

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté par : Bechoua Ahmed

Mansouri Abdel basset

Thème

Optimisation des paramètres de coupe pour les critères de la rugosité en tournage à sec par la méthode de surface de réponse

Soutenue publiquement le 25/06/2019 devant le jury :

Ameur Toufik	MCB	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Président
Belloufi Abderrahim	MCA	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Examineur
Bentaleb Fayçal	MCB	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Encadreur

Année universitaires : 2018/2019

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous souhaitons adresser nos remerciement les plus sincères à :

Notre encadreur Mr BENTALEB FAYCAL pour ses précieux conseils et son aide durant tout la période du travail.

Nos remerciements vont également aux Mrs AMEUR TOUFIK et Mrs BELLOUFI ABDERRAHIM pour s'être intéressé à ce travail et d'avoir bien voulu n'honorer de leur présence dans ce jury.

Nos vifs remerciement voute également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils out porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail ainsi qu'à la réussite de cette formation universitaire.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I Généralités sur le Tournage

I.1 Introduction	04
I.2. définition de tournage.....	04
I.3 Machine-outil	05
I.4 Classification des tours.....	05
I.4.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter.....	05
I.4.2 Les tours à copier.....	06
I.4.3 Les tours semi-automatiques.....	06
I.4.4 Les tours automatiques.....	06
I.4.5 Les tours automatiques multibroches.....	06
I.4.6 Les tours à commande numérique.....	06
I.5 Régimes de coupe.....	07
I.5.1 Ebauche.....	07
I.5.2 Finition.....	07
I.6 Conditions de coupe.....	07
I.6.1 Vitesse de coupe V_c	07
I.6.2 Vitesse d'avance V_f et avance par tour f	08
I.6.3 Profondeur de passe (a).....	09
I.7 Support et entraînement des pièces sur un tour.....	09
I.7.1 Montage en l'air.....	09
I.7.2 Montage mixte.....	09
I.7.3 Montage entre-pointes.....	10
I.8 Définitions des principales opérations de tournage.....	10
I.9 Les outils de coupe.....	13
I.9.1 Éléments de l'outil.....	13
I.9.2 Matériaux d'outil.....	14
I.10 Généralités sur les états de surface.....	15

TABLE DES MATIERES

Chapitre II Modélisation

II.1 Introduction.....	19
II.2 La méthode des surfaces de réponses (RSM)	19
II.2.1 Modélisation de la méthode.....	19
II.3 Plans d'expériences.....	20
II. 3.1 Définition.....	20
II.3.2 Notion d'espace expérimental	20
II.3.3 Notion de surface de réponse.....	23
II.3.4 Notion de modélisation mathématique	23
II.3.5 Le modèle de l'expérimentateur.....	24
II.4 Système d'équations.....	24
II.5 Les type des plans d'expérience.....	25
II.5.1 Plans factoriels complets.....	25
II.5.2 Plans réduits.....	27
II.5.3 Les tables de Taguchi.....	28

Chapitre III Etude expérimentale

III .1 Introduction	31
III.2 Résultats expérimentaux.....	31
III.2.1 Analyse des critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse (Plan Box- Behnken L13).....	31
III.2.2 Analyse des critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse (Plan de TAGUCHI L9).....	46
III.3 Comparaison entre les deux plans d'expérience (Box-behnken et Taguchi)	57
III.3.1 Plan de Box-Behnken.....	57
III.3.2 Plan de Taguchi.....	61
III.4 Comparaison entre la meilleure courbe de Taguchi (L9) et Box-behnken (L13) ...	64
III.5 Optimisation	65

LISTE DES FIGURES

Chapitre I Généralités sur le Tournage

Figure I.1 : Procédure de tournage	04
Figure I.2 : Chemin d'un tour parallèle.....	05
Figure I.3 : Les choix des paramètres de coupe.....	07
Figure I.4 : Vitesse de coupe V_c	08
Figure I.5 : Vitesse d'avance V_f	08
Figure I.6 : Les profondeurs de passe.....	09
Figure I.7 : Montage en l'air.....	09
Figure I.8 : Montage mixte.....	10
Figure I.9 : Montage entre-pointe	10
Figure I.10 : Le chariotage cylindrique et conique.....	10
Figure I.11 : Dressage extérieur et intérieur	11
Figure I.12 : Le perçage	11
Figure I.13 : L'alésage cylindrique et conique	11
Figure I.14 : Le rainurage intérieur et extérieur	12
Figure I.15 : Le tronçonnage	12
Figure I.16 : Le filetage intérieur et extérieur	12
Figure I.17 : Chanfreinage.....	13
Figure I.18 : Élément de l'outil	13
Figure I.19 : Les états de surface	16
Figure I.20 : La rugosité moyenne du profil.....	17
Figure I.21 : La hauteur de profil maximum	17
Figure I.22 : La hauteur de profil total.....	17

Chapitre II Modélisation

Figure II.1 : Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.....	21
---	----

LISTE DES FIGURES

Figure II.2 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental	21
Figure II.3: Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.....	22
Figure II.4 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur	22
Figure II.5 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.	23
Figure II.6: Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental.....	26
Figure II.7: Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs.....	28
Figure II.8: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs	29

Chapitre III Etude expérimentale

Figure III.1: Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR)	36
Figure III.2: Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML).....	39
Figure III.3 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER).....	43
Figure III.4 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG).....	46
Figure III.5 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR).....	49
Figure III.6 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML).....	52
Figure III.7: Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER).....	55
Figure III.8: Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG).....	57

LISTE DES FIGURES

Figure III.9 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (L13).....	60
Figure III.10 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (L9).....	63
Figure III.11 : Courbes d'optimisations (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II Modélisation

Tableau II-1 : Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs	29
---	----

Chapitre III Etude expérimentale

Tableau III-1 : Tableau des résultats pour L13.....	31
Tableaux III-2 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQC)	31
Tableaux III-3: Test de Student pour les critères de la rugosité : (a)Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQC)	32
bleaux III-4 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité: (a)Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR)	33
Tableaux III-5: Test de Student pour les critères de la rugosité (a) Ra, (b) Rt et (c)Rz (MQR)	34
Tableaux III-6: Test de Fisher pour les critères de la rugosité:(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz(ML)	36
Tableaux III-7: Test de student pour les critères de la rugosité: (a)Ra,(b)Rt et (c)Rz (ML)	33
Tableaux II-8: Test de Fisher pour les critères de la rugosité: (a)Ra, (b) Rt et (c) Rz (MEC)	39
Tableaux III-9 Test de Student pour les critères de la rugosité (a) Ra, (b) Rt et (c)Rz(MEC)	40
Tableaux III-10: Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER)	41
Tableaux III-11 Test de Student pour les critères de la rugosité (a) Ra, (b) Rt et (c)Rz (MER)	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux III-12: Test de Fisher pour les critères de la rugosité: (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG)	
.....	44
Tableaux III-13: Test de Student pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG)	
.....	44
Tableau III-14 : Tableau des résultats pour L9	46
Tableaux III-15: Test de Fisher pour les critères de la rugosité: (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR)	
.....	47
Tableaux III-16: Test de Student pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rt et (c)Rz(MQR)	
.....	47
Tableaux III-17 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML)	
.....	50
Tableaux III-18: Test de Student les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML)	
.....	50
Tableaux III-19 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rt et (c)Rz (MER)	
.....	52
Tableaux III-20: Test de Student pour les critères de la rugosité: (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz(MER)	
.....	53
Tableaux III-21 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité: (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz(MG)	
.....	55
Tableaux III-22: Test de Student pour les critères de la rugosité: (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz(MG)	
.....	56
Tableau III-23:Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés:(a)Ra,(b)Rt et (c)Rz	
.....	57
Tableau III-24 :Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimé(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz	
.....	61

NOTATIONS

Notations

Symbole	Unité	Désignation
V_c	m / min	Vitesse de coupe
f	mm/tour	Avance par tour
A_p	mm	Profondeur de passe
R_a	um	Rugosité arithmétique du profil
R_z	um	Rugosité maximal de profile
R_t	Um	Rugosité totale
ω	red/min	Vitesse angulaire
MSR		Méthode de surface de réponse
n	mm	Fréquence de rotation en
D	mm	Diamètre de la pièce à usiner (tournage)
N	mm	Vitesse de broche
ANOVA		Analyse de la variance
F_z		Avance par tour /dent (fraisage)
V_f		Vitesse d'avance
D		Diamètre de la pièce
ARS		Acier Rapides Supérieurs
CBN		Nitruure de Bore Cubique
Ma		Mouvement lent rectiligne uniforme d'avance
Mc		Mouvement rapide circulaire de coupe
W		L'ondulation
MQC		Modèles quadratiques complets
MQR		Modèles quadratiques réduits
ML		Modèles linéaires
MEC		Modèles exponentiels complets

NOTATIONS

MER

Modèles exponentiels réduits

MG

Modèles De Gilbert

Introduction générale

Introduction général

Le tournage est un opération très importants dans l'industrie mécanique. Ainsi, le choix des paramètres de coupe optimaux est très important afin d'assurer un meilleur état de surface des pièces usinées, une durée de vie plus importante des outils de coupe et une productivité plus élevée. Le résultat d'un bon choix de conditions de coupe peut être constaté par une diminution des niveaux d'efforts de coupe et de vibrations de l'outil [1].

L'objectif de cette étude est d'étudier les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance par tour) sur l'état de surface des pièces usinées pendant le tournage par deux plans d'expériences différentes : le plan de Box- Behnken (L13) et le plan de Taguchi (L9) qui utilisent la méthode de surface de réponse.

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

Le chapitre I : Dans ce chapitre nous avons fait une recherche bibliographique sur les procédés de tournage un rappel sur les principales notions de base de tournage, ensuite les différents phénomènes liés au procédé.

Le chapitre II : dans ce chapitre on va parler de la modélisation par la méthode de surfaces de réponses et les différents plans d'expérience, particulièrement le plan de Box- Behnken et plan de Taguchi.

Le chapitre III : Nous modélisons les critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse pour les deux plans d'expériences : Le plan de Box-Behnken (L13) et le plan de Taguchi (L9) et cela par le logiciel Minitab, le meilleur plan entre eux sera optimisé.

En fin nous terminons par une conclusion générale

Chapitre I

Généralités sur le tournage

I.1 Introduction

L'usinage est un procédé de fabrication qui consiste à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement de la matière à froid et sans déformation en utilisant un outil de coupe. La quantité de matière enlevée est dite copeaux et l'instrument avec lequel est enlevée la matière est appelé outil de coupe. L'opérateur utilise des machines dites machines-outils pour réaliser l'usinage d'une pièce [2].

Le tournage est l'un des procédés d'usinage. Il occupe une très importante place dans la fabrication mécanique à cause de sa simplicité et la possibilité de produire par lequel un grand nombre de forme cylindrique [3].

Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur le tournage : des définitions, les conditions de coupe, les outils de coupe en plus les opérations de tournage.

I.2 Définitions

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce (Figure I.1) [4].

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [4].

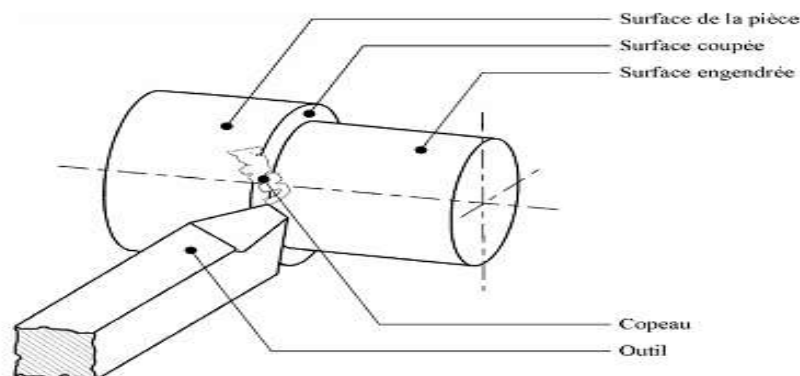


Figure I.1 : Procédure de tournage [4].

I.3 Machine-outil

Le tour est une machine d'outillage conçue pour le travail unitaire et la petite série. Il permet la réalisation de différentes surfaces nécessitant toujours une rotation de la pièce autour d'un axe de révolution.

Durant le processus de tournage la pièce à usiner effectue des rotations dans le tour.

L'outil de coupe opère longitudinalement ou bien transversalement par rapport à la pièce à usiner.

Le travail de l'outil de coupe s'opère à une vitesse déterminée, c'est ce que l'on appelle la vitesse d'avance.

Une certaine profondeur de coupe est de plus nécessaire pour le détachement des copeaux [5].

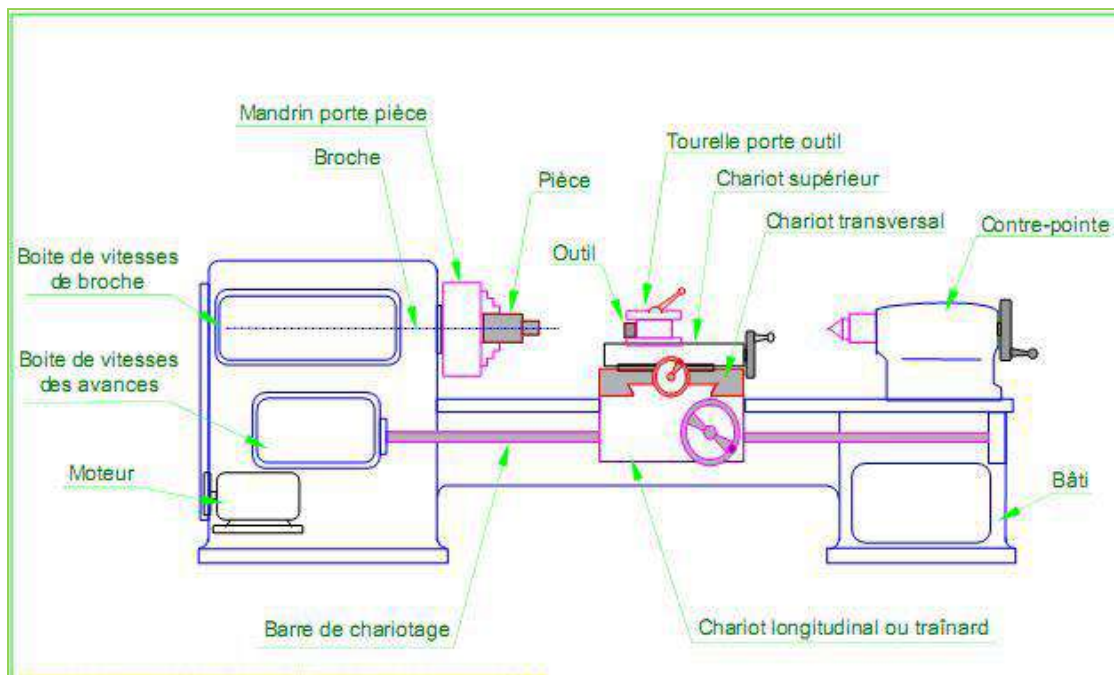


Figure I.2 : Chemin d'un tour parallèle [5].

I.4 Classification des machines de tour

Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont:

I.4.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe [5].

I.4.2 Les tours à copier

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque [5].

I.4.3 Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série [5].

I.4.4 Les tours automatiques

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries [5].

I.4.5 Les tours automatiques multibroches

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine.

Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches [5].

I.4.6 Les tours à commande numérique

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces.

La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives [5].

I.5 Régimes de coupe

I.5.1 Ebauche

C'est l'opération qui consiste à enlever le maximum de copeaux en un minimum de temps sans s'intéresser à l'état de surface. Il faut donc choisir de grandes profondeurs de passe et de grandes avances [2].

I.5.2 Finition

C'est l'opération qui consiste à finir la pièce aux cotes prescrites. Il faut donc choisir des grandes vitesses de coupe et de petites avances en obtiens des surfaces de grandes qualité [2].

I.6 Conditions de coupe

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...).

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...) ;
- La puissance de la machine ;
- La matière de l'outil (ARS, carbure...) ;
- La matière usinée (acier, aluminium...) ;
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage...) ;
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement) [6].

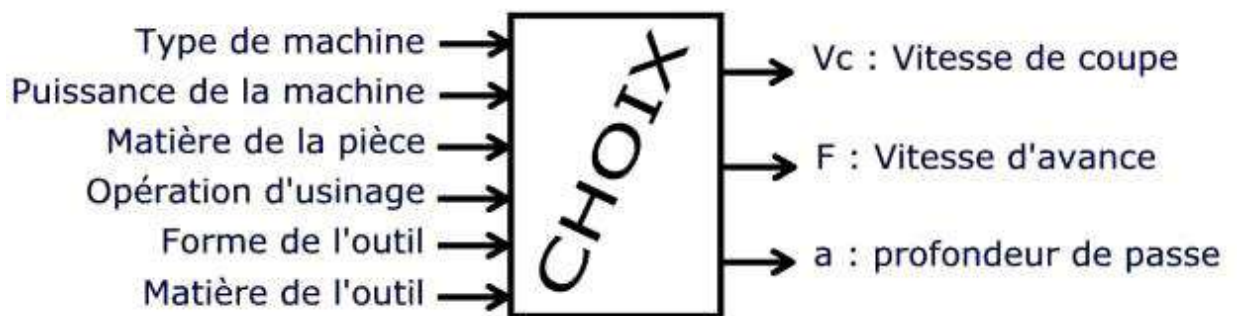


Figure I.3 : Les choix des paramètres de coupe [6].

I.6.1 Vitesse de coupe V_c

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse angulaire ω , cette vitesse étant communiquée par la broche de la machine vers la porte pièce.

La vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil est donnée par la formule suivante :

$$V_c = \frac{D}{2} * \omega \dots\dots\dots(I.1)$$

Avec:

- V_c : vitesse de coupe (m/min) ;
- D : Diamètre de la pièce (mm) ;
- ω : Vitesse angulaire (rd/min) [6].

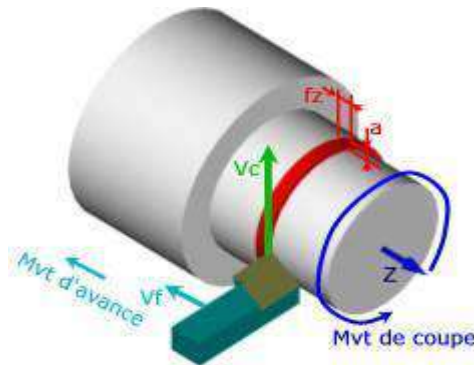


Figure I.4 : Vitesse de coupe V_c

La vitesse de la broche est donnée par l'expression suivante [4]:

$$N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D} \dots\dots\dots(I.2)$$

I.6.2 Vitesse d'avance V_f et avance par tour f

La vitesse d'avance V_f (mm/min), est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution.

C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. La vitesse d'avance V_f est donnée par la formule suivante [6]:

$$V_f = f * N \dots\dots\dots(I.3)$$

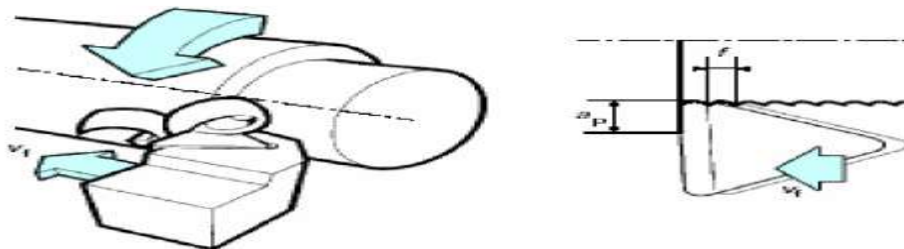


Figure I.5 : Vitesse d'avance V_f [6].

I.6.3 Profondeur de passe « a »

La profondeur de passe notée a en (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [6].

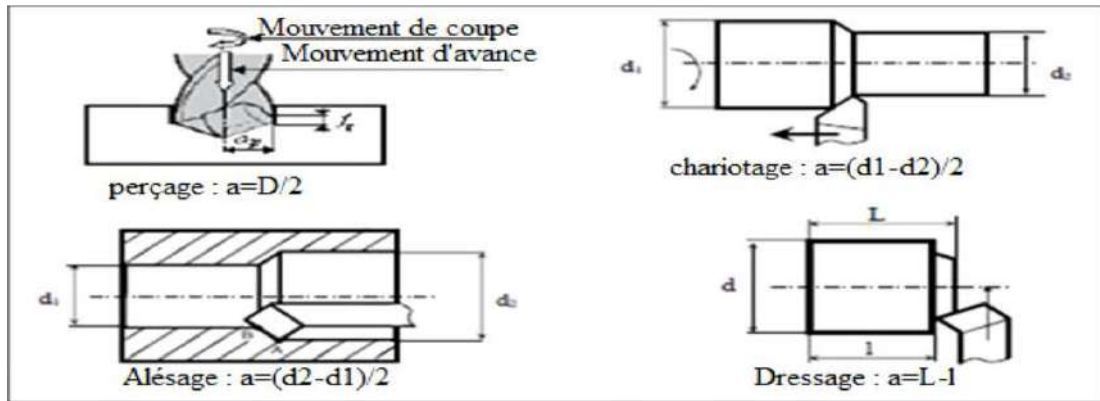


Figure I.6 : Les profondeurs de passe [6].

I.7 Support et entraînement des pièces sur un tour

Il existe trois principaux montages de la pièce à usiner sur le tour :

I.7.1 Montage en l'air

C'est un montage sur mandrin effectué pour les pièces courtes ($L < 4D$). Une des extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre reste libre [2].

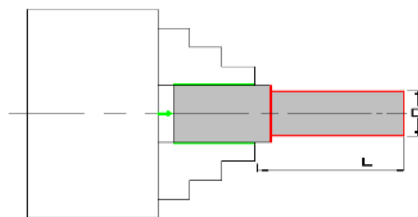


Figure I.7: Montage en l'air [7].

I.7.2 Montage mixte

Il est utilisé pour des pièces relativement longues ($4D < L < 8D$). Une des deux extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre extrémité est soutenue par de la contre-pointe [2].

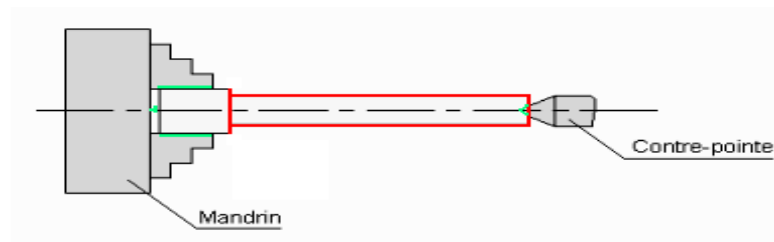


Figure I.8 : Montage mixte [7].

I.7.3 Montage entre-pointes

Pour l'usinage des pièces longues ($L > 8D$), on utilise le montage entre pointes. La pièce est soutenue par ses deux extrémités par deux pointes plus lunette [2].

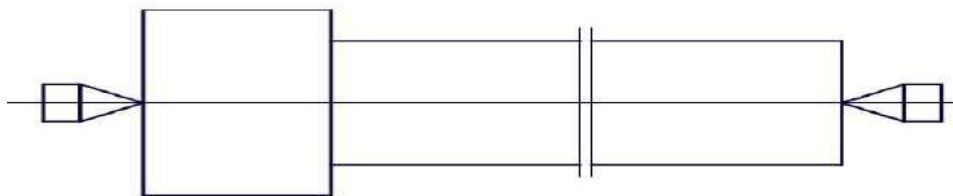


Figure I.9 : Montage entre-pointe [2].

I.8 Les définitions des principales opérations de tournage

a. Le chariotage

Le chariotage est l'opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.

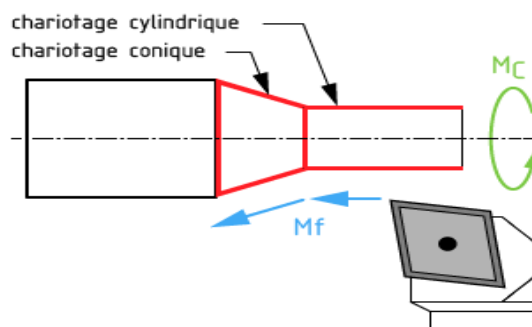


Figure I.10 : Le chariotage cylindrique et conique [5].

b. Le dressage

Le dressage est l'opération qui consiste à usiner une surface plane (extérieure ou intérieure) perpendiculaire à l'axe de la broche.

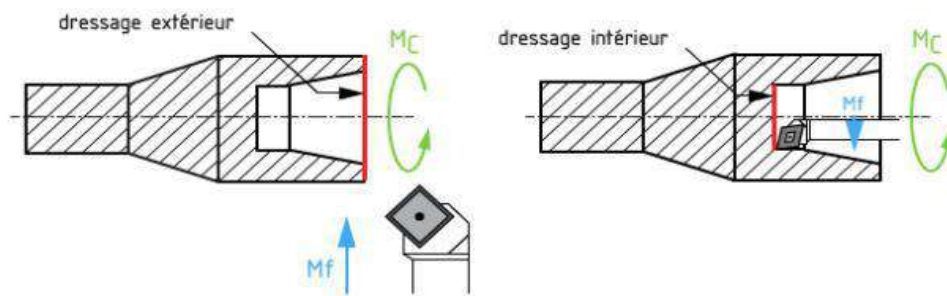


Figure I.11 : Dressage extérieur et intérieur [5].

c. Le perçage

Le perçage est l'opération qui consiste à usiner un trou dans la pièce (débouchant ou borgne) à l'aide d'une forêt. Souvent, l'axe du trou est confondu avec celui de la pièce.

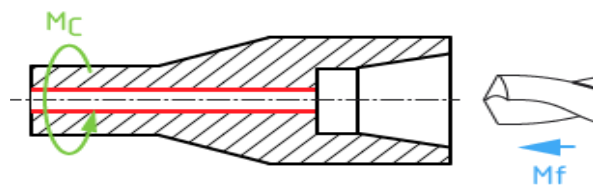


Figure I.12 : Le perçage [5].

d. L'alésage

C'est l'opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique de qualité à l'intérieur d'une pièce.

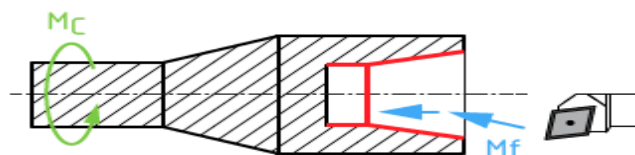


Figure I.13 : L'alésage cylindrique et conique [5].

e. Le rainurage

Le rainurage est l'opération qui consiste à usiner une rainure (association de 3 plans) intérieure ou extérieure. Celle-ci peut servir par exemple pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique.

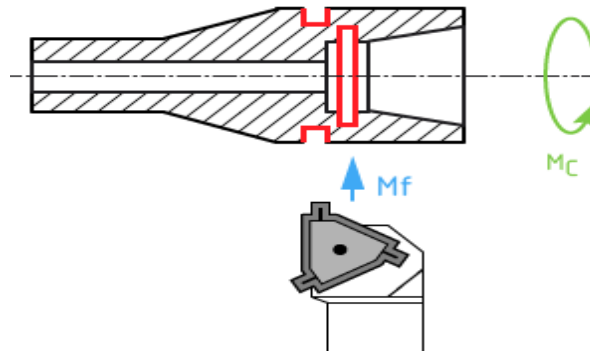


Figure I.14 : Le rainurage intérieur et extérieur [6].

f. Le tronçonnage

Le tronçonnage est l'opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin de détacher un tronçon.

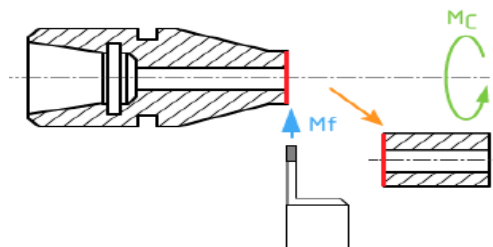


Figure I.15 : Le tronçonnage [5].

g. Le filetage :

Le filetage est l'usinage consistant à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.

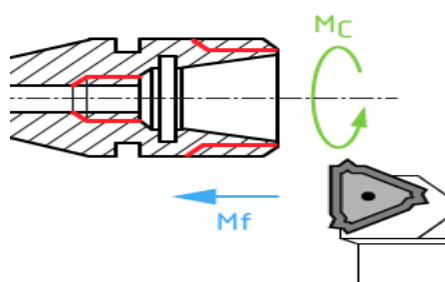


Figure I.16 : Le filetage intérieur et extérieur [5].

h. Chanfreinage

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.

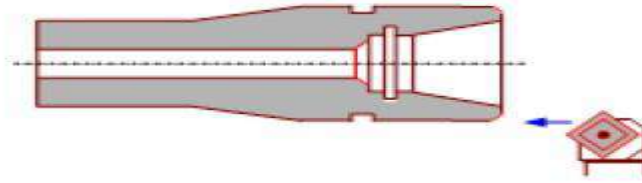


Figure I.17 : Chanfreinage [7].

I.9 Les outils de coupe

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement sous forme de copeaux. Il existe une très grande variété d'outils de coupe avec différents types de géométries, de matériaux et de revêtement. Malgré leur destination ainsi que leur aspect extérieur différent, n'importe quel outil comporte une partie active, c'est à dire celle qui enlève directement le copeau. La partie active de tous les outils de coupe, quelque soit sa forme ressemble à un outil de tournage classique. Tandis que les dents des outils de coupe spéciaux, tels que la meule ont des grains dont les arrêtes enlèvent les copeaux [8].

I.9.1 Éléments de l'outil

Les principaux éléments des différents outils sont semblables. Un outil de coupe peut être caractérisé par une géométrie d'arrête et une orientation dans l'espace définie par des angles de coupe normalisés. Généralement, dans un outil de coupe on trouve les éléments suivants (voir figure I.18) [8] :

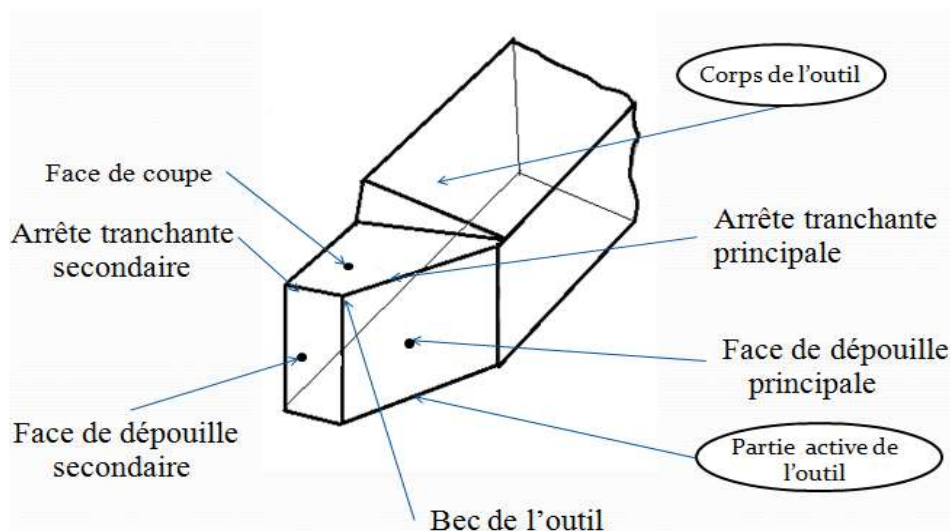


Figure I.18 : Élément de l'outil [8].

a. Corps de l'outil

C'est la partie de l'outil qui porte éléments composants l'outil (éléments coupants où les plaques) et qui sert à sa fixation et à mise en position sur la machine [8].

b. Partie active de l'outil

C'est la partie qui intervienne directement dans l'opération de coupe. La partie active de l'outil est composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arrêts tranchantes [8].

1) Face de coupe $A\gamma$

C'est la surface sur laquelle glisse le copeau lors de la coupe [8].

2) Face de dépouille $A\alpha$

C'est la surface devant laquelle passe la surface coupée par l'outil. En distingue la face en dépouille principale et la face en dépouille secondaire. La face en dépouille principale est celle dont l'intersection avec la face de coupe donne l'arrête tranchante principale [8].

3) Arrête tranchante principale S

C'est l'arrête tranchant destiné à l'enlèvement de la matière. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face en dépouille principale $A\alpha$ [9].

4) Arrête tranchante secondaire S'

C'est une arrête qui commence à l'extrémité de l'arrête principale et qui s'étend dans une autre direction. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face en dépouille secondaire $A\alpha'$. Certains outils possèdent plusieurs arrêtes secondaires [8].

5) Bec de l'outil

C'est la partie où se rejoignent l'arrête principale et l'arrête secondaire. Cette partie peut être droite, arrondie, où vive [8].

I.9.2 Matériaux d'outil**a. Carbures**

Les outils carbures sont les plus utilisée actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide [8].

Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

- **Fabrication** : Par frittage de poudre, puis revêtement.
- **Composition** : Noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°) ou en carbure de titane (3100°).

b. Cermets

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de titane, de carbonitride de titane ou de nitrure de titane. Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...) [8].

c. Céramique

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium. Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) Avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée. Et permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil) [8].

d. Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures [8].

Son utilisation requiert :

- Une machine stable ;
- Une grande rigidité de la pièce et de la porte pièce ;
- Un arrosage.

e. Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules. Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arrêt rapportée (donc peut d'encrassement). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650° se transforme en un vulgaire morceau de graphite... On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre : de magnésium, résines thermodurcissables [8].

f. Acier Rapides Supérieurs

Les outils ARS sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les fortes, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible. Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée

car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arrête de coupe [8].

- **Fabrication** : Par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres ;
- **Composition** : 0.7 % de carbone minimum, 4 % de chrome environ ;
- **Dureté** : de 63 à 66 Hrc [8].

I.10 Les états de surface

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

Cette structure est définie par les critères suivants:

- **La rugosité R**: Exprime les plus petites irrégularités, c.à.d le fin réseau d'écarts micro géométriques mesurés sur la plus petite longueur d'échantillonnage.
- **L'ondulation W** : Est constituée d'irrégularités de plus grande dimensions au niveau suivant de la longueur d'évaluation sur la surface de la pièce.
- **La direction des traces d'usinage L** : Définit l'orientation du profil superficiel. Elle indique la direction dominante générée par la méthode d'usinage [9].

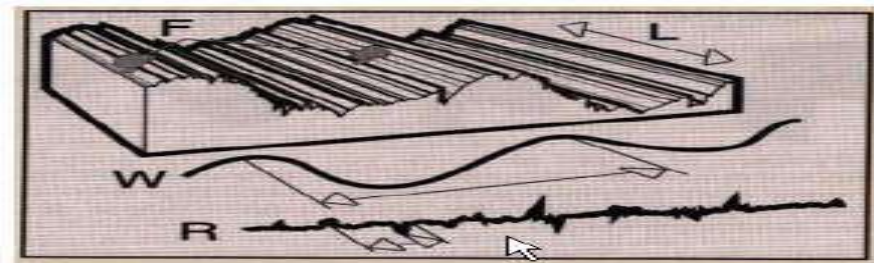


Figure I.19 : Les états de surface [9].

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

a. La rugosité moyenne du profil (R_a)

Valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite, dans la longueur d'évaluation, indifféremment de la direction verticale

- Impossible de savoir si les écarts sont des creux ou des bosses ;
- Pas d'altération pas des écarts isolés, donc risque de manquer un sommet ;
- Valeur de R_a typiques entre $0.02\mu\text{m}$ et $3.5\mu\text{m}$ [10].

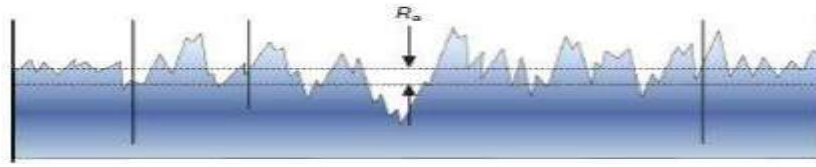


Figure I.20 : Rugosité moyenne du profil [9].

b. La hauteur de profil maximum (Rz)

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

- Il y a couramment 5 longueurs de référence ;
- La valeur affichant la plus grande déviation dans la longueur de référence égale à R_{\max} ou Rz_{\max} [9].

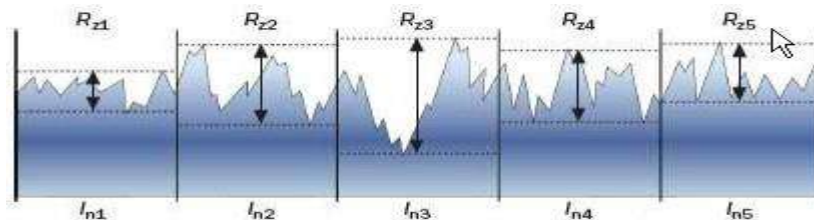


Figure I.21 : Hauteur de profil maximum [9].

c. La hauteur de profil total (Rt)

C'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation • Une seule valeur R_t , non combiné à un Rz ou Ra est l'une des exigences les plus strictes du profil R [9].

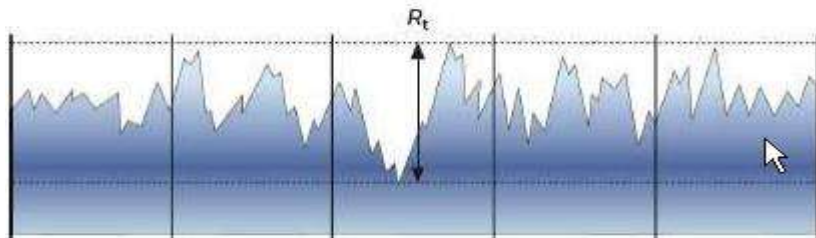


Figure I.22 : Hauteur de profil total [9].

Chapitre II

Modélisation

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode de surfaces de réponses (MSR) ainsi que les plans d'expériences.

Le concept de surface de réponse est né de la volonté de représenter les fluctuations d'une grandeur représentative d'un phénomène - appelée réponse - en fonction de variables aléatoires appelées stimuli. En mécanique, la méthode des surfaces de réponses (MSR) vise à proposer des formulations analytiques explicites des réponses d'un système mécanique.

II.2 La méthode des surfaces de réponses (MSR)

La méthode des surfaces de réponses (RSM) est une stratégie expérimentale pour développer un modèle reliant les facteurs dominants d'un processus aux réponses. Cette approche inclue aussi une procédure d'optimisation pour identifier les niveaux des facteurs qui produisent une réponse désirée [7].

II.2.1 Modélisation par la méthode (MSR)

La méthodologie classiquement utilisée pour étudier l'influence de paramètres opératoires sur une variable d'intérêt consiste à modifier la valeur d'un paramètre tout en maintenant les autres fixes. L'exploitation des résultats et l'étude expérimentale peuvent être fortement simplifiées en utilisant la méthodologie des plans d'expérience. Cette technique permet de créer un modèle statistiquement significatif d'un phénomène qui intègre les interactions entre les variables tout en optimisant le nombre d'essais [7].

La méthodologie des surfaces de réponses (MSR) est une technique statistique empirique utilisée pour l'analyse de régression multiple des données quantitatives obtenues à partir des expériences statistiquement conçues en résolvant les équations multi variables simultanément. La représentation graphique de ces équations s'appelle surfaces de réponse, et permet de décrire l'effet individuel et cumulatif des variables d'essai sur la réponse et de déterminer l'interaction mutuelle entre les variables d'essai et leur effet sur la réponse. L'objectif principal de la MSR est de déterminer les conditions opérationnelles optimales pour un système donné qui satisfasse les conditions spécifiques opératoires [7].

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), x_1, x_2, \dots, x_k , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

où Y est la réponse observée $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variable set des termes quadratiques, et ε représente l'erreur résiduelle .où Y est la réponse observée $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques, et ε représente l'erreur résiduelle où x est la matrice d'expérience, x^t la transposée de x et $(x^t x)^{-1}$ est l'inverse de la matrice $(x^t x)$;

$$\beta = (x^t x)^{-1} X^t Y \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

- Y est le vecteur des de circulation en valeurs codées [6].

Le modèle de prédiction est alors donné par l'équation (II.3) Suivante :

$$y_{pred} = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{i+1}^3 \beta_{ij} x_i x_j \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

II.3 Plans d'expériences

II. 3.1 Définition

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt y et des variables x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type : $y = f(x_i)$ [10].

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue [10].

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées [10].

II.3.2 Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la *réponse*, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur

dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot *facteur*. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut [10].

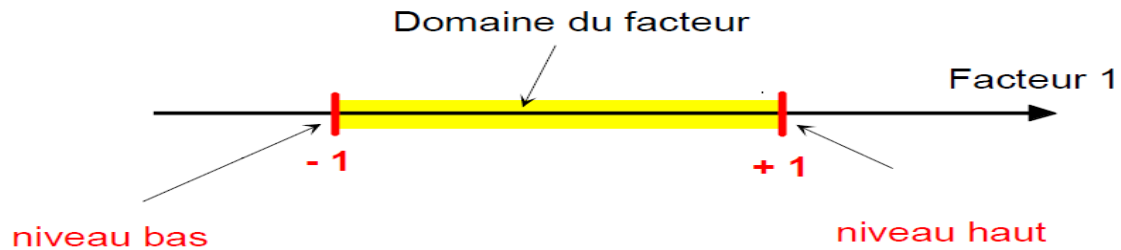


Figure II.1 : Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut [10].

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure II.2) [10].

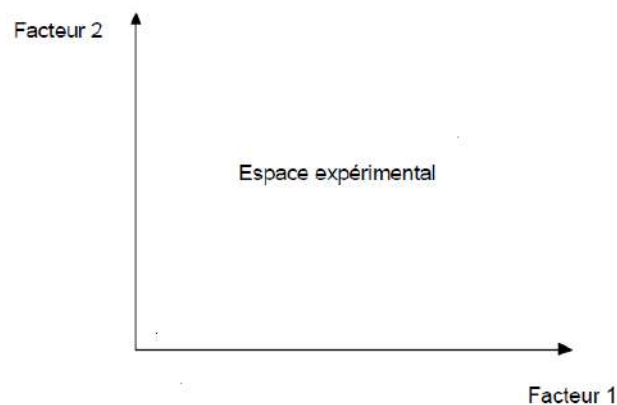


Figure II.2 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental [10].

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.3). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux [10].

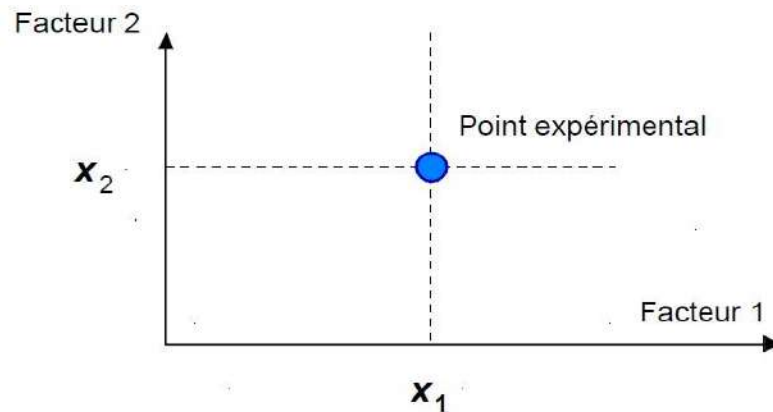


Figure II.3: Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux [10].

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «*domaine d'étude*». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.4).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude [10].

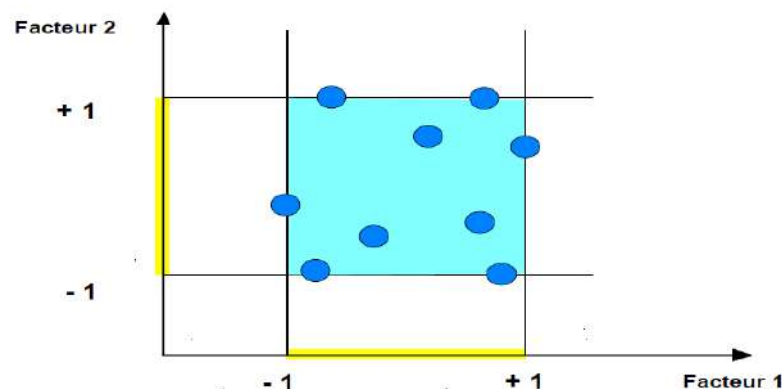


Figure II.4 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur [10].

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes :

Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers [10].

II.3.3 Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs [10].

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure II.5) [10].

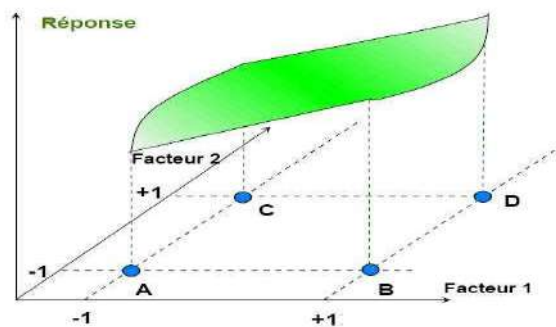


Figure II.5 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses [10].

II.3.4 Notion de modélisation mathématique

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurine. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + L + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij...z} x_i x_j ... x_z \dots \dots \dots (II.4)$$

où :

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé "*modèle postulé*" ou "*modèle a priori*" [10].

II.3.5 Le modèle de l'expérimentateur

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit :

Le premier complément est le "*manque d'ajustement*". Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (*lack of fit* en anglais) ;

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, notée e . Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors [10] :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + L + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i \dots \dots \dots (II.5)$$

II.4 Système d'équations

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, on a un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$y = X a + e \dots \dots \dots (II.6)$$

- y : C'est le vecteur des réponses ;

- **X** : C'est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé ;
- **a** : C'est le vecteur des coefficients ;
- **e** : C'est le vecteur des écarts.

Ce système possède un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Il y a n équations et $p + n$ inconnues. Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés. On obtient ainsi les estimations des coefficients que l'on note $\hat{\mathbf{a}}$. Le résultat de ce calcul est :

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{Y} \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

Formule dans laquelle la matrice \mathbf{X}' est la matrice transposée de \mathbf{X} . De nombreux logiciels exécutent ce calcul et donnent directement les valeurs des coefficients. Deux matrices interviennent constamment dans la théorie des plans d'expériences :

- La matrice d'information $\mathbf{X}'\mathbf{X}$;
- La matrice de dispersion $(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}$;
- Plans pour surfaces de réponse. [10]

II.5 Les type des plans d'expérience

II.5.1 Plans factoriels complets

Nous allons dans un premier temps présenté les plans factoriels, c'est-à-dire les plans d'expériences à 2 niveaux par facteur. Ce sont les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Tout d'abord, nous allons traiter les plans factoriels complets.

Avec deux niveaux et k facteurs, ceux-ci sont notés 2^k . Dans un plan factoriel complet, la totalité des expériences doit être réalisée, comme dans la méthodologie standard. Pour un plan factoriel complet optimal à k facteurs, il va donc falloir mener 2^k expériences. Le principe consiste alors à répartir de façon optimale les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 2 facteurs, noté: 2^2 . La meilleure stratégie consiste à choisir les points de mesures aux extrémités du domaine expérimental, ce qui accroît la précision du résultat et ne demande que 4 essais notés [11].

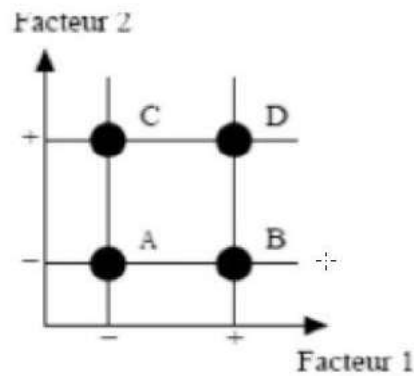


Figure II.6: Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental.[11]

a. Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continus et pour les variables discrètes.[11]

b. Plans à deux facteurs

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + e \dots \dots \dots (II.8)$$

- y : est la réponse ;
- x_1, x_2 : représente le niveau attribué au facteur 1,2 ;
- β_0 : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude ;
- β_1 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 1 ;
- β_2 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 2 ;
- β_{12} : est l'interaction entre les facteurs 1 et 2 ;
- e : est l'écart.

La matrice d'expériences se construit pour le cas des plans 2^2 et avec des facteurs β_1, β_2 .

c. Plans factoriels à k facteurs

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation [13].

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \sum \beta_{ij} x_i^2 + \beta_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e \dots \dots \dots (II.9)$$

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^K

Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.

Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

Plus généralement, la matrice d'expériences comporte k colonnes pour les facteurs principaux et 2^k lignes soit 2^k essais. Elle se construit selon la règle suivante:

- Colonne du 1^{er} facteur: alternance de -1 et +1 ;
- Colonne du 2^e facteur: alternance de -1 et +1 de 2 en 2 ;
- Colonne du 3^e facteur: alternance de -1 et +1 de 4 en 4 ;
- Colonne du 4^e facteur: alternance de -1 et +1 de 8 en 8.

Et ainsi de suite pour un nombre plus élevé de facteurs.

d. Plans factoriels complets à trois niveaux

S'il y a deux facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 9 essais. On note ce plan 3^2 . S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux (plan 3^3), il faut exécuter 27 essais. En général s'il y a k facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 3^k essais. Ce qui commence à faire beaucoup. C'est la raison pour laquelle il existe aussi les plans fractionnaires correspondants qui portent le nom de carrés latins .[11].

II.5.2 Plans réduits

En pratique, les plans complets ne sont utilisables que sur des systèmes avec très peu de facteurs, ou lorsque chaque essai prend très peu de temps ; par exemple, dans le cas de la catapulte avec ses 5 facteurs à 3 niveaux, un plan complet demanderait d'effectuer $3^5 = 243$ essais... Des plans réduits, consistant à *sélectionner certaines combinaisons*, ont donc été proposés. Ils permettent naturellement de réduire les coûts mais diminuent également l'information disponible sur le comportement du système ; il faut donc s'assurer de la pertinence de la sélection par rapport au modèle à identifier.

Pour cela, on part du constat qu'un plan factoriel complet permet d'identifier les coefficients de toutes les interactions, jusqu'à l'ordre le plus élevé. Or, comme nous l'avons vu, on prend rarement en compte toutes les interactions possibles dans le modèle (les interactions d'ordre élevé, en particulier, sont souvent négligées). L'idée est donc d'éliminer des essais de sorte à ne « faire travailler » que les interactions retenues ; les plans obtenus étant des sous-ensembles du plan factoriel complet, on les appelle *plans factoriels fractionnaires*.

Concrètement, l'usage de ces plans demande tout d'abord d'écrire le modèle (c'est-à-dire de lister les facteurs et les interactions à prendre en compte) et de choisir le nombre de niveaux des facteurs. Différentes techniques sont alors utilisables .[12].

II.5.3 Les tables de Taguchi

Les Tables de Taguchi sont des plans de Plackett et Burman dans lesquels on a remplacé +1 par 1 et -1 par 2. Les noms des plans ont également été traduits. Le plan 2^3 est la Table L8 et le plan 2^4 est la Table L16. Le plan de 12 essais, appelé Table L12. A l'origine ces plans étaient utilisés avec un modèle sans interaction. Aujourd'hui, certaines personnes leur appliquent les résultats et les principes de la théorie classique. Box et Behnken ces plans qui permettent d'établir directement des modèles du second degré. Tous les facteurs ont trois niveaux : -1, 0 et +1. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquentialité. On peut entreprendre l'étude des k premiers facteurs en se réservant la possibilité d'en ajouter de nouveaux sans perdre les résultats des essais déjà effectués. Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. Pour quatre facteurs ce plan est construit sur un hyper cube à quatre dimensions. On place les points expérimentaux non pas aux sommets du cube ou de l'hyper cube, mais au milieu des arêtes ou au centre des faces (carrés) ou au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de répartir tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur une sphère ou sur une hyper sphère suivant le nombre de dimensions. On ajoute des points au centre du domaine d'étude [10].

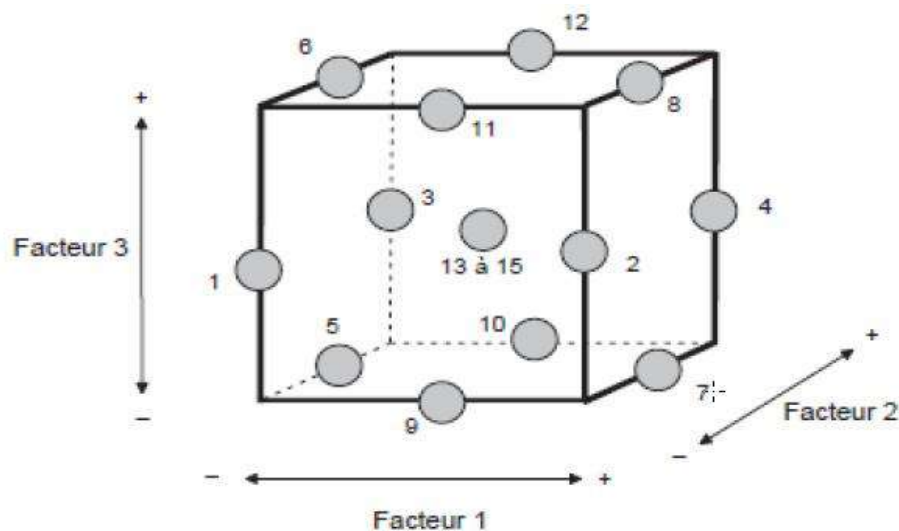


Figure II.7: Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs [11].

Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre. Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est illustré par la figure II.7. Le cube possède 12 arêtes. On a l'habitude d'ajouter des points d'expériences au centre du domaine d'étude, en général trois. Le plan de Box-Behnken pour 3 facteurs possède donc 12 + 3 essais, soit 15 essais. On

pourra remarquer qu'avec 4 points au centre au lieu de 3, on obtient un plan qui répond au critère de presque-orthogonalité.

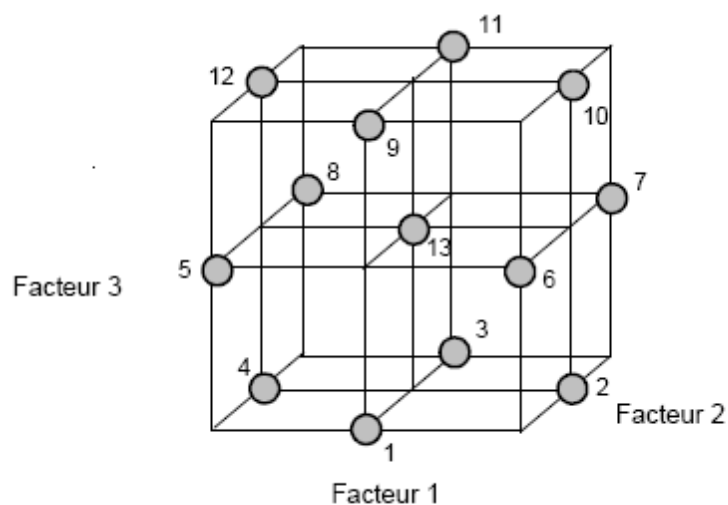


Figure II.8: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs [12].

Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier : l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère (ou une hyper sphère) centrée à l'origine du domaine expérimental. C'est le critère d'isovariance par rotation. Le plus connu des plans de Box-Behnken est celui qui permet d'étudier trois facteurs.

Tableau II-1 : Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs [2].

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	0	- 1	- 1
2	+ 1	0	- 1
3	0	+ 1	- 1
4	- 1	0	- 1
5	- 1	- 1	0
6	+ 1	- 1	0
7	+ 1	+ 1	0
8	- 1	+ 1	0
9	0	- 1	+ 1
10	+ 1	0	+ 1
11	0	+ 1	+ 1
12	- 1	0	+ 1
13	0	0	0

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous utilisons la méthode de surfaces de réponses pour étudier les critères de la rugosité pendant le chariotage de l'acier AISI 1045 avec un outil en carbure métallique en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) en se basant sur une base de données élaboré par Bakkari Lehibib et Gherib Hamza [14].

III.2 Résultats expérimentaux

Dans ce travail, nous avons utilisé deux plans d'expériences différents, le plan Box-Behnken à 13 essais et le plan de Taguchi à 9 essais.

III.2.1 Analyse des critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse (Plan Box-Behnken L13)

Tableau III-1 : Tableau des résultats pour L13.[14]

Essais	V_c (tr/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	R_t (μm)	R_z (μm)
1	141	0,08	1,5	0,36	2,19	1,71
2	193	0,12	1,5	0,33	1,98	1,27
3	141	0,15	1,5	0,54	3,21	2,2
4	116	0,12	1,5	0,53	2,73	2,28
5	116	0,08	2	0,45	2,53	2,33
6	193	0,08	2	0,32	1,97	1,31
7	193	0,15	2	0,42	2,54	1,72
8	116	0,15	2	0,57	3,77	2,84
9	141	0,08	2,5	0,4	2,42	1,94
10	193	0,12	2,5	0,42	2,22	1,5
11	141	0,15	2,5	0,54	3,33	2,47
12	116	0,12	2,5	0,52	3,11	2,55
13	141	0,12	2	0,44	2,95	2,04

a. Modèles quadratiques complets MQC

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité R_a , R_t et R_z en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-2.

Tableaux III-2 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) R_a , (b) R_t et (c) R_z (MQC).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,084633	0,009404	26,64	0,010
Linear	3	0,075194	0,025065	71,00	0,003
Square	3	0,001100	0,000367	1,04	0,488
2-Way Interaction	3	0,003441	0,001147	3,25	0,180
Error	3	0,001059	0,000353		
Total	12	0,085692			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	3,68443	0,40938	55,97	0,003
Linear	3	2,88657	0,96219	131,56	0,001
Square	3	0,15745	0,05248	7,18	0,070
2-Way Interaction	3	0,11193	0,03731	5,10	0,107
Error	3	0,02194	0,00731		
Total	12	3,70637			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2,87939	0,31993	584,78	0,000
Linear	3	2,66716	0,88905	1625,02	0,000
Square	3	0,08908	0,02969	54,28	0,004
2-Way Interaction	3	0,00371	0,00124	2,26	0,260
Error	3	0,00164	0,00055		
Total	12	2,88103			

(c)

D'après l'analyse du tableau III.2, la valeur de test Fisher (F) pour Ra, Rt et Rz est : F = 26,64 (Ra), F = 55.97 (Rt) et F = 584,78 (Rz) respectivement.

La valeur de probabilité (P> F) pour le test de Fisher est de 0,010 pour Ra, 0,03 pour Rt et 0,00 pour Rz. Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-3: Test de Student pour les critères de la rugosité(MQC) :

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	1,332	0,4018	0,0205	19,57	0,000
Vc	-0,0859	0,07185	0,00667	-10,76	0,002
F	1,24	0,06591	0,00683	9,65	0,002
Ap	-0,343	0,02016	0,00687	2,94	0,061
Vc*Vc	0,000016	0,0233	0,0144	1,62	0,205
f*f	12,2	0,0149	0,0127	1,17	0,325
ap*ap	0,0609	0,0152	0,0124	1,23	0,308
Vc*f	-0,00674	-0,00909	0,00908	-1,00	0,390
Vc*ap	0,001321	0,02544	0,00912	2,79	0,068
f*ap	-0,561	-0,00982	0,00935	-1,05	0,371
$R^2 = 98,76\%$				$R^2_{ajustes} = 95.06\%$	

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-4,16	2,7469	0,0934	29,40	0,000
Vc	0,0316	-0,4174	0,0304	-13,74	0,001
F	17,6	0,4397	0,0311	14,14	0,001
Ap	3,33	0,1191	0,0313	3,81	0,032

Vc*Vc	-0,000086	-0,1279	0,0656	-1,95	0,146
f*f	68,2	0,0835	0,0579	1,44	0,245
ap*ap	-0,694	-0,1735	0,0566	-3,07	0,055
Vc*f	-0,1178	-0,1587	0,0413	-3,84	0,031
Vc*ap	-0,00111	-0,0213	0,0415	-0,51	0,643
f*ap	-1,25	-0,0219	0,0426	-0,52	0,642
$R^2 = 99,41\%$			$R^2_{ajustes} = 97,63\%$		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	4,645	1,8047	0,0256	70,62	0,000
Vc	-0,003	-0,52314	0,00831	-62,96	0,000
F	-16,22	0,23793	0,00850	27,98	0,000
Ap	1,126	0,12258	0,00855	14,34	0,001
Vc*Vc	0,000076	0,1130	0,0179	6,30	0,008
F*F	108,0	0,1323	0,0158	8,36	0,004
Ap*Ap	-2117	-0,0543	0,0155	-3,51	0,039
Vc*F	-0,01936	-0,0261	0,0113	-2,31	0,104
Vc*Ap	-0,000502	-0,0097	0,0114	-0,85	0,457
F*Ap	0,579	0,0101	0,0116	0,87	0,448
$R^2 = 99,94\%$			$R^2_{ajustes} = 99,77\%$		

(c)

Nous savons que le modèle quadratique réduit (MQR) c'est le modèle qui prend les facteurs principaux avec les quadratiques et les interactions influents. C'est à dire le MQR est égale le modèle quadratique complet moins les interactions non influents. Donc en peut remplacer le MQC par le MQR.

b. Modèles quadratiques réduits MQR

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-4.

Tableaux III-4 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0,083889	0,011984	33,24	0,001
Linear	3	0,081352	0,027117	75,21	0,000
Square	3	0,001093	0,000364	1,01	0,461
2-Way Interaction	1	0,002697	0,002697	7,48	0,041
Error	5	0,001803	0,000361		
Total	12	0,085692			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	3,68047	0,52578	101,49	0,000
Linear	3	2,89808	0,96603	186,46	0,000
Square	3	0,15745	0,05248	10,13	0,014
2-Way Interaction	1	0,10797	0,10797	20,84	0,006
Error	5	0,02590	0,00518		
Total	12	3,70637			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	2,87860	0,41123	845,02	0,000
Linear	3	2,67973	0,89324	1835,50	0,000
Square	3	0,08908	0,02969	61,02	0,000
2-Way Interaction	1	0,00292	0,00292	5,99	0,058
Error	5	0,00243	0,00049		
Total	12	2,88103			

(c)

D'après l'analyse du tableau III.4, nous concluons que la valeur de Fisher (F) pour Ra, Rt et Rz est : $F = 33,24$ (Ra), $F = 101,49$ (Rt) et $F = 845,02$ (Rz) respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est de 0,001 pour Ra, de 0,00 pour Rt et de 0,00 pour Rz. Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-5: Test de Student pour les critères de la rugosité(MQR):

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	1,574	0,4018	0,0207	19,37	0,000
Vc	0,00936	-0,07250	0,00671	-10,80	0,000
F	-0,88	0,06750	0,00671	10,05	0,000
Ap	-0,403	0,01942	0,00691	2,81	0,037
Vc*Vc	0,000016	0,0233	0,0146	1,60	0,171
f*f	12,2	0,0149	0,0129	1,16	0,298
ap*ap	0,0600	0,0150	0,0126	1,19	0,286
Vc*ap	0,001309	0,02520	0,00922	2,73	0,041
$R^2 = 97,90\%$				$R^2_{ajustes} = 94,95\%$	

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-3,53	2,7469	0,0786	34,93	0,000
Vc	0,0294	-0,4174	0,0256	-16,33	0,000
F	15,08	0,4397	0,0262	16,80	0,000
Ap	3,019	0,1213	0,0254	4,76	0,005
Vc*Vc	-0,000086	-0,1279	0,0552	-2,32	0,068
f*f	68,2	0,0835	0,0487	1,71	0,147
ap*ap	-0,694	-0,1735	0,0476	-3,64	0,015

Vc*f	-0,1178	-0,1587	0,0348	-4,57	0,006
$R^2 = 99,30\%$			$R^2_{ajustes} = 98,32\%$		

(b)

Term	Effect	Coef	SECoef	T-Value	P-Value
Constant	4,657	1,8047	0,0241	74,88	0,000
Vc	-0,03491	-0,52314	0,00784	-66,76	0,000
F	-15,06	0,23793	0,00802	29,67	0,000
Ap	1,120	0,12500	0,00780	16,03	0,000
Vc*Vc	0,000076	0,1130	0,0169	6,67	0,001
F*F	108,0	0,1323	0,0149	8,86	0,000
Ap*Ap	-0,2174	-0,0543	0,0146	-3,72	0,014
Vc*F	-0,01936	-0,0261	0,0107	-2,45	0,058
$R^2 = 99,92\%$			$R^2_{ajustes} = 99,80\%$		

(c)

L'analyse ANOVA prouve que les effets principales de la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont un impact significatif sur la rugosité de surface en général. En effet, les tableaux III-5, prouve que les termes qui ont un impact significatif sur :

- Ra sont Vc et f ;
- Rt sont: Vc et f ;
- Rz sont: Vc , f et ap.

Les équations qui expriment la rugosité de ce modèle sont les suivantes:

$$Ra = 1,574 - 0,00936 Vc - 0,88 f - 0,403 ap + 0,000016 Vc^2 + 12,2 f^2 + 0,0600 ap^2 + 0,001309 Vc * ap \dots \dots \dots (III.1)$$

$$Rt = -3,53 + 0,0294 Vc + 15,08 f + 3,019 ap - 0,000086 Vc^2 + 68,2 f^2 - 0,694 ap^2 - 0,1178 Vc * f \dots \dots \dots (III.2)$$

$$Rz = 4,657 - 0,03491 Vc - 15,06 f + 1,120 ap + 0,000076 Vc^2 + 108,0 f^2 - 0,2174 ap^2 - 0,01936 Vc * f \dots \dots \dots (III.3)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rt et Rz sont $R^2= 97,90 \%$, $R^2 = 99,30\%$ et $R^2 = 99,92 \%$ respectivement. Ces valeurs indiquent que 97,90 %, 99,30% et $R^2 = 99,92 \%$ d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rt et Rz sont expliquées par les variables indépendantes, et que 2,10 %, 0,70 %, et 0,08 % respectivement restent par conséquent inexpliqués.

➤ Les surfaces de réponses

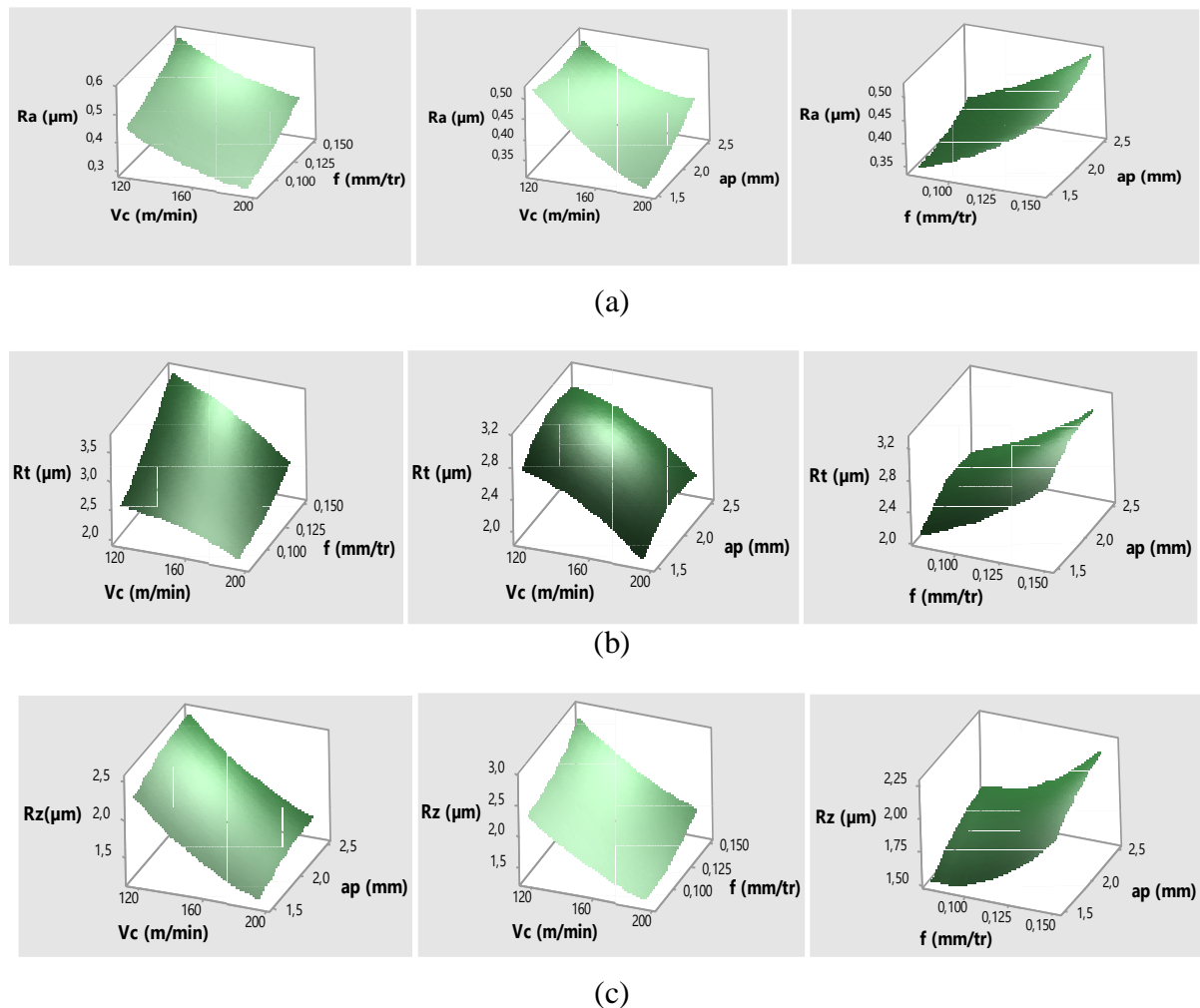


Figure III.1 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR).

Nous remarquons que les facteurs le plus influent sur les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz sont ap , f .

c. Modèles linéaires ML

L’analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-6.

Tableaux III-6: Test de Fisher pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0,080099	0,026700	42,96	0,000
Linear	3	0,080099	0,026700	42,96	0,000
Error	9	0,005593	0,000621		
Total	12	0,085692			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	3,4109	1,13697	34,63	0,000
Linear	3	3,4109	1,13697	34,63	0,000
Error	9	0,2954	0,03283		
Total	12	3,7064			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	2,78609	0,92870	88,03	0,000
Linear	3	2,78609	0,92870	88,03	0,000
Error	9	0,09495	0,01055		
Total	12	2,88103			

(c)

D'après l'analyse du tableau III-6, nous concluons que la valeur de Fisher (F) pour Ra, Rt Rz est : $F = 42,26$ (Ra), $F = 34,63$ (Rt) et $F = 8803$ (Rz) respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est de 0,00 pour Ra, 0,00 pour Rt et 0,00 pour Rz. Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-7: Test de Student pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	0,4399	0,43596	0,00703	62,03	0,000
Vc	- 0,001845	-0,07101	0,00861	-8,25	0,000
F	1,922	0,06727	0,00878	7,66	0,000
Ap	0,0300	0,01500	0,00881	1,70	0,123
$R^2 = 93,47\%$			$R^2_{ajustes} = 91,30\%$		

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	2,376	2,6040	0,0511	50,98	0,000
Vc	- 0,01141	-0,4394	0,0626	-7,02	0,000
F	13,10	0,4584	0,0638	7,18	0,000
Ap	0,243	0,1213	0,0641	1,89	0,091
$R^2 = 92,03\%$			$R^2_{ajustes} = 89,37\%$		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	2,721	1,9299	0,0290	66,65	0,000
Vc	- 0,013379	-0,5151	0,0355	-14,52	0,000
F	6,75	0,2361	0,0362	6,53	0,000
Ap	0,2500	0,1250	0,0363	3,44	0,007
$R^2 = 96,70\%$			$R^2_{ajustes} = 93,21\%$		

(c)

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont un impact significatif sur la rugosité de surface en général. En effet, les tableaux III-7, prouve que les termes qui ont un impact significatif sur R_a , R_t et R_z sont V_c et f .

Les équations qui expriment la rugosité de ce modèle sont les suivantes:

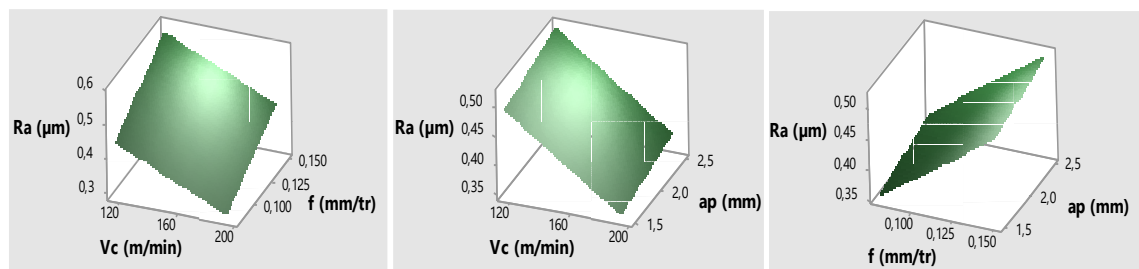
$$R_a = 0,4399 - 0,001845 V_c + 1,922 f + 0,0300 ap \dots\dots\dots(III.4)$$

$$R_t = 2,376 - 0,01141 V_c + 13,10 f + 0,243 ap \dots\dots\dots(III.5)$$

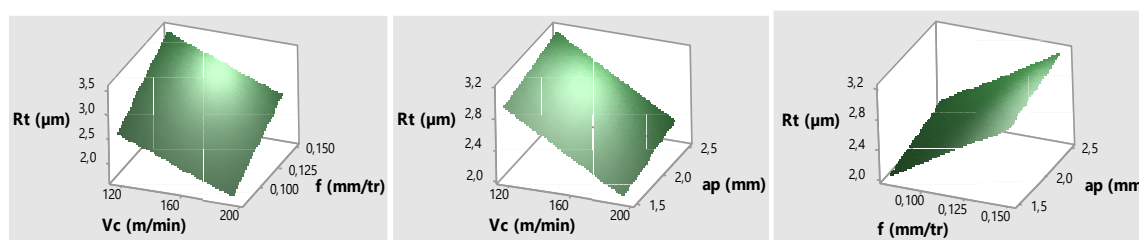
$$R_z = 2,721 - 0,013379 V_c + 6,75 f + 0,2500 ap \dots\dots\dots(III.6)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: R_a , R_t et R_z sont $R^2= 93,47 \%$, $R^2 =92,03 \%$ et $R^2 = 96,70 \%$ respectivement. Ces valeurs indiquent que 93,47 %, 92,03 % et $R^2 = 96,70 \%$ d'une simple variation des critères de la rugosité : R_a , R_t et R_z sont expliquées par les variables indépendantes, et que 6,53 %, 7,97 %, et 3,30 % respectivement restent par conséquent inexpliqués.

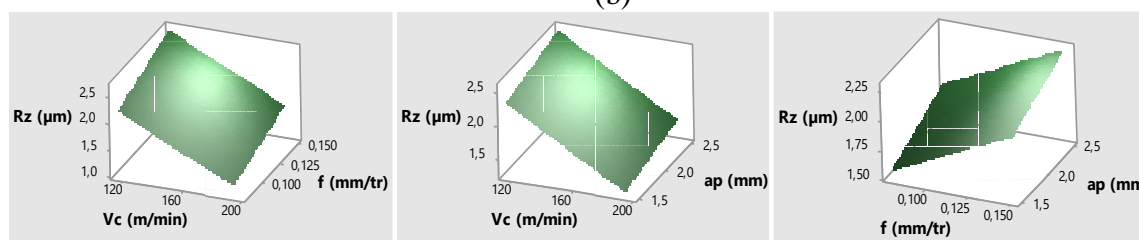
➤ Les surfaces de réponses



(a)



(b)



(c)

Figure III.2 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité : (a) R_a , (b) R_t et (c) R_z (ML).

Nous remarquons que les facteurs le plus influent sur les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz sont ap et f.

d. Modèles exponentiels complets MEC

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-8.

Tableaux III-8: Test de Fisher pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MEC).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,446174	0,049575	27,42	0,010
Linear	3	0,411949	0,137316	75,96	0,003
Square	3	0,005032	0,001677	0,93	0,524
2-Way Interaction	3	0,021373	0,007124	3,94	0,145
Error	3	0,005423	0,001808		
Total	12	0,451597			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,501542	0,055727	79,96	0,002
Linear	3	0,405370	0,135123	193,89	0,001
Square	3	0,034489	0,011496	16,50	0,023
2-Way Interaction	3	0,005986	0,001995	2,86	0,205
Error	3	0,002091	0,000697		
Total	12	0,503632			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,785261	0,087251	443,66	0,000
Linear	3	0,715705	0,238568	1213,09	0,000
Square	3	0,024918	0,008306	42,23	0,006
2-Way Interaction	3	0,001981	0,000660	3,36	0,173
Error	3	0,000590	0,000197		
Total	12	0,785851			

(c)

D'après l'analyse du tableau III-8, nous concluons que la valeur test de Fisher (F) pour Ra, Rt Rz est : $F = 27,42$ (Ra), $F = 79,96$ (Rt) et $F = 433,66$ (Rz), respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est de 0,01 pour Ra, de 0,002 pour Ra, 0,03 pour Rt et 0,00 pour Rz. Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-9: Test de Student pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MEC).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	16,1	-0,9146	0,0465	-19,67	0,000
Ln(Vc)	16,1	-0,1714	0,0154	-11,14	0,002
Ln(f)	- 6,39	0,1537	0,0153	10,06	0,002
Ln(ap)	- 6,39	0,0526	0,0155	3,39	0,043
Ln(Vc)*Ln(Vc)	0,263	0,0170	0,0300	0,57	0,609
Ln(f)*Ln(f)	0,491	0,0485	0,0311	1,56	0,217
Ln(ap)*Ln(ap)	0,500	0,0326	0,0287	1,14	0,338
Ln(Vc)*Ln(f)	0,038	0,0031	0,0206	0,15	0,891
Ln(Vc)*Ln(ap)	1,041	0,0677	0,0209	3,24	0,048
Ln(f)*Ln(ap)	- 0,327	-0,0262	0,0208	-1,26	0,295
$R^2 = 98,8$			$R^2_{ajustes} = 95.20\%$		

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-17,35	0,9898	0,0289	34,28	0,000
Ln(Vc)	10,19	-0,15773	0,00955	-16,51	0,000
Ln(f)	4,97	0,16591	0,00949	17,49	0,000
Ln(ap)	1,17	0,04923	0,00965	5,10	0,015
Ln(Vc)*Ln(Vc)	- 1,177	-0,0762	0,0118	-4,10	0,026
Ln(f)*Ln(f)	0,482	0,0476	0,0193	2,47	0,090
Ln(ap)*Ln(ap)	-0,932	-0,0608	0,0178	-3,42	0,042
Ln(Vc)*Ln(f)	- 0,443	-0,0355	0,0128	-2,78	0,069
Ln(Vc)*Ln(ap)	- 0,013	-0,0008	0,0130	-0,07	0,952
Ln(f)*Ln(ap)	- 0,143	-0,0115	0,0129	-0,89	0,438
$R^2 = 99,46\%$			$R^2_{ajustes} = 97.85\%$		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	2,94	0,6001	0,0153	39,13	0,000
Ln(Vc)	1,76	-0,27738	0,00507	-54,66	0,000
Ln(f)	3,182	0,12245	0,00504	24,29	0,000
Ln(ap)	- 0,462	0,06714	0,00513	13,10	0,001
Ln(Vc)*Ln(Vc)	- 0,256	-0,01661	0,00989	-1,68	0,192
Ln(f)*Ln(f)	0,850	0,0839	0,0102	8,19	0,004
Ln(ap)*Ln(ap)	- 0,381	-0,02486	0,00945	-2,63	0,078
Ln(Vc)*Ln(f)	0,1967	0,01574	0,00678	2,32	0,103
Ln(Vc)*Ln(ap)	0,233	0,01513	0,00690	2,19	0,116
Ln(f)*Ln(ap)	- 0,0285	-0,00229	0,00685	-0,33	0,761
$R^2 = 99,92\%$			$R^2_{ajustes} = 99,70\%$		

(c)

Nous savons que le modèle exponentiels réduit (MER) c'est le modèle qui prend les facteurs principaux avec les quadratiques et les interactions influents. C'est à dire le MER est égale le modèle exponentiels complet moins les interactions non influents. Donc en peut remplacer le MEC par le MER.

e. Modèles exponentiels réduits MER

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-10.

Tableaux III-10: Test de Fisher pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	0,442634	0,073772	49,38	0,000
Linear	3	0,433405	0,144468	96,71	0,000
Square	2	0,004405	0,002202	1,47	0,301
2-Way Interaction	1	0,018453	0,018453	12,35	0,013
Error	6	0,008963	0,001494		
Total	12	0,451597			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0,500980	0,071569	134,90	0,000
Linear	3	0,410565	0,136855	257,96	0,000
Square	3	0,034403	0,011468	21,62	0,003
2-Way Interaction	1	0,005424	0,005424	10,22	0,024
Error	5	0,002653	0,000531		
Total	12	0,503632			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0,784687	0,112098	481,56	0,000
Linear	3	0,732297	0,244099	1048,61	0,000
Square	2	0,024359	0,012179	52,32	0,000
2-Way Interaction	2	0,001959	0,000980	4,21	0,085
Error	5	0,001164	0,000233		
Total	12	0,785851			

(c)

D'après l'analyse du tableau III.10, nous concluons que la valeur test de Fisher (F) pour Ra, Rt et Rz est : $F = 481,56$ (Ra), $F = 134,90$ (Rt) et $F = 161,27$ (Rz) respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est, de 0,00 pour Ra, 0,00 pour Rt et 0,00 pour Rz. Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-11: Test de Student pour les critères de la rugosité:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	8.98	-0,8940	0,0276	-32,43	0,000
Ln(Vc)	-1.346	-0,1698	0,0136	-12,48	0,000
Ln(f)	2.31	0,1517	0,0137	11,10	0,000
Ln(ap)	-5.47	0,0487	0,0138	3,52	0,013
Ln(f)*Ln(f)	0.413	0,0408	0,0256	1,59	0,162
Ln(ap)*Ln(ap)	0.392	0,0256	0,0236	1,09	0,319
Ln(Vc)*Ln(ap)	1.027	0,0668	0,0190	3,51	0,013
$R^2 = 98.02\%$			$R^2_{ajustes} = 96.03\%$		

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-17,42	0,9898	0,0252	39,29	0,000
Ln(Vc)	10,15	-0,15776	0,00830	-19,00	0,000
Ln(f)	4,88	0,16517	0,00825	20,03	0,000
Ln(ap)	1,418	0,04766	0,00814	5,85	0,002
Ln(Vc)*Ln(Vc)	- 1,173	-0,0760	0,0162	-4,68	0,005
Ln(f)*Ln(f)	0,482	0,0476	0,0168	2,83	0,037
Ln(ap)*Ln(ap)	- 0,932	-0,0608	0,0155	-3,92	0,011
Ln(Vc)*Ln(f)	- 0,445	-0,0356	0,0111	-3,20	0,024
$R^2 = 99,47\%$			$R^2_{ajustes} = 98.74\%$		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	9,73	0,5806	0,0109	53,36	0,000
Ln(Vc)	-0.813	-0,27840	0,00548	-50,79	0,000
Ln(f)	3.488	0,12230	0,00546	22,39	0,000
Ln(ap)	0.531	0,06680	0,00546	12,22	0,000
Ln(f)*Ln(f)	0.923	0,0912	0,0101	9,01	0,000
Ln(ap)*Ln(ap)	-0.278	-0,01815	0,00931	-1,95	0,109
Ln(Vc)*Ln(f)	0,1963	0,01571	0,00738	2,13	0,087
Ln(Vc)*Ln(ap)	0,232	0,01506	0,00750	2,01	0,101
$R^2 = 99.86\%$			$R^2_{ajustes} = 99.64\%$		

(c)

L'analyse ANOVA prouve que les effets principales de la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont un impact significatif sur la rugosité de surface en général. En effet, les tableaux III-11, prouve que les termes qui ont un impact significatif sur :

- Ra sont : Ln(Vc) , Ln(f) et Ln(ap) ;
- Rt sont: Ln(Vc) , Ln(f) et Ln(ap) ;
- Rz sont: Ln(Vc) , Ln(f), Ln(ap) et Ln(f)*Ln(f).

Les équations qui expriment la rugosité de ce modèle sont les suivantes:

$$Ra = e^{8,98} * Vc^{-1,346} * f^{2,31} * ap^{-5,47} * f^{Ln(f^{0,413})} * ap^{Ln(ap^{0,392})} * Vc^{Ln(ap^{1,027})} \dots\dots(III.7)$$

$$Rt = e^{-17,42} * Vc^{10,15} * f^{4,88} * ap^{1,418} * Vc^{Ln(Vc^{-1,173})} * f^{Ln(f^{0,482})} * ap^{Ln(ap^{-0,932})} * Vc^{Ln(f^{-0,445})} \dots\dots(III.8)$$

$$Rz = e^{9,73} * Vc^{-0,813} * f^{3,488} * ap^{-0,531} * f^{Ln(f^{0,923})} * ap^{Ln(ap^{-0,278})} * Vc^{Ln(f^{0,1963})} * Vc^{Ln(ap^{0,232})} \dots\dots(III.9)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rt et Rz sont R²= 98,02%, R² =99,47% et R² = 99,86 % respectivement. Ces valeurs indiquent que 98,02%, 99,47% et R² = 99,86 % d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rt et Rz sont expliquées par les variables indépendantes, et que 1,98 %, 0,53 %, et 0,14 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

➤ Les surfaces de réponses de MER

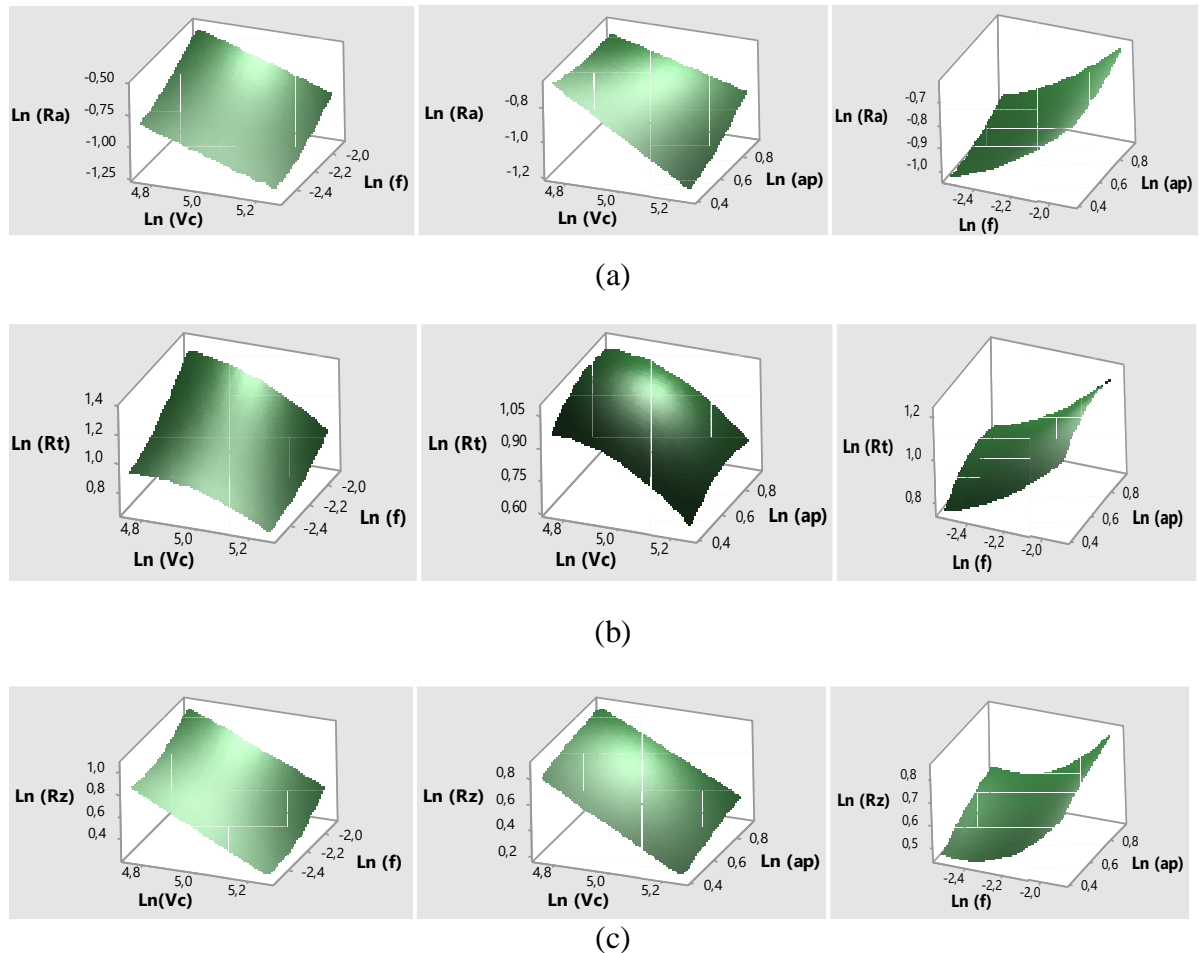


Figure III.3 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité: (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER).

Nous remarquons que les facteurs le plus influent sur les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz sont ap, f.

f. Modèles de Gilbert MG

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-12.

Tableaux III-12: Test de Fisher pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0,41960	0,139866	39,34	0,000
Linear	3	0,41960	0,139866	39,34	0,000
Error	9	0,03200	0,003555		
Total	12	0,45160			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0,46077	0,153589	32,25	0,000
Linear	3	0,46077	0,153589	32,25	0,000
Error	9	0,04287	0,004763		
Total	12	0,50363			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0,75838	0,252793	82,82	0,000
Linear	3	0,75838	0,252793	82,82	0,000
Error	9	0,02747	0,003052		
Total	12	0,78585			

(c)

D'après l'analyse du tableau III-12, nous concluons que la valeur test de Fisher (F) pour Ra, Rt et Rz est : $F = 39,24$ (Ra), $F = 32,25$ (Rt) et $F = 82,82$ (Rz) respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est, de 0,00 pour Ra, 0,00 pour Rt et 0,00 pour Rz. Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-13: Test de Student pour les critères de la rugosité:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	3,38	-0,8507	0,0168	-50,53	0,000
Ln(Vc)	- 0,6571	-0,1673	0,0209	-8,02	0,000
Ln(f)	0,4722	0,1484	0,0207	7,15	0,000
Ln(ap)	0,1576	0,0403	0,0210	1,92	0,088
$R^2 = 92,91\%$			$R^2_{ajustes} = 90,55\%$		

(a)

Term	Effect	Coef	SECoef	T-Value	P-Value
Constant	5,252	0,9341	0,0195	47,93	0,000
Ln(Vc)	-0,6628	-0,1687	0,0241	-6,99	0,000
Ln(f)	0,5102	0,1604	0,0240	6,68	0,000
Ln(Ap)	0,1965	0,0502	0,0243	2,06	0,069
$R^2 = 91,49\%$			$R^2_{ajustes} = 88,49\%$		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	6,683	0,6297	0,0156	40,36	0,000
Ln(Vc)	-1,0876	-0,2768	0,0193	-14,32	0,000
Ln(f)	0,3528	0,1109	0,0192	5,77	0,000
Ln(Ap)	0,2625	0,0671	0,0195	3,44	0,007
$R^2 = 96,50\%$			$R^2_{ajustes} = 95,34\%$		

(c)

L'analyse ANOVA prouve que les effets principales de la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont un impact significatif sur la rugosité de surface en général. En effet, les tableaux III-13, prouve que les termes qui ont un impact significatif sur Ra, Rt et Rz sont Ln(Vc) et Ln(f).

Les équations qui expriment la rugosité de ce modèle sont les suivantes:

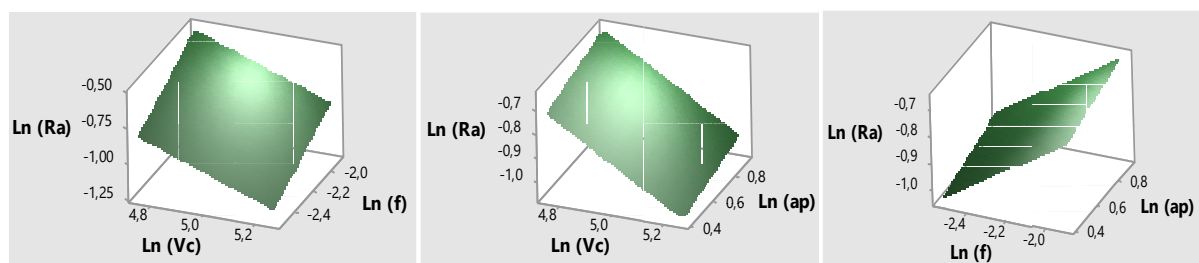
$$Ra = e^{3,380} * Vc^{-0,6571} * f^{0,4722} * ap^{0,1576} \dots\dots\dots (III.10)$$

$$Rt = e^{5,252} Vc^{-0,6628} * f^{0,5102} * ap^{0,1965} \dots\dots\dots (III.11)$$

$$Rz = e^{6,683} * Vc^{-1,0876} * f^{0,3528} * ap^{0,2625} \dots\dots\dots (III.12)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rt et Rz sont $R^2 = 92,91\%$, $R^2 = 91,19\%$ et $R^2 = 96,50\%$ respectivement. Ces valeurs indiquent que 92,91%, 91,19% et $R^2 = 96,50\%$ d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rt et Rz sont expliquées par les variables indépendantes, et que 7,09 %, 8,81 %, et 3,50 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

➤ Les surfaces de réponses



(a)

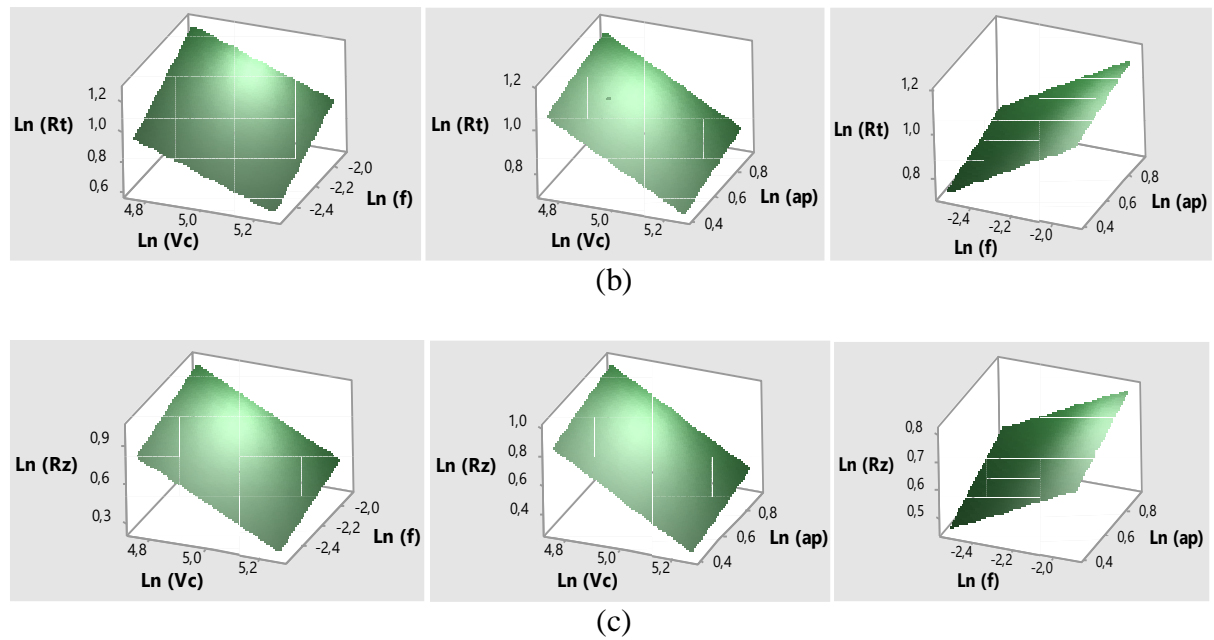


Figure III.4 : Surfaces de réponses des critères de la rugosité:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG).

Nous remarquons que les facteurs le plus influent sur les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz sont ap et f.

III.2.2 Analyse des critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse (Plan de Taguchi L9)

Tableau III-14 : Tableau des résultats pour L9.

Essais	Vc (tr/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
1	116	0,08	1,5	0,46	2,21	2,12
2	116	0,12	2	0,51	3,19	2,48
3	116	0,15	2,5	0,58	3,73	2,92
4	141	0,08	2	0,37	2,37	1,87
5	141	0,12	2,5	0,45	3,29	2,11
6	141	0,15	1,5	0,54	3,21	2,2
7	193	0,08	2,5	0,34	2,05	1,38
8	193	0,12	1,5	0,33	1,98	1,27
9	193	0,15	2	0,42	2,54	1,72

a. Modèles quadratiques réduits MQR

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-15.

Tableaux III-15: Test de Fisher pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0,061949	0,008850	32,41	0,134
Linear	3	0,056619	0,018873	69,11	0,088
Square	3	0,001145	0,000382	1,40	0,540
2-Way Interaction	1	0,001749	0,001749	6,41	0,240
Error	1	0,000273	0,000273		
Total	8	0,062222			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	3,20324	0,45761	34,26	0,131
Linear	3	2,33362	0,77787	58,25	0,096
Square	3	0,07897	0,02632	1,97	0,472
2-Way Interaction	1	0,02071	0,02071	1,55	0,431
Error	1	0,01336	0,01336		
Total	8	3,21660			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	2,15515	0,30788	1478,19	0,020
Linear	3	1,95544	0,65181	3129,51	0,013
Square	3	0,05143	0,01714	82,31	0,081
2-Way Interaction	1	0,00248	0,00248	11,91	0,180
Error	1	0,00021	0,00021		
Total	8	2,15536			

(c)

D'après l'analyse du tableau III.15, nous concluons que la valeur de test de Fisher (F) pour Ra, Rt et Rz est : $F = 34,41$ (Ra), $F = 34,26$ (Rt) et $F = 1478,19$ (Rz) respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est, de 0,02 pour Rz. Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-16: Test de Student pour les critères de la rugosité:

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	1,545	0,4011	0,0165	24,25	0,026
Vc	- 0,00822	0,07667	0,00675	-11,36	0,056
F	- 0,31	0,07447	0,00843	8,83	0,072
Ap	- 0,479	0,01005	0,00688	1,46	0,382
Vc*Vc	0,000010	0,0154	0,0136	1,14	0,459
f*f	10,6	0,0130	0,0139	0,93	0,522
ap*ap	0,0667	0,0167	0,0117	1,43	0,389
Vc*ap	0,001506	0,0290	0,0115	2,53	0,240
$R^2 = 99,56\%$			R^2 ajusté = 96.49		

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-3,69	2,868	0,116	24,73	0,026
Vc	- 0,0428	0,4219	0,0473	-8,91	0,071
F	37,5	0,4634	0,0481	9,64	0,066
Ap	0,72	0,2312	0,0605	3,82	0,163
Vc*Vc	- 0,000146	-0,2171	0,0951	-2,28	0,263
f*f	- 56,0	-0,0685	0,0837	-0,82	0,563
ap*ap	- 0,063	-0,0159	0,0952	-0,17	0,895
Vc*f	- 0,0738	-0,0994	0,0798	-1,25	0,431
R ² = 99,58%			R ² ajusté =96.68		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	4,690	1,7990	0,0145	124,22	0,005
Vc	- 0,03580	-0,52336	0,00591	-88,54	0,007
F	- 11,53	0,24098	0,00601	40,12	0,016
Ap	0,951	0,12037	0,00755	15,94	0,040
Vc*Vc	0,000081	0,1206	0,0119	10,16	0,062
f*f	97,22	0,1191	0,0105	11,39	0,056
ap*ap	- 0,1776	-0,0444	0,0119	- 3,73	0,167
Vc*f	- 0,02553	-0,03440	0,00997	-3,45	0,180
R ² = 99,99%			R ² ajusté =99.92		

(c)

L'analyse ANOVA prouve que les effets principales de la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont un impact significatif sur la rugosité de surface en général. En effet, les tableaux III-16, prouve que les termes qui ont un impact significatif sur :

- Ra sont : Vc et f;
- Rt sont: Vc , f ;
- Rz sont: Vc, f, f*f et Vc*Vc.

Les équations qui expriment la rugosité de ce modèle sont les suivantes:

$$Ra = 1,545 - 0,00822 Vc - 0,31f - 0,479 ap + 0,000010 Vc^2 + 10,6 f^2 + 0,0667 ap^2 + 0,001506 Vc * ap \dots \dots \dots (III.13)$$

$$Rt = -3,69 + 0,0428 Vc + 37,5 f + 0,72 ap - 0,000146 Vc^2 - 56,0 f^2 - 0,063 ap^2 - 0,0738 Vc * f \dots \dots \dots (III.14)$$

$$Rz = 4,690 - 0,03580 Vc - 11,53 f + 0,951 ap + 0,000081 Vc^2 + 97,22 f^2 - 0,1776 ap^2 - 0,02553 Vc * f \dots \dots \dots (III.15)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rt et Rz sont R²= 99,56 %, R²=99,58% et R² = 99,99 % respectivement. Ces valeurs indiquent

que 99,56 %, 99,58 % et $R^2 = 99,99$ % d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rt et Rz sont expliquées par les variables indépendantes, et que 0,44 %, 0,42 %, et 0,01 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

➤ **Les surfaces de réponses**

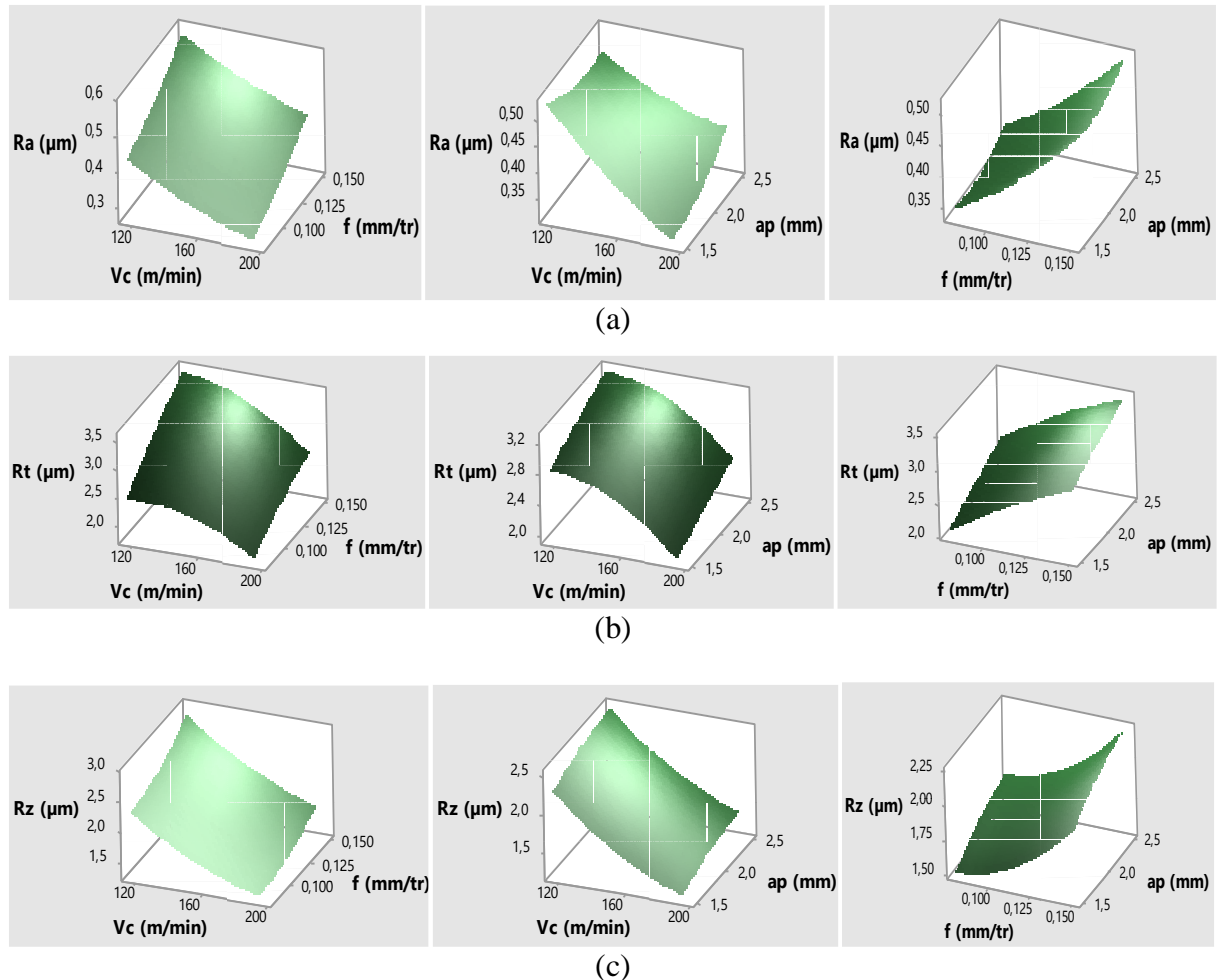


Figure III.5 : Surfaces de réponses des critères de la rugosité:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MQR).

Nous remarquons que les facteurs le plus influent sur les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz sont ap et f.

b. Modèles linéaires ML

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codées est représenté dans les tableaux III-17.

Tableaux III-17 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0,057447	0,019149	20,05	0,003
Linear	3	0,057447	0,019149	20,05	0,003
Error	5	0,004776	0,000955		
Total	8	0,062222			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	3,0999	1,03330	44,27	0,001
Linear	3	3,0999	1,03330	44,27	0,001
Error	5	0,1167	0,02334		
Total	8	3,2166			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	2,10305	0,70102	67,01	0,000
Linear	3	2,10305	0,70102	67,01	0,000
Error	5	0,05230	0,01046	6	
Total	8	2,1553			

(c)

D'après l'analyse du tableau III-17, nous concluons que la valeur de test de Fisher (F) pour Ra, Rt et Rz est : $F = 20,05$ (Ra), $F = 44,27$ (Rt) et $F = 67,01$ (Rz) respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est, de 0,003 pour Ra, 0,01 pour Rt et 0,00 pour Rz. Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-18: Test de Student pour les critères de la rugosité:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	0,5098	0,4328	0,0104	41,54	0,000
Vc	- 0,001952	-0,0751	0,0124	-6,08	0,002
F	1,721	0,0602	0,0126	4,79	0,005
Ap	0,0133	0,0067	0,0126	0,53	0,620
$R^2 = 92,32\%$			R^2 ajusté = 87,72%		

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	1,768	2,6549	0,0515	51,54	0,000
Vc	- 0,01164	-0,4480	0,0611	-7,33	0,001
F	13,66	0,4782	0,0622	7,69	0,001
Ap	0,557	0,2783	0,0624	4,46	0,007
$R^2 = 96,37\%$			R^2 ajusté = 94,19%		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	2,662	1,9364	0,0345	56,15	0,000
Vc	- 0,01333	-0,5131	0,0409	-12,54	0,000
F	6.84	0,2395	0,0416	5,75	0,002
Ap	0,2733	0,1367	0,0418	3,27	0,022
$R^2 = 97,57\%$			$R^2 \text{ ajusté} = 96,12\%$		

(c)

L'analyse ANOVA prouve que les effets principales de la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont un impact significatif sur la rugosité de surface en général. En effet, les tableaux III-18, prouve que les termes qui ont un impact significatif sur Ra, Rt et Rz sont Vc et f.

Les équations qui expriment la rugosité de ce modèle sont les suivantes:

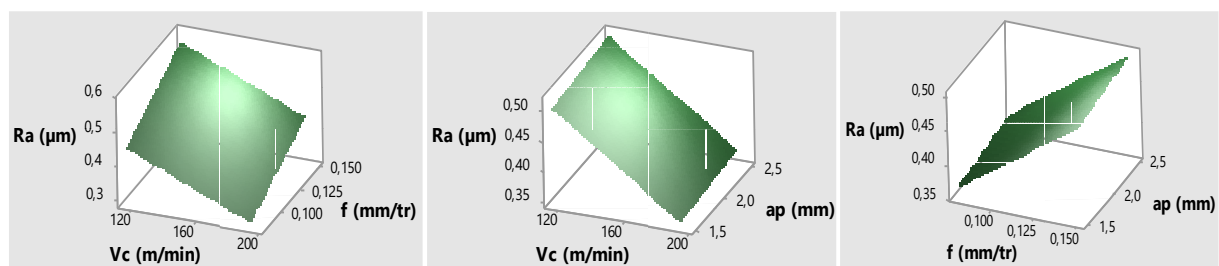
$$Ra = 0,5098 - 0,001952 Vc + 1,721 f + 0,0133 ap \dots \dots \dots (III.16)$$

$$Rt = 1,768 - 0,01164 Vc + 13,66 f + 0,557 ap \dots \dots \dots (III.17)$$

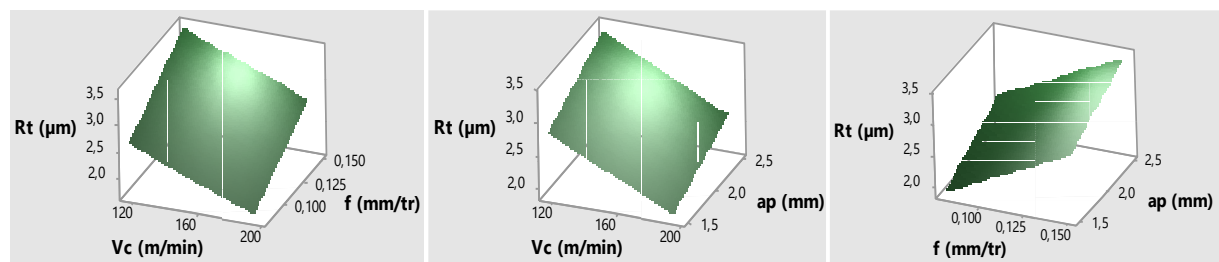
$$Rz = 2,662 - 0,01333 Vc + 6,84 f + 0,2733 ap \dots \dots \dots (III.18)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rt et Rz sont $R^2 = 92,32\%$, $R^2 = 96,37\%$ et $R^2 = 97,57\%$ respectivement. Ces valeurs indiquent que 92,32%, 96,37% et $R^2 = 97,57\%$ d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rt et Rz sont expliquées par les variables indépendantes, et que 7,68 %, 3,63 %, et 2,43 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

➤ Les surfaces de réponses



(a)



(b)

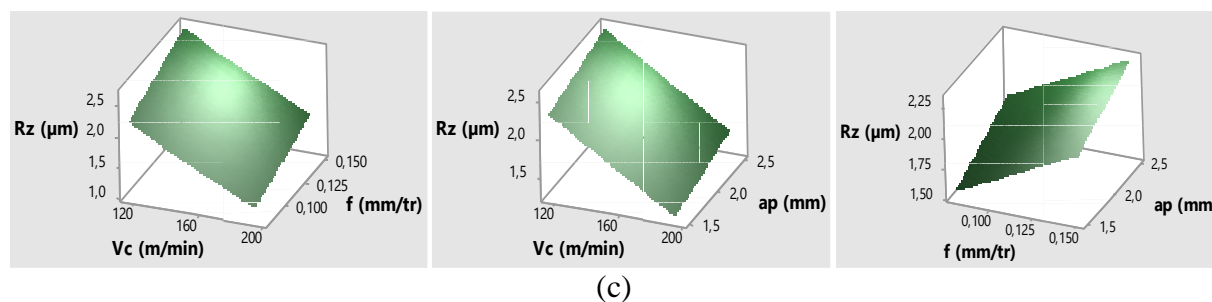


Figure III.6 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (ML).

Nous remarquons que les facteurs le plus influent sur les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz sont ap et f.

c. Modèles exponentiels réduits

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-19.

Tableaux III- 19: Test de Fisher pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	0,322864	0,053811	194,00	0,005
Linear	3	0,298904	0,099635	359,20	0,003
Square	2	0,004085	0,002042	7,36	0,120
2-Way Interaction	1	0,013412	0,013412	48,35	0,020
Error	2	0,000555	0,000277		
Total	8	0,323418			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0,428285	0,061184	14,17	0,202
Linear	3	0,310944	0,103648	24,01	0,149
Square	3	0,021085	0,007028	1,63	0,510
2-Way Interaction	1	0,001496	0,001496	0,35	0,661
Error	1	0,004317	0,004317		
Total	8	0,432602			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0,568850	0,081264	128,27	0,068
Linear	3	0,500482	0,166827	263,33	0,045
Square	2	0,008799	0,004399	6,94	0,259
2-Way Interaction	2	0,002003	0,001002	1,58	0,490
Error	1	0,000634	0,000634		
Total	8	0,569484			

(c)

D'après l'analyse du tableau III-19, nous concluons que la valeur de Fisher (F) pour Ra, Rt et Rz est : F = 194,00 (Ra), F = 14,17 (Rt) et F = 128,27 (Rz) respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est de 0,005 pour Ra, Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-20: Test de Student pour les critères de la rugosité:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	10,384	-0,9100	0,0141	-64,41	0,000
Ln(Vc)	- 1,530	-0,17994	0,00676	-26,63	0,001
Ln(f)	2,623	0,17209	0,00848	20,30	0,002
Ln(ap)	- 6,697	0,01952	0,00686	2,85	0,105
Ln(f)*Ln(f)	0,469	0,0464	0,0148	3,14	0,088
Ln(ap)*Ln(ap)	0,407	0,0266	0,0120	2,21	0,157
Ln(Vc)*Ln(ap)	1,245	0,0809	0,0116	6,95	0,020
$R^2 = 99,83\%$			R^2 ajusté = 99,31%		

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	- 33,4	1,0264	0,0658	15,61	0,041
Ln(Vc)	15,53	-0,1535	0,0272	-5,65	0,112
Ln(f)	2,40	0,1714	0,0271	6,34	0,100
Ln(ap)	0,52	0,0832	0,0358	2,33	0,258
Ln(Vc)*Ln(Vc)	- 1,684	-0,1091	0,0496	-2,20	0,271
Ln(f)* Ln(f)	0,042	0,0041	0,0514	0,08	0,949
Ln(ap)* Ln(ap)	- 0,148	-0,0097	0,0537	-0,18	0,887
Ln(Vc)* Ln(f)	- 0,334	-0,0267	0,0454	-0,59	0,661
$R^2 = 99,00\%$			R^2 ajusté = 92,02%		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	10,72	0,5946	0,0229	26,00	0,024
Ln(Vc)	- 1,150	-0,2747	0,0103	-26,58	0,024
Ln(f)	3,35	0,1304	0,0128	10,17	0,062
Ln(ap)	- 1,41	0,0667	0,0137	4,87	0,129
Ln(f)* Ln(f)	0,778	0,0769	0,0224	3,43	0,181
Ln(ap)* Ln(ap)	0,420	-0,0274	0,0206	-1,33	0,411
Ln(Vc)* Ln(f)	0,101	0,0080	0,0176	0,46	0,727
Ln(Vc)*Ln(ap)	0,445	0,0289	0,0178	1,62	0,352
$R^2 = 99,89\%$			R^2 ajusté = 99,11%		

(c)

L'analyse ANOVA prouve que les effets principales de la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont un impact significatif sur la

rugosité de surface en général. En effet, les tableaux III-20, prouve que les termes qui ont un impact significatif sur :

- Ra sont : Ln(Vc), Ln(f), Ln(f)*Ln(f) et Ln(Vc)*Ln(ap) ;
- Rt sont: Ln (Vc), Ln (f), Ln (ap) et Ln (Vc)* Ln (Vc) ;
- Rz sont: Ln (Vc), Ln (f) et Ln (ap).

Les équations qui expriment la rugosité de ce modèle sont les suivantes:

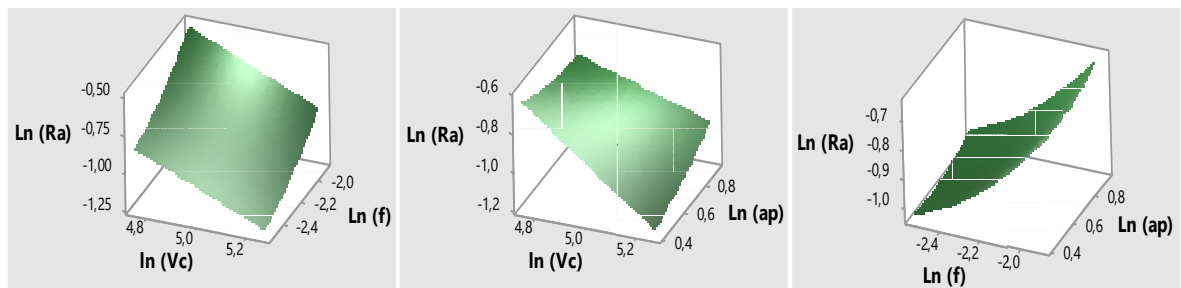
$$Ra = e^{10,384} * Vc^{-1,530} * f^{2,623} * ap^{-6,697} * f^{Ln(f^{0,469})} * ap^{Ln(ap^{0,407})} * Vc^{Ln(f^{1,245})} \dots\dots\dots(III.19)$$

$$Rt = e^{-33,4} * Vc^{15,53} * f^{2,40} * ap^{0,52} * Vc^{Ln(Vc^{-1,684})} * f^{Ln(f^{0,042})} * ap^{Ln(ap^{-0,148})} * Vc^{Ln(f^{-0,334})} \dots\dots\dots(III.20)$$

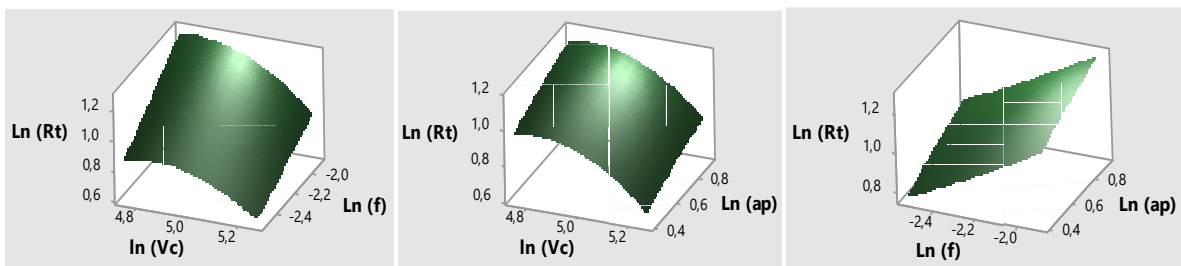
$$Rz = e^{10,72} * Vc^{-1,150} * f^{3,35} * ap^{-1,41} * f^{Ln(f^{0,778})} * ap^{Ln(Ap^{-0,420})} * Vc^{Ln(f^{0,101})} * Vc^{Ln(ap^{0,445})} \dots\dots\dots(III.21)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rt et Rz sont R²= 99,83 %, R² =99,00 % et R² = 99,89 % respectivement. Ces valeurs indiquent que 99,83 %, 99,00 % et R² = 99,89 % d’une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rt et Rz sont expliquées par les variables indépendantes, et que 0,17 %, 1,00 %, et 0,11 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

➤ Les surfaces de réponses



(a)



(b)

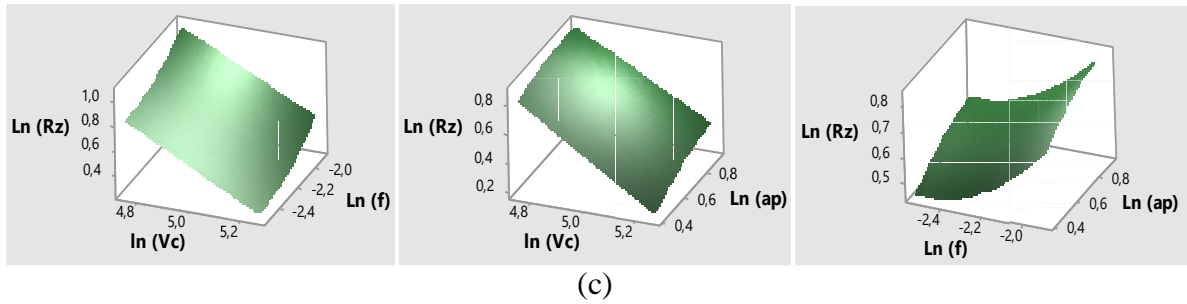


Figure III.7 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MER).

Nous remarquons que les facteurs le plus influent sur les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz sont ap et f.

d. Modèles De Gilbert MG

L'analyse des variances pour les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz en utilisant les données non codés est représenté dans les tableaux III-21.

Tableaux III-21 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0,29340	0,097803	16,30	0,005
Linear	3	0,2910	0,09783	16,30	0,005
Error	5	0,0305	0,00601		
Total	8	0,3214			

(a)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0,40579	0,135264	25,23	0,002
Linear	3	0,40579	0,135264	25,23	0,002
Error	5	0,02681	0,005362		
Total	8	0,43260			

(b)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0,55040	0,183468	48,08	0,000
Linear	3	0,55040	0,183468	48,08	0,000
Error	5	0,01908	0,003816		
Total	8	0,56948			

(c)

D'après l'analyse du tableau III-21, nous concluons que la valeur de test de Fisher (F) pour Ra, Rt et Rz est : F = 16,30 (Ra), F = 25,23 (Rt) et F = 48,08 (Rz) respectivement.

Dans le tableau, la valeur de probabilité ($P > F$) pour le test de Fisher est, de 0,005 pour R_a , 0.002 pour R_t et 0,00 pour R_z . Ceci met en évidence une relation significative entre la variable dépendante et les variables indépendantes.

Tableaux III-22: Test de Student pour les critères de la rugosité: (a) R_a , (b) R_t et (c) R_z (MG).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	3,492	-0,8554	0,0261	-32,72	0,000
Ln (Vc)	- 0,693	-0,1765	0,0313	-5,63	0,002
Ln (f)	0,4095	0,1287	0,0312	4,13	0,009
Ln (ap)	0,047	0,0121	0,0315	0,38	0,716
$R^2 = 90,72\%$			R^2 ajusté =85.16%		

(a)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	5,140	0,9467	0,0247	38,31	0,000
Ln (Vc)	- 0,644	-0,1639	0,0296	-5,53	0,003
Ln (f)	0,5510	0,1732	0,0295	5,87	0,002
Ln (ap)	0,379	0,0969	0,0298	3,25	0,023
$R^2 = 93,80\%$			R^2 ajusté =90.08%		

(b)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	6,605	0,6319	0,0208	30,31	0,000
Ln (Vc)	-1,0712	-0,2727	0,0250	-10,91	0,000
Ln (f)	0,3469	0,1090	0,0249	4,38	0,007
Ln (ap)	0,2410	0,0616	0,0252	2,45	0,058
$R^2 = 96,65\%$			R^2 ajusté =94.64%		

(c)

L'analyse ANOVA prouve que les effets principales de la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont un impact significatif sur la rugosité de surface en général. En effet, les tableaux III-22y, prouve que les termes qui ont un impact significatif sur :

- R_a sont : Ln (Vc), Ln (f) et Ln (ap);
- R_t sont: Ln (Vc), Ln (f) et Ln (ap);
- R_z sont: Ln (Vc), Ln (f) et Ln (ap).

Les équations qui expriment la rugosité de ce modèle sont les suivantes:

$$Ra = e^{3,492} * Vc^{-0,693} * f^{0,4095} * ap^{0,047} \dots\dots\dots(III.13)$$

$$Rt = e^{5,140} * Vc^{-0,644} * f^{0,5510} * ap^{0,379} \dots\dots\dots(III.14)$$

$$Rz = e^{6,605} Vc^{-1,0712} * f^{0,3469} * ap^{0,2410} \dots\dots\dots(III.15)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: R_a ,

Rt et Rz sont $R^2 = 90,72\%$, $R^2 = 93,80\%$ et $R^2 = 96,65\%$ respectivement. Ces valeurs indiquent que 90,72%, 93,80 % et 96,65 % d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rt et Rz sont expliquées par les variables indépendantes, et que 9,28 %, 6,20%, et 3,35 % respectivement restent par conséquent inexpliqués.

➤ Les surfaces de réponses

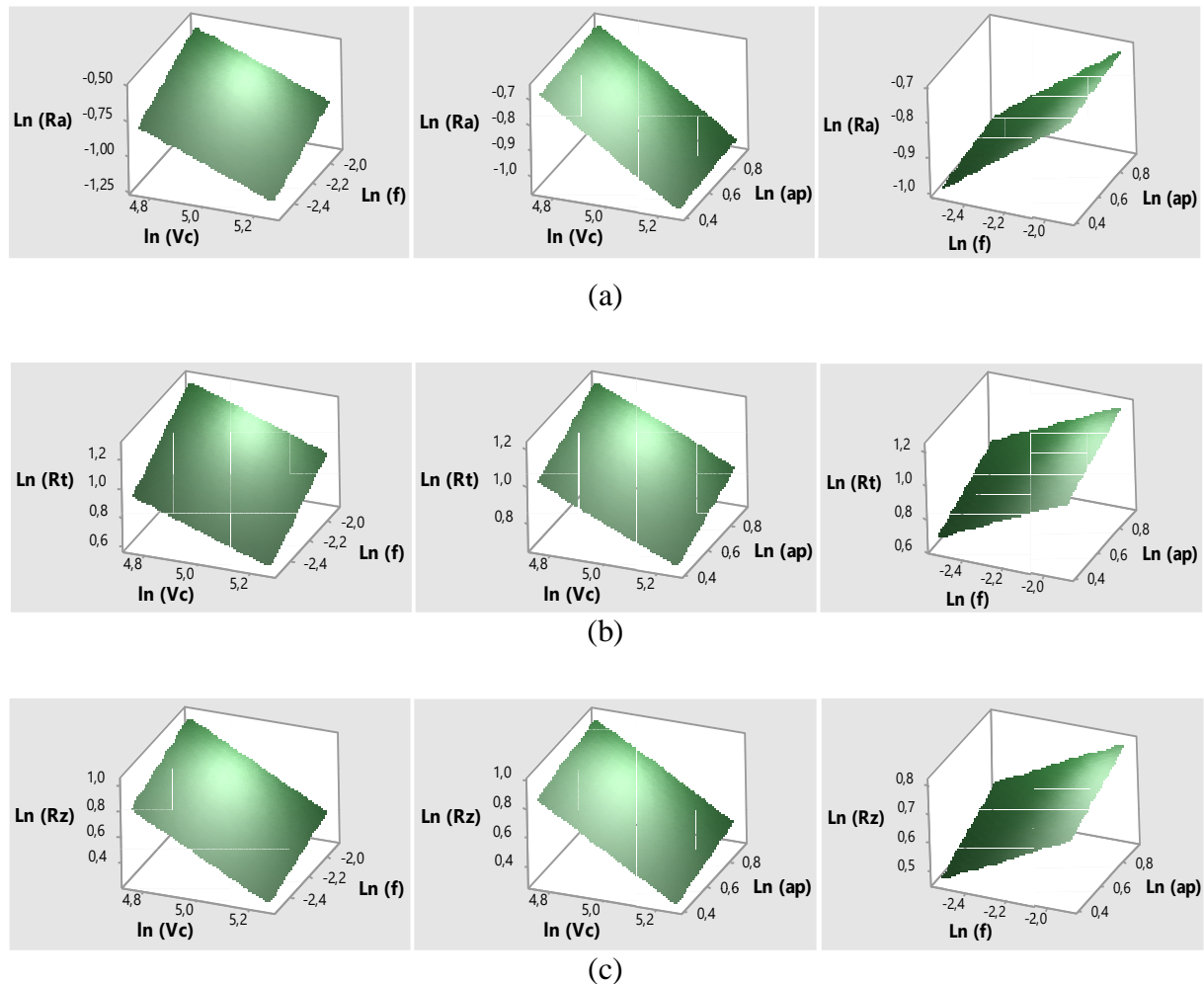


Figure III.8 : Surfaces de réponses pour les critères de la rugosité:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz (MG).

Nous remarquons que les facteurs le plus influent sur les critères de la rugosité Ra, Rt et Rz sont ap et f.

III.3 Comparaison entre les deux plans d'expérience (Box-Behnken et Taguchi)

III.3.1 Plan de Box- Behnken

Le tableau III-23 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés:
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz.

Essais	Vc (tr/min)	F (mm/tr)	ap (mm)	Ra _{EXP} (μm)	Ra _{MQR} (μm)	Ra _{ML} (μm)	Ra _{MER} (μm)	Ra _{MG} (μm)
1	141	0,08	1,5	0,36	0,39	0,38	0,38	0,37
2	193	0,12	1,5	0,33	0,34	0,36	0,33	0,36
3	141	0,15	1,5	0,54	0,52	0,51	0,51	0,49
4	116	0,12	1,5	0,53	0,53	0,50	0,53	0,51
5	116	0,08	2	0,45	0,45	0,44	0,43	0,44
6	193	0,08	2	0,32	0,31	0,30	0,31	0,31
7	193	0,15	2	0,42	0,45	0,43	0,42	0,42
8	116	0,15	2	0,57	0,58	0,57	0,59	0,59
9	141	0,08	2,5	0,4	0,41	0,41	0,40	0,40
10	193	0,12	2,5	0,42	0,43	0,39	0,42	0,39
11	141	0,15	2,5	0,54	0,54	0,54	0,55	0,54
12	116	0,12	2,5	0,52	0,52	0,53	0,51	0,55
13	141	0,12	2	0,44	0,45	0,47	0,45	0,47

(a)

Essais	Vc (tr/min)	F (mm/tr)	ap (mm)	Rt _{EXP} (μm)	Rt _{MQR} (μm)	Rt _{ML} (μm)	Rt _{MER} (μm)	Rt _{MG} (μm)
1	141	0,08	1,5	2,19	2,19	2,18	2,26	2,14
2	193	0,12	1,5	1,98	1,97	2,11	2,05	2,14
3	141	0,15	1,5	3,21	3,18	3,10	3,19	2,96
4	116	0,12	1,5	2,73	2,84	2,99	2,86	3,00
5	116	0,08	2	2,53	2,53	2,59	2,59	2,58
6	193	0,08	2	1,97	2,03	1,71	2,03	1,84
7	193	0,15	2	2,54	2,59	2,62	2,62	2,54
8	116	0,15	2	3,77	3,73	3,50	3,85	3,56
9	141	0,08	2,5	2,42	2,43	2,42	2,49	2,37
10	193	0,12	2,5	2,22	2,21	2,35	2,25	2,37
11	141	0,15	2,5	3,33	3,42	3,34	3,51	3,27
12	116	0,12	2,5	3,11	3,09	3,23	3,14	3,32
13	141	0,12	2	2,95	2,97	2,83	3,03	2,79

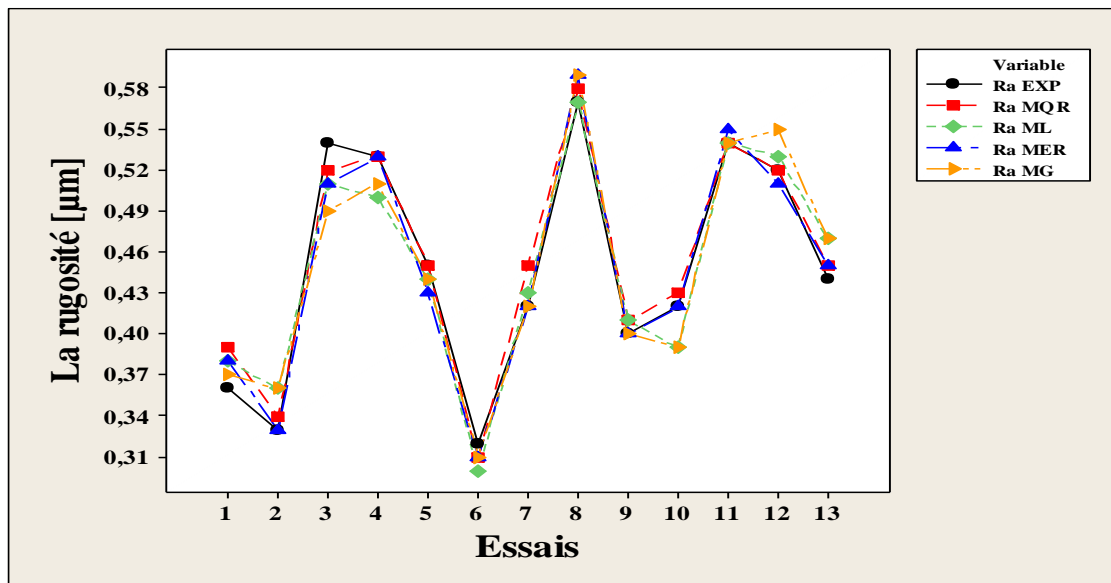
(b)

Essais	Vc (tr/min)	F (mm/tr)	ap (mm)	RZ _{EXP} (μm)	RZ _{MQR} (μm)	RZ _{ML} (μm)	RZ _{MER} (μm)	RZ _{MG} (μm)
1	141	0,08	1,5	1,71	1,70	1,75	1,71	1,68
2	193	0,12	1,5	1,27	1,24	1,32	1,28	1,37
3	141	0,15	1,5	2,2	2,20	2,22	2,17	2,09
4	116	0,12	1,5	2,28	2,30	2,35	2,29	2,39
5	116	0,08	2	2,33	2,31	2,21	2,34	2,23
6	193	0,08	2	1,31	1,31	1,18	1,30	1,28
7	193	0,15	2	1,72	1,73	1,65	1,72	1,60

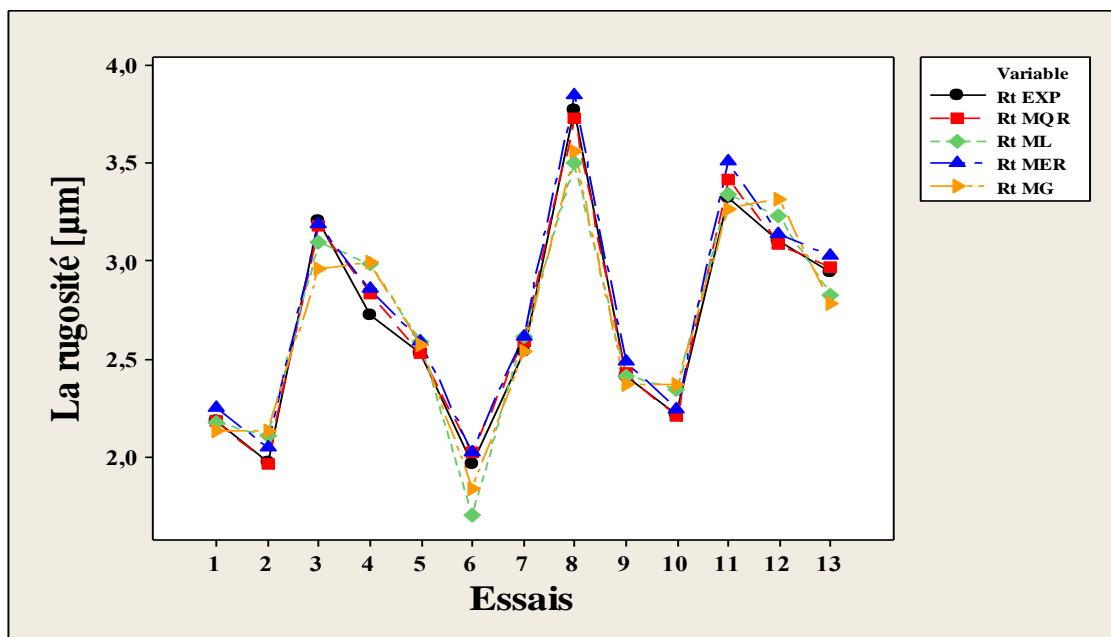
8	116	0,15	2	2,84	2,83	2,68	2,89	2,79
9	141	0,08	2,5	1,94	1,95	2,00	1,94	1,92
10	193	0,12	2,5	1,5	1,49	1,57	1,51	1,57
11	141	0,15	2,5	2,47	2,45	2,47	2,46	2,39
12	116	0,12	2,5	2,55	2,55	2,60	2,54	2,73
13	141	0,12	2	2,04	2,04	2,14	2,00	2,08

(c)

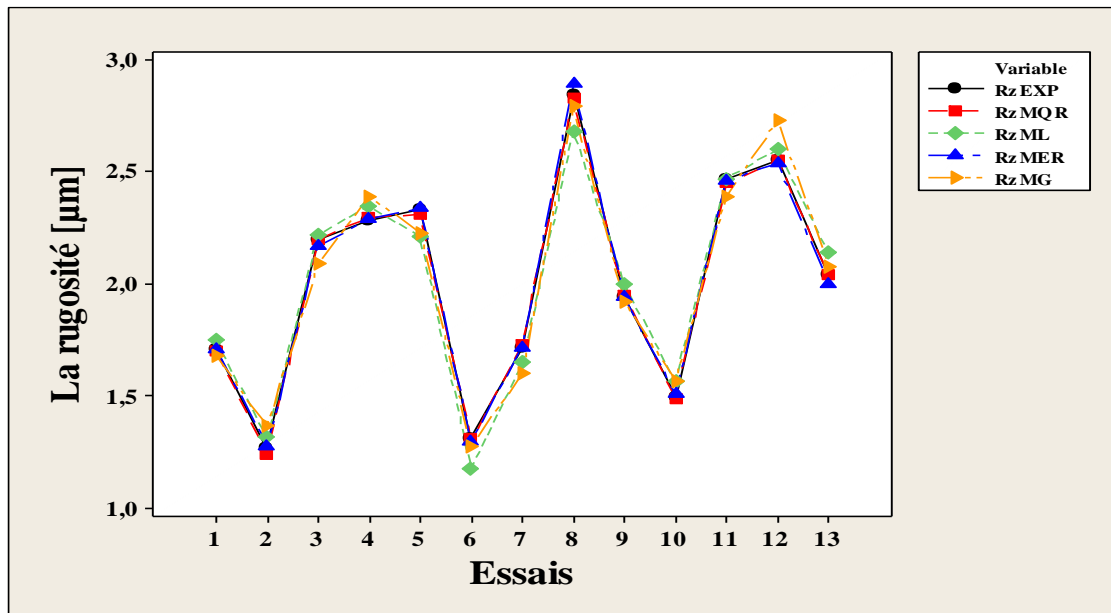
Les trois tableaux montrent les résultats du **plans d'expérience de Box-Behnken** pour la comparaison entre Ra_{EXP} , Rt_{EXP} et Rz_{EXP} et les modèles (MQR, ML, MER, MG)



(a)



(b)



(c)

Figure III.9 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.
 (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz.

Pour faire ce choix nous proposons d'utiliser l'écart-type pour définir les résultats les plus approchés aux résultats expérimentaux.

L'écart-type est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{pré} - R_{mes})^2} \dots\dots\dots(III.1)$$

$R_{pré}$ =la rugosité prédite.

R_{mes} =la rugosité expérimentale.

L'écart-type est de l'ordre de :

- **MQR** : (0,0147 pour Ra, **0,0480 pour Rt** et **0,0141 pour Rz**) ;
- **ML** : (0,0209 pour Ra, 0,1501 pour Rt et 0,0842 pour Rz) ;
- **MER** : (**0,0139 pour Ra**, 0,0844 pour Rt et 0,0209 pour Rz) ;
- **MG** : (0,0235 pour Ra, 0,1582 pour Rt et 0,0914 pour Rz) ;

Après comparaison entre l'écart-type des résultats expérimentaux et estimés nous constatons que le meilleur modèle pour la rugosité **Ra** est **MER**, pour **Rt** et **Rz** est **MQR**.

III.3.2 Plan de Taguchi

Tableau III-24 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.

(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz.

Essais	Vc (tr/min)	f (mm/tr)	Ap (mm)	Ra _{EXP} (μm)	Ra _{MQR} (μm)	Ra _{ML} (μm)	Ra _{MER} (μm)	Ra _{MG} (μm)
1	116	0,08	1,5	0,46	0,46	0,44	0,45	0,42
2	116	0,12	2	0,51	0,50	0,52	0,49	0,50
3	116	0,15	2,5	0,58	0,57	0,57	0,57	0,55
4	141	0,08	2	0,37	0,36	0,40	0,36	0,36
5	141	0,12	2,5	0,45	0,45	0,47	0,44	0,43
6	141	0,15	1,5	0,54	0,53	0,51	0,52	0,48
7	193	0,08	2,5	0,34	0,32	0,30	0,32	0,29
8	193	0,12	1,5	0,33	0,31	0,36	0,32	0,34
9	193	0,15	2	0,42	0,41	0,42	0,41	0,38

(a)

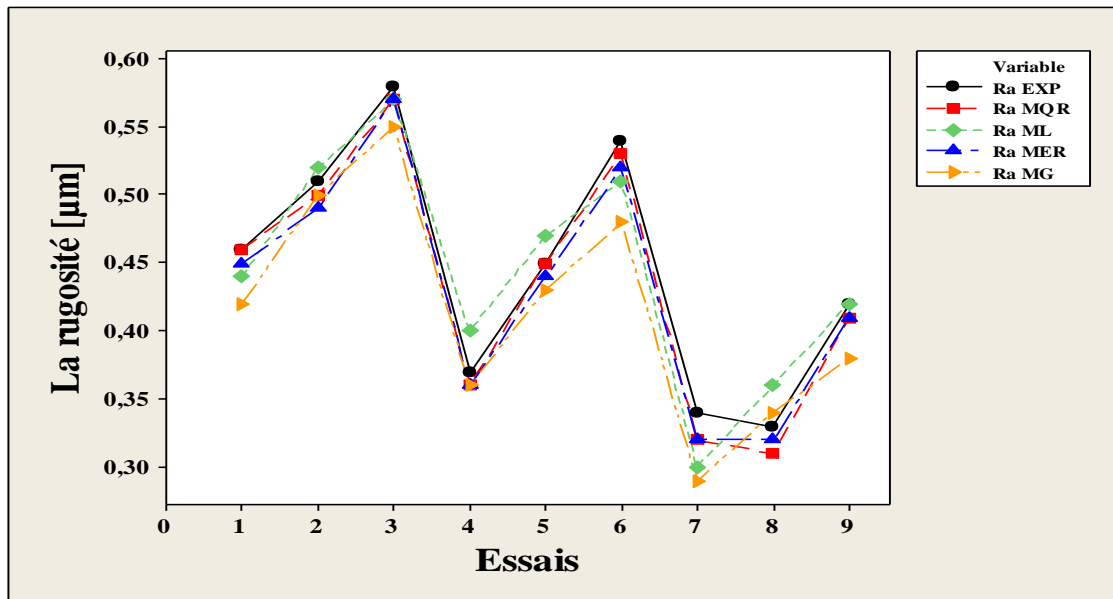
Essais	Vc (tr/min)	f (mm/tr)	Ap (mm)	Rt _{EXP} (μm)	Rt _{MQR} (μm)	Rt _{ML} (μm)	Rt _{MER} (μm)	Rt _{MG} (μm)
1	116	0,08	1,5	2,21	2,21	2,35	2,17	2,32
2	116	0,12	2	3,19	3,16	3,17	3,08	3,23
3	116	0,15	2,5	3,73	3,80	3,86	3,79	3,98
4	141	0,08	2	2,37	2,44	2,33	2,42	2,28
5	141	0,12	2,5	3,29	3,29	3,16	3,22	3,10
6	141	0,15	1,5	3,21	3,18	3,01	3,10	2,89
7	193	0,08	2,5	2,05	2,04	2,01	1,99	2,03
8	193	0,12	1,5	1,98	2,05	2,00	2,02	2,09
9	193	0,15	2	2,54	2,55	2,68	2,49	2,63

(b)

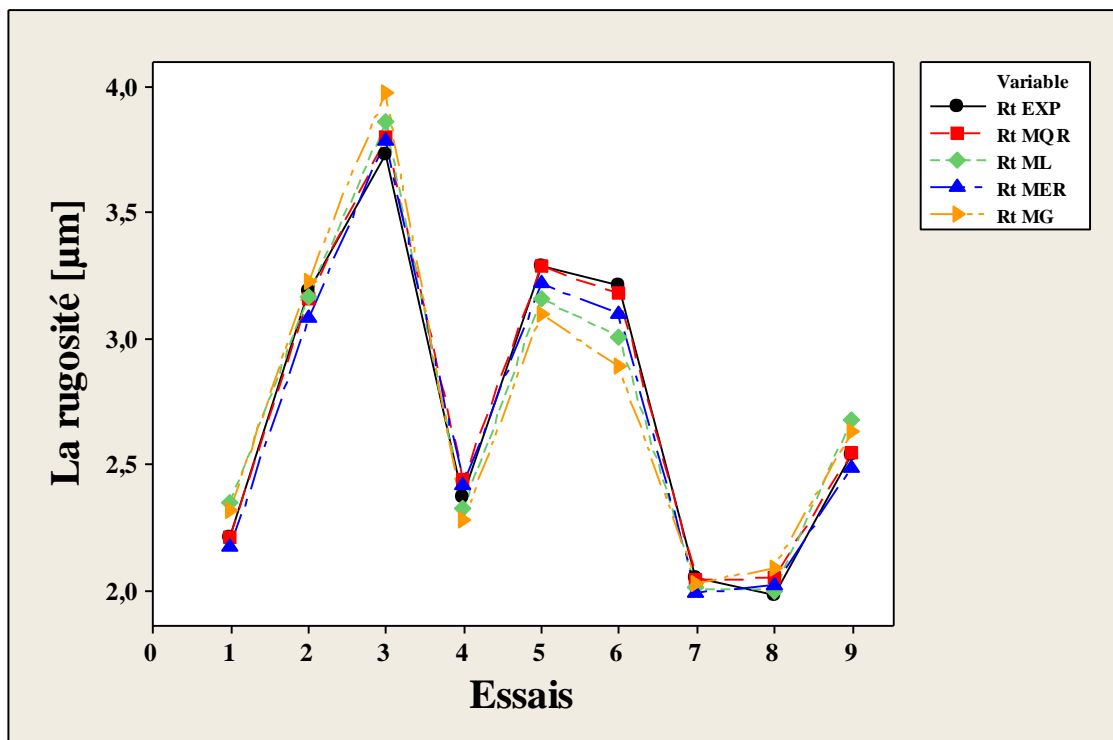
Essais	Vc (tr/min)	f (mm/tr)	Ap (mm)	Rz _{EXP} (μm)	Rz _{MQR} (μm)	Rz _{ML} (μm)	Rz _{MER} (μm)	Rz _{MG} (μm)
1	116	0,08	1,5	2,12	2,12	2,07	2,14	2,08
2	116	0,12	2	2,48	2,48	2,48	2,50	2,57
3	116	0,15	2,5	2,92	2,91	2,82	2,95	2,93
4	141	0,08	2	1,87	1,86	1,88	1,85	1,81
5	141	0,12	2,5	2,11	2,10	2,29	2,09	2,20
6	141	0,15	1,5	2,20	2,20	2,22	2,18	2,10
7	193	0,08	2,5	1,38	1,37	1,32	1,39	1,37
8	193	0,12	1,5	1,27	1,25	1,32	1,28	1,39
9	193	0,15	2	1,72	1,71	1,66	1,73	1,61

(c)

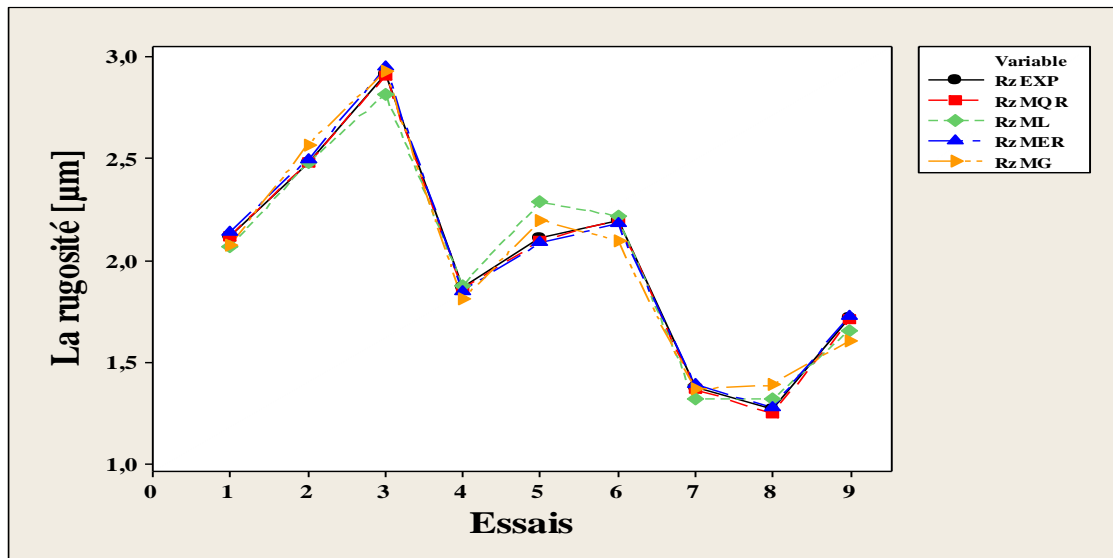
Les trois tableaux montrent les résultats du **plans d'expérience de Taguchi** pour la comparaison entre Ra_{EXP}, Rt_{EXP} et Rz_{EXP} et les modèles (MQR, ML, MER, MG)



(a)



(b)



(c)

Figure III.10: Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.
(a) Ra, (b) Rt et (c) Rz.

Pour faire ce choix nous proposons d'utiliser l'écart-type pour définir les résultats les plus approchés aux résultats expérimentaux.

L'écart-type est de l'ordre de :

- **MQR** : (0,0120 pour Ra, 0,0431 pour Rt et 0,0100 pour Rz) ;
- **ML** : (0,0243 pour Ra, 0,1140 pour Rt et 0,0782 pour Rz) ;
- **MER** : (0,0141 pour Ra, 0,0703 pour Rt et 0,0189 pour Rz) ;
- **MG** : (0,0348 pour Ra, 0,1645 pour Rt et 0,0803 pour Rz) ;

Après comparaison entre l'écart-type des résultats expérimentaux et estimés nous constatons que le meilleur modèle pour la rugosité **Ra**, **Rt** et **Rz** est **MQR**.

III.4 Comparaison entre les meilleurs résultats obtenus par le plan de Taguchi (L9) et le plan de Box-Behnken (L13)

Pour faire ce choix nous proposons d'utiliser l'écart-type pour définir les résultats les plus approchés aux résultats expérimentaux.

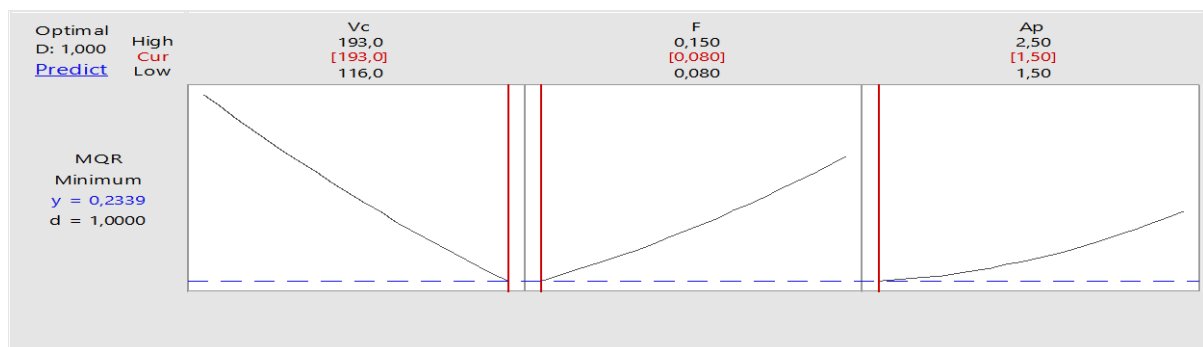
L'écart-type est de l'ordre de :

- Le plan de Box-Behnken (L13) : (0,0139 pour Ra, 0,0480 pour Rt et 0,0141 pour Rz) ;
- Le plan de Taguchi (L9) : (**0,0120 pour Ra, 0,0431 pour Rt et 0,0100 pour Rz**).

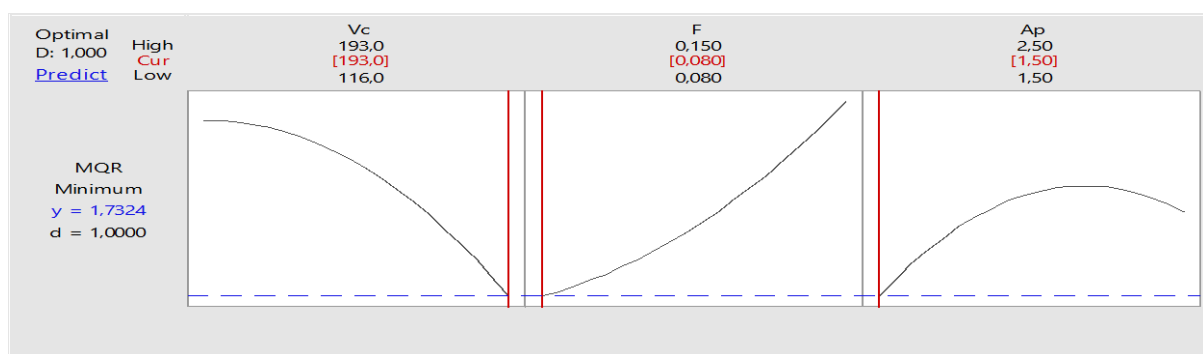
Après comparaison entre l'écart-type des résultats expérimentaux et estimés nous constatons que le meilleur modèle est le modèle obtenu par le plan de Taguchi (L9).

Donc les MQR du plan de Taguchi (L9) seront optimisées.

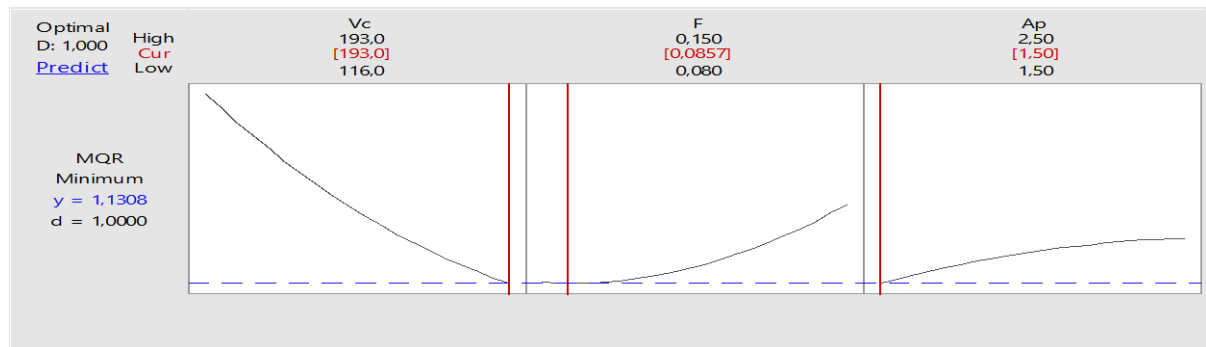
III.5 Optimisation



(a)



(b)



(c)

Figure III.11: Courbes d'optimisations : (a) Ra, (b) Rt et (c) Rz.

Les résultats d'optimisation sont de plan de taguchi (MQR) :

- **Ra = 0,234 μm** pour les paramètres de coupe : **Vc = 193 m/min**, **f = 0,08 mm/tr** et **ap = 1,5 mm**.
- **Rt = 1,732 μm** pour les paramètres de coupe : **Vc = 193 m/min**, **f = 0,08 mm/tr** et **ap = 1,5 mm**.
- **Rz = 1,130 μm** pour les paramètres de coupe : **Vc = 193 m/min**, **f = 0,0857 mm/tr** et **ap = 1,5 mm**.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, Nous avons traité le problème d'optimisation des critères de la rugosité pour choisir les conditions de coupe optimaus en appliquant la méthode de surface de réponse.

Pour cela, une modélisation des critères de la rugosité est faite en utilisant le logiciel Minitab, on appliquant deux plans d'expériences différents ; Le plan de Box- Behnken (L13) et le plan de Taguchi (L9).

Après comparaison entre ces deux plans, nous avons constaté que le meilleur résultat est celle obtenu par le plan de Taguchi (L9).

Les résultats d'optimisation sont :

- **Ra = 0,234 μm** pour les paramètres de coupe : **Vc =193 m/min, f = 0,08 mm/tr** et **ap = 1,5 mm.**
- **Rt = 1.732 μm** pour les paramètres de coupe : **Vc =193 m/min, f = 0,08 mm/tr** et **ap = 1,5 mm.**
- **Rz = 1.130 μm** pour les paramètres de coupe : **Vc =193 m/min, f = 0,085 mm/tr** et **ap = 1.5 mm.**

Références Bibliographiques

- [1] : https://www.researchgate.net/publication/257298002_Optimisation_des_parametres_de_coupe_en_tournage.
- [2] : **MAAMRI Deyaeddine, NECIB Abderrahmane**. Optimisation des Paramètres de Coupe pour Minimiser la Consommation d'Energie Pendant le Tournage, Mémoire de Master UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2015.
- [3] : **M. Benglia**, Sélection Optimale des Conditions Coupe d'Opération de Tournage à Passe Multiple, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014
- [4] : **REMLI Fethi** . L'effet d'usinage par tournage sur un acier XC18. Mémoire de Doctorat ,UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER – BISKRA2016
- [5] : **BOUGOFFA RAMEZ MED LAMINE** L'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface lors de l'usinage de l'acier XC48. Mémoire de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2018
- [6] : **CHEBI Celia**, Application informatique pour le calcul du temps et coût d'usinage des pièces en fraisage et en tournage . Mémoire de Master ,UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2017
- [7] : **HAMMOYDI Abdelmadjid .HADJSEYD Sadek Walid**, Optimisation des critères de la rugosité pare MSR et l'algorithme génétique en tournage à sec de l'acier 42CD4. Mémoire de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2017
- [8] : **BAZIZ Kahina . ZOUAOUI Sabrina**, Angles de coupe des outils en acier rapide pour l'usinage des plastiques. . Mémoire de Master ,UNIVERSITE A-MIRA BEJAIA 2017

Références Bibliographiques

[9] : **CoroKey 2006 – Produits / Théorie du tournage**, Les solutions Sandvik Coromant aux problématiques d'états de surface.

[10] : **Jacques GOUPY Revue MODULAD, 2006**, Tutoriel LES PLANS D'EXPERIENCES.

[11] : **SAHEB FARES & MAHDJOUR OUMESAAD**, Modélisation de conception de mélange Pour évaluer l'effet de la nature de sable sur les propriété physico mécanique de béton. Mémoire de Master UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR – DJELFA 2017

[12] : **Lionel GENDRE- Arnaud SAVARY-Bruno SOULIER**, Les plans d'expériences.
Edité le 21/12/2009

[13] : **HALHAL Yuba & HADROUG Salma** Optimisation par le plan d'expérience Box-Behnken de la production d'une pectinase à partir des écorces d'agrumes. Mémoire de Master UNIVERSITÉ A. MIRA-BEJAIA 2017

[14] : **Bakkari Lehib, Gherib Hamza**, Modélisation des critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse en tournage à sec, Mémoire de Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2016.

Résumé

La qualité et la performance des pièces mécaniques sont devenues un objectif majeur du processus de fabrication. La sélection optimale des conditions de coupe a un impact significatif sur l'état de la surface. Dans ce mémoire une modélisation des critères de la rugosité par la méthode de surfaces de réponses est faite, on appliquant deux plans d'expériences différentes, le plan de Box-Behnken (L13) et le plan de Taguchi (L9). Le meilleur résultat Après comparaison

Mots-clés: Conditions de coupe, Critères de la rugosité, La méthode de surfaces de réponses, Plan de Box-Behnken(L13), Plan de Taguchi (L9) et Optimisation.

المخلص

لقد أصبحت جودة وأداء القطع الميكانيكية هدفاً رئيسياً لعملية التصنيع. الاختيار الأمثل لشروط القطع له تأثير كبير على حالة السطح. في هذه المذكرة ، تم وضع نموذج لمعايير الخشونة بواسطة طريقة سطح الاستجابة ، وذلك بتطبيق خطتين تجريبيتين مختلفتين خطة (L13) Box-Behnken وخطة Taguchi (L9). سيتم تحسين افضل نتيجة بعد المقارنة

الكلمات المفتاحية: شروط القطع ، معايير الخشونة ، طريقة سطح الاستجابة ، خطة Box-Behnken (L13) ، خطة Taguchi (L9) والتحسين..

Abstract

The quality and performance of mechanical parts has become a major objective of the manufacturing process. Optimal selection of cutting conditions has a significant impact on the condition of the surface. In this thesis a modeling of the roughness criteria by the response surface method is done, applying two different experimental plans, the Box-Behnken plane (L13) and the Taguchi plane (L9). The best result After comparison

Keywords: Cutting conditions, Roughness criteria, Response surface method, Box-Behnken Plan (L13), Taguchi Plan (L9) and Optimization.