

Université du 8 mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique



***Mémoire Fin D'étude pour l'obtention de Diplôme de
Master en construction Mécanique***

Présenté par : **ZOUAIDIA KHALED**

=====

***Analyse de l'état de surface et des efforts
de coupe lors de l'usinage de l'acier
XC 48 en utilisant la MSR et PCA***

=====

Sous la Direction de :

Dr. Boucherit S

Pr. Yallese M.A

Année universitaire 2019/2020

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

Nous tenons à remercier nos encadreurs :

Dr Boucherit.S

Pr yalllese M.A

Qui ont géré avec compétence, et efficacités le déroulement

De notre travail et qui nous ont bien orienté.

Résumé

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur l'état de surface du produit fini impose l'optimisation des paramètres de coupe. L'optimisation est donc une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de mémoire de fin d'étude. Il consiste à investiguer le comportement des outils en carbure métallique (GC1025) avec revêtements PVD, face à l'acier mi-dur (XC48).

Le présent travail commence par l'étude de l'influence des paramètres de coupe, soit, la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe, sur les paramètres technologiques d'usinage (les efforts de coupe et la rugosité de surface).

La dernière partie du travail est réservée à l'optimisation par l'analyse en composantes principale (ACP), afin de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs de l'optimisation.

Mots clés : plans d'expérience ; ANOVA ; modélisation ; ACP ; optimisation.

ملخص

يتطلب التأثير الاقتصادي لتكاليف التصنيع والمتطلبات الفنية على السطح النهائي للمنتج النهائي تحسين معايير القطع. لذا يعد التحسين مهمة مهمة في عملية المعالجة، مما يسمح باختيار ظروف القطع الأكثر ملائمة. في هذا السياق تجري دراسة الأطروحة. وهو يتألف من التحقيق في سلوك أدوات كربيد المعادن (GC1025) مع طلاء PVD ، تواجه الفولاذ شبه الصلب (XC48) .

يبدأ العمل الحالي بدراسة تأثير معاملات القطع، أي سرعة القطع، التغذية لكل دورة وعمق التمرير، على المعلمات التكنولوجية للقطع (قوى القطع والخشونة) السطح.

الجزء الأخير من العمل محجوز للتحسين من خلال تحليل المكونات الرئيسية (ACP) ، من أجل العثور على القيم المثلى لمعاملات القطع مقارنة بأهداف التحسين.

الكلمات المفتاحية: تصميم التجارب، العملية التحسينية، ANOVA، ACP.

Sommaire

Introduction générale	I
------------------------------	----------

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I.1 INTRODUCTION.....	1
I.2 L'USINABILITE	1
I.3 PARAMETRES DE COUPE DE TOURNAGE.....	1
I.3.1 Vitesse de coupe (V_c).....	2
I.3.2 Avance par tour (f).....	3
I.3.3 Profondeur de passe (a_p).....	3
I.4 OUTILS DE COUPE	4
I.4.1 les aciers rapides (AR)	4
I.4.2 les carbures	4
I.4.3 Les cermets	5
I.4.4 les céramiques	5
I.4.5 les matériaux ultra-durs (Nitrure de bore cubique CBN, diamant polycristallin PCD)	5
I.5 PARAMETRES TECHNOLOGIQUES DE L'USINAGE	5
I.5.1 Usure des outils de coupe.....	5
I.5.2 Etat de surface	7
I.5.3 Efforts de coupe	9
I.6 METHODES D'OPTIMISATIONS	9
I.7 ETAT DE L'ART.....	10
I.8 Conclusion	13

CHAPITRE II

Procédure expérimental

II.1 INTRODUCTION.....	15
II.2 EQUIPEMENTS ET PREPARATION DES EXPÉRIENCES	15
II.2.1 Machine-outil	15
II.2.2 Outils de coupes utilisées	16
II.2.3 Porte outil utilisé	17
II.2.4 Eprouvettes d'usinage	18
II.2.5 Enregistrement des efforts de coupe	19
II.2.6 Etat de surface de la pièce	21
II.3. CONDITIONS DE COUPE	22
II.4 PLANIFICATION DES EXPERIENCES	22
II.5. CONCLUSION	23

CHAPITRE III

Résultats expérimentaux

III.1 INTRODUCTION.....	25
III.2 MODELISATION DE LA RUGOSITE ET DES EFFORTS DE COUPE POUR UN PLAN DE 27 ESSAIS.....	25
III.2.1 Résultats des essais	25
III.2.2 Analyse de variance (ANOVA).....	27
III.2.2.1 Analyse de variance (ANOVA) pour Ra	28
III.2.2.2 Analyse de variance (ANOVA) pour Fx	28
III.2.2.3 Analyse de variance (ANOVA) pour Fy	29
III.2.2.4 Analyse de variance (ANOVA) pour Fz	30
III.2.3 Analyse de régression	30
III.2.3.1 Analyse de régression pour Ra.....	31

III.2.3.2 Analyse de régression pour F_x	32
III.2.3.3 Analyse de régression pour F_y	32
III.2.3.4 Analyse de régression pour F_z	32
III.2.4 Représentation graphique 3D	32
III.2.4.1 La rugosité R_a	32
III.2.4.2 L'effort de coupe F_x	34
III.2.4.3 L'effort de coupe F_y	35
III.2.4.4 L'effort de coupe F_z	36
III.3 Conclusion	37

CHAPITRE IV

Optimisation des conditions de coupe

I. INTRODUCTION	39
II. HISTORIQUE	39
III. OPTIMISATION PAR L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP).....	39
IV. ALGORITHME DE LA METHODE.....	40
V. DEROULEMENT DES EXPERIENCES	41
VI. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSION	43
VI.1 Combinaison optimale des paramètres du processus	43
VI.2 Obtention des composantes principales	44
VI.3 Calcul de l'indice de la composante principale totale (ICPT)	45
VI.4 Générer un tableau de réponse pour la sélection des paramètres optimaux	46
VI.5 Analyse de la variance	47
VII. CONCLUSIONS	48
Conclusion générale	49
Références	50

Liste de figures

CHAPITRE I

Figure I.1	Vitesse de coupe	02
Figure I.2	Avance par tour	03
Figure I.3	Profondeur de passe a_p	03
Figure I.4	Formes d'usure sur les outils de coupe	07
Figure I.5	Décomposition d'une surface mesurée	07
Figure I.6	Rugosité moyenne arithmétique R_a	08
Figure I.7	Paramètres de rugosité	08
Figure I.8	Les composantes de l'effort de coupe	09

CHAPITRE II

Figure II.1	Tour modèle SN 40C	15
Figure II.2	Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC1025)	16
Figure II.3	Plaquette de coupe revêtue	17
Figure II.4	Porte plaquette utilisé	17
Figure II.5	Eprouvette utilisée pour les essais	18
Figure II.6	Chaîne d'acquisition des efforts avec le dynamomètre	19
Figure II.7	Rugosimètre Mitutoyo Modèle SurfTest SJ-210	21

CHAPITRE III

Figure III.1	Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité (R_a)	33
Figure III.2	Effet des paramètres de régime de coupe sur (F_x)	34
Figure III.3	Effet des paramètres de régime de coupe sur (F_y)	35
Figure III.4	Effet des paramètres de régime de coupe sur (F_y)	36

CHAPITRE IV

Figure IV.1 Graphique de réponse de l'indice de composante principale totale (ICPT)

Liste des tableaux

CHAPITRE II

Tableau II.1 :	Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées	16
Tableau II.2 :	Caractéristiques de porte outil utilisé	18
Tableau II.3 :	Composition chimique de l'acier XC48	18
Tableau II.4 :	Caractéristiques mécaniques moyenne (état normalisé) de l'acier XC48	19
Tableau II.5 :	Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 27 essais	22

CHAPITRE III

Tableau III.1 :	Résultats des essais	26
Tableau III.2 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra	28
Tableau III.3 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour Fx	29
Tableau III.4 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour Fy	29
Tableau III.5 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour Fz	30

CHAPITRE IV

Tableau IV.1	Les facteurs et leurs niveaux	41
Tableau IV.2	<i>Plan d'expérience de 27 essais pour l'élaboration des modèles de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage pour le carbure revêtu GC1025</i>	42
Tableau IV.3	Rapport signale sur bruit	43
Tableau IV.4	Vecteurs propres	44
Tableau IV.5	Les composantes principales et FOC pour les séries de mesures	45
Tableau IV.6	Valeurs des réponses correspondant aux facteurs	46
Tableau IV.7	Résultat de l'ANOVA pour la fonction objectif combiné (FOC)	48

Nomenclature

V_c	Vitesse de coupe [m/min].
f	Avance par tour [mm/tr].
ap	Profondeur de passe [mm].
$F_x (F_a)$	Effort de coupe axial [N].
$F_y (F_r)$	Effort de coupe radial [N].
$F_z (F_t)$	Effort de coupe tangentiel [N].
HB	Dureté Brinell
HRC	Dureté Rockwell
R_a	Rugosité moyenne arithmétique [μm].
R_t	Rugosité totale [μm].
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [μm].
R^2	Coefficient de détermination
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).
χ	Angle de direction principal (degré).
α	Angle de dépouille principal (degré).
γ	Angle d'attaque (degré).
ANOVA	Analyse de la variance
ACP	l'analyse en composantes principale
CVD	dépôt vapeur chimique
AR	Acier Rapides
CBN	Nitru de bore cubique

Introduction

Les différentes techniques de fabrication est un sujet important dans le domaine industriel. L'usinage par enlèvement de matière occupe un espace présumé dans ce domaine, c'est une méthode qui permet de produire des formes complexes et très précises sans changement des caractéristiques de la matière usinée.

Généralement, les recherches mondiales portent un commun intérêt, de trouver les conditions optimales d'usinage, et cela, afin d'atteindre l'objectif économique d'une part, et technologique d'autre part. Donc le fabricant essaye dans les stratégies d'optimisation des processus d'usinage actuellement préconisées visent à l'augmentation de la productivité, de la qualité du surface, ou à réduire les couts par plusieurs voies, recherche de débit optimal d'enlèvement de matière, amélioration de la précision de l'usinage, réduction du nombre d'opérations et recherche d'une plus grande fiabilité au niveau des propriétés d'usage des pièces usinées.

Ce travail est organisé en quatre chapitres distincts.

Le premier chapitre, représentant l'étude bibliographique, est divisé en deux parties, la première concerne les définitions de l'usinabilité, le principe de la coupe des métaux, les différents paramètres de coupe en tournage, ainsi que les outils de coupe. Cette partie est aussi consacrée à des généralités sur les paramètres technologiques de l'usinage et des méthodes de modélisation. La seconde partie est réservée à l'état de l'art.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les équipements et les conditions expérimentales utilisés pour mener cette recherche. Les dispositifs de mesure et le couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe.

Le troisième chapitre, concerne une étude statistique pour un plan L27, l'analyse de la variance ANOVA des résultats expérimentaux basée sur la méthodologie de surface de réponse a été réalisée en utilisant le logiciel Design Expert. L'objectif est de déterminer des modèles mathématiques qui permettent à la prédiction de la rugosité de surface, l'effort axial, ainsi que l'effort radial et l'effort tangentiel.

Le quatrième et dernier chapitre, nous élaborons une méthode d'optimisation, l'analyse en composantes principales (ACP). L'objectif est le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus.

Enfin, nous clôturons avec une conclusion générale.

Chapitre 01

Étude

bibliographique

I.1. INTRODUCTION

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

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

I.2. L'USINABILITE

L'usinabilité peut être définie comme l'aptitude d'un matériau à subir une mise en forme par enlèvement de matière [1].

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 de 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 cout et/ou à la meilleure qualité pièce [2].

I.3. PARAMETRES DE COUPE DE TOURNAGE

Les paramètres de coupe sont, d'une part, des valeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques). Les conditions de coupe sont une notion plus large qui inclut les paramètres géométriques et cinématiques de coupe en plus d'autres facteurs qui influencent l'usinage tels que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, les fluides de coupe, l'état de la machine-outil, etc. [3]

I.3.1. Vitesse de coupe (V_c)

Pour le tournage, la vitesse de coupe est le chemin parcouru en mètres par minute, par un point placé sur le diamètre extérieur de la pièce *figure I.1*. Ce que l'on appelle en usinage "vitesse de coupe" correspond en cinématique à la vitesse circonférentielle uniforme, elle est régie par la formule suivante : [4]

$$n = V_c / \pi \cdot d$$

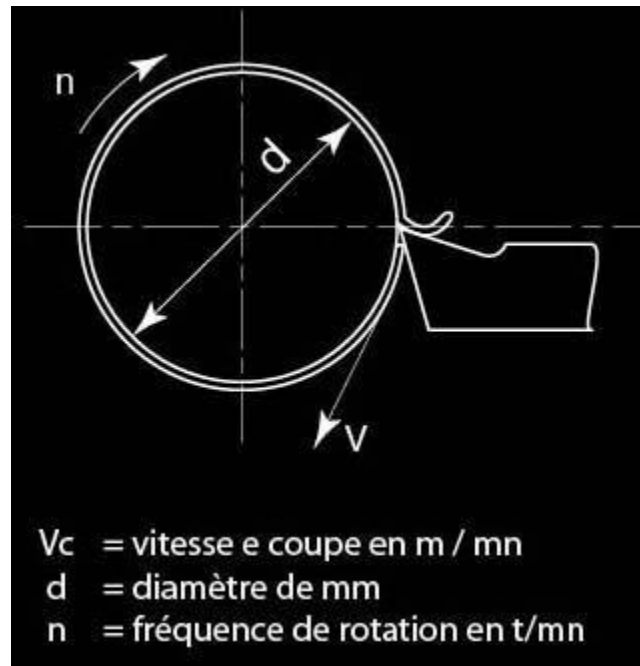


Figure I.1 Vitesse de coupe [4]

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

- De la matière à usiner généralement, plus la matière est tendre, plus la vitesse est élevée.
- De la nature de la matière de l'outil de coupe
- Du genre d'usinage Ébauche, finition, tournage, filetage ... etc...
- De la profondeur de passe Plus la quantité de matière est importante moins la vitesse de coupe est grande.
- De la forme de la pièce et de sa fixation, du serrage de l'outil de coupe La rigidité du montage de l'outil de coupe ainsi que le bon serrage de la pièce (tenir compte de la forme pour des raisons de déformations) ont une influence sur les vitesses de coupe.
- Du lubrifiant Une abondante lubrification permet d'augmenter la vitesse de coupe
- Du type de machine Une machine robuste peut supporter des vitesses de coupe plus élevée par rapport à une machine de construction plus légère.

I.3.2. Avance par tour (f)

En tournage, l'avance est le déplacement en millimètre de l'outil pendant un tour de la pièce. C'est aussi l'épaisseur du copeau *figure I.2* Comme pour le choix de la vitesse de coupe, le choix des avances dépend de la matière à usiner, mais aussi de la profondeur de passe, nature du métal de l'outil de coupe, l'état de surface à obtenir...etc... [4]

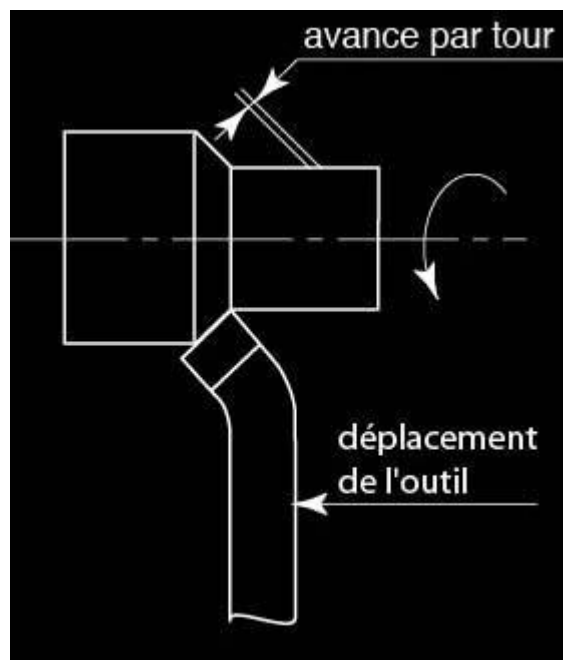


Figure I.2 Avance par tour [4].

I.3.3. Profondeur de passe (a_p)

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

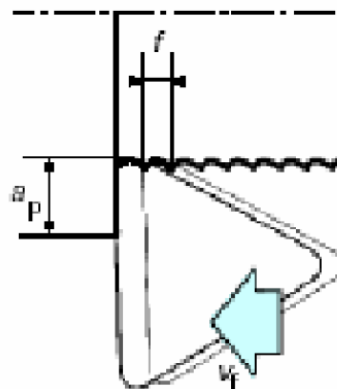


Figure I.3 Profondeur de passe a_p [3].

I.4. OUTILS DE COUPE

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

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

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

I.4.1. Acier rapide (AR)

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

I.4.2. Carbure de tungstène cémenté

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

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

I.4.3. Céramiques

Sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevé. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium Al₂O₃ ou de nitrure de silicium (Si₃N₄). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage.

I.4.4. Nitrure de bore cubique (CBN)

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

I.4.5. Diamant polycristallin (PCD)

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

I.5. PARAMETRES TECHNOLOGIQUES DE L'USINAGE

I.5.1. Usure des outils de coupe

L'usure est définie par la matière qui sort définitivement du contact outil – pièce. L'usure de l'outil est la conséquence directe des sollicitations très sévères que subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces sollicitations sont de nature mécanique, accentuées par les effets thermiques. [5]

En fonction des conditions d'usinage (la nature de l'outil, du matériau usiné, du type d'usinage et des conditions de coupe) nous pouvons avoir les types d'usures suivantes : [6]

* Usure en dépouille : Ou usure frontale due aux frottements de la surface de coupe de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête tranchante de l'outil **figure I.4 (a)**.

* Usure suivant la surface d'attaque : elle se caractérise par une cuvette dite "cratère " formée sur la surface d'attaque de l'outil suite au frottement du copeau sur celle-ci **figure I.4 (b)**. Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quand à l'enroulement et la fragmentation du copeau.

* Fissuration de l'arête : On observe l'apparition de fissures sur l'arête coupante dans le cas des usinages avec des chocs mécaniques ou thermiques, ou avec des vibrations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue. Elle est propre aux outils en carbure métalliques **figure I.4 (c)**.

* Rupture (cassure) de la pointe : c'est la destruction totale du bec de l'outil (Observée dans le cas des outils en acier rapide), **figure I.4 (d)**.

* Déformation plastique : la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe. Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée, **figure I.4 (e)**.

* Entaille : Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure, **figure I.4 (f)**. [6]

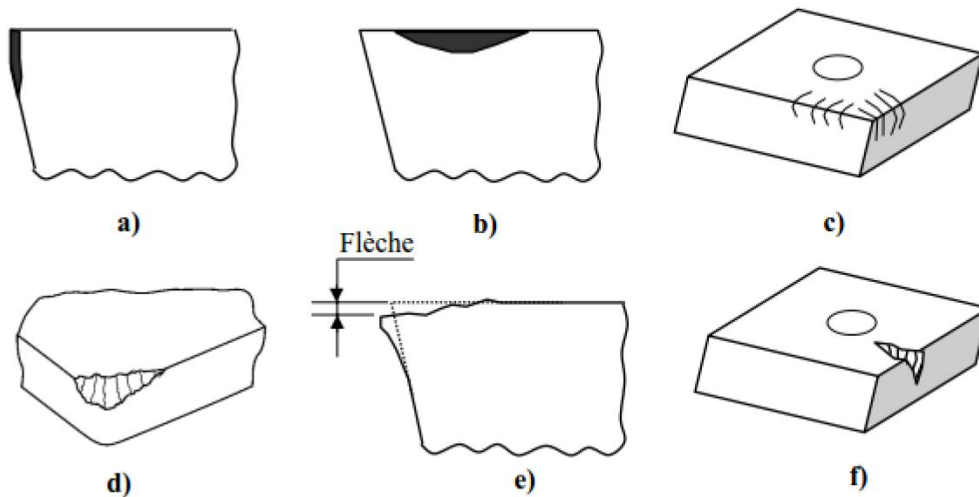


Figure I.4 Formes d'usure sur les outils de coupe [6].

I.5.2. Etat de surface

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosimètre 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont alors un profil (mesure 2D) ou une surface reconstruite à partir de plusieurs profils (mesure 3D, exemple *figure I.5*). Le relief d'une surface mesuré en 2D peut-être représenté sous la forme d'une fonction $z(x) = h$ où x est la position du point courant sur la longueur d'évaluation de la surface et h la mesure de la hauteur du défaut à cette position. [7]

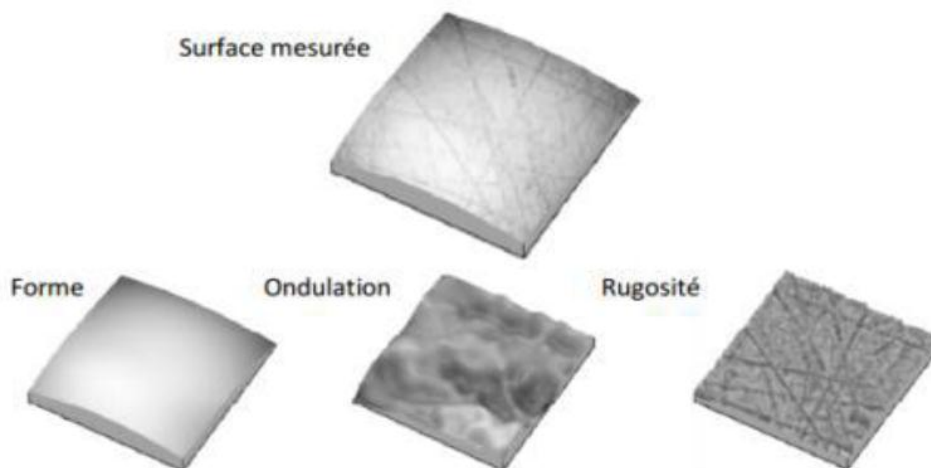


Figure I.5 Décomposition d'une surface mesurée [7].

Le paramètre de rugosité le plus fréquemment utilisé est (Ra). Il correspond à la rugosité arithmétique et représente la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation. Son expression est la suivante :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

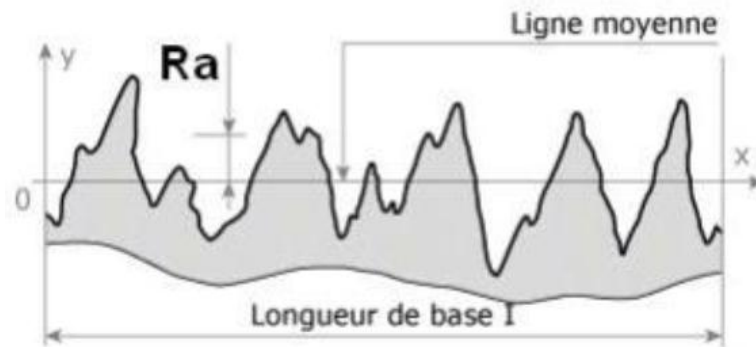


Figure I.6 Rugosité moyenne arithmétique Ra [7].

Les procédés courants d'usinage permettent d'obtenir un Ra compris entre 1,6 et 6,3 μm .

En tournage et en fraisage, un certain nombre de facteurs agissent particulièrement sur la rugosité. L'état de surface en tournage de finition dépend principalement de l'avance (f) et du rayon de bec (r). Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit tenir compte de ces influences.

D'autres paramètres classiques sont définis comme suit : R_p : la hauteur maximale du pic le plus élevé observé par rapport à la ligne moyenne sur la longueur analysée R_t : rugosité totale, la hauteur entre le pic le plus élevé et la vallée la plus profonde sur la longueur analysée R_q : écart moyen quadratique [6].

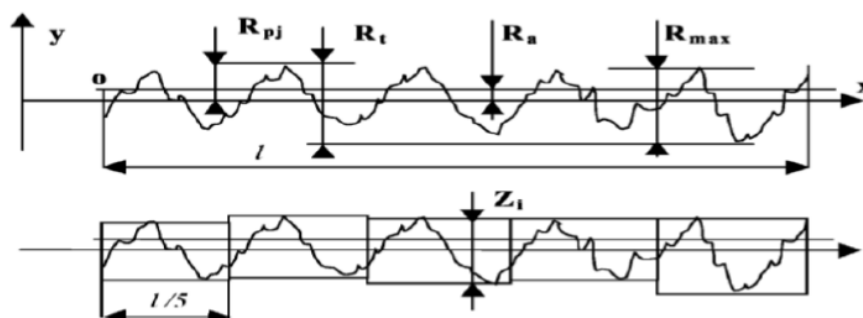


Figure I.7 Paramètres de rugosité.

I.5.3. Efforts de coupe

L'effort de coupe (F_c), appelé effort « générateur de puissance », est décisif, tout comme la vitesse de coupe, pour le calcul de la puissance de coupe ou d'entraînement de la machine-outil.

L'importance de l'effort de coupe dépend essentiellement de la matière à usiner et des Conditions de coupe actives.

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage *figure I.8*.

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

* F_x : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.

* F_y : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure [7].

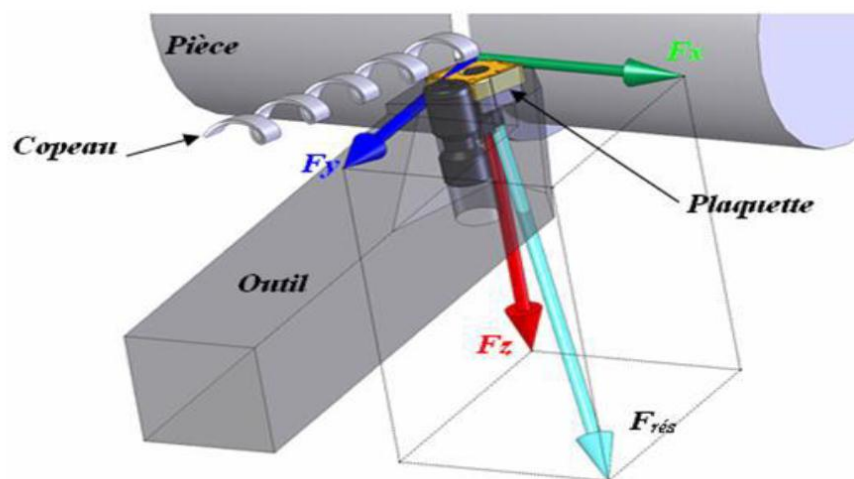


Figure I.8 Les composantes de l'effort de coupe [8].

I.6. METHODES D'OPTIMISATIONS

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

L'optimisation de processus d'usinage est habituellement difficile, où les aspects suivant sont exigés :

- La connaissance du processus de coupe ;
- Les équations empiriques reliant la vie d'outil, les forces, la puissance, etc., pour développer des contraintes réalistes ;
- Spécifications des possibilités d'usinage ;
- Développement d'un critère efficace d'optimisation ;
- La connaissance des techniques mathématiques et numériques d'optimisation. En usinage, les tâches d'optimisation sont critiques, parce qu'il comporte beaucoup de processus complexes. Habituellement, la petite variation d'un paramètre cause les changements notables des autres. D'ailleurs, quelques variables, telles que l'effort de coupe ou l'usure d'outil, dépendent fortement des conditions de coupe [5].

I.7. ETAT DE L'ART

Dans cette partie nous parlerons des travaux effectués à propos de l'usinage des différents matériaux, comme nous exposerons les recherches faites concernant la méthode d'optimisation (PCA).

Une comparaison entre cinq techniques d'optimisation différentes a été faite par Anish Nair & all [8] lors du fraisage en bout de l'aluminium. Ces cinq techniques sont l'analyse en composantes principales, la théorie de l'utilité, l'analyse relationnelle de grey, la technique de préférence d'ordre par similarité avec la solution idéale et leurs variantes hybrides. Le principe d'optimisation de Taguchi est commun à toutes les méthodes.

Ces techniques ont été appliquées sur la rugosité de surface (R_a , R_z et R_q) comme indice de qualité et le taux d'enlèvement de la matière MRR comme indice de productivité.

Un plan orthogonal L25 est choisi pour réaliser les expériences avec différentes combinaisons des paramètres d'usinage.

L'optimisation est donc réalisée de telle sorte que les paramètres optimisés qui en résultent conduisent à un compromis entre la productivité et la qualité de la surface. L'objectif du travail est de réaliser une optimisation multi-objectifs sur un seul processus et de comparer les résultats.

Les résultats des différentes techniques d'optimisation sont présentés dans le tableau suivant :

Method adapted for optimization	Response features	Optimum values		
		Depth (mm)	Speed (rpm)	Feed (mm/min)
PCA	R_a , MRR	0.1	3000	750
PCA combined with utility theory	R_a , R_z , R_{q_t} , MRR	0.5	3500	650
PCA combined with Grey Relational Analysis	R_a , R_z , R_{q_t} , MRR	0.5	3500	650
PCA combined with TOPSIS	R_a , R_z , R_{q_t} , MRR	0.5	3500	650

Les valeurs montrent que les trois dernières méthodes ont donné des résultats similaires. Alors que lorsque seuls R_a et MRR ont été pris en compte, les résultats ont varié. Cela indique l'influence des niveaux de paramètres lors de l'examen des différentes réponses.

R. Ramanujam & all [9], ont proposé une méthode d'optimisation hybride pour l'optimisation des paramètres d'usinage lors du tournage à sec de l'Inconel 625. Dans cette étude, une méthode d'optimisation basée sur le couplage de la méthode de l'analyse en composantes principales et la logique floue est proposée pour avoir une rugosité de surface et une puissance de coupe minimale, ainsi qu'un taux d'enlèvement de matière élevé pour augmenter la productivité. Le plan d'expérience orthogonal L9 de Taguchi est utilisé. Les réponses multiples sont réunies en un seul indice multi-performances en utilisant l'analyse en composantes principales. Pour éviter les incertitudes, la méthode de la logique floue est introduite dans cette recherche travail.

L'ajustement optimal et l'influence des paramètres du processus sur l'indice de performance multiple sont déterminés à l'aide d'un tableau de réponse, d'un graphique de réponse et d'une analyse de variance.

Les valeurs optimales des paramètres pour le tournage de l'Inconel 625 se sont avérées être une vitesse de coupe de 70 mm/min, Vitesse d'avance de 0,103 mm/tour et profondeur de coupe de 0,4 mm.

Tableau : Comparaison du niveau de confiance de diverses techniques d'optimisation

	GREY	PCA_W/O_GREY	PCA_W_GREY	PCA_FUZZY_W/O_GREY	PCA_FUZZY_W_GREY
R^2	92.54%	95.49%	94.83%	94.12%	95.62%

Le tableau ci-dessus montre est une comparaison du niveau de confiance des différentes procédures d'optimisation. L'analyse hybride en composantes principales basée sur la logique floue prend toutes les composantes principales pour évaluer

l'indice de performance en réduisant l'erreur. Il y a une augmentation substantielle du niveau de confiance de cette approche par rapport à celui de la méthode de grey.

Dans l'étude de Suneel Kumar Rathore & all [10], l'analyse en composantes principales est couplé avec la méthode de GRA pour l'optimisation des paramètres de coupes (V_c, f, a_p et le liquide de refroidissement (avec et sans liquide)), lors d'une opération de tournage de AA 6463. Les deux objectifs de sortie sont R_a et R_z . Les résultats ont montrés que l'association des deux méthodes a permet d'obtenir la meilleure combinaison des facteurs d'usinage (A2B2C1D2).

L'étude a montrée que la diminution de R_a jusqu'à 65,80 %, ainsi que la diminution de R_z jusqu'à 80,79 % ont été constatées lors de l'usinage avec la combinaison optimale obtenu par PCA-GRA, par rapport à combinaison optimale du PCA.

	PCA	GRA	GRA-PCA	PCA (%)	GRA (%)
Niveau du facteur	A1B1C1D1	A2B2C2D2	A2B2C2D2		
R_a (μm)	1.550	0.546	0.530	65.80	2.93
R_z (μm)	24.990	4.870	4.80	80.79	1.43

AMIT SHARMA & all [11] ont utilisé l'Analyse en composantes principales (ACP) pour optimisé les paramètres du procédé de coulée sous agitation du Metal Matrix Composite développé. L'alliage d'aluminium 2024 est utilisé comme matériau de matrice et la boue rouge est utilisée comme renforcement. Le plan orthogonal L9 de Taguchi est utilisé pour concevoir les expériences. Trois paramètres sont pris en compte pour processus d'optimisation, à savoir le pourcentage de renforcement, la taille des grains et l'angle de la lame. Les variables de réponse considérées pour l'optimisation sont la résistance à la traction et la micro dureté. L'ANOVA est appliquée pour trouver l'effet du facteur individuel sur la les propriétés mécaniques du MMC. Les résultats révèlent que la taille des grains était le facteur le plus important, suivi du pourcentage de renforcement et angle de la lame.

K. Sundara Murthy & I. Rajendran [12] ont proposé une méthode d'optimisation basé sur l'analyse en composantes principales, la méthode relationnelle de grey et la méthode de Taguchi pour optimiser les paramètres de fraisage en bout avec une quantité minimal de lubrifiant.

Les conclusions suivantes sont tirées :

- Les paramètres d'usinage optimaux pour une rugosité de surface et usure minimale sont une vitesse de coupe de 88 m/min, une avance de 180 mm/min, une profondeur de coupe de 1,4 mm et un débit de 600 ml/h du liquide de refroidissement.

I.8. CONCLUSION

L'étude bibliographique présentée, fait savoir que le but du tournage, est l'obtention d'un bon état de surface, tout en optimisant les paramètres de coupe et prolongeant la durée de vie de l'outil.

Chapitre 02

Procédure expérimentale

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale qui consiste en une présentation du matériel qui sert à l'étude expérimentale. Les mesures concernent les efforts de coupe et la rugosité de surface. Nous présentons aussi des informations concernant le couple outil-matière ainsi que les conditions de coupe et le plan d'expérience utilisé.

II.2. EQUIPEMENTS ET PREPARATION DES EXPÉRIENCES

Pour la réalisation des expériences, il est nécessaire de préparer les équipements, les éprouvettes ainsi que les outils de coupe.

II.2.1. Machine outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais *figure II.1* est un tour à charioter et à fileter de la société Tchèque «TOS TENCIN» modèle SN 40 d'une puissance de 6.6KW sur la broche, ayant une gamme de vitesse de 45 à 2000 tr/min et d'avances de 0.08 à 6.4 mm/tr.



Figure II.1 : Tour modèle SN 40C

II.2.2. Outils de coupes utilisées

Les outils de coupe utilisés sont des plaquettes en carbure amovibles de la marque Sandvik Coromant de forme carré **figure II.2 et II.3**, à fixation par trou central avec les caractéristiques suivantes :

Tableau II.1. Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.

Diamètre du cercle inscrit	12.7 mm
Désignation sandvik	1025
Longueur effective du tranchant	12.496mm
Revêtement	PVD, TiALN + TiN
Angle de dégagement majeur	0 degré
Rayon de coin	0.8mm
Épaisseur d'insertion	4.763mm
Poids	10g

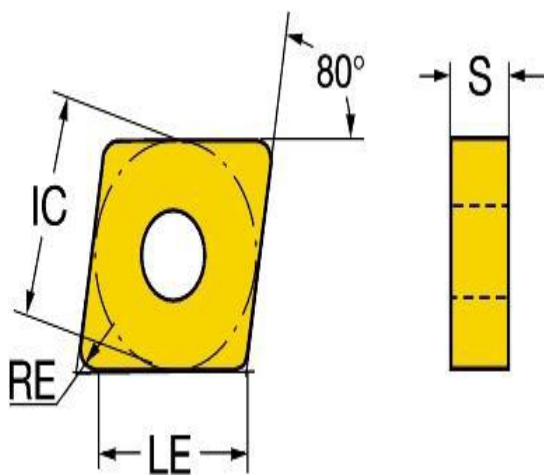


Figure II.2 Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement PVD (GC1025)

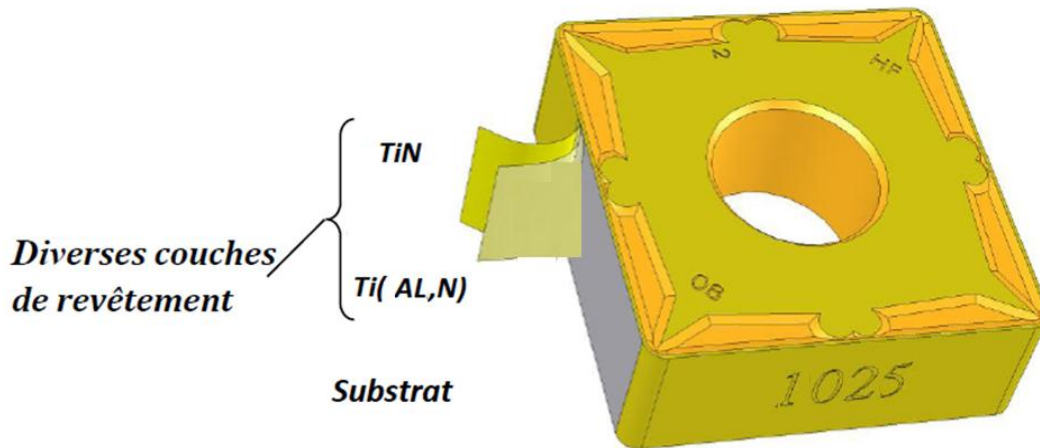


Figure II.3 Plaquette de coupe revêtue.

GC 1025 est une nuance carbure micrograin à revêtement PVD de TiALN-TiN 4 μ m, tenace et résistante à l'usure. Présente les qualités requises pour des arêtes de coupe vives et une sécurité élevée contre le martelage des coupeaux.

Les revêtements PVD sont obtenus par dépôt physique en phase vapeur à température relativement basse (400 à 600°C). Ce procédé consiste à faire évaporer un métal qui entre alors en réaction avec un gaz, par exemple de l'azote, pour former une couche dure de nitrure sur la surface des plaquettes.

II.2.3. Porte outil utilisé

Afin de réaliser les essais, le choix du porte plaquette s'est effectué sur le porte outil de désignation PSBNR25x25M12 **figure II.4**, dont la géométrie de la partie active de l'outil, est matérialisée par les angles définis sur le **Tableau II.2**.

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

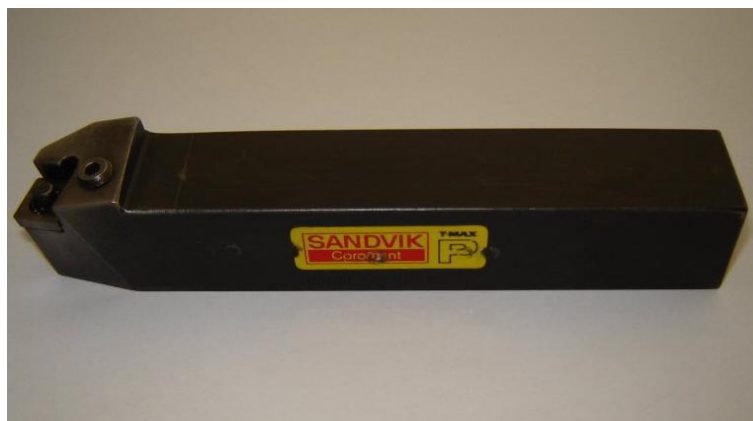


Figure II.4 Porte plaquette utilisé.

Tableau II.2. Caractéristiques de porte outil utilisé.

Désignation	Marque	χ	α	γ	λ	χ^r
PSBNR 25x25M 12	SANDVIK coramant	75°	6°	-6°	-6°	15°

II.2.4. Eprouvettes d'usinage

Les essais ont été réalisés sur une barre d'acier XC 48 figure II.5, ce dernier est un acier mi-dur de haute qualité pouvant être utilisé à l'état traité ou recuit ou à l'état trempé superficiellement, de la désignation XC 48 H1 (NF A 35-552 / 07-86). L'XC48 (aujourd'hui C45).

Encore, est un acier carbone à teneur plus élevée que pour les aciers C35 et C40, utilisée en mécanique générale de part sa bonne usinabilité et ses caractéristiques mécaniques. Apte aux traitements thermiques : ex. à l'huile 820 - 860°C.

Domaines d'application : Pièces soumises aux chocs et nécessitant une bonne résistance : axes, engrenages, vis sans fin, paliers, pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres).

**Figure II.5** Eprouvette utilisée pour les essais.

Sa composition chimique ainsi que ses caractéristiques physico-mécaniques sont présentées dans le **tableau II.3** et **II.4** respectivement.

Tableau II.3. Composition chimique de l'acier XC48.

C	S	Mn	P	Si
0,52 - 0,50	≤ 0,035	0,50 - 0,80	≤ 0,035	0,40 maxi

Tableau II.4. Caractéristiques mécaniques moyenne (état normalisé) de l'acier XC48.

Rm N/mm ²	Re N/mm ²	A %	Dureté HB
560 / 620	275 / 340	14 / 16	

II.2.5. Enregistrement des efforts de coupe

Le système d'acquisition de base des efforts est composé de **figure II.6** :

- Table de mesure dynamométrique kistler à capteurs piézo-électriques,
- Amplificateurs de signaux kistler,
- Carte d'acquisition permettant de transformer un signal analogique en signal numérique de marque national instrument,
- Programme de mesure permettant d'effectuer les mesures et de les exploiter. Ce programme a été fait sur la base du logiciel dynoware.

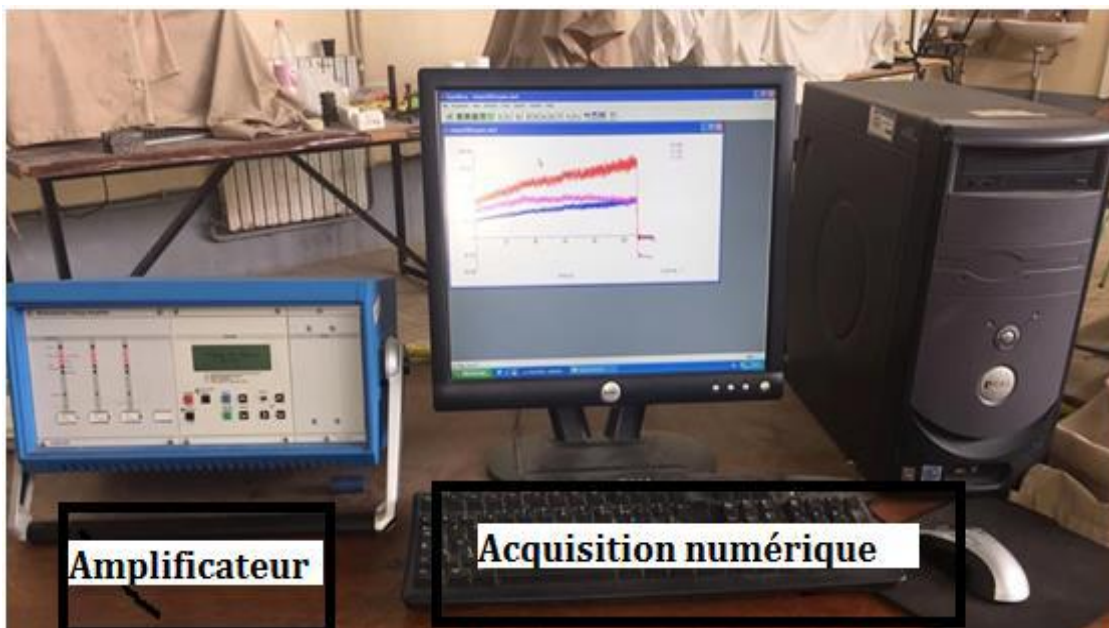


Figure II.6 Chaîne d'acquisition des efforts avec le dynamomètre.

L'ensemble dynamométrique se compose de quatre capteurs permettant de mesurer trois composantes orthogonales (X, Y et Z), mais il ne permet pas d'enregistrer les couples. Ses références sont les suivantes :

- Type 9257 B N° série 87069
- Nombre de capteur, capteurs piézo-électriques 4
- Charge admissible des capteurs : +/- 5 KN
- Sensibilité : -7,92 pC/N pour F_x , -7,91 pC/N pour F_y et -3,80 pC/N pour F_z
- Linéarité : $\pm 0,3 \leq \%FSO$
- Rigidité : $>1 \text{ kN}/\mu\text{m}$
- Seuil de réponse : $< 0,01$
- Gamme de température d'utilisation 0 à 70°C
- Fréquence propre : en 3,5 kHz

Le signal de sortie fourni par les capteurs piézo-électriques est de type analogique en termes de variations de potentiel dans une plage de + ou - 1 volt. Il est donc nécessaire de l'amplifier pour pouvoir le mesurer commodément. Pour cela, nous avons utilisé des amplificateurs kistler de type (5011B) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Tension de sortie : $\pm 10\text{V}$
- Courant de sortie : $\pm 5 \text{ mA}$
- Gamme de fréquence : 0 à 200 kHz
- Impédance : 10Ω
- Erreur : $\pm 3\%$
- Linéarité : $\leq \pm 0,05 \% F_s$

Pour l'acquisition, nous avons opté pour une carte (référence PCI-MOI-16E-4 série ADA77F). Elle a comme caractéristiques :

- Nombre d'entrées – sorties : 16
- Vitesse d'acquisition : 500 000 points/s pour chaque entrée
- Résolution 12 bits
- Signal acceptable : $\pm 10 \text{ volts}$, - bande passante : 0 – 600 kHz

II.2.6. Etat de surface de la pièce

La caractérisation de la topographie de surface (2D) de la pièce usinée est effectuée grâce au rugosimètre de la marque Mitutoyo modèle Surftest SJ-210 *figure II.7*

Ce dernier est doté :

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

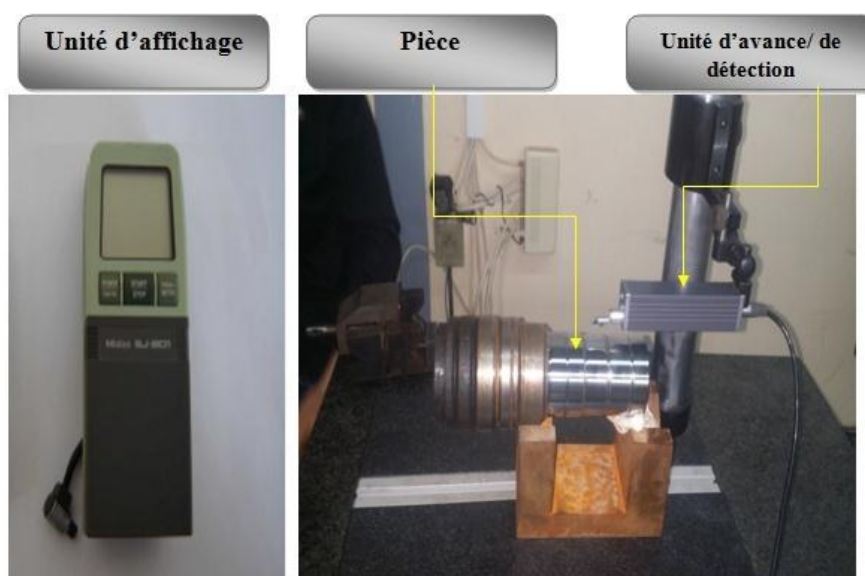


Figure II.7 Rugosimètre Mitutoyo Modèle Surftest SJ-210.

La pointe en diamant (palpeur) se déplace linéairement sur la surface usinée, Les mesures sont répétées à trois reprises à 120° et le résultat final est une moyenne de ces valeurs.

II.3. CONDITIONS DE COUPE

Plusieurs facteurs influents sur le système d'usinage, dans notre travail nous nous sommes intéressés à cet ensemble d'éléments : vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f), profondeur de passe (a_p).

Les paramètres de sortie (résultats) à observer sont : les composantes de l'effort de coupe (F_x, F_y, F_z), la rugosité de surface (R_a).

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais varient dans les intervalles suivants : V_c [145-280] m/min ; f [0.08-0.16] mm/tr ; a_p [0.15-0.45] mm.

II.4. PLANIFICATION DES EXPERIENCES

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.

Le type de plan choisi est celui de Taguchi car il simplifie le protocole expérimental pour mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. La méthode de Taguchi se distingue par une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant une bonne précision.

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

Dans cette étude, la table orthogonale standard L27 de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le **tableau II.5**.

Tableau II.5. Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 27 essais.

<i>Niveau</i>	<i>Vitesse de coupe</i> <i>V_c (m/min)</i>	<i>Avance</i> <i>f (mm/tr)</i>	<i>Profondeur de passe</i> <i>a_p (mm)</i>
1	145	0,08	0,15
2	200	0.12	0,30
3	280	0.16	0,45

II.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fait le point sur les équipements utilisés lors de nos travaux. On a désigné les caractéristiques des matériaux de coupe et la composition chimique du matériau usiné, comme on a présenté les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences.

Chapitre 03

Résultats expérimentaux

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des essais réalisés, ainsi que la modélisation mathématique des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'étudier la relation entre les paramètres d'entrée : la vitesse de coupe (V_c en [m/min]), l'avance par tour (f en [mm/tr]) et la profondeur de passe (a_p en [mm]), et les paramètres de sortie : la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_x), l'effort de coupe (F_y) et l'effort de coupe (F_z)

Afin de déterminer les modèles mathématiques et les coefficients de corrélation de chaque modèle, ainsi que la présentation 3D sous forme d'une surface de réponse, nous avons utilisé un logiciel de statistique nommé «Design Expert». Ce logiciel nous a permis de faire des statistiques basées sur l'analyse de la variance, afin de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur (R_a), (F_x), (F_y) et (F_z)

III.2. MODELISATION DE LA RUGOSITE ET DES EFFORTS DE COUPE POUR UN PLAN DE 27 ESSAIS

Les résultats sont obtenus suite aux essais de tournage de l'acier X C 48 par un outil en carbure revêtu [Ti(C, N)/Al₂O₃/TiN] suivant un plan de Taguchi L₂₇.

III.2.1 Résultats des essais

Les valeurs des paramètres d'entrés (V_c , f et a_p) et celles des réponses considérés sont présentées dans le **tableau III.1**.

Tableau III.1. Résultats des essais

N° Essai	Paramètres d'entrée (facteurs)			Paramètres de sortie (réponses)			
	<i>V_c</i> (m/min)	<i>f</i> (mm/tr)	<i>a_p</i> (mm)	<i>R_a</i> (μm)	<i>F_x</i> (N)	<i>F_y</i> (N)	<i>F_z</i> (N)
1	145	0,08	0,15	1,96	11,31	36,10	50,02
2	145	0,08	0,30	1,85	18,57	43,83	75,82
3	145	0,08	0,45	1,54	37,64	56,27	86,31
4	145	0,12	0,15	1,47	7,21	34,82	53,61
5	145	0,12	0,30	1,55	25,09	60,10	98,81
6	145	0,12	0,45	1,19	42,07	70,82	139,36
7	145	0,16	0,15	1,96	12,74	45,88	70,88
8	145	0,16	0,30	1,74	27,46	69,77	127,19
9	145	0,16	0,45	1,91	50,45	89,70	169,99
10	200	0,08	0,15	1,28	14,85	30,91	39,98
11	200	0,08	0,30	1,16	28,41	34,67	62,94
12	200	0,08	0,45	0,67	34,64	72,98	109,85
13	200	0,12	0,15	1,23	6,52	34,46	59,45
14	200	0,12	0,30	1,13	32,89	51,59	93,73
15	200	0,12	0,45	0,98	59,20	93,07	144,52
16	200	0,16	0,15	1,42	16,75	38,14	56,77
17	200	0,16	0,30	1,47	24,38	60,81	116,27
18	200	0,16	0,45	1,38	46,94	94,50	176,09
19	280	0,08	0,15	0,57	9,48	22,22	36,63
20	280	0,08	0,30	0,56	28,70	60,05	83,22
21	280	0,08	0,45	0,63	50,85	74,22	106,54
22	280	0,12	0,15	0,87	23,59	48,99	59,53
23	280	0,12	0,30	0,89	29,65	60,54	87,11
24	280	0,12	0,45	0,91	49,37	78,90	139,18
25	280	0,16	0,15	1,34	17,17	53,19	57,79
26	280	0,16	0,30	1,40	26,29	66,04	137,75
27	280	0,16	0,45	1,40	58,85	87,71	181,48

III.2.2 Analyse de variance (ANOVA)

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

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

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

La somme des carrés (*SS*) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale.

$$SS = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2$$

Où : $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ moyenne des réponses, \bar{y}_i réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son niveau, N nombre total d'expériences, niveau de chaque facteur f .

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

$$MC = \frac{SS}{MC_e}$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice *F-value* est utilisé avec la base que les valeurs de *F-calculées* devraient être supérieures à celles obtenues à partir du *F-table*.

$$F = \frac{MC}{MC_e}$$

Avec M les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (*Contribution. %*), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$\text{contribution \%} = \frac{SC_f}{SC_t} \times 100$$

Avec SC_f somme des carrés des écarts finals, SC_t somme des carrés des écarts totaux.

III.2.2.1 Analyse de variance (ANOVA) pour Ra

Le *tableau III.2* montre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour la rugosité de surface (Ra) en fonction de V_c , f et a_p .

Tableau III.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra

Source	dl	Som car séq	CM ajust	Valeur F	Valeur de P	Contribution	Observations
Régression	9	4,25	0,47	27,61	< 0.0001	93,61%	Signifiant
V_c [m/min]	1	2,42	2,42	141,38	< 0.0001	53,30%	Signifiant
f [mm/tr]	1	0,88	0,88	51,53	< 0.0001	19,38%	Signifiant
a_p [mm]	1	0,11	0,11	6,32	0,0223	2,42%	Insignifiant
V_c [m/min]* f [mm/tr]	1	0,38	0,38	22,04	0,0002	8,37%	Signifiant
V_c [m/min]* a_p [mm]	1	0,080	0,080	4,67	0,0453	1,76%	Signifiant
f [mm/tr]* a_p [mm]	1	0,074	0,074	4,30	0,0536	1,62%	Insignifiant
V_c [m/min]* V_c [m/min]	1	0,23	0,23	13,27	0,0020	5,06%	Signifiant
f [mm/tr]* f [mm/tr]	1	0,27	0,27	15,62	0,0010	5,94%	Signifiant
a_p [mm]* a_p [mm]	1	0,012	0,012	0,68	0,4226	0,26%	Insignifiant
erreur	17	0,29	0,017			6,38%	
Total	26	4,54				100%	

On peut observer à partir des résultats ANOVA pour (Ra) présentés dans le *tableau III.2* que la vitesse de coupe est le facteur le plus important affectant la rugosité de surface. Sa contribution est de (53.30%).

Suivi par l'avance par tour avec une contribution de 19.38% suivi par les interactions (V_c^2) et (f^2) avec une contribution de (5,06%) et (5,94%) respectivement.

III.2.2.2 Analyse de variance (ANOVA) pour Fx

Le *tableau III.3* illustre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour l'effort de coupe (Fx) en fonction de V_c , f et a_p .

Tableau III.3. Analyse de la variance (ANOVA) pour Fx

Source	dl	Som car séq	CM ajust	Valeur F	Valeur de P	Contribution	Observations
Régression	9	5844,12	649,35	20,55	< 0.0001	91,58%	Signifiant
Vc[m/min]	1	209,51	209,51	6,63	0,0197	3,28%	Insignifiant
f [mm/tr]	1	115,72	115,72	3,66	0,0727	1,81%	Insignifiant
ap [mm]	1	5353,94	5353,94	169,41	< 0.0001	83,89%	Signifiant
Vc[m/min]*f [mm/tr]	1	6,46	6,46	0,20	0,6568	0,10%	Insignifiant
Vc[m/min]*ap [mm]	1	8,37	8,37	0,26	0,6134	0,13%	Insignifiant
f [mm/tr]*ap [mm]	1	40,66	40,66	1,29	0,2724	0,63%	Insignifiant
Vc[m/min]*Vc[m/min]	1	3,61	3,61	0,11	0,7395	0,05%	Insignifiant
f [mm/tr]*f [mm/tr]	1	23,60	23,60	0,75	0,3995	0,36%	Insignifiant
ap [mm]*ap [mm]	1	82,51	82,51	2,61	0,1245	1,29%	Insignifiant
erreur	17	537,25	31,60			8,41%	
Total	26	6381,38				100%	

L'analyse des résultats montre que le facteur le plus important qui affecte l'effort de coupe (Fx) est la profondeur de passe avec une contribution de (83.89%).

III.2.2.3 Analyse de variance (ANOVA) pour Fy

Le *tableau III.4* montre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour l'effort de coupe (Fy) en fonction de Vc, f et ap.

Tableau III.4. Analyse de la variance (ANOVA) pour Fy

Source	dl	Som car séq	CM ajust	Valeur F	Valeur de P	Contribution	Observations
Régression	9	9705,33	1078,37	17,00	< 0.0001	89,99%	Signifiant
Vc[m/min]	1	110,36	110,36	1,74	0,2047	1,02%	Insignifiant
f [mm/tr]	1	1650,20	1650,20	26,01	< 0.0001	15,30%	Signifiant
ap [mm]	1	7744,30	7744,30	122,08	< 0.0001	71,81%	Signifiant
Vc[m/min]*f [mm/tr]	1	26,97	26,97	0,43	0,5231	0,25%	Insignifiant
Vc[m/min]*ap [mm]	1	8,93	8,93	0,14	0,7121	0,08%	Insignifiant
f [mm/tr]*ap [mm]	1	34,88	34,88	0,55	0,4685	0,32%	Insignifiant
Vc[m/min]*Vc[m/min]	1	15,01	15,01	0,24	0,6328	0,13%	Insignifiant
f [mm/tr]*f [mm/tr]	1	16,21	16,21	0,26	0,6197	0,15%	Insignifiant
ap [mm]*ap [mm]	1	42,81	42,81	0,67	0,4227	0,39%	Insignifiant
erreur	17	1078,43	63,44			10%	
Total	26	10783,76				100%	

Les résultats indiquent que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant l'effort de coupe (F_y) avec une contribution de (71,81%). d'un autre coté, la vitesse de coupe (V_c), l'interaction ($f \times ap$) et les termes carrés (ap^2 , f^2) ne sont pas significatives, leurs contributions sont (1,02 ; 0,32 ; 0,39 et 0,15) % respectivement.

III.2.2.4 Analyse de variance (ANOVA) pour F_z

Le **tableau III.5** montre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour l'effort de coupe (F_z) en fonction de V_c , f et ap .

Tableau III.5. Analyse de la variance (ANOVA) pour F_z

Source	dl	Som car séq	CM ajust	Valeur F	Valeur de P	Contribution	Observations
Régression	9	46280,48	5142,28	77,19	< 0.0001	97,61%	Signifiant
V_c[m/min]	1	16,51	16,51	0,25	0,6250	0,03%	Insignifiant
f [mm/tr]	1	10822,27	10822,27	162,44	< 0.0001	22,82%	Signifiant
ap [mm]	1	33020,09	33020,09	495,64	< 0.0001	69,64%	Signifiant
V_c[m/min]*f [mm/tr]	1	0,84	0,84	0,013	0,9119	0,001%	Insignifiant
V_c[m/min]*ap [mm]	1	195,88	195,88	2,94	0,1046	0,41%	Insignifiant
f [mm/tr]*ap [mm]	1	2297,72	2297,72	34,49	< 0.0001	4,84%	Signifiant
V_c[m/min]*V_c[m/min]	1	27,60	27,60	0,41	0,5284	0,05%	Insignifiant
f [mm/tr]*f [mm/tr]	1	0,48	0,48	7,173E-003	0,9335	0,001%	Insignifiant
ap [mm]*ap [mm]	1	14,21	14,21	0,21	0,6501	0,02%	Insignifiant
erreur	17	1132,56	66,62			2,38%	
Total	26	47413,04				100%	

Les résultats du **tableau III.5** indiquent que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant l'effort tangentiel (F_z). Sa contribution est de (69.64%). Le second facteur qui a une influence sur F_z est l'avance par tour (22.82%), suivi par la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution de (0.3%). L'interaction ($f \times ap$) est significative avec une contribution de (4.84%), tandis que, l'interaction ($ap \times ap$) est moins importante (0.05%).

III.2.3 Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre l'entrée, appelé les conditions de coupe (vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap)) et la sortie (Y), défini

comme un des aspects d'usinabilité (paramètres technologiques d'usinage) est donnée par :

$$Y = \varphi(Vc, f, ap)$$

Où φ est la fonction de réponse.

L'approximation des Y est proposé au moyen d'un modèle mathématique non-linéaire (quadratique), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres de coupe.

Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \varepsilon_{ij}$$

$$\text{Avec } \varepsilon_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij}$$

Où : b_0 est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ et b_{11}, b_{22}, b_{kk} sont les termes linéaires et quadratiques respectivement, tandis que b_{12}, b_{13}, b_{k-1} sont les termes d'interaction. X_i Représente les paramètres d'entrée (Vc, f et ap). ε_{ij} présente l'erreur d'ajustement pour le modèle de régression. y_{ij} est l'observation correspondante des essais, et \bar{y}_{ij} est la valeur ajusté.

Le coefficient de détermination R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2}$$

Avec y_i valeur de la réponse calculée à la i^{eme} expérience ;

\bar{y}_i Valeur mesurée à la i^{eme} expérience.

\bar{y} Valeur moyenne des réponses mesurées.

III.2.3.1 Analyse de régression pour Ra

L'analyse de régression de Ra en fonction de Vc, f et ap donne l'équation (III.1) du modèle complet avec un coefficient de corrélation $R^2 = 93,61\%$

$$\text{Ra} = +1,00 - 0,37 \times Vc + 0,22 \times f - 0,078 \times ap + 0,18 \times Vc \times f + 0,081 \times Vc \times ap + 0,078 \times f \times ap + 0,20 \times Vc^2 + 0,21 \times f^2 - 0,044 \times ap^2 \quad (\text{III.1})$$

III.2.3.2 Analyse de régression pour Fx

L'analyse de régression de Fx en fonction de Vc, f et ap donne l'équation (III.2) du modèle complet avec un coefficient de corrélation $R^2 = 91,58\%$

$$F_x = +28,91 + 3,41 \times V_c + 2,54 \times f + 17,30 \times a_p - 0,73 \times V_c \times f + 0,83 \times V_c \times a_p + 1,84 \times f \times a_p - 0,81 \times V_c^2 - 1,98 \times f^2 + 3,71 \times a_p^2 \quad (\text{III.2})$$

III.2.3.3 Analyse de régression pour Fy

L'analyse de régression de Fy en fonction de Vc, f et ap donne l'équation (III.3) du modèle complet avec un coefficient de corrélation $R^2 = 89,99\%$

$$F_y = +56,51 + 2,48 \times V_c + 9,60 \times f + 20,80 \times a_p - 1,49 \times V_c \times f + 0,86 \times V_c \times a_p + 1,71 \times f \times a_p + 1,65 \times V_c^2 - 1,64 \times f^2 + 2,67 \times a_p^2 \quad (\text{III.3})$$

III.2.3.4 Analyse de régression pour Fz

L'analyse de régression de Fz en fonction de Vc, f et ap donne l'équation (III.4) du modèle complet avec un coefficient de corrélation $R^2 = 97,61\%$

$$F_z = +96,83 + 0,96 \times V_c + 24,59 \times f + 42,95 \times a_p - 0,26 \times V_c \times f + 4,02 \times V_c \times a_p + 13,84 \times f \times a_p + 2,23 \times V_c^2 - 0,28 \times f^2 - 1,54 \times a_p^2 \quad (\text{III.4})$$

III.2.4 Représentation graphique 3D

III.2.4.1 La rugosité Ra

Pour étudier l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe) sur le critère de rugosité (Ra), la surface de réponse (3D) est tracée dans la *figure III.1*. On observe que (Ra) augmente d'une manière significative avec la diminution de (Vc). Cependant, l'avance par tour (f) a une influence moins importante sur (Ra), car sa pente est faible par rapport à la pente de (Vc). Une rugosité minimale est donnée avec une (Vc) forte et une avance faible.

Pour les différentes valeurs de la profondeur de passe (ap), (Ra) ne varie pas beaucoup donc (ap) n'a pas d'effet important sur (Ra).

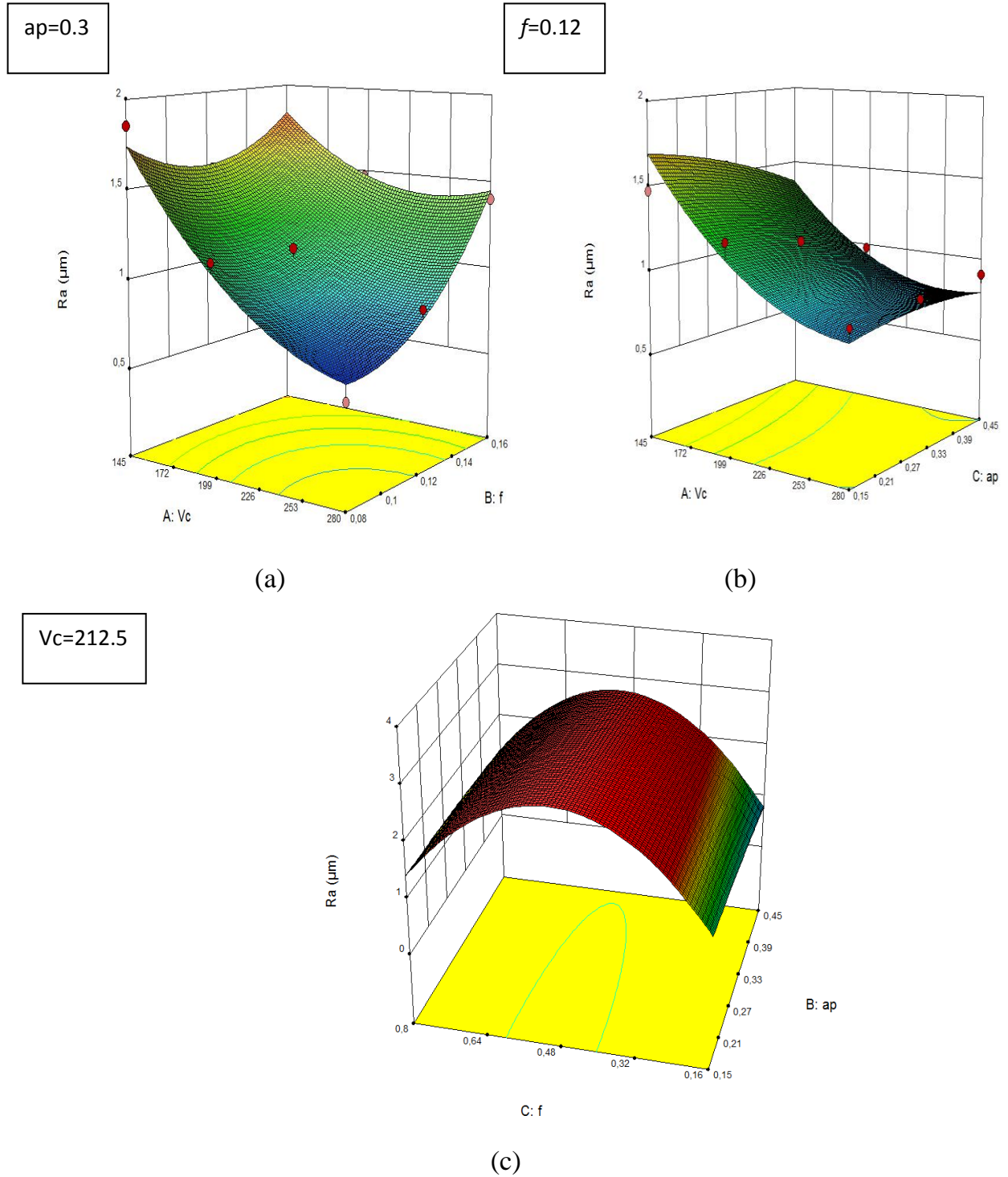


Figure III.1. Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité (Ra)

III.2.4 L'effort de coupe F_x

La présentation en 3D dans la *figure III.2* montre que la pente la profondeur de passe est le plus supérieure par rapports aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort axial.

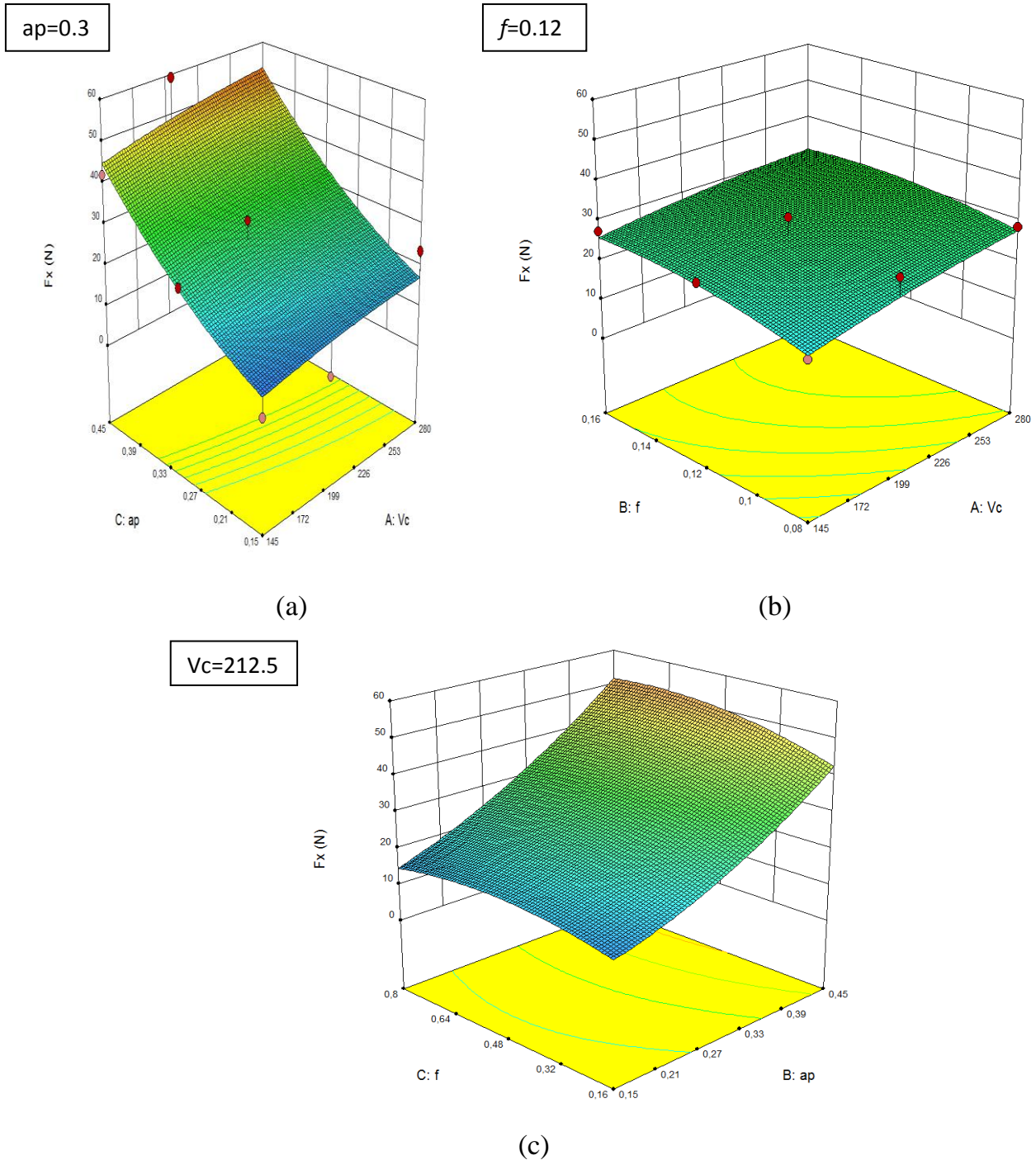


Figure III.2. Effet des paramètres de régime de coupe sur (F_x)

III.2.4 L'effort de coupe F_y

La **figure III.3** montre la variation de (F_y) en fonction de l'avance, la vitesse de coupe et le profondeur de passe. On remarque que (F_y) augmente avec l'augmentation de (a_p) tandis que la variation de (f) n'a pas un effet important sur l'augmentation du (F_y). On remarque aussi que la vitesse de coupe n'affecte pas l'effort de coupe radial.

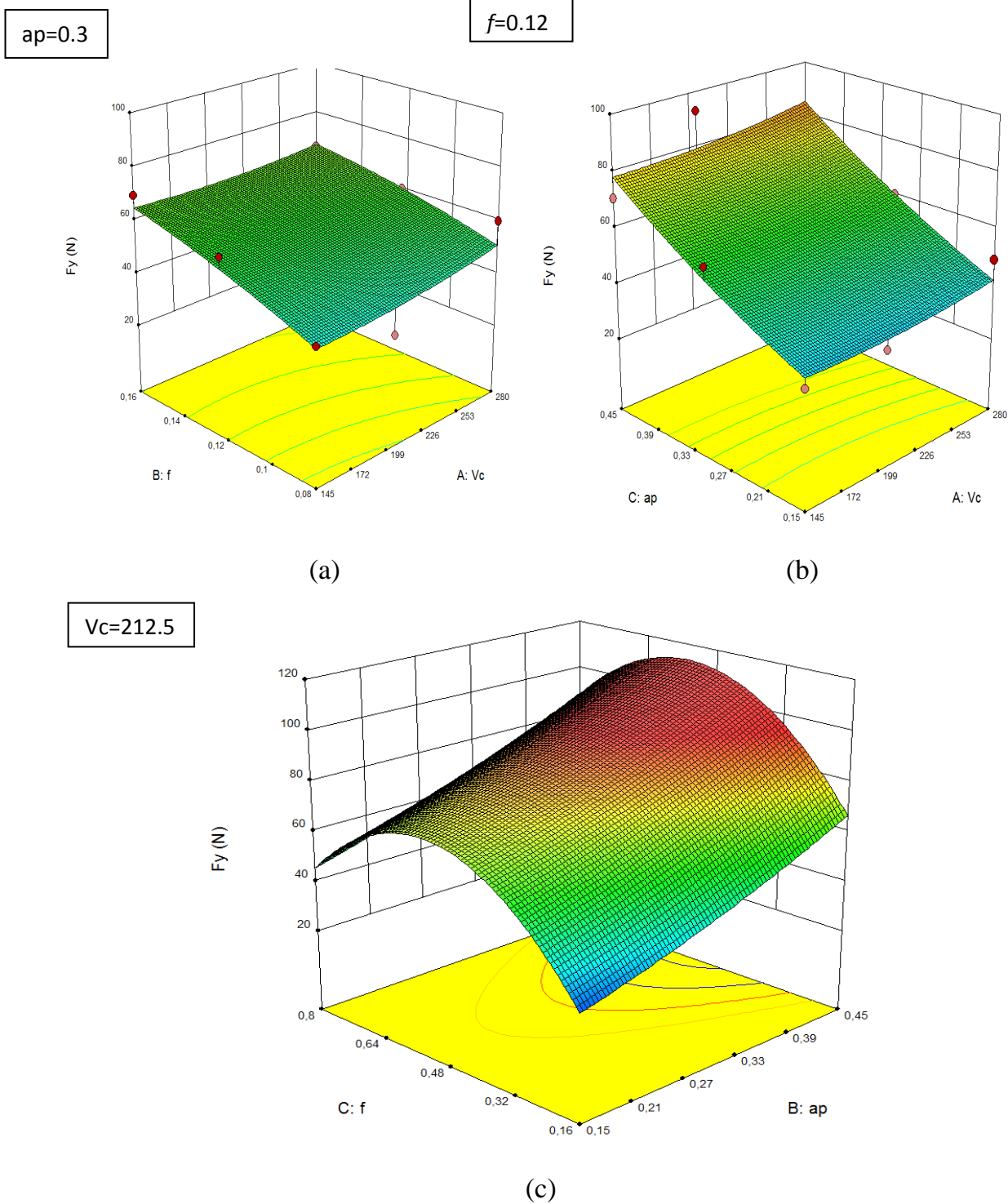


Figure III.3. Effet des paramètres de régime de coupe sur (F_y)

III.2.4 L'effort de coupe F_z

Les relations entre l'effort tangentiel et la profondeur de passe et l'avance sont visualisées sur la *figure III.4. (a, b et c)*. On remarque que l'effort tangentiel (F_z) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) et de l'avance (f). Pour les différentes valeurs de la vitesse de coupe (V_c), (F_z) ne varie pas beaucoup donc (V_c) n'a pas d'effet important sur (F_z).

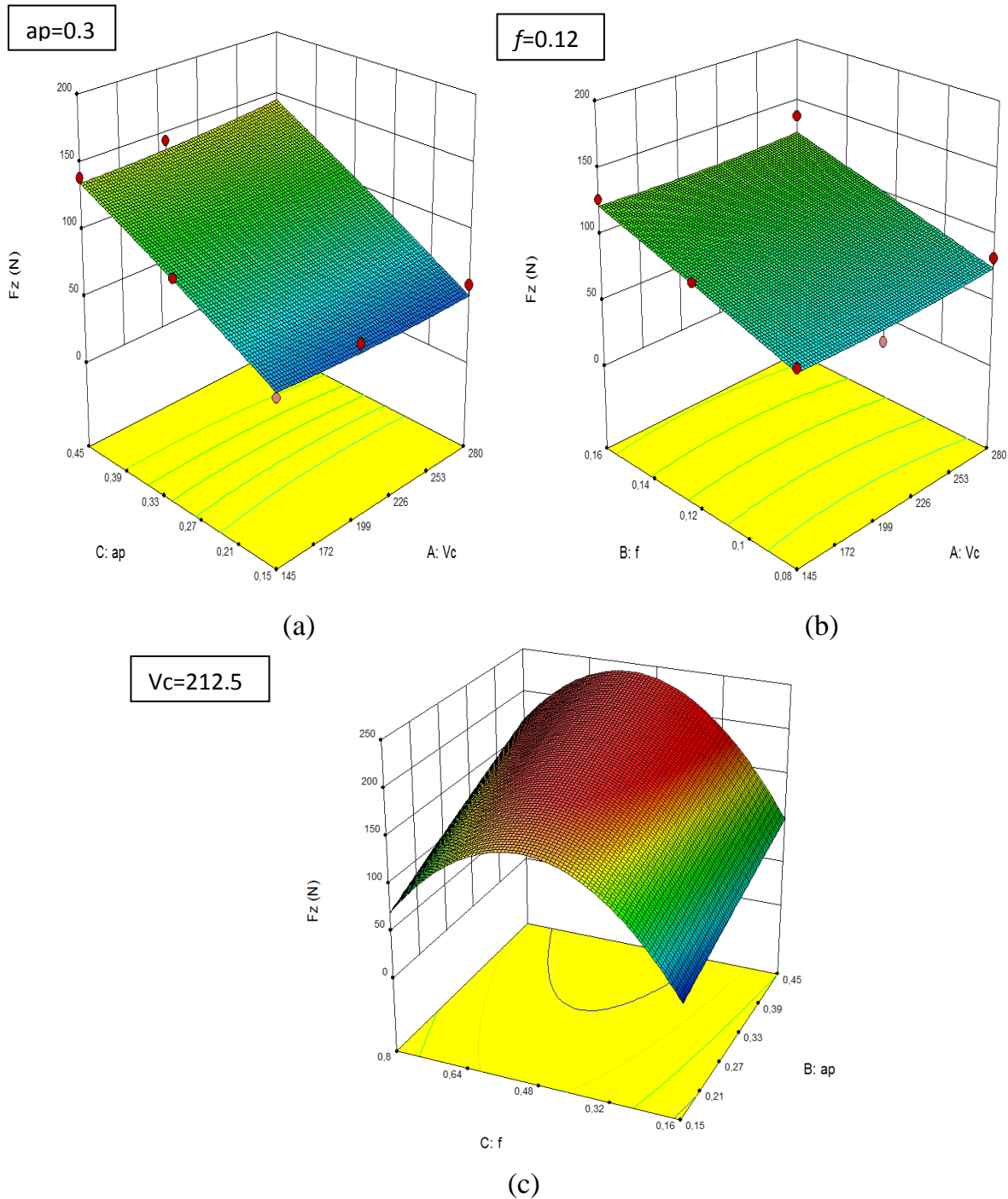


Figure III.4. Effet des paramètres de régime de coupe sur (F_y)

D'après l'analyse des figures (a), (b) et (c) on constate que l'effort tangentiel augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance. Ceci est dû à l'élargissement de la section de contact entre l'outil et la pièce usinée. Aussi, l'augmentation de la profondeur de passe mène à la diminution de la pression de coupe, mais par contre fait augmenter considérablement les efforts de coupe. On peut déduire que l'influence de la profondeur de passe est plus importante, et ce à partir de la pente de la variation de l'effort tangentiel suivant l'axe (ap).

III.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (rugosité et les efforts de coupe) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) lors de l'usinage de l'acier XC48.

Chapitre 04

Optimisation des conditions de coupe

I. INTRODUCTION

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage est une tâche très importante, elle permet le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus. Ce qui a généralement un impact économique direct sur la production tel que : le temps technologique d'usinage ou le coût global d'opération. L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, on utilise l'optimisation par l'analyse en composantes principale.

II. HISTORIQUE

L'ACP prend sa source dans un article de Karl Pearson publié en 1901 [13]. Il prolonge ses travaux dans le domaine de la régression et des corrélations entre plusieurs variables. Pearson utilise ces corrélations non plus pour expliquer une variable à partir des autres (comme en régression), mais pour décrire et résumer l'information contenue dans ces variables.

Encore connue sous le nom de transformée de Karhunen-Loève ou de transformée de Hotelling, l'ACP a été de nouveau développée et formalisée dans les années 1930 par Harold Hotelling [14]. La puissance mathématique de l'économiste et statisticien américain le conduira aussi à développer l'analyse canonique des corrélations, généralisation des analyses factorielles dont fait partie l'ACP.

III. OPTIMISATION PAR L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP ou PCA) repose sur une procédure mathématique qui transforme un ensemble de variables de réponse corrélées (liées entre elles) en un ensemble plus petit de variables de réponse non corrélées appelées composantes principales ou axes principaux. L'ACP est utilisé pour expliquer la structure de variance-covariance par des combinaisons linéaires des variables d'origines. L'ACP est donc un moyen efficace de déterminer un petit nombre de constructions qui expliquent les principales sources de variation dans un tel ensemble de réponses corrélées. L'ACP est fréquemment utilisée dans les problèmes d'optimisation multi-réponse de considérer les corrélations entre les réponses, c'est-à-dire de décortiquer les réponses multiples.

Il existe une variété de méthodes d'optimisation multi-réponse proposées, basées sur la transformation des données QL ou SN de Taguchi pour des réponses multiples en utilisant l'ACP [15].

L'ACP est une approche statistique multi variée introduite par Pearson et développé par Hotelling. ACP peut convertir les données des réponses multiples corrélées en plusieurs indices de qualité non corrélés. A La fonction mathématique est

alors formulée par rassemblant tout ou partie des indices de qualité appelés composites composante principale (CPC) qui représente la qualité globale du processus. Enfin, le CPC peut être utilisé pour déterminer les conditions optimales. Afin de faire toutes les réponses avec des dimensions différentes à diverses gammes du système unique, ACP est généralement utilisés dans le prétraitement des données.

IV. ALGORITHME DE LA METHODE

Actuellement, l'ACP trouve de nombreuses applications dans de nombreux domaines scientifiques. Son objectif est principalement porté sur l'analyse de corrélation entre les objets à l'aide de modèles linéaires pour chaque mesure de performance. Pour déterminer les combinaisons optimales lors du tournage final.

L'algorithme d'analyse en composantes principales est donné ci-dessous :

Etape 1 : Convertir les données expérimentales en rapport signal/bruit :

$$\eta_{ij} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad (\text{IV.1})$$

Etape 2 : Normaliser le rapport signal/bruit :

$$x_i^*(j) = \frac{x_i^{(o)}(j) - \min x_i^{(o)}(j)}{\max x_i^{(o)}(j) - \min x_i^{(o)}(j)} \quad (\text{IV.2})$$

Etape 3 : Représenter les réponses multiples par une matrice :

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & \cdots & x_1(n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m(1) & \cdots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

Etape 4 : Evaluer le tableau des coefficients de corrélation :

$$R_{jl} = \frac{\text{COV}(x_i(j), x_i(l))}{\sigma_{x_i(j)} \times \sigma_{x_i(l)}}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (\text{IV.4})$$

Etape 5 : Calculer les valeurs propres et les vecteurs propres :

$$(R - \lambda_k I_m) V_{ik} = 0 \quad (\text{IV.5})$$

Etape 6 : Obtenir les composantes principales

$$P_{ik} = \sum_{j=1}^m x_i(j) \times V_{jk} \quad (\text{IV.6})$$

Étape 7 : Calculer l'indice total des composantes principales :

$$P_i = \sum_{k=1}^m P_{ik} \times e(k) \quad (\text{IV.7})$$

$$\text{Où : } e(k) = \frac{eig(k)}{\sum_{k=1}^m eig(k)} \quad (\text{IV.8})$$

$$eig(k) = k^{\text{th}} \quad \text{Valeur propre}$$

Étape 8 : Générer un tableau de réponse et sélectionner les niveaux optimaux des paramètres de coupe :

$$\bar{v}_1 = \frac{(TPCI)_1 + (TPCI)_2 + \dots + (TPCI)_9}{9} \quad (\text{IV.9})$$

Étape 9 : Calculer la fonction objective combinée (FOC) :

$$\text{valeur normalisée pondérée pour chaque réponse} = W_i \frac{\text{valeur mesurée de caractéristique de qualité à chaque essai}}{\text{valeur minimale de caractéristique de qualité dans l'ensemble de données}} \quad (\text{IV.10})$$

Étape 10 : Effectuez l'analyse statistique de la variance (ANOVA).

Étape 11 : Effectuez un test de confirmation.

V. DEROULEMENT DES EXPERIENCES

Dans la présente étude sur le tournage de l'acier XC45, les quatre caractéristiques de qualité retenues sont la rugosité de surface et les composantes de l'effort de coupe F_x , F_y et F_z .

Les facteurs et niveaux de contrôle ont été sélectionnés selon le catalogue « Sandvik Coromant .2017. Turning tools ». et sont présentés dans le **tableau IV.1** :

Tableau IV.1 : Les facteurs et leurs niveaux

Code	Paramètres de l'usinage	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
A	V_c [m/min]	145	200	280
B	f [mm/tr]	0.08	0.12	0.16
C	a_p [mm]	0.15	0.3	0.45

Les expériences ont été réalisées en mode de tournage à sec. Nous avons réalisé une série d'expériences composées de 27 essais, ce qui correspond à un plan de Taguchi L27. Les essais sont réalisés en utilisant la nuance de carbure revêtu GC1025.

Les résultats de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe sont mentionnés dans le **tableau IV.2**.

Tableau IV.2 : Plan d'expérience de 27 essais pour l'élaboration des modèles de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage pour le carbure revêtu GC1025.

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

VI. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSION

Dans ce paragraphe, la procédure détaillée pour trouver les combinaisons optimales des paramètres de coupe en utilisant L'analyse en composantes principales est discutée.

VI.1 Combinaison optimale des paramètres du processus

Dans le tableau 2. La rugosité de surface et les composantes de l'effort de coupe sont considérées comme des caractéristiques de qualité. Ces caractéristiques de qualité sont continues et non négatives. Les résultats sont substitués en Eq. (IV.1) pour obtenir les rapports S/B de la rugosité de surface et des composantes de l'effort de coupe. Généralement, plus le rapport signal/bruit est élevé, plus la caractéristique de qualité est meilleure. Les rapports S/B calculés sont normalisés à l'aide de l'équation (IV.2) et sont présentés dans le **tableau IV.3**.

Tableau IV.3 : Rapport signale sur bruit

Signal/Bruit				signal/Bruit normalisé			
Ra	Fx	Fy	Fz	Ra	Fx	Fy	Fz
-5,845121	-21,06925	-31,1501	-33,98287	1	1	1	0
-5,343434	-25,37623	-32,83542	-37,59567	1	1	0,369070	0,046105
-3,750414	-31,51299	-35,00553	-38,72122	1	1	0	0,192504
-3,346346	-17,15870	-30,83657	-34,58491	1	0,41503	1	0,229638
-3,8066	-27,99001	-35,57748	-39,89601	1	0,41503	0,369070	0,187337
-1,510939	-32,47945	-37,00311	-42,88276	1	0,41503	0	0,398312
-5,845121	-22,10338	-33,23246	-37,01047	1	0	1	0
-4,810984	-28,77401	-36,87337	-42,08905	1	0	0,369070	0,095037
-5,620667	-34,05722	-39,05584	-44,60846	1	0	0	0,020627
-2,144199	-23,43452	-29,80198	-32,03685	0,511312	1	1	0,340115
-1,289159	-29,06942	-30,79907	-35,97853	0,511312	1	0,369070	0,418694
3,478503	-30,79155	-37,26407	-40,81600	0,511312	1	0	0,856843
-1,798102	-16,28495	-30,74630	-35,48303	0,511312	0,41503	1	0,371922
-1,061568	-30,34127	-34,25131	-39,43757	0,511312	0,41503	0,369070	0,439609
0,175478	-35,44643	-39,37619	-43,19855	0,511312	0,41503	0	0,553294
-3,045766	-24,48029	-31,62761	-35,08237	0,511312	0	1	0,257261
-3,346346	-27,74067	-35,67950	-41,30935	0,511312	0	0,369070	0,229638
-2,797581	-33,43086	-39,50863	-44,91469	0,511312	0	0	0,280069
4,882502	-19,53616	-26,93488	-31,27673	0	1	1	0,985871
5,036239	-29,15763	-35,57026	-38,40455	0	1	0,369070	1
4,013189	-34,12581	-37,41041	-40,55025	0	1	0	0,905981
1,209614	-27,45455	-33,80214	-35,49471	0	0,41503	1	0,648332
1,012199	-29,44049	-35,64084	-38,80136	0	0,41503	0,369070	0,630189
0,819172	-33,86926	-37,94154	-42,87153	0	0,41503	0	0,612450

-2,542095	-24,69540	-34,51659	-35,23705	0	0	1	0,303548
-2,922560	-28,39581	-36,39614	-42,78183	0	0	0,369070	0,268584
-2,922560	-35,39492	-38,86098	-45,17657	0	0	0	0,268584

Les coefficients de corrélation sont obtenus à l'aide de l'équation (4.4). A partir du tableau des coefficients de corrélation, les valeurs propres et les vecteurs propres sont calculés à l'aide de MATLAB.

Les vecteurs propres sont toujours orthogonaux les uns par rapport aux autres. La valeur propre correspondante (2,75498414, 1,04318035, 0,14938982, et 0,05244569) et les vecteurs propres sont :

Tableau IV.4 : Vecteurs propres

-0,053396	0,214950	0,974882	-0,023443
0,069055	0,807244	-0,160649	0,56371
-0,733232	-0,338175	0,048541	0,58792
0,674351	-0,43334	0,146423	0,57967

Des coefficients de corrélation sont obtenus en utilisant l'équation (IV.5).

VI.2 OBTENTION DES COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse en composantes principales est une technique utilisée pour transformer les variables corrélées en combinaisons de variables linéaires non corrélées, qui représentent la majeure partie de la variance de l'ensemble initial des observations. L'objectif fondamental de l'ACP est de déterminer les composantes principales. Si le nombre d'observations linéaires les combinaisons obtenues sont n , alors le nombre de composantes principales formées sera inférieur ou égal à n . En se référant au tableau 3 et à l'équation (IV.6), la composante principale (PC1) pour l'expérience N°1 peut être calculée comme suit :

$$\begin{aligned}
 PC1 &= 1 \times (-0,0533) + 1 \times 0,0690 + 1 \times (-0,7332) + 0 \times 0,6743 \\
 &= 0,1075
 \end{aligned}$$

Le présent travail porte sur quatre réponses et donc sur quatre composantes principales : PC1, PC2, PC3 et PC4 sont déterminés. Les valeurs correspondantes figurent dans le **tableau IV.5**.

Tableau IV.5 : Les composantes principales et FOC pour les séries de mesures

Composantes principales					Poids normalisé				
PC1	PC2	PC3	PC4	ICPT	Ra	Fx	Fy	Fz	COF
0,1075	0,0319	0,0296	1,2806	0,1002	1,1550	0,5724	0,5361	0,4506	2,7142
0,0125	0,0183	0,0661	0,9234	0,0279	1,0902	0,9399	0,6509	0,6831	3,3641
0,0545	-0,1153	0,2401	0,5910	0,0242	0,9075	1,9051	0,8357	0,7776	4,4259
0,0618	0,2563	0,2156	1,3798	0,1356	0,8663	0,3649	0,5171	0,4830	2,2313
0,0438	0,0840	0,1909	0,6190	0,0673	0,9134	1,2699	0,8926	0,8902	3,9660
-0,0454	0,0717	0,3973	0,2908	0,0061	0,7013	2,1293	1,0518	1,2555	5,1378
0,0783	0,1387	-0,0016	1,0266	0,1035	1,1550	0,6448	0,6814	0,6386	3,1198
0,0151	0,1344	0,0794	0,4461	0,0543	1,0254	1,3898	1,0362	1,1459	4,5972
0,0051	0,0331	0,0162	0,0852	0,0138	1,1255	2,5535	1,3322	1,5314	6,5426
0,0966	-0,0916	0,4068	1,3472	0,0755	0,7543	0,7516	0,4591	0,3602	2,3251
-0,0610	-0,1624	0,4852	0,9686	-0,0536	0,6836	1,4379	0,5149	0,5670	3,2034
0,0517	0,1840	0,8509	0,4037	0,1206	0,3948	1,7533	1,0839	0,9896	4,2216
0,0085	0,3493	0,3379	1,3690	0,1275	0,7248	0,3300	0,5118	0,5356	2,1022
-0,0332	-0,0108	0,4665	0,6250	-0,0001	0,6659	1,6647	0,7662	0,8444	3,9412
0,0587	0,0537	0,5607	0,0757	0,0764	0,5775	2,9963	1,3822	1,3020	6,2580
0,0559	-0,0094	0,2956	1,1060	0,0616	0,8368	0,8478	0,5664	0,5114	2,7624
-0,0202	0,1504	0,2148	0,5616	0,0407	0,8663	1,2340	0,9031	1,0475	4,0508
0,0050	0,1369	0,2589	0,0637	0,0497	0,8132	2,3758	1,4035	1,5864	6,1789
-0,0542	0,1107	1,0227	1,6126	0,0509	0,3359	0,4798	0,3300	0,3300	1,4757
0,0681	0,1628	1,0087	0,6281	0,1353	0,3300	1,4526	0,8918	0,7497	3,4242
0,0585	0,0497	0,9290	0,3087	0,0920	0,3713	2,5737	1,1023	0,9598	5,0070
0,1311	0,0207	0,6891	0,8905	0,1331	0,5127	1,1940	0,7276	0,5363	2,9705
0,0717	0,0857	0,6461	0,6086	0,1039	0,5245	1,5007	0,8991	0,7848	3,7090
-0,0066	0,0841	0,6142	0,2014	0,0430	0,5363	2,4988	1,1718	1,2539	5,4607
0,2136	0,0740	0,3298	0,9571	0,0000	0,7896	0,8690	0,7900	0,5206	2,9693
-0,0543	0,1964	0,2400	0,4465	0,0287	0,8250	1,3306	0,9808	1,2410	4,3774
-0,0519	0,0425	0,2639	0,0255	-0,014	0,8250	2,9786	1,3026	1,6350	6,7412

VI.3 CALCUL DE L'INDICE DE LA COMPOSANTE PRINCIPALE TOTALE (ICPT)

Pour obtenir la meilleure combinaison optimale de facteurs/niveaux, l'ICPT est calculé en utilisant les équations (IV.7) et (IV.8). Ainsi, l'ICPT est calculé à l'aide des équations (IV.7) et (IV.8), pour l'expérience N°1 est calculé comme suit :

$$(ICPT)_1 = (PC1)_1 \times 0,6887 + (PC2)_1 \times 0,2607 + (PC3)_1 \times 0,0373 + (PC4)_1 \times 0,0131 = 0,1002$$

Toutes les valeurs calculées de l'ICPT sont indiquées en conséquence dans le **tableau 4**.

VI.4 GENERER UN TABLEAU DE REPONSE POUR LA SELECTION DES PARAMETRES OPTIMAUX

Après avoir calculé les ICPT pour l'ensemble du cycle d'expérimentation, l'étape suivante consiste à construire le tableau des réponses.

A titre d'illustration, pour calculer la valeur de réponse du facteur A au niveau 1, on obtient d'après l'équation (4.9).

$$\bar{V}_{c_1} = \frac{ICPT_1 + ICPT_2 + \dots + ICPT_9}{9}$$

$$\bar{V}_{c_1} = \frac{0,1002 + 0,0279 + \dots + 0,0138}{9} = 0.0592$$

Les résultats sont représentés sur le **tableau IV.6**.

Tableau IV.6 : Valeurs des réponses correspondant aux facteurs

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau3
B : f	0,0636	0,0769	0,0375
C :ap	0,0847	0,0406	0,0447
A :Vc	0,0592	0,0553	0,0635

Cette méthode de calcul permet de déterminer les valeurs de réponse restantes correspondant aux facteurs et à leurs niveaux respectifs. La valeur maximale de l'ICPT correspondant à chaque facteur donne le niveau de facteur optimal prévu. La **figure IV .1** montre le graphe de réponse de l'ICPT. A partir du graphe de réponse, la meilleure combinaison est constituée par l'ensemble : A3 (Vc= 280 [m/min]), B2 (f= 0.12 [mm/tr]), et C1 (ap= 0.15 mm).

La fonction objective combinée (FOC) pour toutes les caractéristiques de qualités est calculée à l'aide de l'équation (IV.10) par l'attribution d'un poids égal à 0,7 pour la rugosité de surface et 0.1 pour les autres caractéristiques de qualité. Le tableau 4 indique les valeurs FOC pour toutes les essais expérimentales.

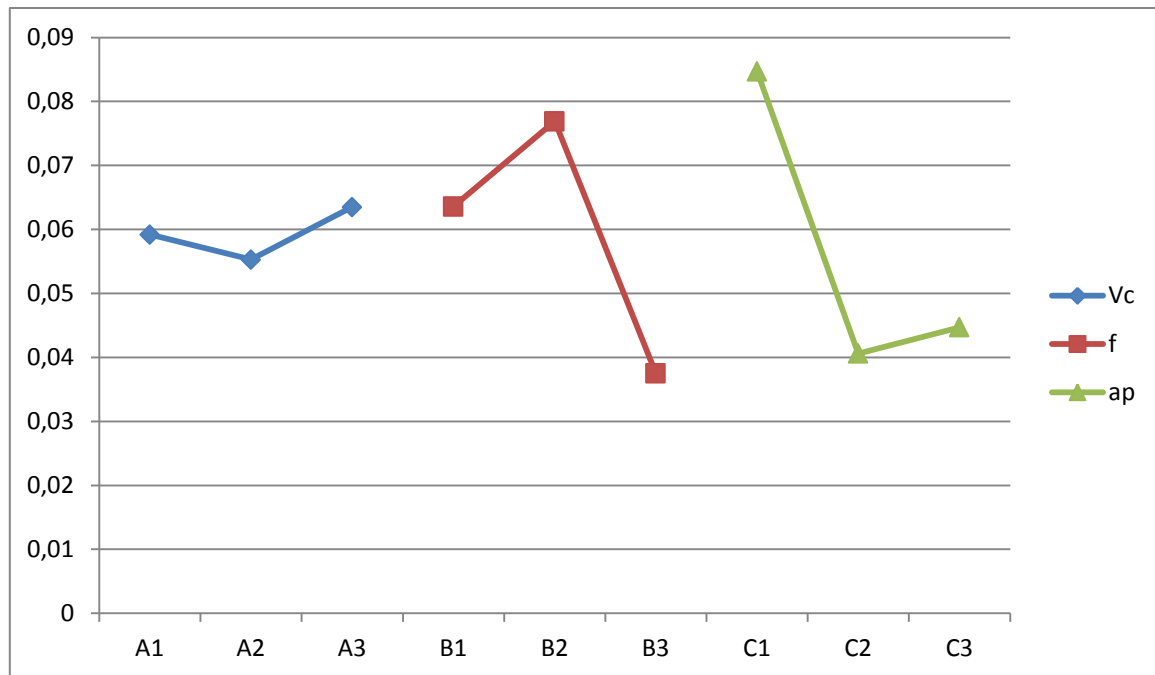


Figure IV.1 Graphique de réponse de l'indice de composante principale totale (ICPT)

VI.5 ANALYSE DE LA VARIANCE

Afin d'identifier les facteurs significatifs qui influencent les performances mesurées Ra, Fx, Fy et Fz une analyse de la variance ANOVA est effectuée pour Le COF et les résultats sont présentés dans le **tableau 6**. Les niveaux significatifs (pour $\alpha = 0,05$, avec un niveau de confiance de 95%) pour chaque source de variation, associée au test F sont également indiquées dans le **tableau 6** A partir du principe de Test F, si F est plus grand pour un paramètre spécifique, l'effet sur les caractéristiques de performance est plus important.

Dans notre cas, d'après le tableau ANOVA, pour la profondeur de passe (ap), la valeur F est la plus importante, avec une contribution totale de (79,43%) ; ce qui justifie clairement l'effet majeur sur les performances mesurées telles que la rugosité de surface, Fx, Fy et Fz. L'avance (f) était le deuxième facteur significatif avec (13,27 %) de contribution. La contribution de la vitesse de coupe (Vc) était de (0,0001 %), La contribution due à l'erreur était faible et signifie clairement qu'un facteur important n'a pas été omis et qu'il n'y a pas eu d'erreur de mesure élevée.

Tableau IV.7: Résultat de l'ANOVA pour la fonction objectif combiné (FOC)

Source	dl	Som car séqu	CM ajust	Valeur F	Valeur de P	Contribution	Observations
Régression	9	49,91	5,55	37,48	< 0.0001	95,19%	Signifiant
Vc[m/min]	1	7,240E-005	7,240E-005	4,892E-004	0,9826	0,0001%	Insignifiant
f [mm/tr]	1	6,96	6,96	47,04	< 0.0001	13,27%	Signifiant
ap [mm]	1	41,65	41,65	281,43	< 0.0001	79,43%	Signifiant
Vc[m/min]*f [mm/tr]	1	0,022	0,022	0,15	0,7054	0,041%	Insignifiant
Vc[m/min]*ap [mm]	1	0,23	0,23	1,58	0,2258	0,43%	Insignifiant
f [mm/tr]*ap [mm]	1	1,00	1,00	6,79	0,0185	1,90%	Insignifiant
Vc[m/min]*Vc[m/min]	1	0,084	0,084	0,57	0,4619	0,16%	Insignifiant
f [mm/tr]*f [mm/tr]	1	5,124E-005	5,124E-005	3,462E-004	0,9854	9,773E-05%	Insignifiant
ap [mm]*ap [mm]	1	0,21	0,21	1,43	0,2486	0,40%	Insignifiant
erreur	17	2,52	0,15			4,80%	
Total	26	52,43				100%	

VII. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons appliqué l'optimisation par l'analyse en composantes principales (ACP) pour optimiser la rugosité de surface et les efforts de coupe.

Conclusion générale

L'étude expérimentale de l'usinage de l'acier XC48 nous a permis d'étudier l'effet des conditions de coupe en tournage sur les paramètres de sortie à savoir ; la rugosité de surface usinée (R_a), l'effort axial (F_x), l'effort radial (F_y) et l'effort tangentiel (F_z). Par la suite élaborer une modélisation des conditions de coupes.

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- ✓ L'analyse ANOVA de la rugosité de surface (R_a) pour le plan L27, on constate que la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) sont les termes les plus significatifs avec les contributions respectives (53,30% et 19,38%). La meilleure rugosité de surface est obtenue en employant une petite avance.
- ✓ L'analyse de la variance de l'effort de coupe (F_x) a montré que la profondeur de passe (a_p) à un effet significatif sur (F_x) avec une contribution de 83,89%. Contrairement à la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) mais qui contribuent quand même avec 3,28% et 1,81%.
- ✓ L'analyse ANOVA de l'effort de coupe (F_y) montre que, la profondeur de passe (a_p) l'avance (f), affectent l'effort de coupe (F_y) avec des contributions de 71,81% ; 15,30% respectivement.
- ✓ D'après L'analyse ANOVA de l'effort tangentiel (F_z) montre que la profondeur de passe (a_p) est statistiquement le facteur le plus significatif sur (F_z) avec une contribution de 69,64%, le second facteur qui a une influence sur (F_z), est l'avance par tour (f) avec 22,82% de contribution, suivie par la vitesse de coupe avec une contribution de 0,03%.
- ✓ A partir de l'analyse en composantes principales, la meilleure combinaison des paramètres d'usinage pour avoir une rugosité minimale avec des efforts de coupe faible est constituée par l'ensemble : A3 ($V_c = 280$ [m/min]), B2 ($f = 0.12$ [mm/tr]), et C1 ($a_p = 0.15$ mm).
- ✓ L'ACP permet de représenter les individus, les variables et de compresser les données et d'éliminer du bruit

- [1] Czaplicki A. L'usinabilité et la coupe des métaux. Revue de la société royale belge des ingénieurs et des industries, n°12. pp. 708 – 736 (1962).
- [2] Tarek BRAHAM BOUCHNAK : étude de comportement en sollicitations extrêmes, et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique, thèse de doctorat, 2cole doctoral n°432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, 2010 pp 11.
- [3] Madani Mohammed Saïd et Ghouini Rabah, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master thème Amélioration des paramètres Technologiques de coupe en tournage.
- [4] Utilisation d'un tour <http://serge79.over-blog.com/article-la-vitesse-de-coupe-45528985.html>.
- [5] Dr Lakhdar BOUZID thèse doctorat Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-(2015)
- [6] ALLAL Mohammed, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master Optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 en utilisant la méthode RSM et l'approche de Taguchi.
- [7] BOUSSAID Khawla, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master Prédiction des paramètres technologiques d'usinage en tournage de l'acier inoxydable AISI 304 par la méthodologie de surface de réponse. (2017)
- [8] Nair, A., Govindan, P., & Ganesan, H. (2014). A comparison between different optimization techniques for CNC end milling process. *Procedia Engineering*, 97, 36-46.
- [9] Ramanujam, R., Venkatesan, K., Saxena, V., Pandey, R., Harsha, T., & Kumar, G. (2014). Optimization of Machining Parameters Using Fuzzy Based Principal Component Analysis during dry turning operation of Inconel 625–A hybrid approach. *Procedia Engineering*, 97, 668-676.
- [10] Rathore, S. K., Vimal, J., & Kasdekar, D. K. (2018). Determination of optimum parameters for surface roughness in CNC turning by using GRA-PCA. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 10(2), 37-49.
- [11] Sharma, A., Belokar, R. M., & Kumar, S. (2018). Multi-response optimization of Al2024/red mud MMC using hybrid Taguchi-GRA-entropy optimization technique. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4748-4760.
- [12] Murthy, K. S., & Rajendran, I. (2012). Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey

relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(3), 253-261.

[13] (en) Pearson, K., « On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space », *Philosophical Magazine*, vol. 2, no 6, 1901, p. 559–572 (lire en ligne [archive] [PDF])

[14] (en) « Analysis of a Complex of Statistical Variables with Principal Components », 1933, *Journal of Educational Psychology*.

[15] Su et Tong 1997 ; Antony 2000 ; Hsu 2001 ; Fung et Kang 2005.