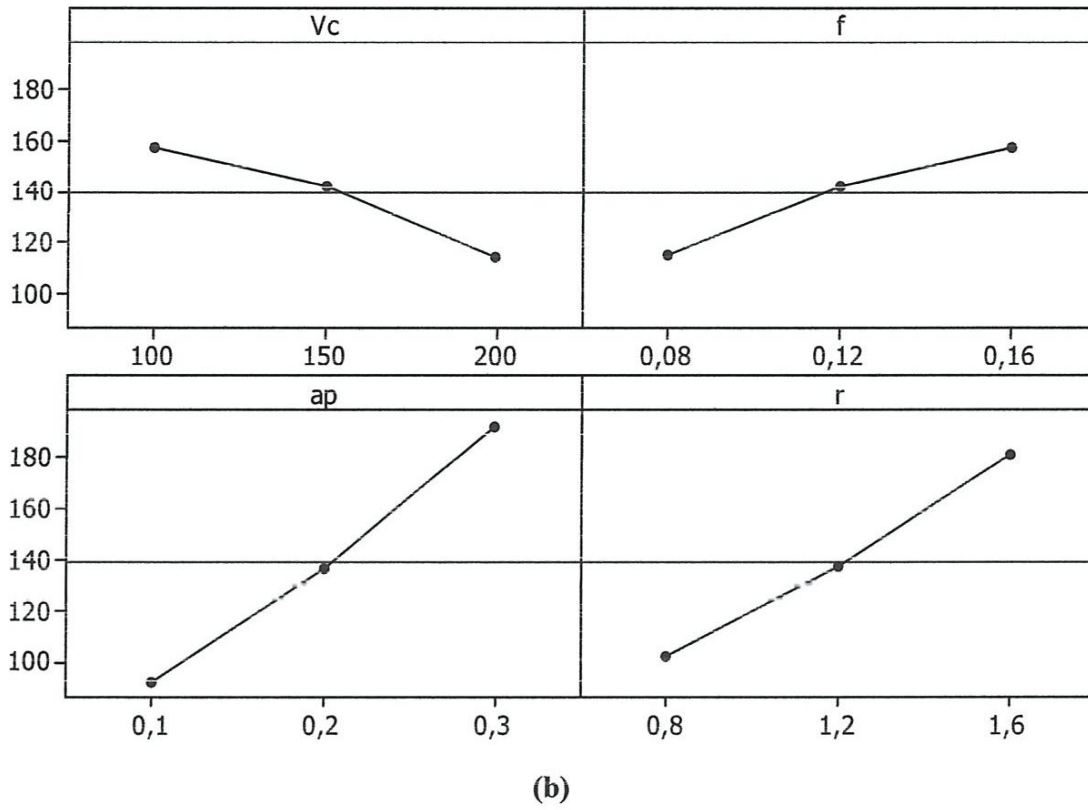
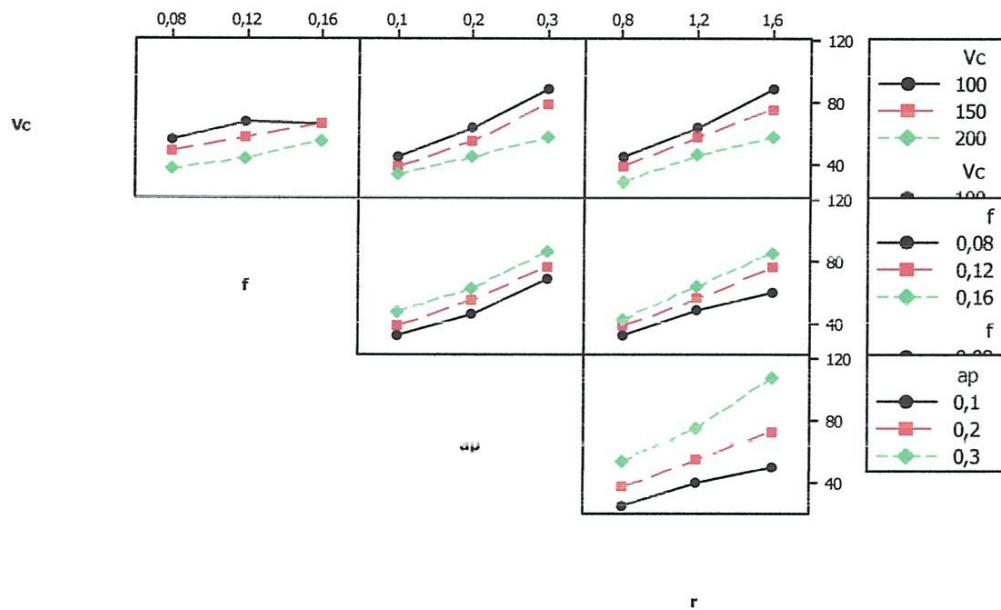
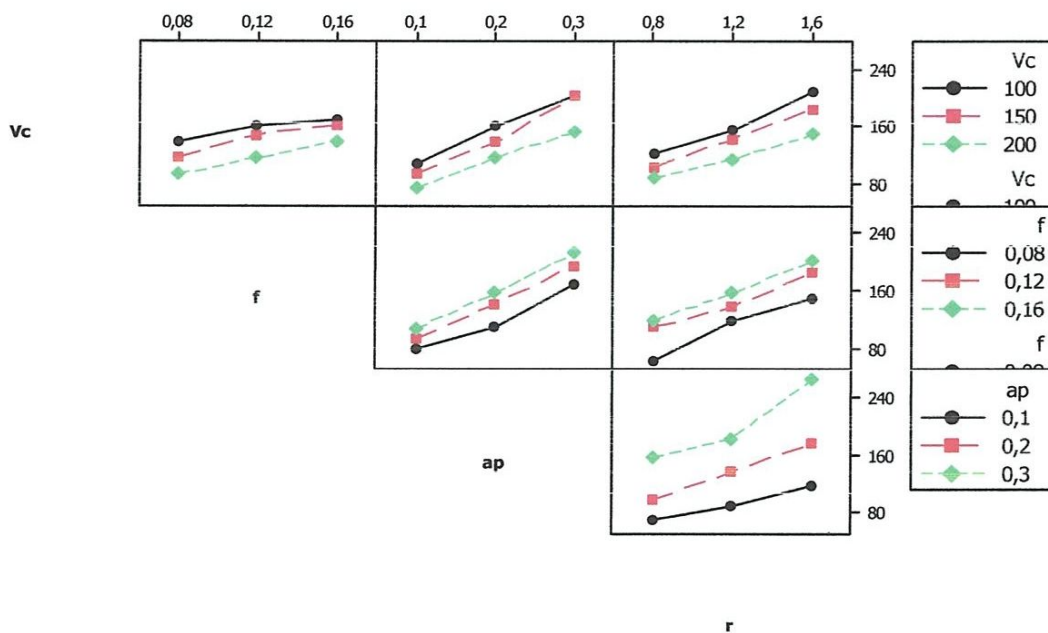


Figure III-15 : Graphique des effets principaux des efforts de coup : a) Fa,b) Fr et c) Fv

Un diagramme des interactions (figure III.16) est un diagramme des moyennes pour chaque niveau d'un facteur. Ces diagrammes sont utiles pour juger la présence d'interactions. Une interaction est présente si la réponse pour un niveau d'un facteur dépend du ou des niveaux d'autres facteurs. Dans un diagramme des interactions, les droites parallèles indiquent l'absence d'interaction. Plus les droites s'écartent de la parallèle, plus le degré d'interaction est élevé. Pour qu'il soit possible d'utiliser un diagramme des interactions, il faut que les données pour toutes les combinaisons de niveaux existent.



(a)



(b)

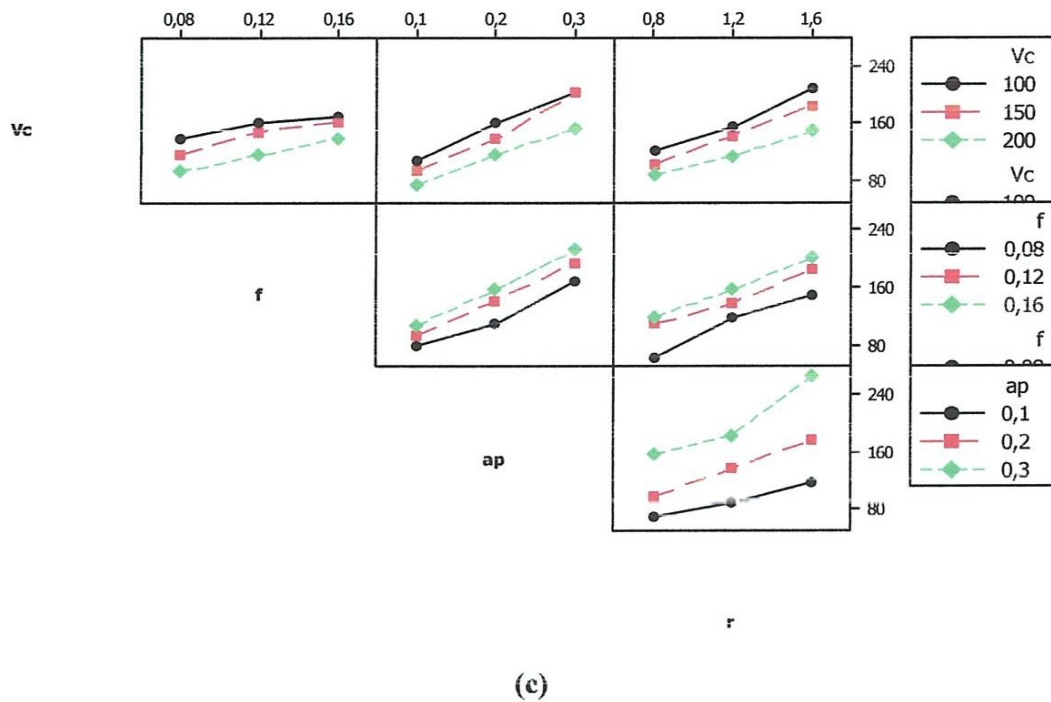
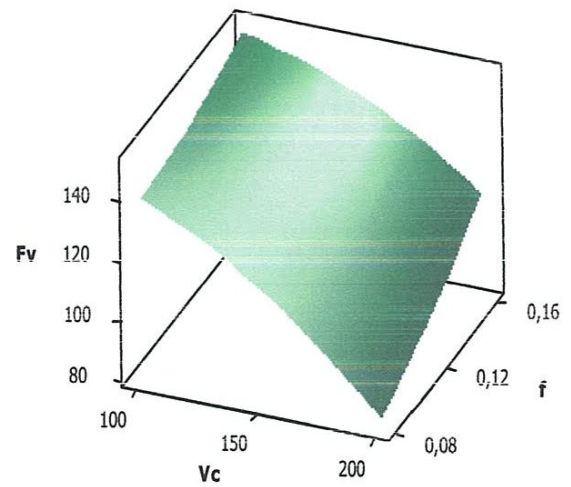
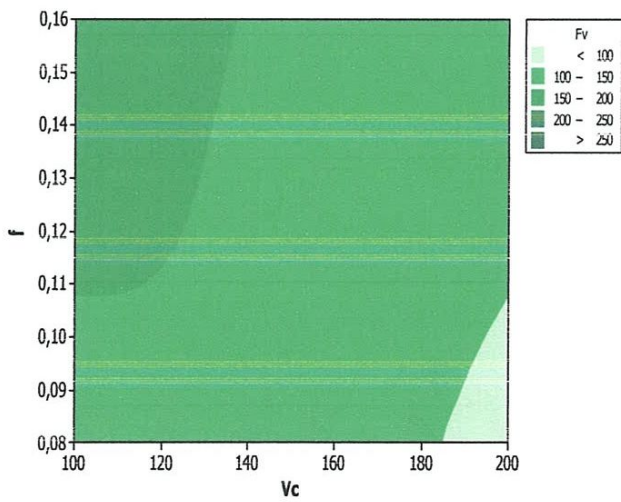
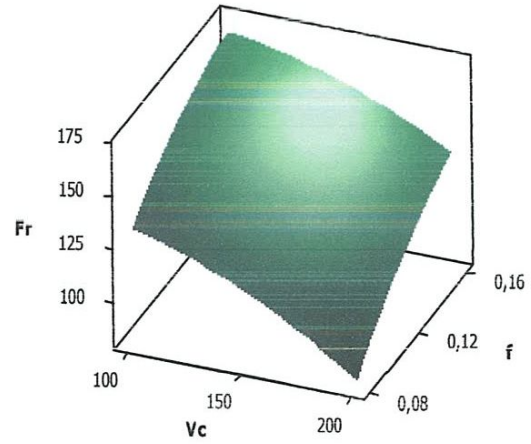
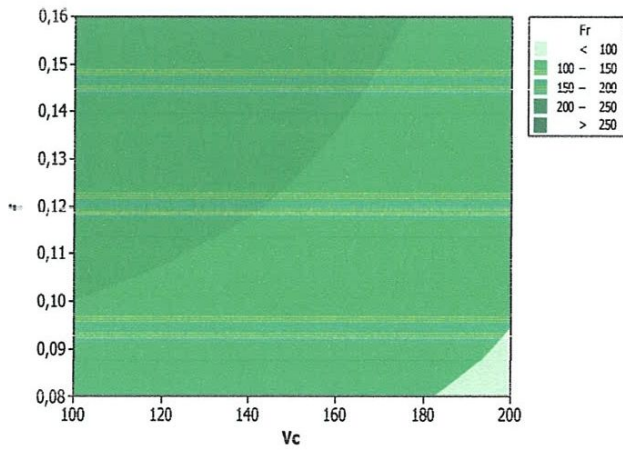
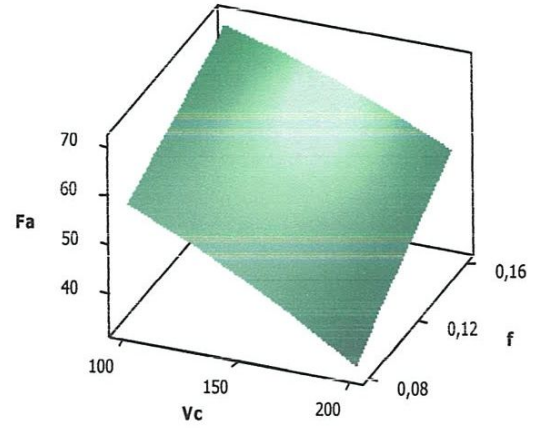
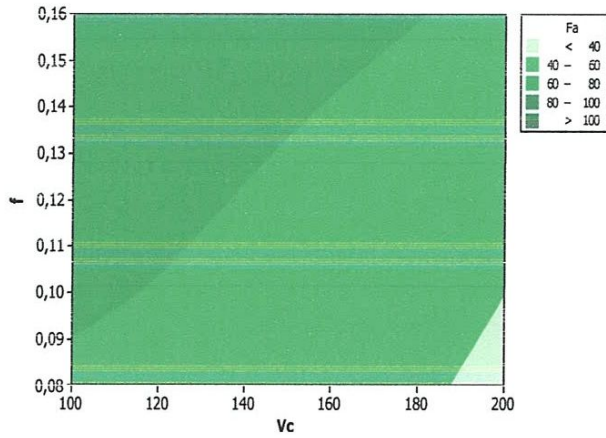


Figure III-16 : Graphique des effets principaux des efforts de coupe : a) Fa,b) Fr et c) Fv

#### IV.b.2.2.1.2:Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour

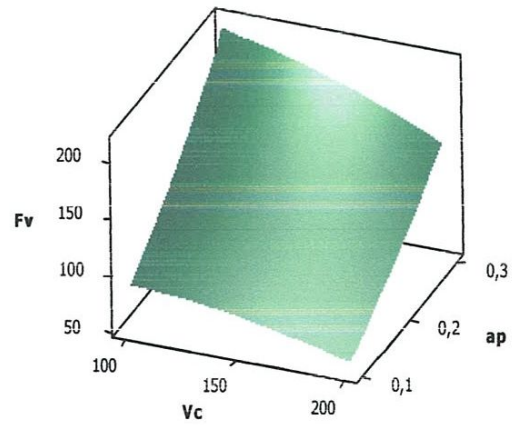
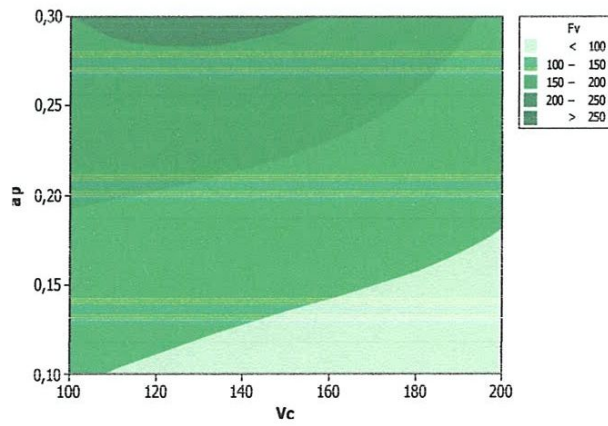
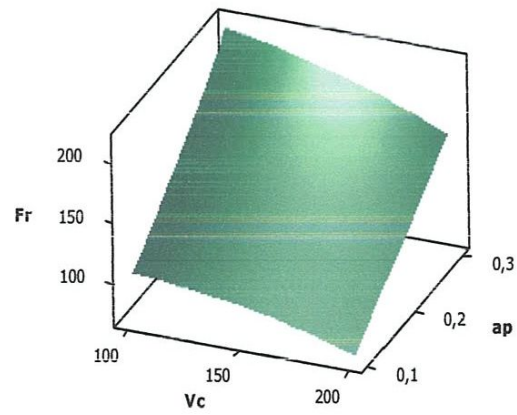
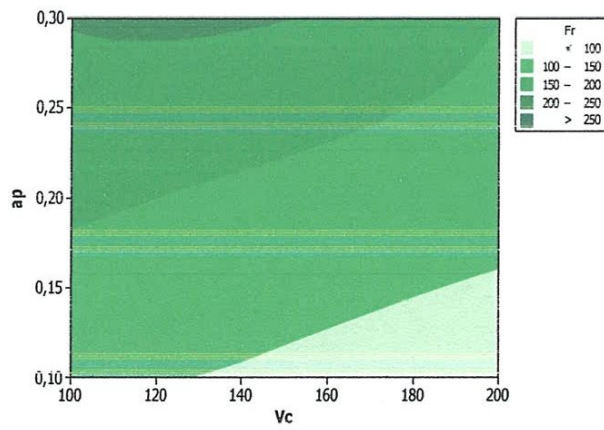
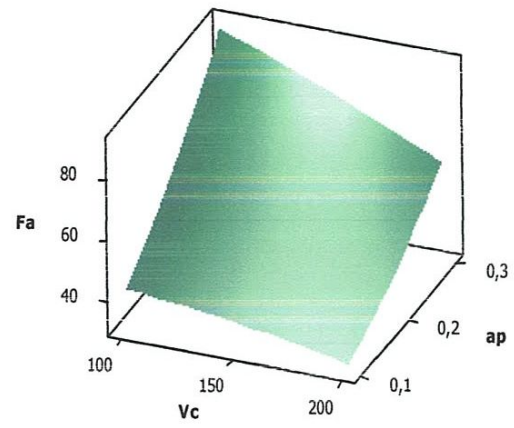
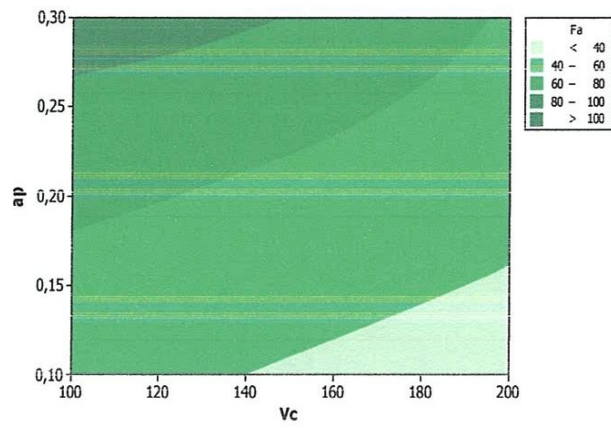
La figure III-17 (a, b, c, d, e et f) synthétise les surfaces de réponse en 3D et les graphes de contour estimées pour les efforts de coupe ( Fa, Fr et Fv ) respectivement, en fonction de la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f), la profondeur de coupe (ap) et le rayon du bec de l'outil (r). La figure III-17e, met en évidence l'impacte de la profondeur de coupe (ap) et le rayon du bec de l'outil (r) sur les efforts de coupe. L'influence de l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc) sur les efforts de coupe sont présentées sur la figure III-17a. La figure III-17b présente la surface de réponse et graphique de contours estimée efforts par rapport à la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de coupe (ap). En effet, les courbes de la surface de réponse montrent que les efforts de coupe sont plus sensibles à l'augmentation de la profondeur de coupe (ap) qu'aux autres paramètres.

Les courbes en 3D confirment les résultats des analyse des graphiques des effets principaux et des graphiques des interactions figure (III-15, III-16).

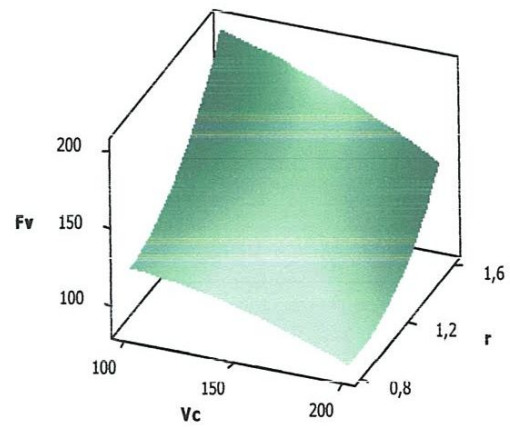
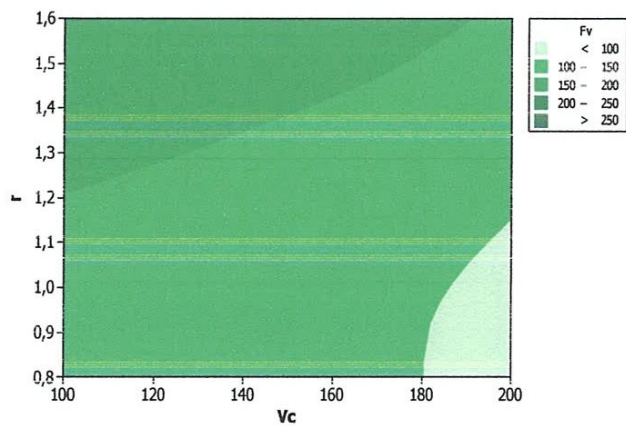
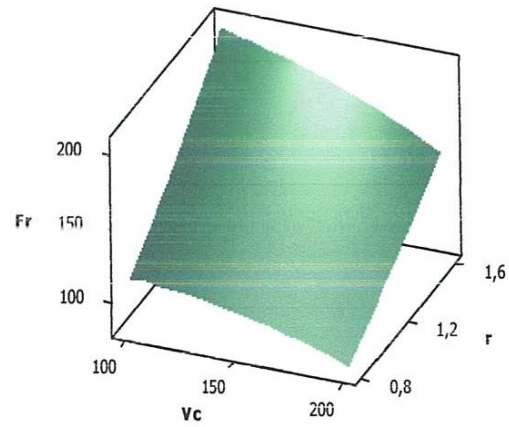
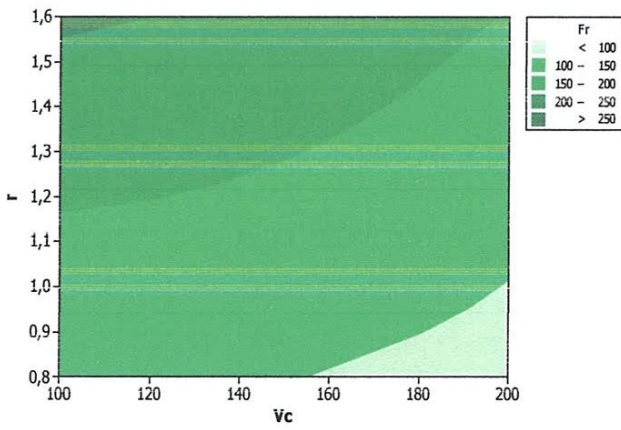
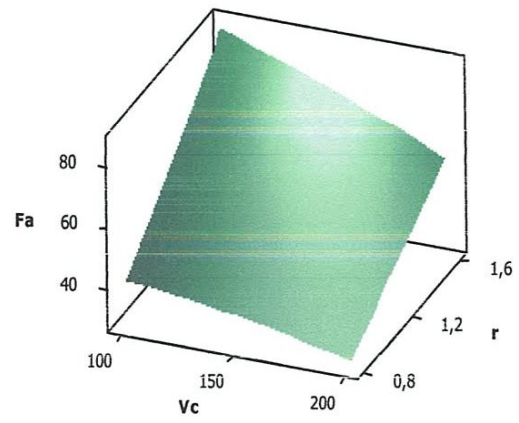
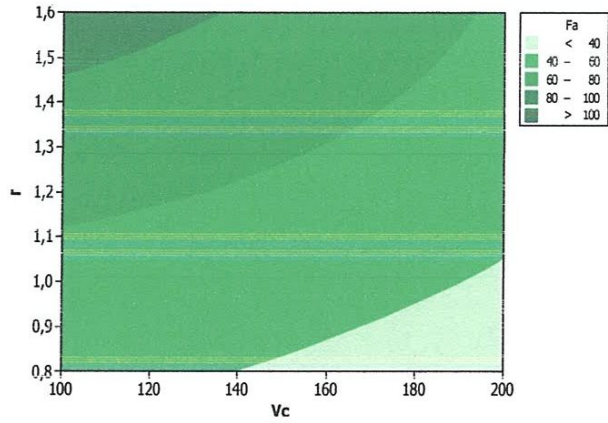


(a)

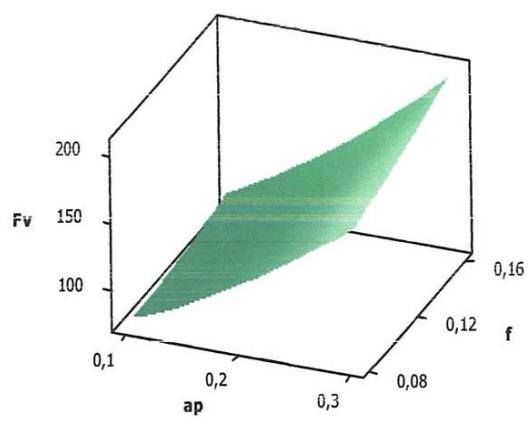
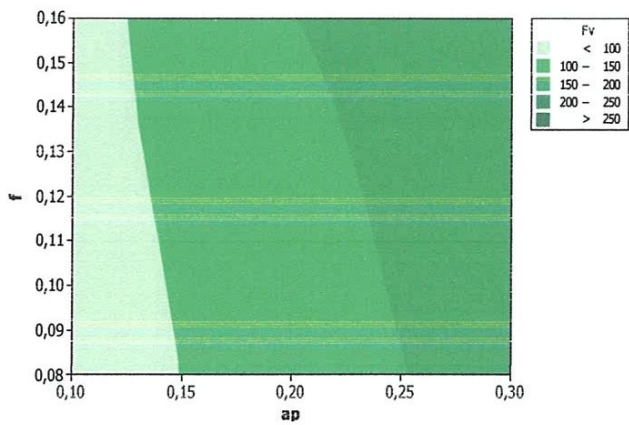
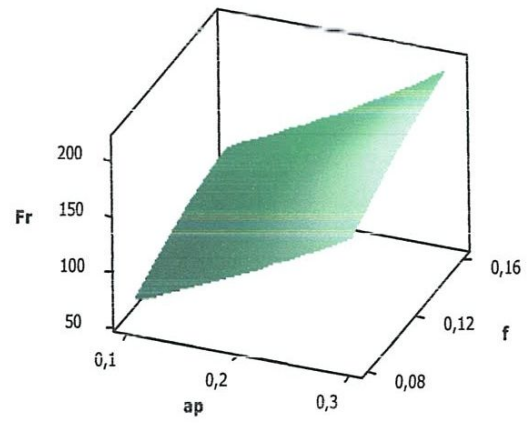
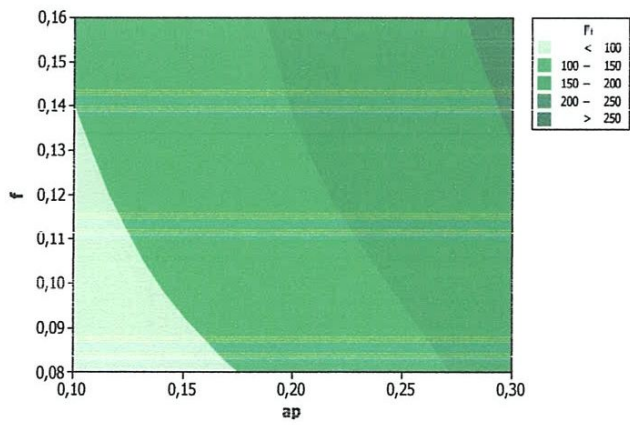
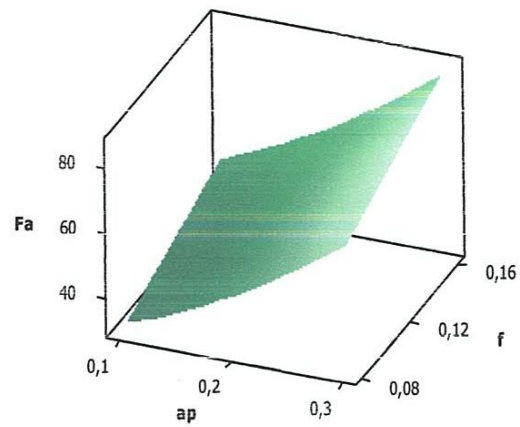
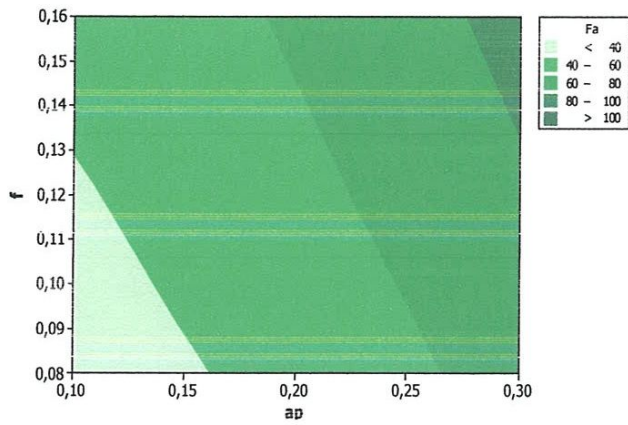




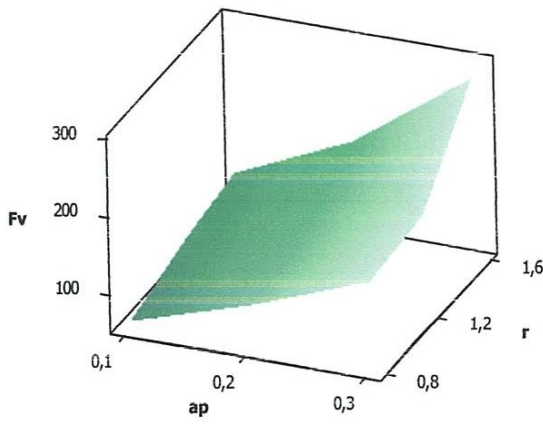
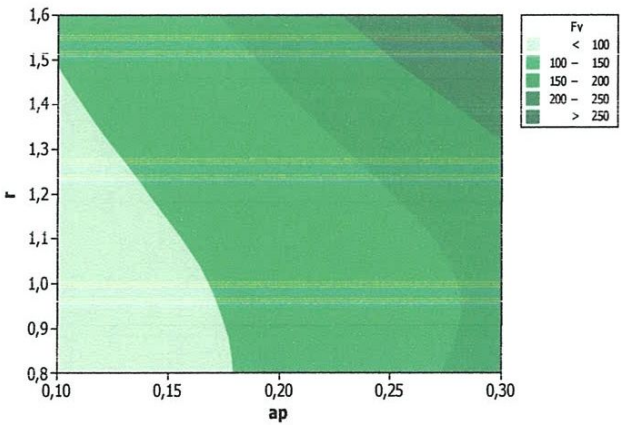
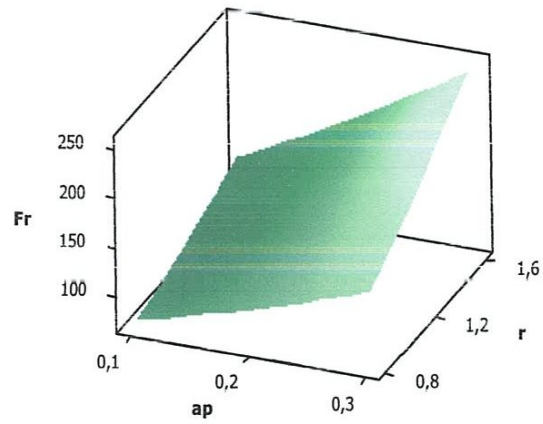
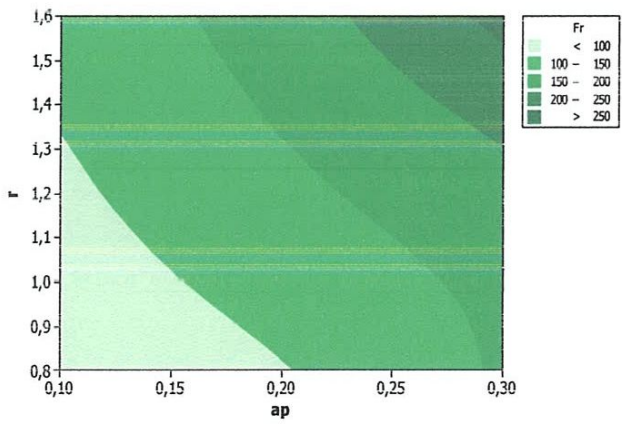
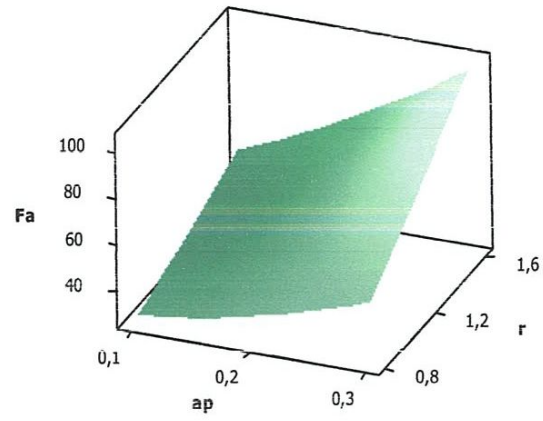
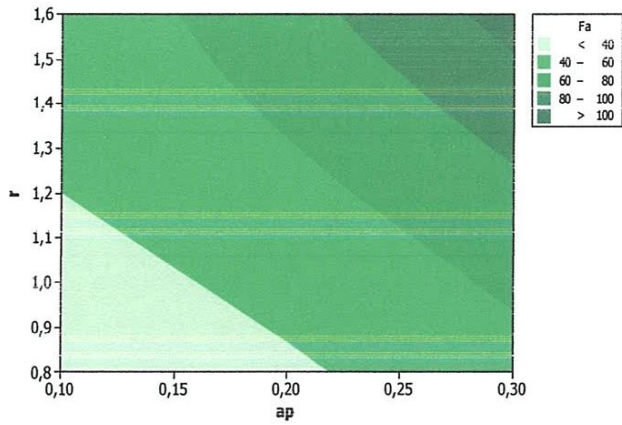
(b)



(c)



(d)



(e)

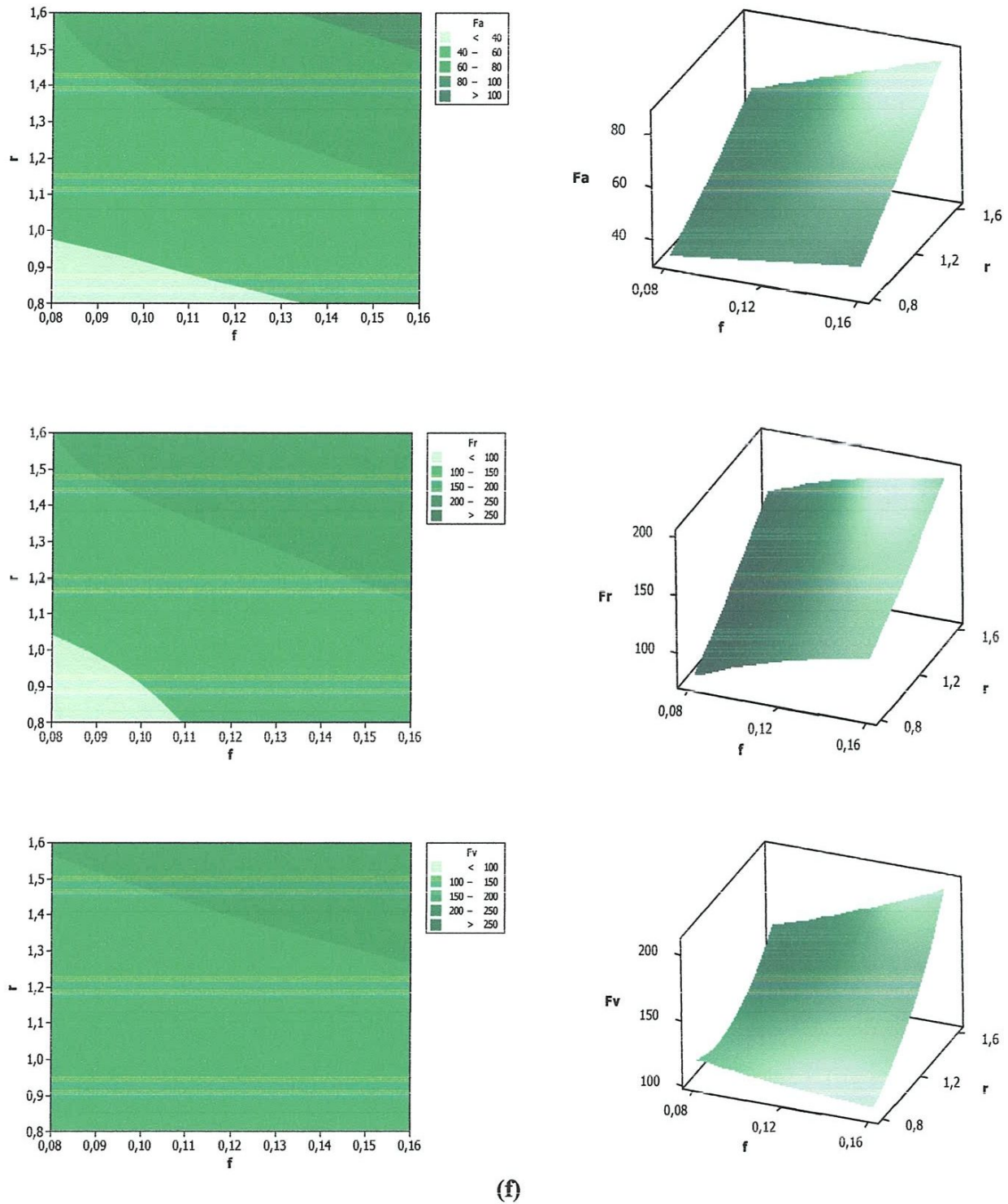


Figure III-17 (a, b, c, d, e et f) : Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour des efforts de coupe

### III.b.3-2-1-3. Comparaison entre les efforts de coup expérimentaux et prédites : a) Fa, b) Fr et c) Fv

Le tableau III-6 (a, b et c) sont présentées les valeurs expérimentales et prédites des efforts de coupe et les graphiques sur la figure III-18 (a, b et c).

**Tableau III-6:** Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédits des efforts de coupe.

(a)	Essai	Fa expérimental	Fa prédit	Erreur
	1	57,456	58,74	-2,24
	2	68,64	68,53	0,15
	3	55,092	55,09	0
	4	89,28	86,99	2,55
	5	28,728	29,64	-3,19
	6	107,84	103,86	3,68
	7	44,64	41,98	5,94
	8	66,84	70,20	-5,04
	9	36,96	33,48	9,39
	10	55,092	53,64	2,63
	11	49,44	51,04	-3,24
	12	85,6	86,27	-0,79
	13	88,56	90,89	-2,63
	14	59,52	62,20	-4,51
	15	86,4	86,28	0,13
	16	55,092	55,09	0
	17	55,092	55,09	0
	18	56,16	57,50	-2,39
	19	33,24	32,37	2,59
	20	45,36	43,25	4,64
	21	32,88	31,63	3,79
	22	48	46,74	2,62
	23	42,8	41,58	2,84
	24	57,6	61,17	-6,21
	25	32	32,79	-2,47
	26	24,72	28,59	-15,65
	27	53,92	52,21	3,16
	28	55,092	55,09	0

L'analyse de cette comparaison montre que les erreurs minimales pour les trois composantes de l'effort de coupe (Fa, Fr et Fv) sont de (00%, 00%, et 0,39%) sont

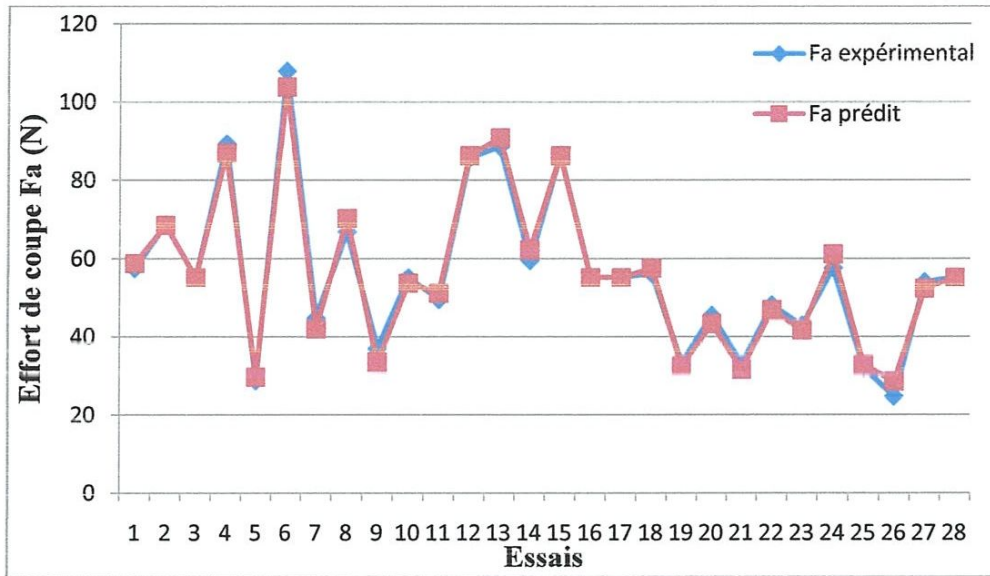
enregistrées aux essais (3, 3 et 28) respectivement et que les erreurs maximales (-15,65%, -22,69%, et -32,31%) sont enregistrées aux essais (26, 25 et 26) respectivement.

(b)	Essai	Fr expérimental	Fr prédit	Erreur
	1	147,56	150,74	-2,15
	2	168,87	164,97	2,30
	3	141,44	141,44	0
	4	207,06	205,69	0,65
	5	86,8	84,012	3,21
	6	265,71	253,40	4,63
	7	121,8	114,46	6,02
	8	168,74	168,87	-0,08
	9	91,65	83,24	9,17
	10	137,93	133,58	3,15
	11	119	122,81	-3,20
	12	200,94	199,08	0,92
	13	202,67	215,62	-6,39
	14	149,6	158,13	-5,70
	15	212,29	214,72	-1,14
	16	141,44	141,44	0
	17	141,44	141,44	0
	18	137,28	133,35	2,85
	19	73,06	72,52	0,72
	20	106,08	105,61	0,44
	21	78	71,40	8,44
	22	107,77	107,51	0,23
	23	118,2	122,08	-3,28
	24	150,41	163,29	-8,56
	25	62,9	77,17	-22,69
	26	70	74,03	-5,76
	27	156,3	144,22	7,72
	28	141,44	141,44	0

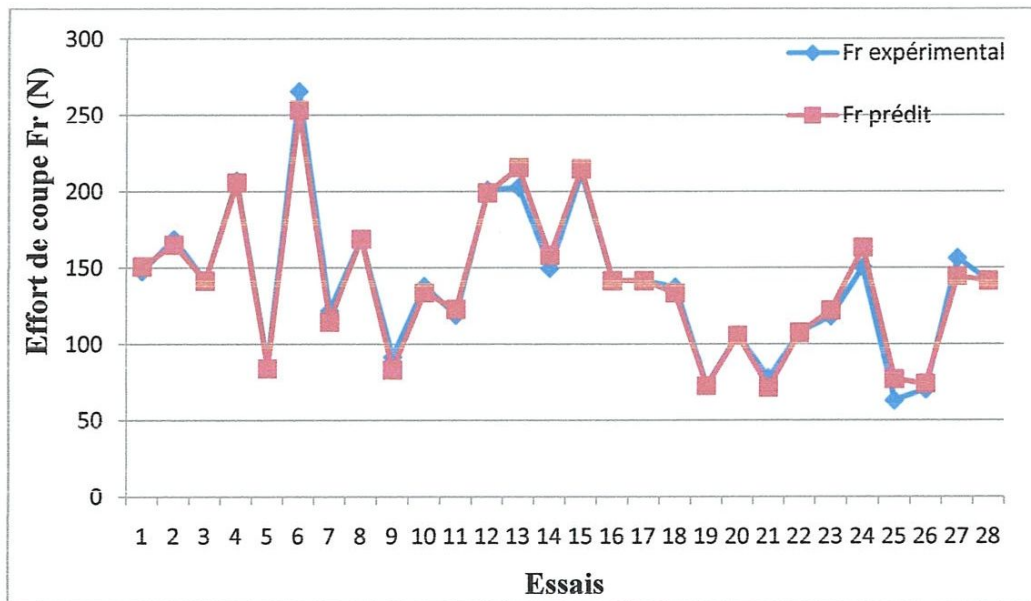
(c)	Essai	Fv expérimental	Fv prédit	Erreur
	1	139,68	143,06	-2,42
	2	176,54	175,14	0,78
	3	125,17	125,67	-0,39
	4	200,7	201,95	-0,62
	5	83	86,58	-4,31
	6	283,02	259,76	8,21
	7	120,28	121,73	-1,20
	8	163,97	150,96	7,92
	9	73,19	83,29	-13,80
	10	127,06	113,65	10,54
	11	105,1	114,05	-8,519
	12	196,1	207,23	-5,67
	13	199,3	213,65	-7,20
	14	155,72	154,24	0,95
	15	196,17	205,67	-4,84
	16	125,17	125,67	-0,39
	17	127,17	125,67	1,17
	18	129,52	140,02	-8,11
	19	74,88	58,57	21,77
	20	104,27	89,69	13,97
	21	81,64	76,97	5,716
	22	81,51	87,74	-7,64
	23	107	106,53	0,43
	24	138,1	150,72	-9,14
	25	131,3	118,22	9,95
	26	63	83,35	-32,31
	27	165,6	153,75	7,15
	28	125,17	125,67	-0,39



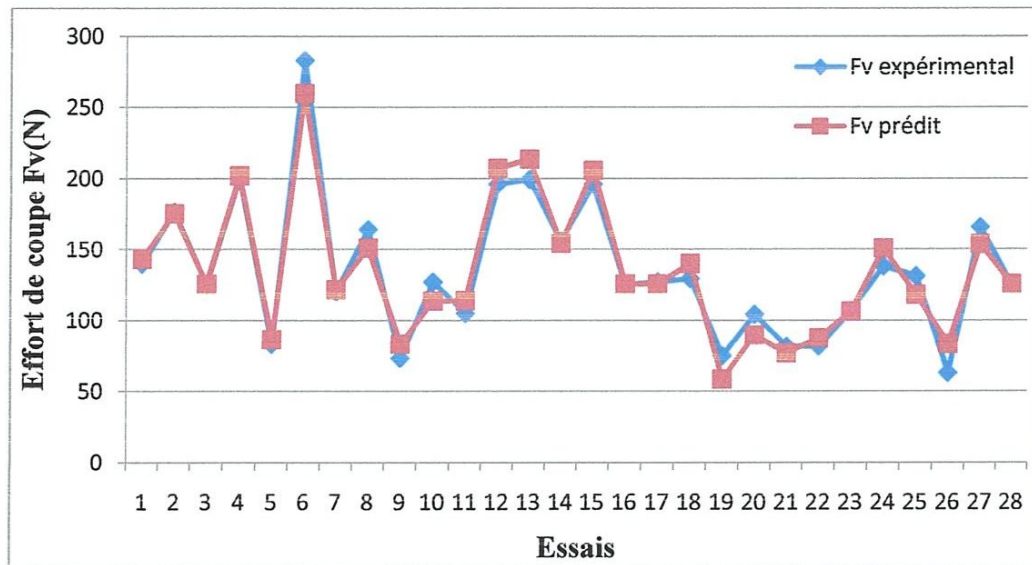
Les figures III-18 (a, b, et c), montrent que les valeurs expérimentales et prédites sont très proche.



(a)



(b)



(c)

**Figure III-18** : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour les efforts de coupe (a) Fa, (b) et Fr(c) Fv.

#### III.b.4.Optimisation

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (MSR) a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum.

L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface ( $Ra$ ) et les composantes de la force de coupe ( $Fa$ ,  $Fr$  et  $Fv$ ) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface ( $Ra$ ) et les efforts de coupe ( $Fa$ ,  $Fr$  et  $Fv$ ).

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective,  $F(x)$ , est définie comme suit [15]:

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

$F(x) - -DF$

Où  $d_i$  est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et  $w_i$  est la fonction de pondération de  $d_i$ . Pour différent objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité  $d_i$  est définie dans différentes formes. Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de  $T_i$ , la désirabilité  $d_i$  est :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$d_i = \left[ \frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (III.10)$$

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i$$

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  $F(x)$ .

### III.b.4.1:Optimisation des conditions de coupe pour : $Ra$ , $Fa$ , $Fr$ et $Fv$ .

Le tableau III-7 présente les conditions d'optimisations des paramètres de coupe sur la rugosité ( $Ra$ ) et sur les efforts de coupe ( $Fa$ ,  $Fr$  et  $Fv$ ) lors de tournage de l'Inconel 718 par la céramique composite UC6/0.

**Tableau III-7** Conditions d'optimisation

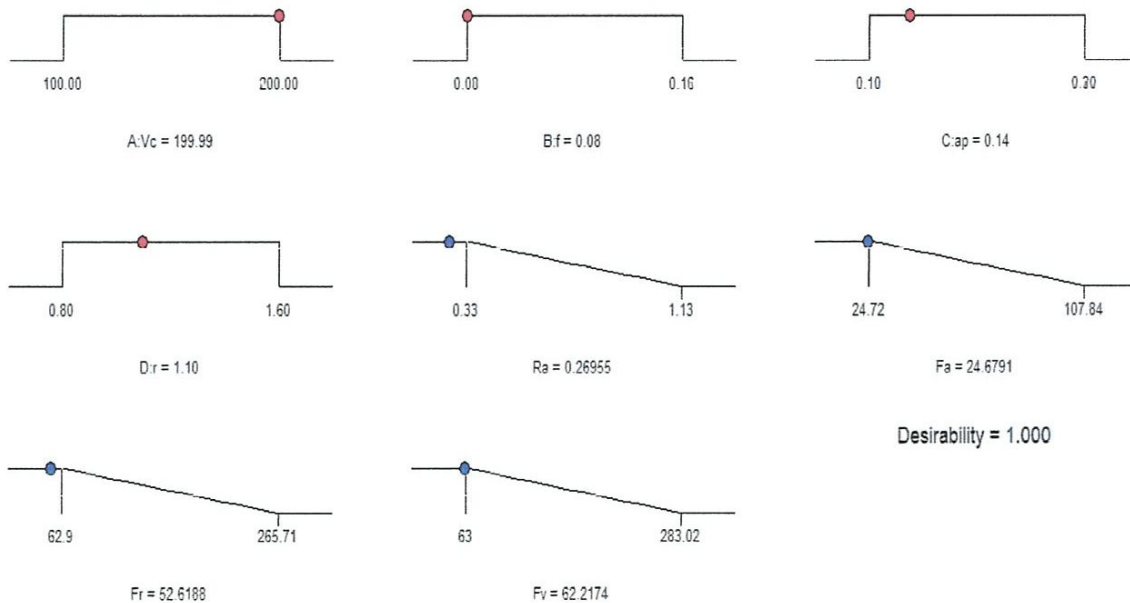
Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, $Vc$ (m/min)	Gamme	100	200
Avance, $f$ (mm/tr)	Gamme	0,08	0,16
Profondeur de passe, $ap$ (mm)	Gamme	0,1	0,3
le rayon du bec de l'outil (mm)	Gamme	0,8	1,6
$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	Mini	0,33	1,13
$Fa$ (N)	Mini	24,72	107,84
$Fr$ (N)	Mini	62,9	265,71
$Fv$ (N)	Mini	63	283,02

Le tableau III-8 présente les résultats de l'optimisation par (MSR) de la rugosité ( $Ra$ ) et des efforts de coupe ( $Fa$ ,  $Fr$  et  $Fv$ ). Les paramètres de coupe optimaux obtenus sont : la vitesse de coupe de (200) m/min, l'avance de (0,08) mm/tr, la profondeur de passe de (0,1) mm et le rayon du bec de l'outil de (0,95).



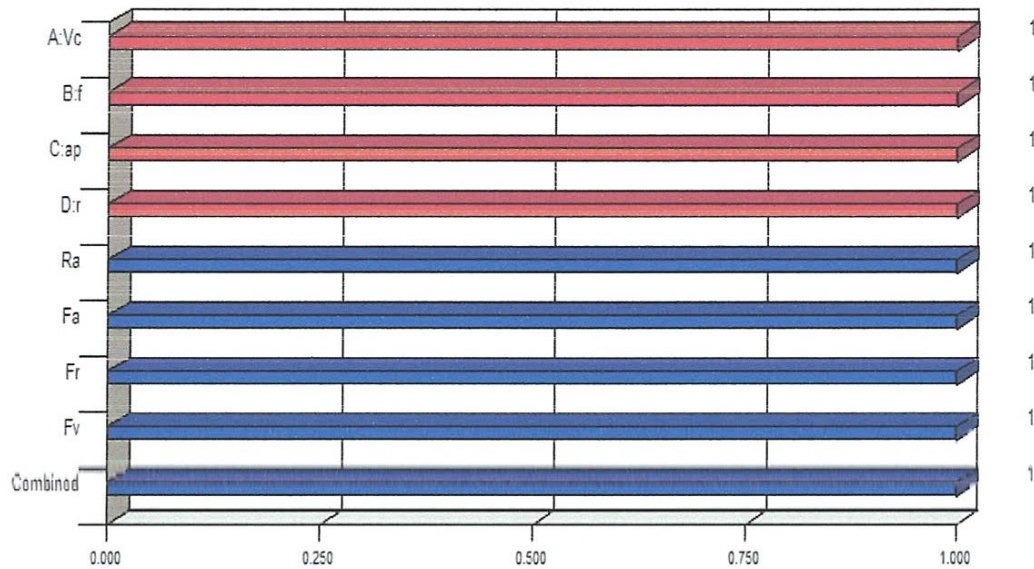
**Tableau III-8** Optimisation de la rugosité et des composantes de l'effort de coupe

N°	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$ap$ (mm)	$r$ (mm)	Forces			Rugosité	Désirabilité individuelle
					$F_a$ (N)	$F_r$ (N)	$F_v$ (N)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	
1	199.99	0.08	0.14	1.10	24.6791	52.6188	62.2174	0.26955	1.000
2	189.68	0.08	0.10	1.14	24.5175	49.2688	58.5938	0.269064	1.000
3	198.59	0.08	0.10	0.95	21.9081	38.469	62.8072	0.271084	1.000
4	199.55	0.08	0.10	1.33	24.6871	53.528	51.4534	0.256743	1.000
5	199.82	0.09	0.10	0.95	22.9364	43.3352	61.8659	0.308579	1.000
6	197.55	0.08	0.13	1.12	24.6247	51.6461	60.2681	0.299837	1.000
7	198.57	0.09	0.10	1.15	24.7183	50.5734	53.8516	0.276429	1.000
8	198.63	0.09	0.12	1.03	24.6205	51.5373	61.3943	0.268213	1.000



**Figure III.19** : Résultat optimales des paramètres étudiés

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (1). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation ( $R_a$  min,  $F_a$  min,  $F_r$  min, et  $F_v$  min).



**Figure III.20 :** Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques

### III-5.Conclusion

Une étude portant sur les effets des paramètres d'usinage sur l'usinabilité est présentée dans ce chapitre. L'analyse de variance a permis d'obtenir des modèles mathématiques à la fois pour la rugosité de surface ( $R_a$ ) et les composantes de l'effort de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ) en tournage du super alliage Inconel 718 avec l'outil en céramique. En conséquence, des valeurs optimales des paramètres d'usinage ont été étudiées et calculés. Les conclusions qui peuvent être tirées de ce travail sont comme suite:

- L'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de surface tandis que l'augmentation la l'avance induit une augmentation des trois critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) successivement de (45.26%, 31.03% et 27.71%).
- Les composantes de l'effort de coupe axiale ( $F_a$ ), l'effort de coupe radial ( $F_r$ ) et l'effort de coupe tangentiel ( $F_v$ ) sont fortement influencés par la profondeur de coupe.
- La comparaison des valeurs expérimentales et mathématiques prédites des composantes de l'effort de coupe et la rugosité de surface montrent une bonne corroboration.

- En outre, cette étude montre que le rayon du bec de l'outil, l'avance et l'interaction entre eux ont une influence statistiquement significative sur la rugosité de surface avec les contributions de: (31,38%), (24,17%) et (11,60%), respectivement.
- Les paramètres de coupe optimaux obtenus dans cette étude ont été jugés, vitesse de coupe de 200 m/min, avance de 0,08 mm/tr, rayon du bec de 0,95 mm et la profondeur de coupe de 0,1 mm.

### Conclusion générale

La modélisation des résultats expérimentaux lors de l'usinage de l'Inconel 718 avec l'outil céramique composite CC670, nous a permis d'étudier l'évolution des principaux paramètres technologiques dans le domaine de la fabrication tels que, la rugosité de surface usinée ( $Ra$ ), les composantes de l'effort de coupe ( $Fa$ ,  $Fr$  et  $Fv$ ) et les paramètres calculés en fonction des résultats expérimentaux qui sont, la puissance de coupe ( $P$ ) et la pression spécifique ( $Kc$ ).

Les principales conclusions tirées de ce travail sont:

- L'analyse des paramètres d'usinage en utilisant la technique *RSM* permet d'étudier l'influence de chacun d'eux sur les résultats du processus de coupe tels que la rugosité et les composantes de l'effort de coupe.
- La comparaison des valeurs expérimentales et mathématiques prédites des composantes de l'effort de coupe et la rugosité de surface montrent une bonne corroboration.
- En outre, cette étude montre que le rayon du bec de l'outil, l'avance et l'interaction entre eux ont une influence statistiquement significative sur la rugosité de surface avec les contributions de: (31,38%), (24,17%) et (11,60%), respectivement.
- Les composantes de l'effort de coupe axiale ( $Fa$ ), l'effort de coupe radial ( $Fr$ ) et l'effort de coupe tangentiel ( $Fv$ ) sont fortement influencés par la profondeur de coupe avec les contributions de: (39,14%), (47,88%) et (52,98%), respectivement. La prochaine contribution la plus importante sur la réduction des composantes de l'effort de coupe est le rayon du bec de l'outil ( $r$ ) avec les contributions de: (36,79%), (29,63%) et (21,20%), respectivement.
- Les paramètres de coupe optimaux obtenus dans cette étude ont été jugés, vitesse de coupe de 200 m/min, avance de 0,08 mm/tr, rayon du bec de 0,95 mm et la profondeur de coupe de 0,1 mm.
- La rugosité de surface optimisée et les composantes de l'effort de coupe obtenus sont:  
 $Ra = 0.27\mu\text{m}$ ,  $Fa = 21.90\text{N}$ ,  $Fr = 38.46\text{N}$  et  $Fv = 62.80\text{N}$ .



### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Tarek BRAHAM BOUCHNAK** : étude de comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique, thèse de doctorat, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, (2010) pp : 11
- [2] **TROMBERT C**; Usinabilité des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur M726.
- [3] **Marek Balazinski**, Fabrication mécanique avancée, MEC 4530, Ecole Polytechnique de Monreale, CANADA
- [4] **Claude Barlier**, Les matériaux pour outils de coupe en usinage, - Equip'prod ,12 – 2012.
- [5] **M.A. Yalesse, H. Bouchelaghem, S. Belhadi, N. Kribes**, investigation expérimentale sur l'usure des outils de coupe en CBN lors du tournage des pièces dures, Sciences & Technologie,B- N°26, pp 15-22, 2007.
- [6] **Farhat ZEMZEMI** "Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau en usinage : Application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718 " thèse de doctorat, l'École Centrale de Lyon Année 2007 pp : 19
- [7] **Joël RECH** ; "CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DES MODES D' ACTIONS TRIBOLOGIQUES ET THERMIQUES DES REVETEMENTS EN USINAGE", thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers, (2002) pp : 65
- [8] Sciences et Techniques Industrielles productique cours génie mécanique  
– terminal - Usure des outils-prof.doc [http://www.extpdf.com/1\\_usure-en-tournage-pdf.html#a\\_10](http://www.extpdf.com/1_usure-en-tournage-pdf.html#a_10), 2010
- [9] **Sandvik Coromant**  
[http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech\\_guide/spa/MTG\\_H.PDF](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H.PDF)
- [10] **Michel.Baehrel**, Cours Paramètres de coupe, TS1CPI, 2005
- [11] **M.A.Yalese**, « (cours de module) ».Cours des efforts de coupe

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

[12] **M.A. Yalles**, Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, Thèse de doctorat, Université de Annaba, 194 p, 2005.

[13] **S. Belhadi, M.A. Yaltese, L. Boulanouar & N. Ouelâa**, Influence des conditions de coupe sur la rugosité de l'acier 45NiCrMo16 traité usiné avec un outil CBN, REVUE COST, N°03, pp. 109-115.

[14] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>.

[15] **Wafik Hachicha**; Nouvelle approches pour la formation des cellules de production dans le cadre d'une démarche de conception . thèse de doctorat, école national d'ingénieurs de sfax (2009) pp 69-73.

[16] **Ashok Kumar Sahoo, Kashfull Orra and Bharat Chandra Routra**; Application of response surface methodology on investigating flank wear in machining hardened steel using PVD TiN coated mixed ceramic insert; International Journal of Industrial Engineering Computations 4 (201 3) 469–478.

[17] **Mustafa Günay , Emre Yücel**, Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron; Measurement 46 (2013) 913–919.

[18] **H. K. Dave, L. S. Patel and H. K. Raval**; Effect of machining conditions on MRR and surface roughness during CNC Turning of different Materials Using TiN Coated Cutting Tools – A Taguchi approach; International Journal of Industrial Engineering Computations 3 (2012) 925–930.

[19] **PAUL..BLANARD**; Nickel et alliages base nickel super alliages, .....DUNOD, (2002).

[20] <http://www.nidi.org>; All Metals and Forge.

[21] **L Li., N HE., M WANG., Y.G WANG.**; high speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts, Journal of Materials.

[22].**J.P COSTES., Y GUILLET., G POULACHON., M DESSOLY.**;Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel718, Journal of MACHINT TOOLS & MANUFACTURE 47 (2007), PP. 1081-1087.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

[23]..MUAMME NALBANT., ABDULLAH ALTIN., ASAN GOKKAYA.; The effect of coating material and geometry of cutting. Processing Technology 129 (2002), PP. 127-130.

# Résumé

*Dans notre sujet, nous avons présenté une étude expérimentale sur les effets de la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance par tour ( $f$ ), la profondeur de passe ( $a_p$ ) et le rayon du bec de l'outil ( $r$ ) sur les critères de rugosité de la surface usinée et les composantes de l'effort de coupe en tournage dur. Dans cette étude le matériau usiné est l'Inconel 718, l'usinage est réalisé avec un outil de coupe en céramique composite (CC670 de Sandvik). Un plan Composite centré (CCD) est adopté pour la réalisation des expériences, ce qui a permis de faire une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM). Des modèles mathématiques pour la rugosité de la surface et les composantes de l'effort de coupe sont déduits. Les résultats montrent que les composantes de l'effort de coupe sont influencées principalement par la profondeur de passe, le rayon du bec de l'outil et l'avance ont une influence statistiquement significative sur la rugosité de surface. Une étude d'optimisation a été réalisée dans le but de déterminer un régime de coupe optimal, satisfaisant des objectifs technologiques divers, à savoir minimisé la rugosité de surface et les composantes de l'effort de coupe.*

**Mots clé :** Optimisation, Rugosité, Efforts de coupe, puissance de coupe, Inconel 718, CCD, RMS, ANOVA