

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADIMIQUE

Domaine : Sciences Techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Génie Productique

Présenté par :

HAMMOYDI Abdelmadjid

HADJSEYD Sadek Walid

Thème

Optimisation des critères de la rugosité pare MSR et l'algorithme génétique en tournage à sec de l'acier 42CD4

Soutenu le 30/05/2017

Devant le jury composé de :

MrBoukhatemMouradMA	(A)	Président	UKM ouargla
MrkheireddineAbdelazizMA	(A)	Examineur	UKM ouargla
MrFaycelBentaleb	MC (B)	Encadreur	UKM ouargla

Année Universitaire 2016/2017

Remerciement

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 M. BOUKHATEM et Mrs A.KHEIREDDINE 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 ont 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.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Nous adressons nos plus sincères remerciement à tous proches et amis, qui nous ont toujours encouragée a terminé ces étude avec brillance.

Enfin, à ma grand-mère qui n'est plus là, un grand merci pour tout en paix «Maa» et que le paradis doit ta dernière demeure. Sans oublier mon grand-père «Saddek» qu'il repose en paix là où il est.

Table des matières

Introduction générale.....1

Chapitre I Généralité sur l'usinage

I.1 Introduction2

I.2 Procédés d'usinage2

I.2.1 Tournage.....3

I.2.1.1 Les machines de tournage.....3

I.2.1.2 Les opérations de tournage.....6

I.2.1.3 Les paramètres de coupe.....8

I.2.1.4 Paramètres géométriques de coupe.....9

I.3 Les matériaux des outils10

I.4 Généralités sur les états de surface.....12

I.4.1 Rugosité.....12

I.5 Conclusion12

Chapitre II Modélisation

II.1 Introduction13

II.2 La méthode des surfaces de réponses (RSM).....13

II.2.1 Définition13

II.2.2 Modélisation de la méthode13

II.3 Plans d'expériences.....14

II. 3.1 Définition14

II.3.2 Notion d'espace expérimental15

II.3.3 Notion de surface de réponse.....17

II.3.4 Notion de modélisation mathématique.....18

II.3.5 Le modèle de l'expérimentateur.....19

II.4 Système d'équations.....19

Table des matières

II.5 Les plans pour surfaces de réponses	20
II.5.1 Les plans composites.....	20
II.5.2 Les plans de Doehlert.....	20
II.5.3 Les plans de Box-Behnken.....	21
II.5.5 Tables de Taguchi	22
II.6 Analyse de la variance (ANOVA).....	22
II.6.1 La variance.....	22
II.6.2 Hypothèses fondamentales	23
II.6.3 Hypothèses à tester	23
II.7 Les algorithmes génétiques.....	23
II.7.1 Définition.....	23
II.7.2 Principe.....	24
II.7.3 Paramètres d'un AG.....	25
II.7.4 Principe de base d'un AG standard.....	25
II.7.5 Les opérations d'un AG.....	27
II.8 Conclusion.....	29

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1 Introduction	30
III.2 Matériel utilisé	30
III.2.1 Machine de tour.....	30
III.2.2 L'outil et le porte-outil.....	30
III.2.3 L'éprouvette utilisée	31
III.2.3 Rugosimètre	32
III.3 Procédure d'exécution	32
III.4 Les paramètres de coupe	33
III.5 Conclusion.....	33

Chapitre IV
Résultats et discussions

IV.1 Introduction	34
IV.2 Résultats expérimentaux.....	34
IV.2.1 Analyse des critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse (Plan Box-Behnken L13).....	34
IV.2.2 Analyse des critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse (Plan de TAGUCHI L9).....	48
IV.3 Comparaison entre les deux plans d'expérience (Box-behnken et Taguchi)	
IV.3.1 Plan de Box-behnken.....	61
IV.3.2 Plan de Taguchi.....	61
IV.4 Optimisation par algorithme génétique.....	

Liste des figures

Chapitre I

Généralité sur l'usinage

Figure I.1 Les différentes opérations d'usinage	3
Figure I.2 Mouvements de coupe et d'avance en tournage	3
Figure I.3 Terminologie des organes principaux du tour	4
Figure I.4 Chariotage.....	6
Figure I.5 Dressage.....	6
Figure I.6 Perçage.....	6
Figure I.7 Alésage.....	6
Figure I.8 Chanfreinage.....	7
Figure I.9 Rainurage.....	7
Figure I.10 Tronçonnage.....	7
Figure I.11 Filetage.....	7
Figure I.12 Vitesse de coupe V_c	8
Figure I.13 Vitesse d'avance V_f	9
Figure I.14 Les profondeurs de passe	9
Figure I.15 Paramètres géométriques de coupe.....	10
Figure I.16 Les matériaux des outils de coupe.....	10

Chapitre II

Modélisation

Figure II.1 Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1.....	15
Figure II.2 Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté	16
Figure II.3 Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux	16
Figure II.4 Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	17
Figure II.5 Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse.....	18
Figure II.6 Plan de Doehlert.....	21

Liste des figures

Figure II.7 Plan de Box- Behnken pour trois facteurs	21
Figure II.8 Vue d'ensemble d'un algorithme génétique.....	25
Figure II.9 Organigramme des AG standard	26
Figure II.10 Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation (chaque individu représente une solution possible)	27
Figure II.11 Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes.....	28
Figure II.12 Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne.....	28

Chapitre III

Etude expérimentale

Figure III.1 Tour parallèle EmcoMaximat V13	30
Figure III.2 L'ensemble outil, porte-outil	30
Figure III.3 L'éprouvette utilisée 42CD4	31
Figure III.4(a) Rugosimètre MITUTOYO, (b) étalon d'étalonnage du rugosimètre.....	32
Figure III.5 Principe de mesure de la rugosité	32

Chapitre IV

Résultats et discussions

Figure IV.1 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles quadratiques réduits): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	38
Figure IV.2 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles linéaires): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	41
Figure IV.3 : Surface de réponse de la rugosité Ra : (a) MQR, (b) ML.....	42
Figure IV.4 : Surface de réponse de la rugosité Rz : (a) MQR, (b) ML.....	42
Figure IV.5 : Surface de réponse de la rugosité Rt : (a) MQR, (b) ML.....	43
Figure IV.6 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles exponentiels réduits): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	45
Figure IV.7 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles de Gilbert): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	48
Figure IV.8 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles quadratiques réduits): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	51
Figure IV.9 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles linéaires): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	54
Figure IV.10 : Surface de réponse de la rugosité Ra : (a) MQR, (b) ML.....	54
Figure IV.11 : Surface de réponse de la rugosité Rz : (a) MQR, (b) ML.....	55

Liste des figures

Figure IV.12: Surface de réponse de la rugosité R_t : (a) MQR, (b) ML.....	55
Figure IV.13: Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles exponentiels réduits): (a) R_a , (b) R_z et (c) R_t	58
Figure IV.14: Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles de Gilbert): (a) R_a , (b) R_z et (c) R_t	60
Figure IV.15 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés. (a) R_a , (b) R_z et (c) R_t	63
Figure IV.16 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.: R_a , (b) R_z et (c) R_t	65

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Généralité sur l'usinage

#

Tableau I.1 Les éléments de machine de tour	4
---	---

Chapitre II

Modélisation

Tableau I.1 Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs	22
Tableau I.2 Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits	29

Liste des Tableaux

Chapitre III

Etude expérimentale

Tableau I.1 Composition chimique	31
Tableau I.2 Caractéristiques mécaniques moyennes (état trempé revenu)	31
Tableau I.3 Paramètres de coupe et leurs niveaux	33

Liste des Tableaux

Chapitre IV

Résultats et discussions

Tableau IV-1 : Tableau des résultats pour L13	34
Tableaux IV-2 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles quadratiques complets)	34

Liste des Tableaux

Tableaux IV-3: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	35
Tableaux IV-4 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles quadratiques réduits).....	36
Tableaux IV-5: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	37
Tableaux IV-6 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles linéaires).....	39
Tableaux IV-7: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	40
Tableaux IV-8: Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles exponentiels réduits).....	43
Tableaux IV-9: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	44
Tableaux IV-10: Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles de Gilbert).....	46
Tableaux IV-11: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	47
Tableau IV-12 : Tableau des résultats pour L9.....	48
Tableaux IV-13 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles quadratiques réduits).....	49
Tableaux IV-14: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	50
Tableaux IV-15 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles linéaires).....	52
Tableaux IV-16: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	52
Tableaux IV-17 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles exponentiels réduits).....	55
Tableaux IV-18: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	56
Tableaux IV-19 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles exponentiels réduits).....	59
Tableaux IV-20: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.....	59
Table IV-21 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés (a) :Ra, (b) :Rz et (c) :Rt.....	61
Tableau IV-22 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.(a) :Ra, (b) :Rz et (c) :Rt.....	63

Notations

Symbole	Unité	Désignation
V_c	m / min	Vitesse de coupe
f	mm /Toures	Avance par tour
A_p	mm	Profondeur de passe
R_a	μm	Rugosité arithmétique du profil
R_z	μm	Rugosité maximale de profil
R_t	μm	Rugosité totale
W	red/min	vitesse angulaire
MSR		Méthode de surface de réponse
GA		Algorithme génétique
n	tr/min	fréquence de rotation en
D	mm	diamètre de la pièce à usiner (tournage)
N	tr/min	Vitesse de broche
ANOVA		Analyse de la variance
F_z	mm	avance par tour /dent (fraisage)
V_f	mm /min	vitesse d'avance
D	mm	diamètre de la pièce
ω	red/min	vitesse angulaire
ARS		Acier Rapides Supérieurs
CBN		Nitride de Bore Cubique
Ma		mouvement lent rectiligne uniforme d'avance
Mc		mouvement rapide circulaire de coupe
W		L'ondulation

Introduction générale

Introduction générale

L'usinage par enlèvement de matière désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de copeaux à l'aide d'un outil tranchant. Cette technique ancienne reste une technique de fabrication importante et très répandue [14].

Dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage représente à lui seul, dans l'industrie, plus du tiers de l'usinage par enlèvement de copeaux. L'optimisation des processus de fabrication prend une place importante au niveau de la recherche scientifique industrielle dans un but de répondre à un double objectif visant l'amélioration de la qualité des produits fabriqués et la réduction des coûts de production. De ce point nous avons commencé à travailler sur la façon de l'optimisation des critères de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe.

Le travail réalisé au cours de cette étude a pour objectif de proposer une méthode d'optimisation permettant de rechercher les conditions de coupe optimums pour le meilleur critère de la rugosité pendant le tournage.

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

Le chapitre I: Porte sur une recherche bibliographique sur le procédé de tournage dans un premier temps, ensuite les différents phénomènes liés au procédé, ainsi que les paramètres technico-économiques.

Dans le chapitre II : Nous nous adressons à la modélisation de MSR et ensuite les différents plans d'expérience et particulièrement le Plan de Box Behnken et Plan de Taguchi, ainsi que l'analyse de la variance ANOVA, et enfin l'algorithme génétique.

Dans le chapitre III : On va parler de la partie expérimentale de notre mémoire.

Dans le chapitre IV : Nous analysons et modélisons les critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse pour deux plans d'expériences ; le plan de Box Behnken et le plan de Taguchi. La meilleure réponse sera optimisée par l'algorithme génétique.

Chapitre I

Généralités sur

l'usinage

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.[14]

L'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées.

Le procédé est, par contre, coûteux (machine, outils, hommes qualifiés) et relativement lent. C'est pourquoi on essaye d'obtenir maintenant des pièces de moulage ne nécessitant pas d'usinage. Cela est possible avec le plastique ou le Zamac (Zn, Al, Mg), mais les qualités techniques : résistance à la chaleur ou limite élastique sont encore loin d'égaliser celles de l'acier ou des alliages d'aluminium.

Avec le travail à grande vitesse, la machine-outil passe à la vitesse supérieure.

L'état de surface de la pièce à usiner est amélioré par l'écoulement plastique du matériau dans la zone de cisaillement. L'augmentation du débit des copeaux autorise une meilleure productivité, qui peut être multipliée par un facteur de 3 à 10.[3]

I.2 Procédés d'usinage

Parmi les différentes techniques de transformation de la matière, la mise en forme par enlèvement de matière (usinage) présente un poste onéreux tant par le parc de machines mobilisé que par les outils de coupe utilisés ou la perte inévitable de la matière par formation de copeaux, mais néanmoins c'est la seule méthode qui permet de produire des formes complexes avec des tolérances très serrées.

Si on compare les différentes opérations d'usinage réalisées au cours des travaux industriels, on remarque que la répartition s'effectue de la façon suivante : tournage 30%, fraisage 15%, perçage 15%, rectification 10%, alésage et brochage 15%, divers 15%.[1]

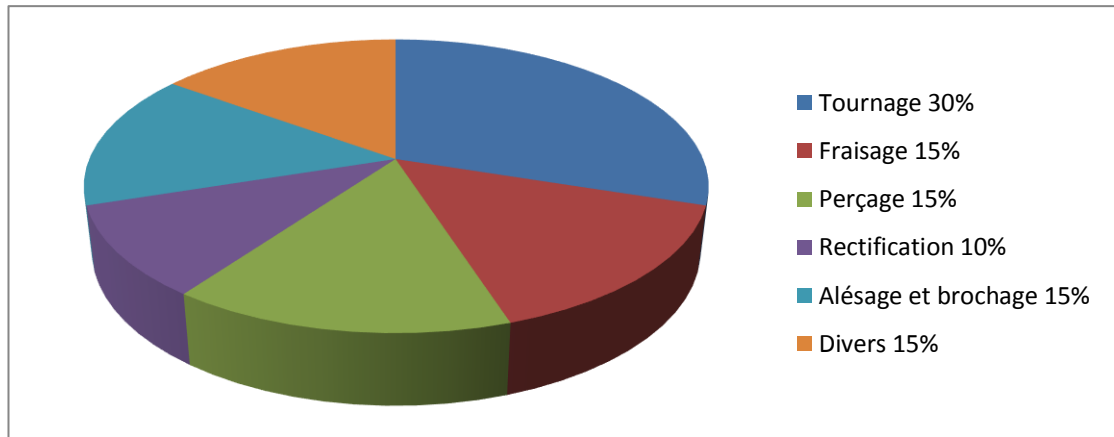


Figure I.1 : Les différentes opérations d'usinage[1].

I.2.1 Tournage

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 (Figure I.2)[1].

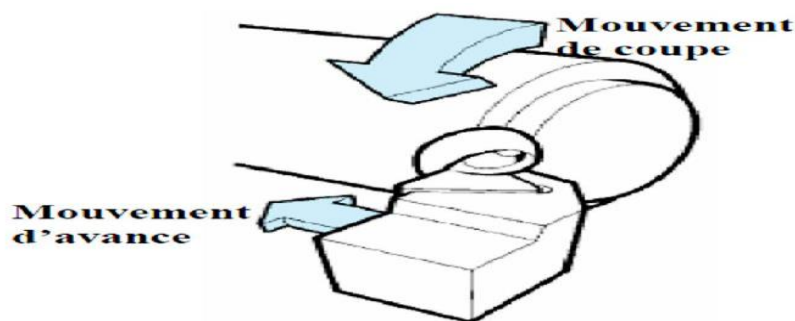


Figure I.2 : Mouvements de coupe et d'avance en tournage[1].

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.

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) [1].

I.2.1.1 Les machines de tournage

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

a- 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.

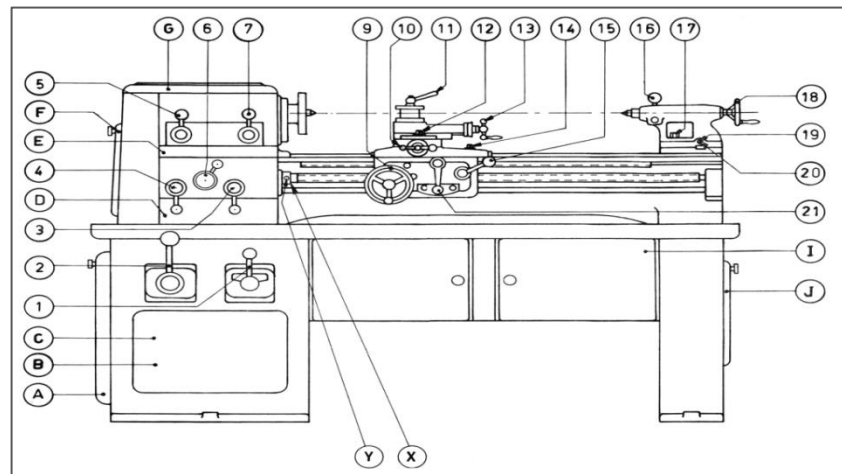


Figure 3 : Terminologie des organes principaux du tour[5].

1	Levier de commande (inverseur et commutateur) du moteur	17	Écrou de blocage de la contre-pointe sur le banc
2	Levier de commande de la boîte de vitesse	18	Volant de commande du canon de la contre-pointe
3	Levier d'inversion du sens de rotation (tringle - vis-mère)	19	Vis de désaxage de la contre-pointe
4	Levier de sélection des filetages et avances	20	Contre-avis de désaxage de la contre-pointe
5	Levier donnant (position harnais) les mouvements lent et rapide	21	Levier d'embrayage des mouvements automatiques longitudinal et transversal des chariots
6	Levier baladeur de sélection des filetages et avances	A	Couvercle d'accès à la poulie d'entrée de la boîte de vitesse
7	Levier donnant à la poupée les vitesses à la volée ou au harnais	C	Accès au moteur principal
9	Volant de commande à la main du chariot longitudinal	D	Couvercle d'accès à l'inverseur
10	Commande à la main du chariot transversal	E	Couvercle d'accès au graissage de la boîte « norton »
11	Levier de blocage de la tourelle porte-outils	F	Porte d'accès à la tête de cheval
12	Vis (deux) de blocage de l'orientation du chariot porte-outils	G	Couvercle de la poupée fixe
13	Commande à la main du chariot porte-outils	I	Portes des armoires à outils
14	Vis de blocage du chariot longitudinal	J	Couvercle d'accès au dispositif de lubrification
15	Levier commandant les demi-écrous de la vis mère (filetage)	X	Manchon
16	Levier de blocage du fourreau de la contre-pointe	Y	Vis

Tableau I-1 : Les éléments de machine de tour[5].

b- 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 [1].

c- Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonal 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 [1].

d- 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[1].

e- Les tours automatiques multibroches

Ce type de tour comporte 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'unhuitième 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[1].

f- 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[1].

I.2.1.2 Les opérations de tournage

a- Chariotage

Le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.



Figure I.4 : Chariotage[1].

b- Dressage

Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure, ce qui diminue la longueur.

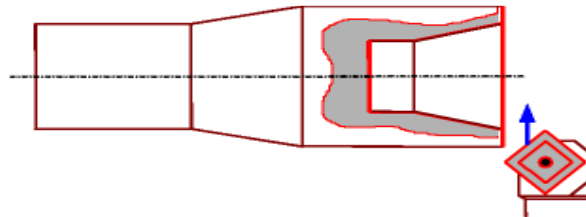


Figure I.5 : Dressage [1].

c- Perçage

Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'un foret.

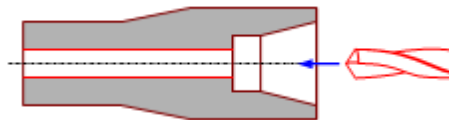


Figure I.6 : Perçage [1].

d- Alésage

Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure. Le mouvement d'avance est similaire à celui en chariotage.



Figure I.7 : Alésage[1].

e- Chanfreinage

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

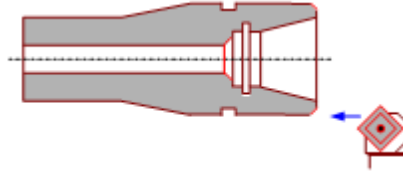


Figure I.8 :Chanfreinage[1].

f- Rainurage

On donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque, on peut obtenir une forme de révolution quelconque.

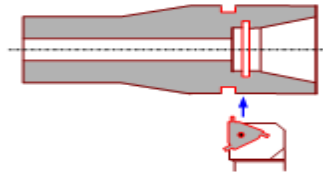


Figure I.9 : Rainurage [1].

g- Tronçonnage

Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.

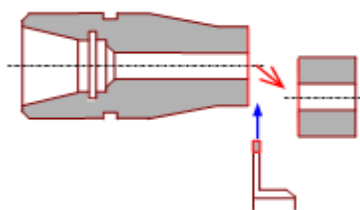


Figure I.10 : Tronçonnage [1].

h-Filetage

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieure ou intérieure, le mouvement d'avance est combine avec le mouvement de coupe.

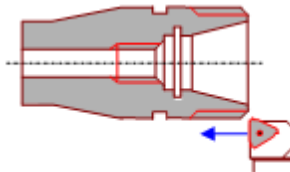


Figure I.11 : Filetage[1].

I.2.1.3 Les paramètres de coupe

- V_c : Vitesse de coupe en m/min ;
- f : Avance par tour en mm/tr (tournage) ;
- a_p : Profondeur de passe.

a- 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 pièce.

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

$$V_c \text{ (m/min)} = \frac{D}{2} \text{ (m)} \times \omega \text{ (rad/min)} \dots \dots \dots \text{(I-1)}$$

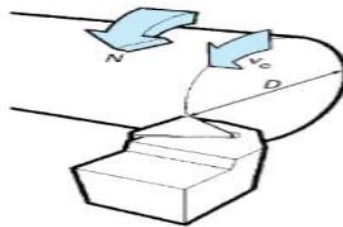


Figure I.12 : Vitesse de coupe V_c [2].

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

$$N \text{ (tr/min)} = \frac{1000 \times V_c \text{ (m/min)}}{\pi D \text{ (mm)}} \dots \dots \dots \text{(I-2)}$$

b- Vitesse d'avance V_f et avance par tour f

La vitesse d'avance (mm/min), que la figure (I. 18) montre, 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 :

$$V_f \text{ (mm)} = f \text{ (mm/tr)} \times N \text{ (tr/min)} \dots \dots \dots \text{(I-3)}$$

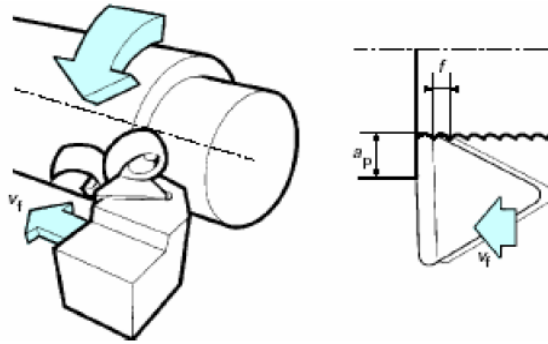


Figure I.13 :Vitesse d'avance VF [2].

c- Profondeur de passe ap

La profondeur de passe notée ap 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.

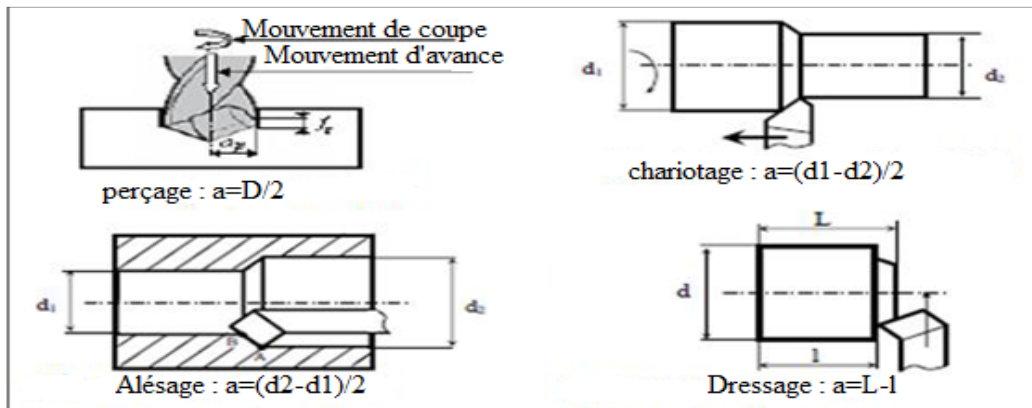


Figure I.14 : Les profondeurs de passe [6].

I.2.1.4 Paramètres géométriques de coupe

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée profondeur de passe. Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée surépaisseur d'usinage. On appelle la coupe la couche de matière qui est enlevée par une action unique de la partie active et transformée en copeaux. Ces différents paramètres sont illustrés à la figure I.15.

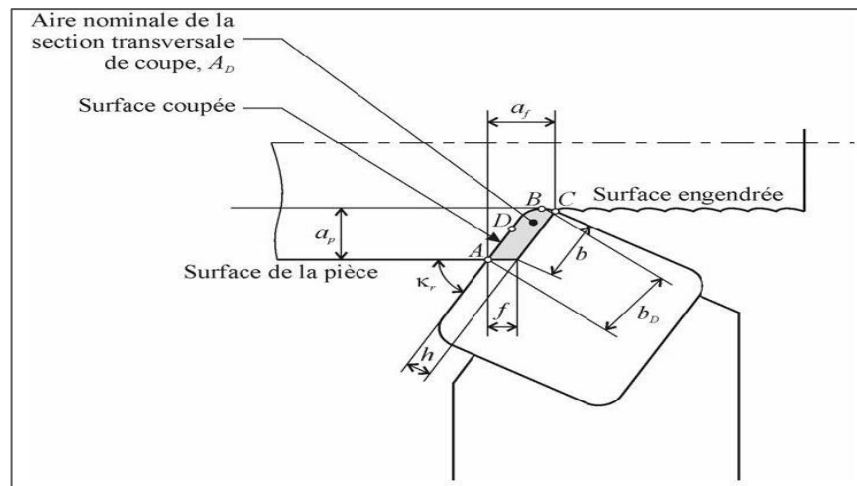


Figure I.15 : Paramètres géométriques de coupe[6].

I.3 Les matériaux des outils

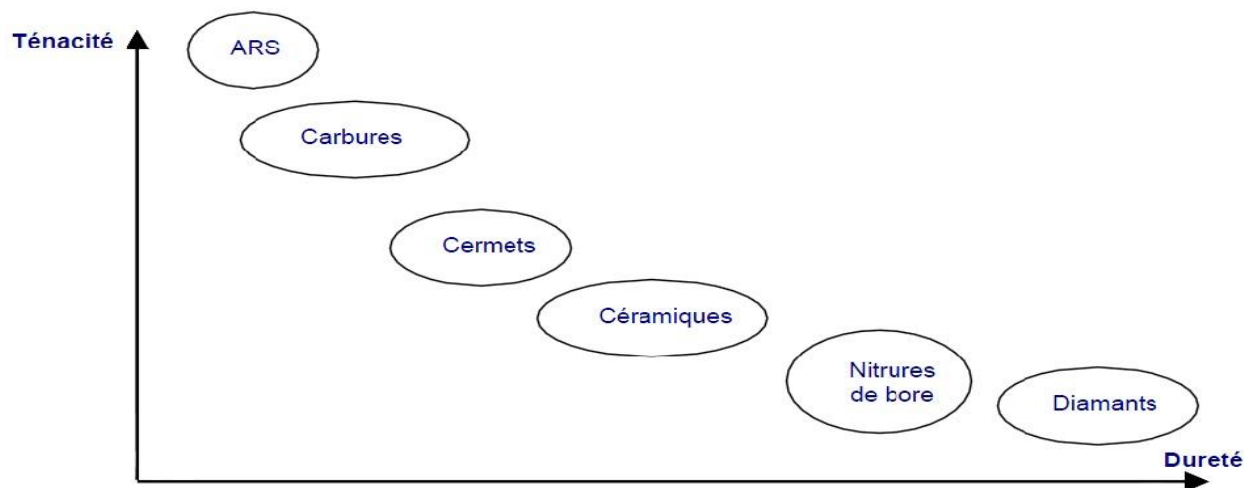


Figure I.16 : Les matériaux des outils de coupe [3].

a- ARS :

Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forêts, 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'arête de coupe.

Fabrication : Par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres.

Composition : 0,7 % de Carbone minimum, 4 % de Chrome environ. Tungstène, Molybdène, Vanadium. Cobalt pour les plus durs. Dureté : de 63 à 66 Hrc[3].

b- Carbures

Les outils carbures sont les plus utilisés 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.

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°), ou tantale (3780°) ou niobium (3500°).

Liant : cobalt : le plus courant ou nickel.

Revêtement en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon : Al_2O_3)[3].

c- 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...)[3].

d- Céramiques

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.

Les céramiques 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) [3].

e- 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 [3].

Son utilisation requiert :

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

f- 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'arête 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.

Il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à base température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables [3].

I.4 Généralités sur 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'est 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 dimension 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 [4].

I.4.1 Rugosité

La rugosité concerne les défauts micro géométriques de la surface réelle. La cotation des états de surface fait essentiellement référence à l'usinage par enlèvement de matière. Les défauts sont des stries et des sillons creusés par les arêtes coupantes des outils (outils de tournage, fraises, meules, etc...). On distingue 2 niveaux de défauts d'état de surface [4] :

- **Niveau 1:** stries périodiques.
- **Niveau 2:** défauts apériodiques : arrachement de matière.

I.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les procédés d'usinage, les matériaux des outils de coupe, ainsi que l'état de surface (la rugosité).

Chapitre II

Modélisation

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode de surface de réponse (MSR), les plans d'expérience et les algorithmes génétiques.

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 réponse (MSR) vise à proposer des formulations analytiques explicites des réponses d'un système mécanique[8].

Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques de recherche et d'optimisation stochastique dérivées de la génétique et des mécanismes de la sélection naturelle et de l'évolution. Leurs champs d'application sont très vastes : Optimisation de fonctions (cout ou les pertes), planification, et bien d'autres domaines. La raison de ce grand nombre d'application est claire, la simplicité et l'efficacité[11].

II.2 La méthode des surfaces de réponses (RSM)**II.2.1 Définition**

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.2.2 Modélisation de la méthode

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 [8].

La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) 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 RSM est de déterminer les conditions opérationnelles optimales pour un système donné qui satisfasse les conditions spécifiques opératoires [8].

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 :

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

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 variables et 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 $(x^t x)$;

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

Y est le vecteur des réponses observées, représentant le pourcentage de photo dégradation, utilisant les variables indépendantes x_1 (Concentration en para-crésol), x_2 (Charge en catalyseur) et x_3 (Débit de circulation) en valeurs codées [7].

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

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

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 [1]. 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 [8]. 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.

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.

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.[9]

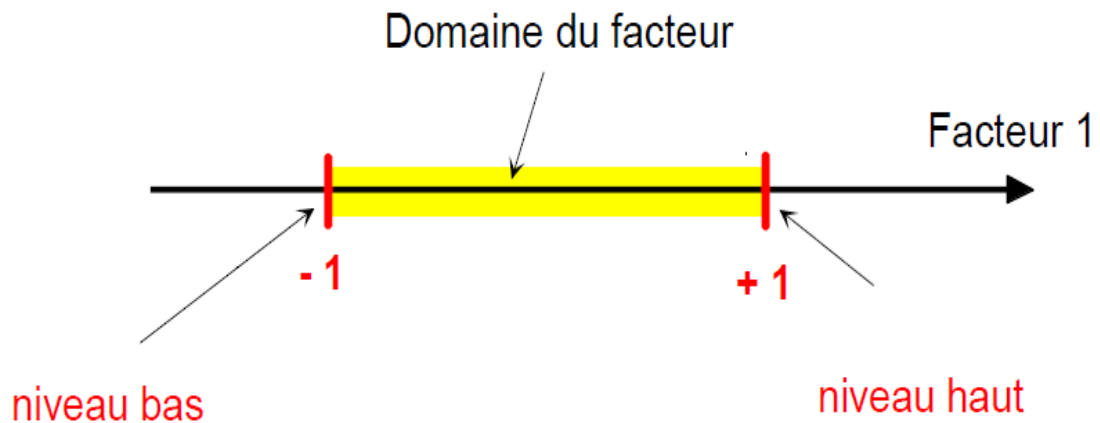


Figure II.1 : Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut[9].

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).

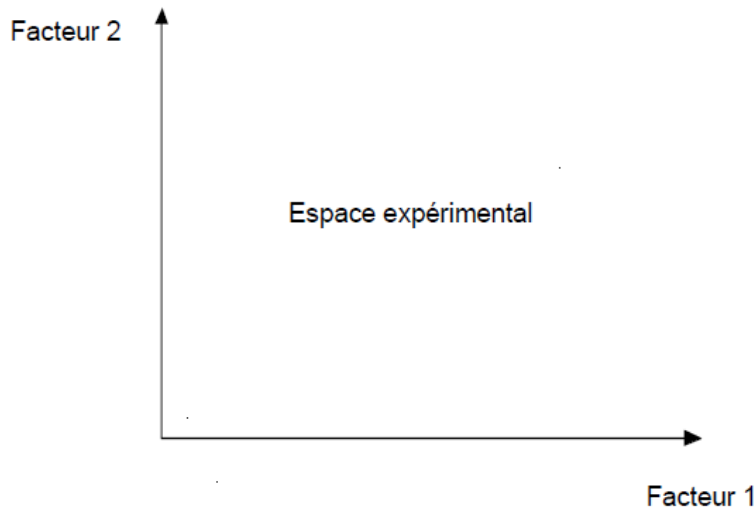


Figure II.2 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental[9].

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.

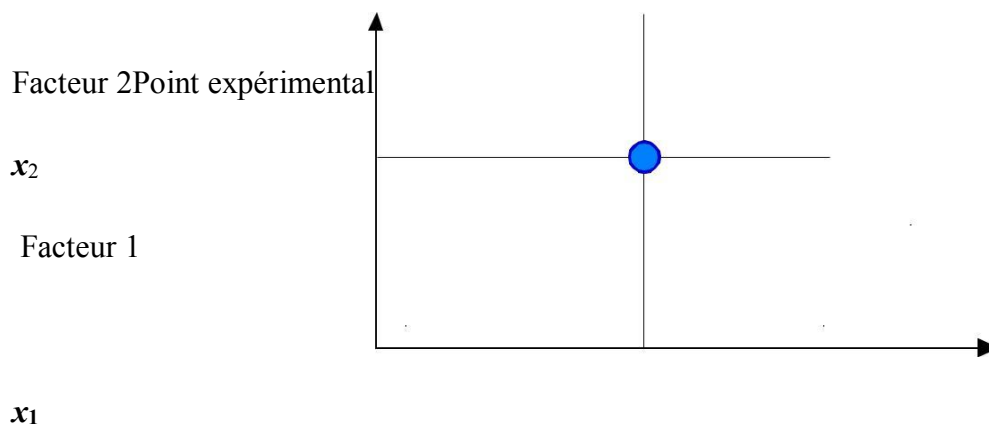


Figure II.3: Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux[9].

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. Une autre représentation d'une étude sera introduite au paragraphe 2.1 [9].

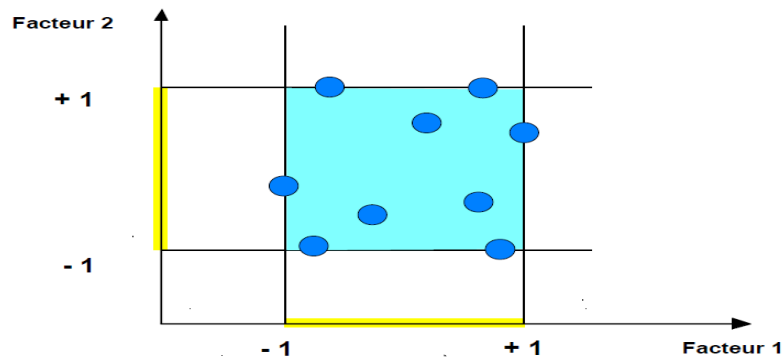


Figure II.4 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur [9].

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.[9]

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.[9]

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).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

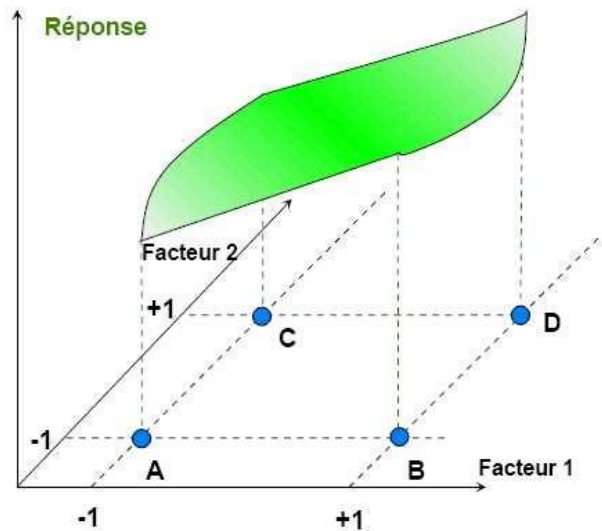


Figure II.5 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.[9]

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 :

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

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*". [9]

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 : [9]

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

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{a} . Le résultat de ce calcul est :

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

Formule dans laquelle la matrice X' est la matrice transposée de 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 $X' X$
- La matrice de dispersion $(X'X)^{-1}$
- Plans pour surfaces de réponse.

II.5 Les plans pour surfaces de réponses

Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues. Pour deux facteurs, on a :

$$y =a_0+ a_1x_1 + a_2x_2+ a_{12}x_1 x_2+ a_{11}x_1^2+a_{22}x_2^2+e \dots\dots\dots(II.8)$$

Ces plans sont utiles à chaque fois que l'on se trouve près d'un maximum ou d'un minimum. La théorie développée au cours de la première partie de cet article s'applique à ces plans. A la fin des essais, on a un système d'équations dont les coefficients sont obtenus grâce à la relation :

$$\hat{a}=(X' X)^{-1} X' y \dots\dots\dots(II.9)$$

Il existe plusieurs types de plans du second degré dont les principaux sont décrits ci-dessous.

II.5.1 Les plans composites

Un plan composite est constitué de trois parties :

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

II.5.2 Les plans de Doehlert

La caractéristique principale des plans de Doehlert est d'avoir une répartition uniforme des points expérimentaux dans l'espace expérimental. La Figure 6 donne la disposition de ces points pour un plan à deux facteurs (essais 1 à 7). Tous les points sont à la même distance du centre du domaine d'étude et sont situés sur le cercle trigonométrique. Ils forment un hexagone régulier.

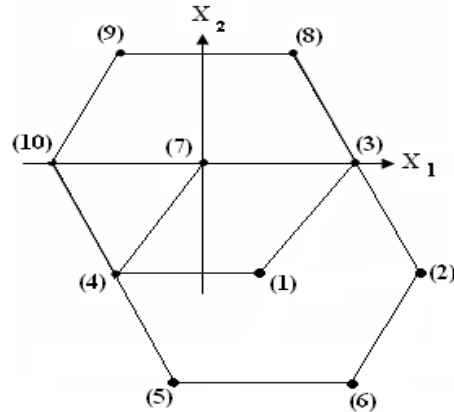


Figure II.6 : Plan de Doehlert.[9]

Si l'expérimentateur désire explorer le domaine expérimental, il peut facilement ajouter des points d'expériences supplémentaires et retrouver une disposition identique à celle de départ. La Figure II.6 montre qu'avec trois points d'expériences supplémentaires (essais 8, 9 et 10), on peut obtenir un nouveau plan de Doehlert (essais 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1).

Ce type de plans existe pour un nombre quelconque de facteurs.

II.5.3 Les plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (Figure II.7). Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central. La matrice du Tableau 14 indique ces douze essais accompagnés d'un seul point central. Dans la pratique on réalise souvent 3 ou 4 points au centre.

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.

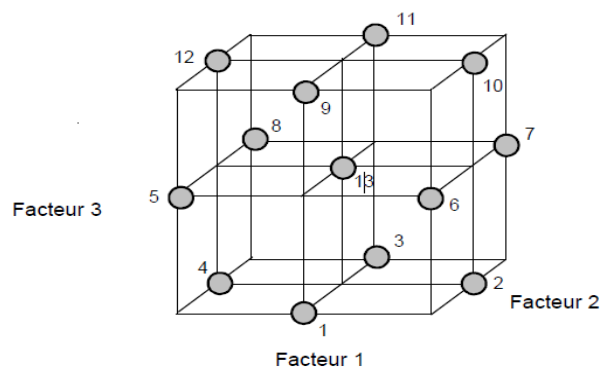


Figure II.7 : Plan de Box- Behnken pour trois facteurs [9].

Tableau II-1 : Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs[9].

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

II.5.5 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 à 12 essais est appelé table L12. À 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.

Ces plans sont très prisés dans le domaine de la qualité [13].

II.6 Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (terme souvent abrégé par le terme ANOVA : *ANalysis Of VAriance*) est un permettant de vérifier que plusieurs échantillons sont issus d'une même population [10].

Ce test s'applique lorsque l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives catégorielles (appelées alors facteurs de variabilité, leurs différentes modalités étant parfois appelées « niveaux ») qui ont de l'influence sur la distribution d'une variable continue à expliquer. On parle d'analyse à un facteur, lorsque l'analyse porte sur un modèle décrit par un facteur de variabilité, d'analyse à deux facteurs ou d'analyse multifactorielle.[10].

II.6.1 La variance

Selon la définition classique, la variance est la moyenne des carrés des écarts par rapport à la moyenne. On a n observations d'une variable, chaque observation pouvant être désignée comme x_i ; leur moyenne est égale à

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (II.10)$$

C'est-à-dire : la moyenne est égale au quotient qu'on obtient en divisant par le nombre n des données la somme de toutes les valeurs observées de la variable (de la première à la $n^{\text{ième}}$). Ceci posé, la variance est une autre moyenne, celle qu'on obtient à partir du carré des différences qui séparent les n observations de la moyenne X :

$$Var x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n} \dots \dots \dots (II.11)$$

C'est-à-dire : la variance est égale au quotient qu'on obtient en divisant par le nombre n des données la somme des carrés de toutes les différences qui séparent les observations individuelles de leur moyenne commune. En fait, surtout avec les moyens modernes de calcul, il est beaucoup plus facile d'obtenir la variance avec des données pour lesquelles on n'a pas besoin de connaître d'avance la moyenne X :

$$Var x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - X^2 = \frac{1}{n} + (\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}) \dots \dots \dots (II.12)$$

En d'autres termes : on calcule la somme des x , et en même temps la somme de leurs carrés ; si nous appelons S la somme des x et SS la somme des carrés de x , nous divisons par n le carré de S et nous retirons de SS le quotient, après quoi nous divisons par n la différence obtenue. Les trois formulations ci-dessus sont strictement équivalentes [10].

II.6.2 Hypothèses fondamentales

La forme générale de l'analyse de variance repose sur le test de Fisher et donc sur la normalité des distributions et l'indépendance des échantillons[10].

II.6.3 Hypothèses à tester

L'hypothèse nulle correspond au cas où les distributions suivent la même loi normale.

L'hypothèse alternative est qu'il existe au moins une distribution dont la moyenne s'écarte des autres moyennes :

- $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$
- $H_1 : \exists (i, j) \text{ tel que } \mu_i \neq \mu_j$

II.7 Les algorithmes génétiques

II.7.1 Définition

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : sélections, croisements, mutations, etc. Ils appartiennent à la classe des algorithmes évolutionnaires. On peut dire que l'algorithme génétique est une méthode de programmation qui repose sur le principe de l'évolution pour effectuer la recherche d'une solution adéquate à un problème [12].

II.7.2 Principe

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes utilisées dans les problèmes d'optimisation [11].

Les AG tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel. Ces algorithmes cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C Darwin. Dans un environnement, « les individus » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître (the survive al of the Fitte est)[11].

Dans un problème d'optimisation à 'n' variables, nous faisons correspondre un gène à Chaque variable cherchée. Chaque gène est représenté par une chaîne de caractères choisis Dans un alphabet fini (souvent binaire).

Les gènes s'enchaînent ensemble "bout à bout" pour construire un chromosome, chaque chromosome représentant une solution potentielle sous une forme codée. Ces chromosomes constituent les briques de base contenant les caractéristiques héréditaires des individus[11].

Un chromosome (ou plusieurs) forme un individu qui représente à son tour une solution potentielle dans l'espace de recherche correspondant du problème. Etant donné que les algorithmes génétiques travaillent sur un ensemble de points de l'espace de recherche, nous appelons l'ensemble des points choisis (à savoir les individus) une population. Au fur et à mesure des générations (itérations), une population des individus mieux adaptés va être créée[11].

Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois Catégories. Énumératives, déterministes et stochastiques. Les AG font partie de la troisième catégorie et quatre caractéristiques les distinguent des autres techniques d'optimisation

- Ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes ;
- Ils travaillent sur une population d'individus (ou de solutions) ;
- Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire ;
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

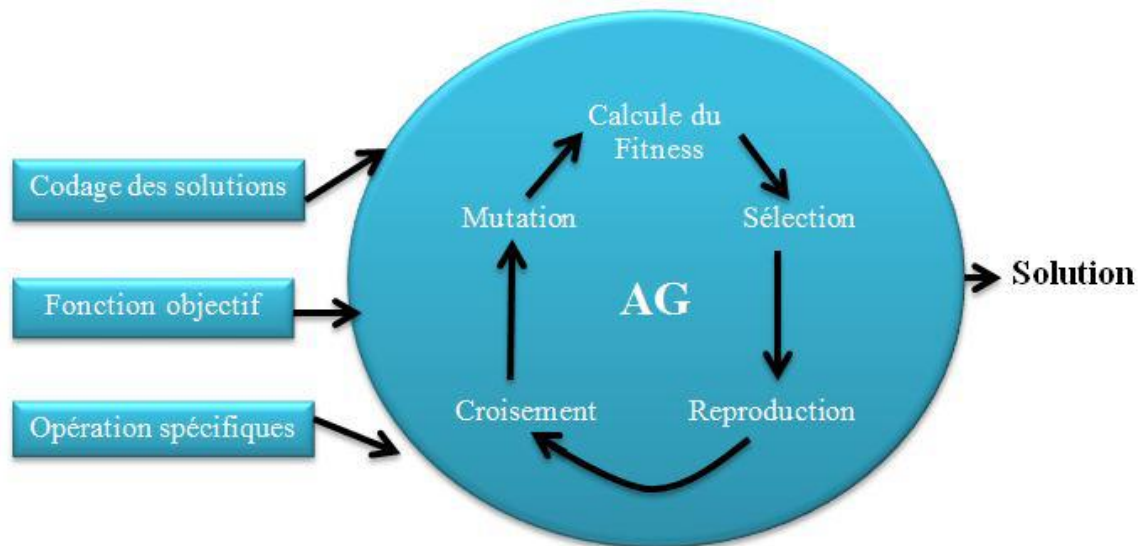


Figure II.8 : Vue d'ensemble d'un algorithme génétique [11]

II.7.3 Paramètres d'un AG

Pour appliquer un la méthode des AG à un problème réel, on doit posséder les éléments suivants :

- Un codage des éléments appartenant à la population, le codage des solutions du ;
- Problème à résoudre doit être choisi avec soin;
- Un processus d'évolution des générations;
- Des opérateurs pour modifier les individus d'une population de la génération (t) à la génération (t+1) comme le croisement et la mutation;

Les caractéristiques d'un Algorithme génétique sont :[11]

- 1. Des paramètres de l'AG :** Les opérateurs précédents dépendent de plusieurs paramètres qui sont fixés à l'avance et dont dépend fortement la convergence de l'algorithme ;
- 2. Taille de la population :** C'est-à-dire le nombre d'individus dans la population. Si la taille est trop petite, l'AG peut ne pas converger, par contre si elle est trop grande, l'évaluation des individus peut être très longue;
- 3. Probabilité de croisement et de mutation :** Les valeurs de ces probabilités peuvent varier d'une application à l'autre. Par exemple, dans l'étude des AG pour l'optimisation de cinq fonctions mathématiques,
- 4. Critère d'arrêt :** C'est-à-dire le nombre maximal de générations à effectuer.

II.7.4 Principe de base d'un AG standard

Un AG standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il

s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solutions) de façon aléatoire. Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction objectif appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer (la figure II.9).

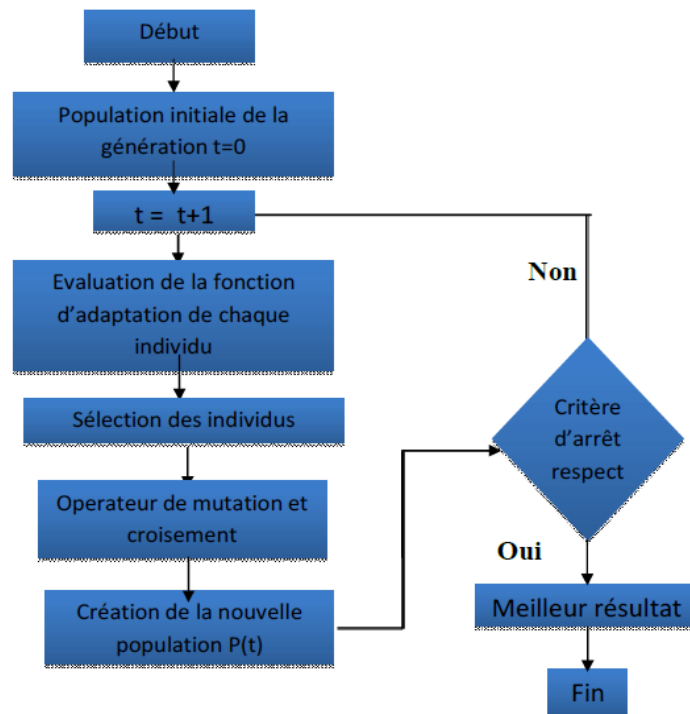


Figure II.9 : Organigramme des AG standard [12].

L'AG débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population $p(t)$ et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (t) à la génération $(t+1)$, chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. L'AG présenté ci-dessus est dit générationnel car tous les individus enfants générés sont placés dans une population et vont remplacer entièrement la population des individus parents.[12]

II.7. 5 Les opérations d'un AG

a. Sélection

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Cet opérateur ne crée pas de nouveaux individus mais identifie les individus sur la base de leur fonction d'adaptation, les individus les mieux adaptés sont sélectionnés alors que les moins bien adaptés sont écartés. La sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Ceci permet de donner aux individus dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante.

Il existe plusieurs méthodes de sélection, les plus connues étant la « roue de la fortune » et la « sélection par tournoi » :

La « roue de la fortune » est la plus ancienne, où chaque individu, de la population de taille maximale j_{\max} , occupe une section de la roue proportionnellement à sa fonction d'adaptation $Fitness(j)$, la probabilité de sélection d'un individu (j) s'écrit :

$$\text{prob}(j)=x = \frac{\text{fitness}(j)}{\sum_{j=1}^{j_{\max}} \text{fitness}(j)} \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

À chaque fois qu'un individu doit être sélectionné, un tirage à la loterie s'effectue et propose un candidat, les individus possédant une plus grande fonction d'adaptation ayant plus de chance d'être sélectionnés. À chaque fois qu'il faut sélectionner un individu, la « sélection par tournoi » consiste à tirer aléatoirement (k) individus de la population, sans tenir compte de la valeur de leur fonction d'adaptation, et de choisir le meilleur individu parmi les k individus. Le nombre d'individus sélectionnés a une influence sur la pression de sélection, lorsque $k = 2$, la sélection est dite par «tournoi binaire».

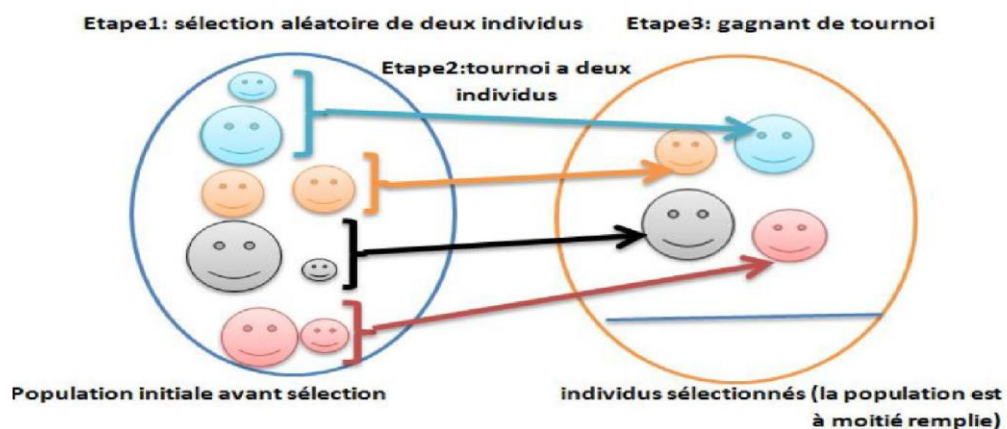


Figure II.10: Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation (chaque individu représente une solution possible)[12].

b. Croisement

Le croisement permet de créer de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes. Le croisement s'effectue en deux étapes. D'abord les nouveaux éléments produits par la reproduction sont appariés, ensuite chaque paire de chaînes subit un croisement comme suit : un entier k représentant une position sur la chaîne est choisi aléatoirement entre 1 et la longueur de chaîne (l) moins un ($l - 1$). Deux nouvelles chaînes sont créées en échangeant tous les caractères compris entre les positions $k + 1$ et l inclusivement.

L'exemple suivant (figure II.11) montre deux chaînes (A1 et A2) de longueur $l = 5$

Appartenant à la population initiale. Les deux nouvelles chaînes (A3 et A4) appartenant à la Nouvelle population sont obtenues par croisement à la position $k = 5$: [11]

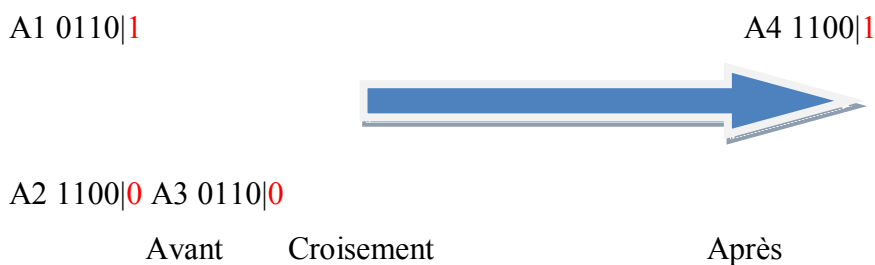


Figure II.11 : Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes [12].

c. Mutation

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaîne, pour un codage binaire cela revient à changer un 1 en 0 et vice versa.

Cet opérateur introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG à ne pas stagner dans un optimum local [12].

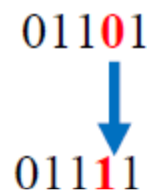


Figure II.12: Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne [12].

d. Codage

Le codage utilisé par un AG est représenté sous forme d'une chaîne de bits qui contient toute l'information nécessaire pour représenter un point de l'espace de recherche. Le codage binaire est le plus utilisé, l'inconvénient majeur du code binaire étant que deux points proches dans l'espace des variables (colonne 1 du Tableau II-1) ne sont pas nécessairement

codés par deux chaînes de bits voisines (colonne 2). On remédie en général à ce problème en utilisant le codage de Gray qui conserve une distance de Hemming de 1 entre deux chaînes (colonne 3). La distance de Hemming entre deux chaînes de bits est le nombre de bits qui diffère de l'une à l'autre. Pour les deux chaînes suivantes: 111 et 100, la distance est de 2.

Le Tableau II-2 montre un exemple du code binaire et le code Gray pour des variables entières allant de 0 et 7. On voit que la distance de Hemming est de 1 pour chaque entier dans le code Gray, alors que pour les nombres binaires, pour passer de 3 à 4, la distance de Hemming est de 3.

Tableau II.2: Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits[12].

Variables entières	Code binaire	Code Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	110	110
5	101	111
6	110	101
7	111	110

II.8 Conclusion

Nous avons adresses à la modélisation de MSR et ensuit les déférents plans d'expérience et particulièrement le Plan de Box Behnken et Plan de Taguchi, ainsi que l'analyse de la variance ANOVA, et enfin l'algorithme génétique.

Chapitre III

Etude Expérimentale

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va parler de la partie fonctionnelle de notre mémoire. Dans ce chapitre on va faire l'opération chariotage en utilisant la spécialité de tournage à sec sur l'acier 42CD4 en utilisant les appareils de tour (EMCO MAIER MAXIMAT V13) et on a changé et ajusté à chaque fois les paramètres de coupe pour mesurer l'état de surface de la pièce en utilisant l'appareils derugosimètre pour enregistrer les résultats des critères de la rugosité R_a , R_{tq} et R_z

III.2 Matériel utilisé

III.2.1 Machine de tour

Les essais ont été réalisés sur un tour modèle EmcoMaximat V13 (Figure III-1) avec une puissance de 2,2 kW sur la broche, ayant une gamme de vitesses de 30 à 2.500 tr/mn et des avances de 0,045 à 0,787 mm/tr.



Figure III.1 : Tour parallèle EmcoMaximat V13.

III.2.2 L'outil et le porte-outil

L'outil de coupe utilisé est l'outil **KNMK 16 15 04** fabriqué par Sandvik avec le porte-outil **CKTNR 20 20 K16** (Figure III-2).



Figure III-2 : L'ensemble outil, porte-outil.

III.2.3 L'éprouvette utilisée



Figure III.3 :L'éprouvette utilisée 42CD4.

L'éprouvette utilisée est 42CD4 de longueur de 400 mm et de diamètre 45 mm (Figure III-2). C'est acier de construction faiblement allié au chrome molybdène pour trempe et revenu. Bonne trempabilité à l'huile, bonne résistance aux surcharges à l'état traité. C'est un acier très employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections : arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, engrenages. Cet acier est parfois utilisé pour des pièces trempées superficiellement.

a. Composition chimique

Tableau III-1 : Composition chimique

Eléments	% mini	% maxi	Ecart admissible % en masse
C Carbone	0.38	0.45	+/- 0.02
SiSilicium		0.40	+/- 0.03
MnManganèse	0.60	0.90	+/- 0.04
PPhosphore		0.025	+ 0.005
S Soufre		0.035	+/- 0.005
Cr Chrome	0.90	1.20	+/- 0.05
Mo Molybdène	0.15	0.30	+/- 0.03
Fe Fer	Le reste		

b. Caractéristiques mécaniques moyennes (état trempé revenu)

Tableau III-2 : Caractéristiques mécaniques moyennes (état trempé revenu)

Rm (MPa)	Re (MPa)	A%	Dureté d'utilisation
750/1300	500/900	10/14	max 48 HRC

III.2.3 Rugosimètre

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z) nous avons utilisé un rugosimètre (2D), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (Figure III.4.a). Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de 4 mm avec une longueur de base de 0,8 mm ($0,8*5$). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0,05 à $40\mu\text{m}$) pour R_a et de (0,3 à $160\mu\text{m}$) pour R_t et R_z . Le rugosimètre a été étalonné à l'aide d'un étalon de rugosité de $R_a = 2,97\mu\text{m}$ et $R_{\text{max}} (R_y) = 9.4\mu\text{m}$ (Figure III.4.b). Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la même machine et sans démontage de la pièce (figure III.5).



Figure III.4 : (a) Rugosimètre MITUTOYO, (b) étalon d'étalonnage du rugosimètre.



Figure III.5: Principe de mesure de la rugosité.

III.3 Procédure d'exécution

Les essais ont été menés avec les plus grandes précautions. La démarche générale des essais est la suivante :

- Mise en position de l'éprouvette sur le tour ;

- Réglage de l'avance, de la profondeur de passe et choix de la plage de vitesse ;
- Contrôle des états de surface ;

III. 4 Les paramètres de coupe

Selon Sandvik les paramètres de coupe appliquée dans cette expérience sont données par le tableau suivant :

Tableau III-3 : Paramètres de coupe et leurs niveaux.

Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de passeap(mm)
105	0.112	0.5
145	0.140	1.0
175	0.168	1.5

III. 5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait des études expérimentale du notre mémoire, nous avons fait le chariotage avec la machine de tour pour l'éprouvette 42 CD4, pour muser les critères de la rugosité avec la rugosimètre pour Ra,Rz,et Rt.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous modélisons les critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse, on appliquant le logiciel Minitab sur deux plans d'expériences différents, le plan de Box Behnken et le plan de Taguchi. Puis nous choisirons le meilleur modèle de chaque plan pour l'optimisé on appliquant l'algorithme génétique.

IV.2 Résultats expérimentaux

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

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

Tableau IV-1 : Tableau des résultats pour L13.

Essais	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
1	128	0,112	0,5	0,54	3,51	0,66
2	174	0,14	0,5	0,67	3,69	0,83
3	128	0,168	0,5	0,82	4,65	1
4	105	0,14	0,5	0,73	4,1	0,9
5	105	0,112	1	0,6	4,49	0,78
6	174	0,112	1	0,46	3,07	0,57
7	174	0,168	1	1,07	5,23	1,28
8	105	0,168	1	1,1	5,24	1,3
9	128	0,112	1,5	0,72	4,03	0,86
10	174	0,14	1,5	1,02	5,46	1,24
11	128	0,168	1,5	1,09	5,33	1,3
12	105	0,14	1,5	1,07	6,02	1,3
13	128	0,14	1	0,76	4,64	0,94

a. Modèles quadratiques complets MQC

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 IV-2.

Tableaux IV-2 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles quadratiques complets).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0,588587	0,588587	0,065399	6,93	0,069
Linear	3	0,555698	0,032138	0,010713	1,14	0,460
Square	3	0,022019	0,022019	0,007340	0,78	0,579
Interaction	3	0,010870	0,010870	0,003623	0,38	0,774
Residual Error	3	0,028305	0,028305	0,009435		
Total	12	0,616892				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	8,24425	8,244252	0,916028	3,48	0,167
Linear	3	7,12798	0,920482	0,306827	1,16	0,452
Square	3	0,56860	0,568599	0,189533	0,72	0,603
Interaction	3	0,54767	0,547670	0,182557	0,69	0,615
Residual Error	3	0,79046	0,790455	0,263485		
Total	12	9,03471				

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0,786785	0,786785	0,087421	8,72	0,051
Linear	3	0,729271	0,055706	0,018569	1,85	0,313
Square	3	0,037481	0,037481	0,012494	1,25	0,431
Interaction	3	0,020033	0,020033	0,006678	0,67	0,627
Residual Error	3	0,030092	0,030092	0,010031		
Total	12	0,816877				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : $F = 6,93$ (Ra), $F = 3,48$ (Rz) et $F = 8,72$ (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est 6,93 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexplicée, 3,48 fois plus important pour Rz et 8,72 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-2, la probabilité ($P > F$) associée au test de Fisher (F) est de 0,069 pour Ra, 0,167 pour Rz et 0,051 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 6,9% (Ra), 16,7% (Rz) et de 5,1% (Rt).

Tableaux IV-3: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,8451	2,6782	0,689	0,540
Vc	-0,0280	0,0189	-1,480	0,235
f	5,9323	24,1431	0,246	0,822
ap	-0,4218	0,7994	-0,528	0,634
Vc*Vc	0,0001	0,0001	1,156	0,332
f*f	-20,7270	81,9494	-0,253	0,817
ap*ap	0,1950	0,2570	0,759	0,503
Vc*f	0,0458	0,0489	0,935	0,419
Vc*ap	0,0007	0,0027	0,251	0,818
f*ap	1,6071	3,4691	0,463	0,675
R²=95,43%			R²_{ajustes}=81,64%	

(a)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6,494	14,153	0,459	0,678
Vc	-0,130	0,100	-1,301	0,284
f	74,006	127,585	0,580	0,603
ap	0,136	4,225	0,032	0,976
Vc*Vc	0,000	0,000	0,732	0,517

f*f	-363,520	433,063	-0,839	0,463
ap*ap	0,100	1,358	0,074	0,946
Vc*f	0,365	0,259	1,411	0,253
Vc*ap	0,004	0,014	0,251	0,818
f*ap	2,857	18,332	0,156	0,886
R²=91,34%		R²_{ajustes}=65,01%		

(b)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,1179	2,7614	0,767	0,499
Vc	-0,0356	0,0195	-1,828	0,165
f	10,9975	24,8935	0,442	0,689
ap	-0,4357	0,8243	-0,529	0,634
Vc*Vc	0,0001	0,0001	1,375	0,263
f*f	-44,6429	84,4965	-0,528	0,634
ap*ap	0,2000	0,2650	0,755	0,505
Vc*f	0,0650	0,0505	1,288	0,288
Vc*ap	0,0008	0,0028	0,300	0,784
f*ap	1,7857	3,5769	0,499	0,652
R²=96,34%		R²_{ajustes}=85,33%		

(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 IV-4.

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

(a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles quadratiques réduits).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0,568422	0,568422	0,142106	23,45	0,000
Linear	3	0,555698	0,563474	0,187825	31,00	0,000
Square	1	0,012724	0,012724	0,012724	2,10	0,185
Residual Error	8	0,048470	0,048470	0,006059		
Total	12	0,616892				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	7,65262	7,65262	1,91316	11,07	0,002
Linear	3	7,12798	7,26158	2,42053	14,01	0,002
Interaction	1	0,52464	0,52464	0,52464	3,04	0,120
Residual Error	8	1,38209	1,38209	0,17276		

Total	12	9,03471
--------------	----	---------

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,768754	0,768754	0,153751	22,36	0,000
Linear	3	0,729271	0,261460	0,087153	12,68	0,003
Square	1	0,022851	0,022851	0,022851	3,32	0,111
Interaction	1	0,016632	0,016632	0,016632	2,42	0,164
Residual Error	7	0,048123	0,048123	0,006875		
Total	12	0,816877				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : $F = 23,45$ (Ra), $F = 11,07$ (Rz) et $F = 22,36$ (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est 23,45 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexplicée, 11,07 fois plus important pour Rz et 22,36 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-4, la probabilité ($P > F$) associée au test de Fisher (F) est de 0,000 pour Ra, 0,002 pour Rz et 0,000 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de $< 0,1\%$ (Ra), $0,2\%$ (Rz) et de $< 0,1\%$ (Rt).

Tableaux IV-5: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,73048	0,841895	0,868	0,411
Vc	-0,01833	0,012136	-1,510	0,169
f	7,85714	0,982853	7,994	0,000
ap	0,28500	0,055040	5,178	0,001
Vc*Vc	0,00006	0,000043	1,449	0,185
R²=92,14%		R²_{ajustes}=88,21%		

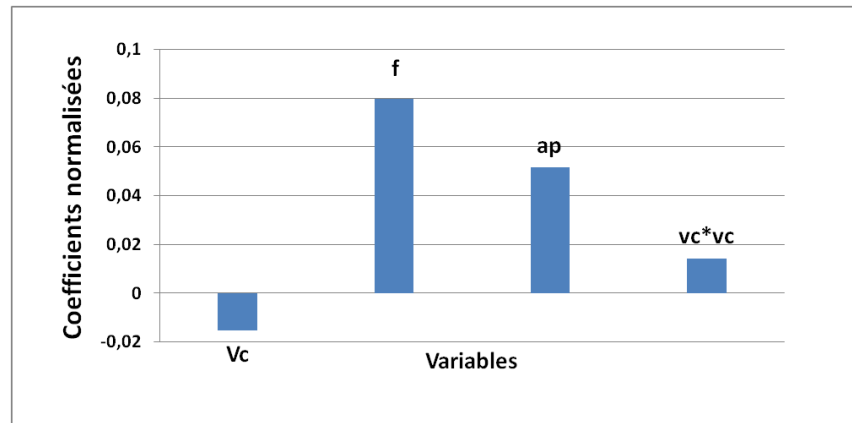
(a)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	7,8560	4,0412	1,944	0,088
Vc	-0,0586	0,0296	-1,979	0,083
f	-24,9224	28,4946	-0,875	0,407
ap	1,2225	0,2939	4,160	0,003
Vc*f	0,3649	0,2094	1,743	0,120
R²=84,70%		R²_{ajustes}=77,05%		

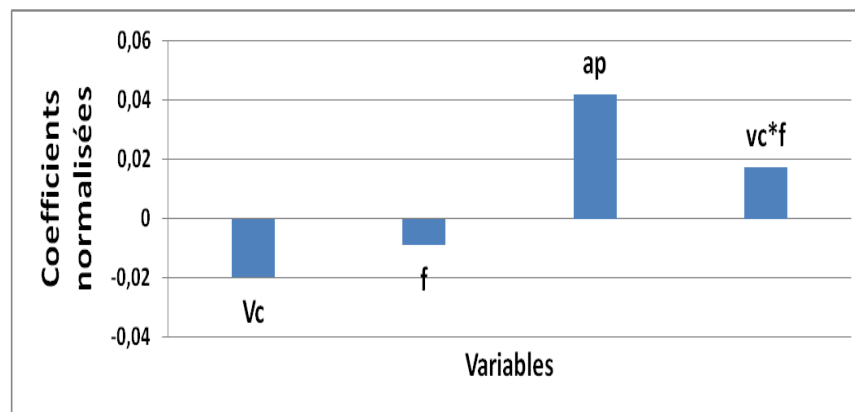
(b)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,35943	1,18997	1,983	0,088
Vc	-0,03361	0,01419	-2,369	0,050
f	0,28318	5,68417	0,050	0,962
ap	0,32750	0,05863	5,586	0,001
Vc*Vc	0,00008	0,00005	1,823	0,111
Vc*f	0,06497	0,04177	1,555	0,164
R²=94,11%		R²_{ajustes}=89,90%		

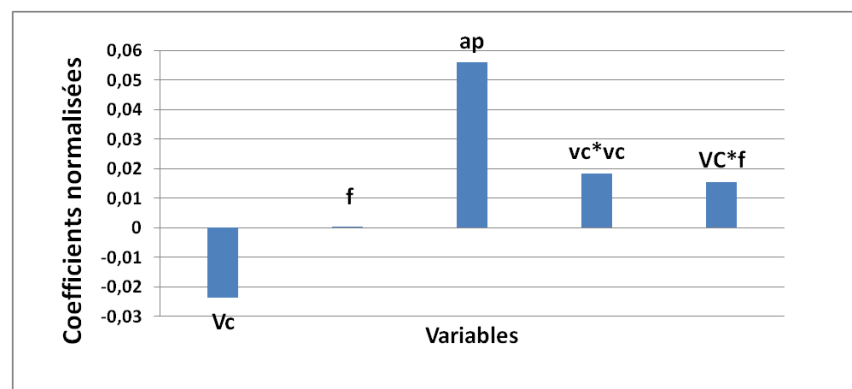
(c)



(a)



(b)



(c)

Figure IV.1 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles quadratiques réduits): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (Vc), avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) sur les critères de la rugosité (Ra, Rz et Rt) sont significatifs. En effet, le tableau IV-5(a) prouve que les termes f et ap ont des effets

significatifs sur la rugosité Ra. Le tableau IV-5(b) montre que les termes ap, Vc et Vc*f ont des effets significatifs sur la rugosité Rz. Le tableau IV-5(c) montre que les termes ap, Vc, Vc*Vc et Vc*f ont des effets significatifs sur la rugosité Rz.

D’après le tableau de test Student nous pouvons obtenir l’équation de régression qui exprime les critères de la rugosité pour ce modèle.

$$Ra = 0,730 - 0,0183 * Vc + 7,857 * f + 0,285 * ap + 0,4000062 * Vc * Vc \dots\dots\dots (IV.1)$$

$$Rz = 7,86 - 0,0586 * Vc - 24,9 * f + 1,223 * ap + 0,365 * Vc * f \dots\dots\dots(IV.2)$$

$$Rt = 2,36 - 0,0336 * vc + 0,28 * f + 0,3275 * ap + 0,000083 * vc * vc + 0,065 * vc * f \dots(IV.3)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rz et Rt sont R²= 92,14%, R² = 84,70% et R² = 94,11% respectivement. Ces valeurs indiquent que 92,14%, 84,70% et 94,11% d’une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rz et Rt sont expliquées par les variables indépendantes, et que 7,86%, 15,30%, et 5,89% respectivement restent par conséquent inexpliquées.

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 IV-6.

Tableaux IV-6 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles linéaires).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,555698	0,555698	0,185233	27,24	0,000
Linear	3	0,555698	0,555698	0,185233	27,24	0,000
Residual Error	9	0,061194	0,061194	0,006799		
Total	12	0,616892				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	7,12798	7,12798	2,37599	11,22	0,002
Linear	3	7,12798	7,12798	2,37599	211,22	0,002
Residual Error	9	1,90672	1,90672	0,21186		
Total	12	9,03471				

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,729271	0,729271	0,243090	24,97	0,000
Linear	3	0,729271	0,729271	0,243090	24,97	0,000
Residual Error	9	0,087606	0,087606	0,009734		
Total	12	0,816877				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : F = 27,24 (Ra), F = 11,22 (Rz) et F = 24,97 (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est

27,24 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexplicée, 11,22 fois plus important pour Rz et 24,97 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-6, la probabilité ($P>F$) associée au test de Fisher (F) est de 0,000 pour Ra, 0,002 pour Rz et 0,000 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de $< 0,1\%$ (Ra), $0,2\%$ (Rz) et de $< 0,1\%$ (Rt).

Tableaux IV-7: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,46035	0,19408	-2,372	0,042
Vc	-0,00078	0,00083	-0,943	0,370
f	7,85714	1,04119	7,546	0,000
ap	0,28500	0,05831	4,888	0,001
R²= 90,08%		R²_{ajustes}= 86,77%		

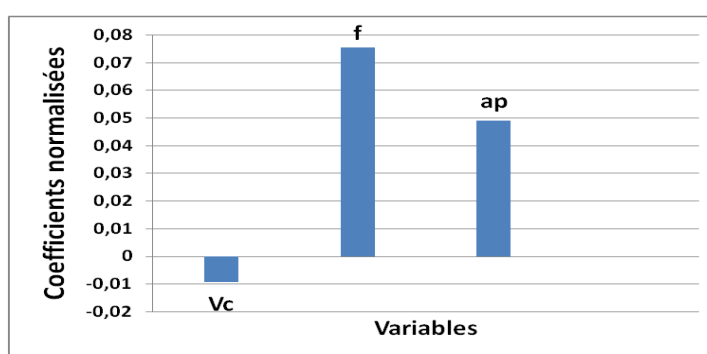
(a)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,0231	1,08333	0,944	0,370
Vc	-0,0075	0,00462	-1,627	0,138
f	23,8839	5,81192	4,109	0,003
ap	1,2225	0,32547	3,756	0,005
R²= 78,90%		R²_{ajustes}= 71,86%		

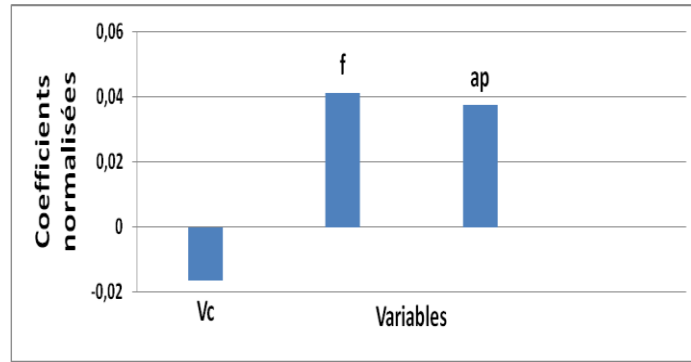
(b)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,45300	0,23221	-1,951	0,083
Vc	-0,00099	0,00099	-1,001	0,343
f	8,97321	1,24578	7,203	0,000
ap	0,32750	0,06976	4,694	0,001
R²= 89,28%		R²_{ajustes}= 89,28%		

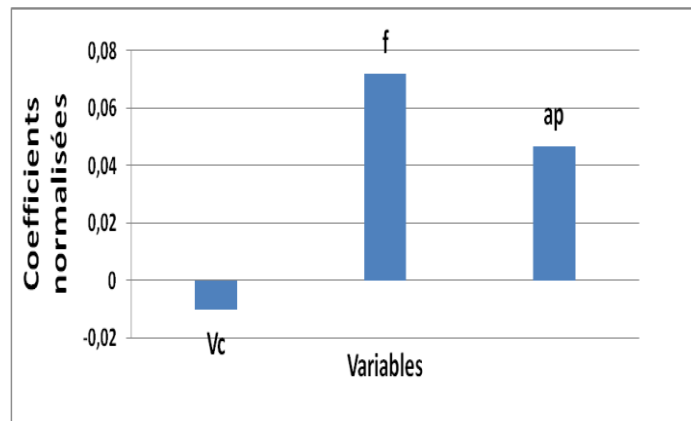
(c)



(a)



(b)



(c)

Figure IV.2 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles linéaires): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) sur les critères de la rugosité (R_a , R_z et R_t) sont significatifs. En effet, les tableaux IV-7(a), IV-7(b) et IV-7(c) montrent que les termes f et ap ont des effets significatifs sur la rugosité R_a , R_z et R_t .

D'après le tableau de test Student nous pouvons obtenir l'équation de régression qui exprime les critères de la rugosité pour ce modèle.

$$R_a = -0,460 - 0,000780 * V_c + 7,86 * f + 0,2850 * ap \dots\dots\dots (IV.4)$$

$$R_z = 1,02 - 0,00752 * V_c + 23,88 * f + 1,223 * ap \dots\dots\dots (IV.5)$$

$$R_t = -0,453 - 0,0000991 * V_c + 8,97 * f + 0,3275 * ap \dots\dots\dots (IV.6)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: R_a , R_z et R_t sont $R^2 = 90,08 \%$, $R^2 = 78,90 \%$ et $R^2 = 89,28 \%$ respectivement. Ces valeurs indiquent que $90,08 \%$, $78,90 \%$ et $89,28 \%$ d'une simple variation des critères de la

rugosité : Ra, Rz et Rt sont expliquées par les variables indépendantes, et que 9,92 %, 11,10 % et 10,72 % respectivement restent par conséquent inexpliquées

d. Les surfaces de réponses

• Pour la rugosité Ra

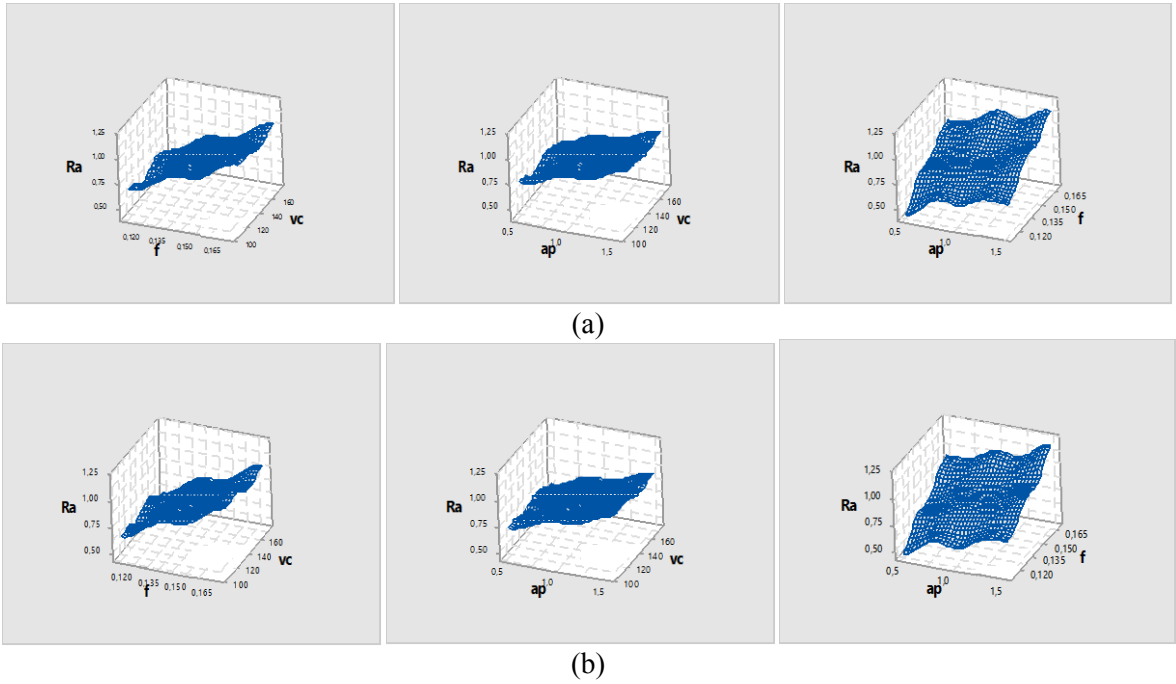


Figure IV.3 : Surface de réponse de la rugosité Ra : (a) MQR, (b) ML.

• Pour la rugosité Rz

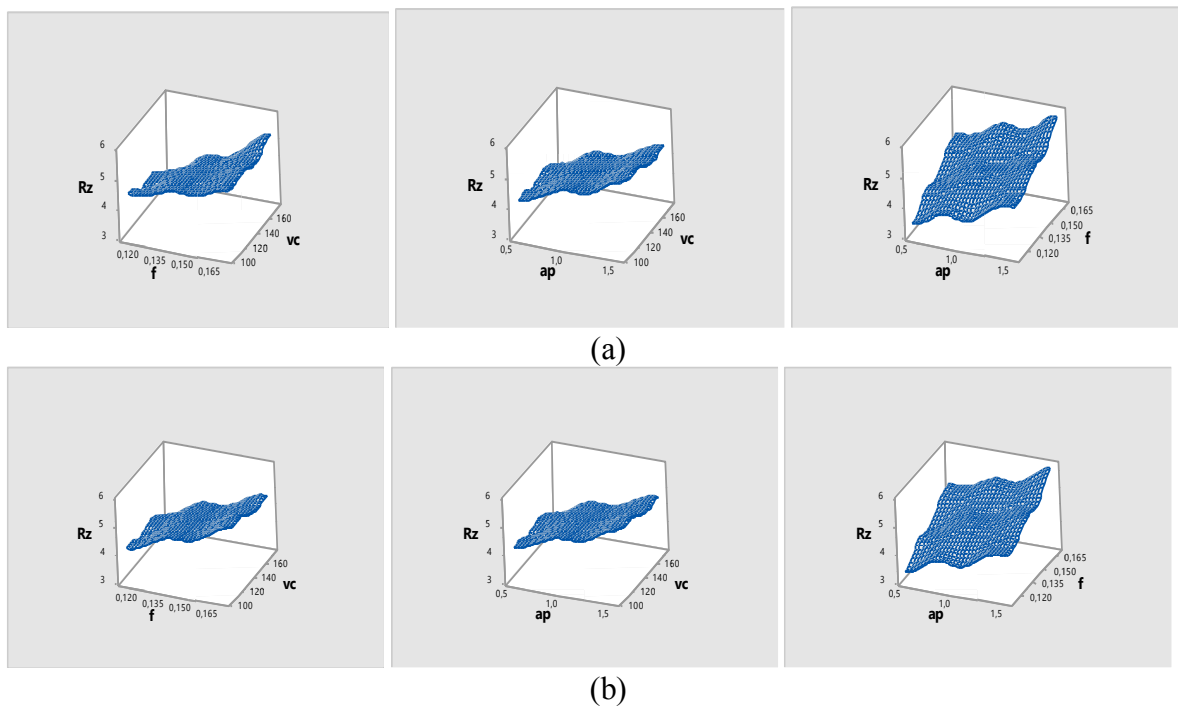


Figure IV.4 : Surface de réponse de la rugosité Rz : (a) MQR, (b) ML.

• Pour la rugosité Rz

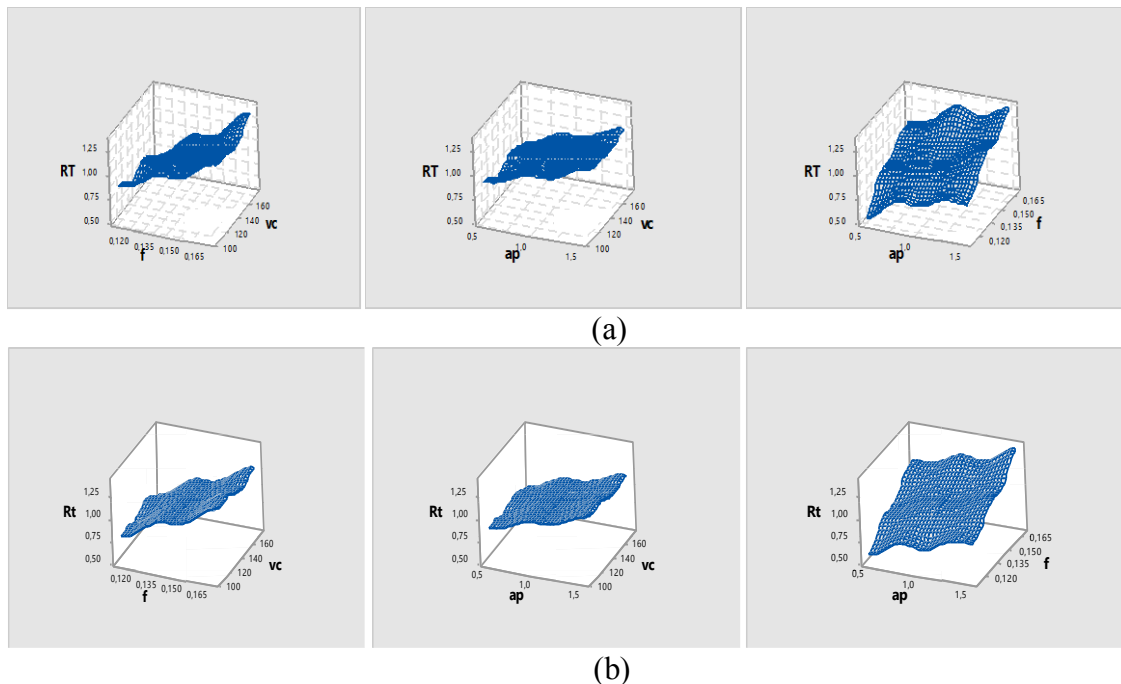


Figure IV.5 : Surface de réponse de la rugosité Rt : (a) MQR, (b) ML.

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 IV-8.

Tableaux IV-8: Test de Fisher pour les critères de la rugosité :
(a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles exponentiels réduits).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,95517	0,955173	0,191035	20,52	0,000
Linear	3	0,90001	0,270469	0,090156	9,69	0,007
Square	1	0,03138	0,030875	0,030875	3,32	0,111
Interaction	1	0,02378	0,023777	0,023777	2,55	0,154
Residual Error	7	0,06516	0,065160	0,009309		
Total	12	1,02033				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0,412624	0,412624	0,103156	15,26	0,001
Linear	3	0,373299	0,167205	0,055735	8,25	0,008
Interaction	1	0,039325	0,039325	0,039325	5,82	0,042
Residual Error	8	0,054068	0,054068	0,006759		
Total	12	0,466692				

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,861958	0,861958	0,172392	21,29	0,000
Linear	3	0,806628	0,236041	0,078680	9,72	0,007
Square	1	0,023606	0,023100	0,023100	2,85	0,135
Interaction	1	0,031724	0,031724	0,031724	3,92	0,088
Residual Error	7	0,056691	0,056691	0,008099		
Total	12	0,918649				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : $F = 20,52$ (Ra), $F = 15,26$ (Rz) et $F = 21,29$ (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est 20,52 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexplicée, 15,26 fois plus important pour Rz et 21,29 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-4, la probabilité ($P > F$) associée au test de Fisher (F) est de 0,000 pour Ra, 0,001 pour Rz et 0,000 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de $< 0,1\%$ (Ra), $0,1\%$ (Rz) et de $< 0,1\%$ (Rt).

Tableaux IV-9: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-10,8618	8,98970	-1,208	0,266
LN (Vc)	2,7452	1,84115	1,491	0,180
LN (f)	-5,8287	4,53661	-1,285	0,240
LN (ap)	0,4169	0,09084	4,589	0,003
LN (ap)*LN (ap)	0,3614	0,19847	1,821	0,111
LN (Vc)*LN (f)	1,4850	0,92913	1,598	0,154
R²=93,61%			R²_{ajustes}=89,05%	

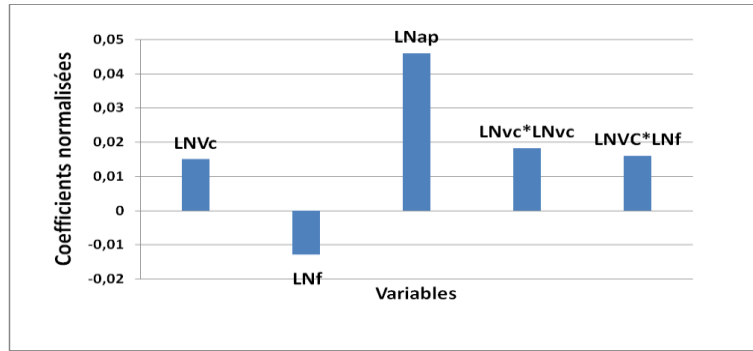
(a)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-13,9900	7,65998	-1,826	0,105
LN (Vc)	3,4975	1,56878	2,229	0,056
LN (f)	-8,5342	3,86544	-2,208	0,058
LN (ap)	0,2321	0,05223	4,444	0,002
LN (Vc)*LN (f)	1,9096	0,79167	2,412	0,042
R²=88,41%			R²_{ajustes}=79,99%	

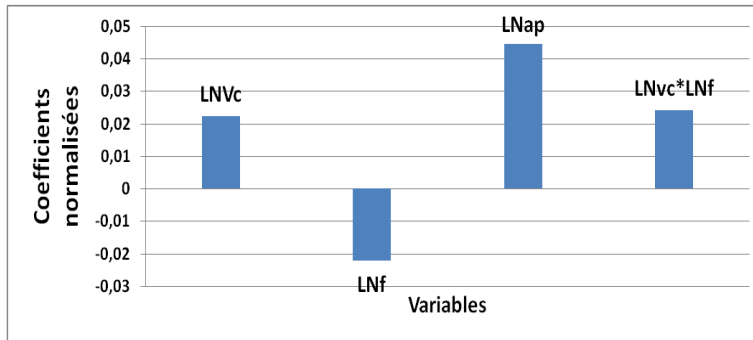
(b)

0,166Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-12,9756	8,38515	-1,547	0,166
LN (Vc)	3,1883	1,71733	1,857	0,106
LN (f)	-7,0326	4,23152	-1,662	0,140
LN (ap)	0,3849	0,08473	4,543	0,003
LN (ap)*LN (ap)	0,3126	0,18512	1,689	0,135
LN (Vc)*LN (f)	1,7153	0,86665	1,979	0,088
R²=93,83%			R²_{ajustes}=89,42%	

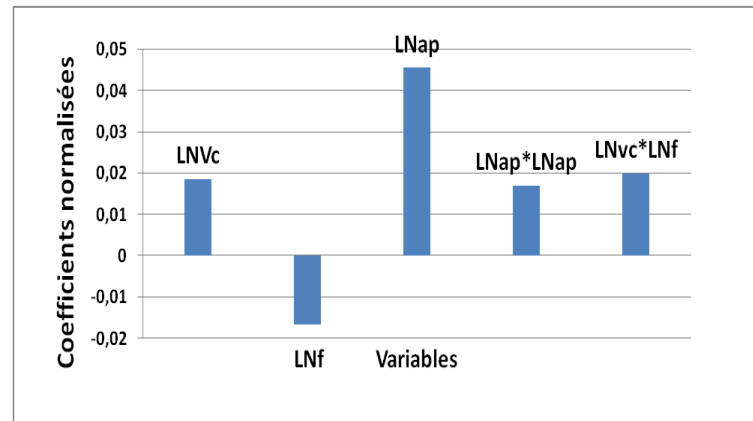
(c)



(a)



(b)



(c)

Figure IV.6 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles exponentiels réduits): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p) sur les critères de la rugosité (R_a , R_z et R_t) sont significatifs. En effet, les tableaux IV-9(a), IV-9(b) et IV-9(c) prouvent que les termes $\ln(a_p)$ et $\ln(V_c) * \ln(f)$ ont des effets significatifs sur la rugosité R_a , R_z et R_t .

D'après le tableau de test Student nous pouvons obtenir l'équation de régression qui exprime les critères de la rugosité pour ce modèle.

$$Ra = e^{-10,86} * vc^{2,75} * f^{-5,83} * ap^{0,4169} * ap^{\ln(ap^{0,36})} * vc^{\ln(f^{1,485})} \dots\dots\dots (IV.7)$$

$$Rz = e^{-13,99} * vc^{3,4975} * f^{-8,5342} * ap^{0,2321} * vc^{\ln f^{1,9096}} \dots\dots\dots (IV.8)$$

$$Rt = e^{-12,976} * vc^{3,1883} * f^{7,0326} * ap^{0,3849} * ap^{\ln ap^{0,3126}} * vc^{\ln f^{1,7153}} \dots\dots\dots (IV.9)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rz et Rt sont R²= 93,61 %, R² = 88,41 % et R² = 93,83 % respectivement. Ces valeurs indiquent que 93,61 %, 88,41 % et 93,83 % d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rz et Rt sont expliquées par les variables indépendantes, et que 6,39 %, 11,59%, et 6,17 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

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 IV-10.

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

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,90001	0,900014	0,300005	22,44	0,000
Linear	3	0,90001	0,900014	0,300005	22,44	0,000
Residual Error	9	0,12032	0,120319	0,013369		
Total	12	1,02033				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,373299	0,373299	0,124433	11,99	0,002
Linear	3	0,373299	0,373299	0,124433	11,99	0,002
Residual Error	9	0,093393	0,093393	0,010377		
Total	12	0,466692				

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,806628	0,806628	0,268876	21,60	0,000
Linear	3	0,806628	0,806628	0,268876	21,60	0,000
Residual Error	9	0,112021	0,112021	0,012447		
Total	12	0,918649				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : F = 22,44 (Ra), F = 11,99 (Rz) et F = 21,60 (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est 22,44 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexpliquée, 11,99 fois plus important pour Rz et 21,60 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-4, la probabilité (P>F) associée au test de Fisher (F) est de 0, 000 pour Ra, 0,002 pour Rz

et 0,000 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de < 0,1% (Ra), 0,2% (Rz) et de < 0,1% (Rt).

Tableaux IV-11: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,5773	0,88073	4,062	0,003
LN vc	-0,1993	0,16044	-1,242	0,246
LN f	1,4226	0,20125	7,069	0,000
LN ap	0,2946	0,07346	4,011	0,003
R²=88,21%			R²ajustes=84,28%	

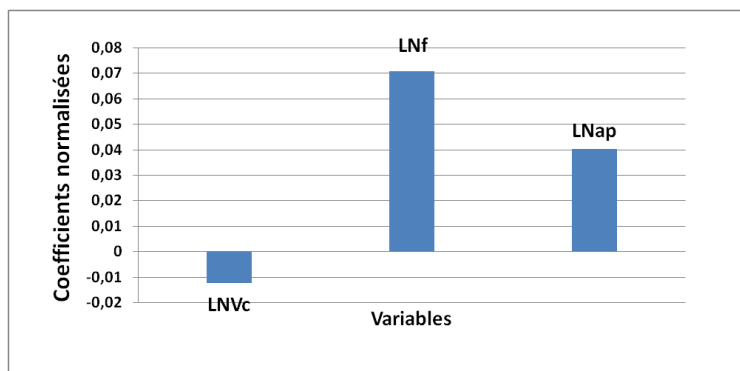
(a)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,4254	0,77595	5,703	0,000
LN vc	-0,2767	0,14135	-1,957	0,082
LN f	0,7835	0,17731	4,419	0,002
LN ap	0,2319	0,06472	3,584	0,006
R²=79,99%			R²ajustes=73,32%	

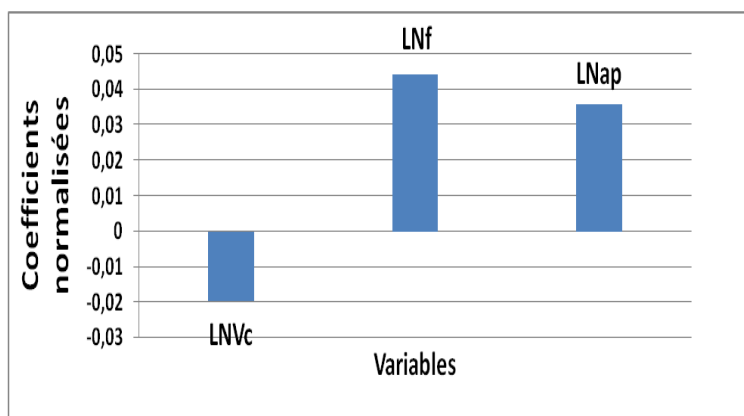
(b)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,6682	0,84982	4,316	0,002
LN vc	-0,2100	0,15481	-1,356	0,208
LN f	1,3416	0,19419	6,909	0,000
LN ap	0,2791	0,07088	3,938	0,003
R²=87,81%			R²ajustes=83,74%	

(c)



(a)



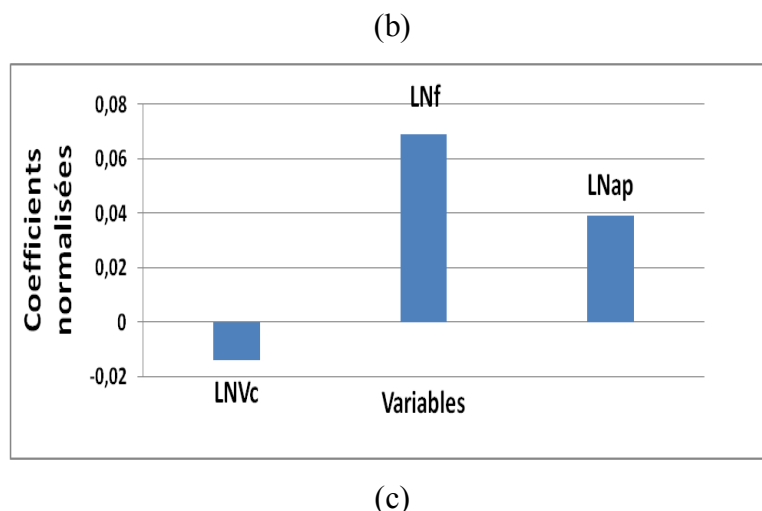


Figure IV.7 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles de Gilbert): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (Vc), avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) sur les critères de la rugosité (Ra, Rz et Rt) sont significatifs. En effet, les tableaux IV-11(a), IV-11(b) et IV-11(c) prouvent que les termes ln(f) et ln(ap) ont des effets significatifs sur la rugosité Ra, Rz et Rt.

D'après le tableau de test Student nous pouvons obtenir l'équation de régression qui exprime les critères de la rugosité pour ce modèle.

$$Ra = e^{3,577} * vc^{-0,199} * f^{1,432} * ap^{0,2946} \dots\dots\dots (IV.10)$$

$$Rz = e^{4,4254} * vc^{-0,2767} * f^{0,7835} * ap^{0,2319} \dots\dots\dots (IV.11)$$

$$Rt = e^{4,4254} * vc^{-0,2765} * f^{0,7835} * ap^{0,2319} \dots\dots\dots (IV.12)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rz et Rt sont R²= 88,21 %, R² = 79,99 % et R² = 87,81 % respectivement. Ces valeurs indiquent que 88,21 %, 79,99 % et 87,81 % d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rz et Rt sont expliquées par les variables indépendantes, et que 11,79 %, 20,01%, et 12,19 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

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

Tableau IV-12 : Tableau des résultats pour L9.

Essais	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
1	105	0,112	0,5	0,57	3,97	0,7
2	105	0,14	1	0,6	4,36	0,77
3	105	0,168	1,5	1,13	5,89	1,37

4	128	0,112	1	0,61	5,37	0,79
5	128	0,14	1,5	0,89	4,96	1,11
6	128	0,168	0,5	0,91	4,86	1,12
7	174	0,112	1,5	0,56	3,61	0,7
8	174	0,14	0,5	0,73	3,88	0,88
9	174	0,168	1	1,22	5,73	1,44

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 IV-13.

Tableaux IV-13 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles quadratiques réduits).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0,415239	0,415239	0,103810	5,08	0,072
Linear	3	0,414896	0,408437	0,136146	6,66	0,049
Square	1	0,000343	0,000343	0,000343	0,02	0,903
Residual Error	4	0,081717	0,081717	0,020429		
Total	8	0,496956				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	3,67051	3,67051	0,91763	1,99	0,261
Linear	3	2,87010	3,41639	1,13880	2,47	0,202
Interaction	1	0,80042	0,80042	0,80042	1,73	0,258
Residual Error	4	1,84549	1,84549	0,46137		
Total	8	5,51600				

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,595575	0,595575	0,119115	6,98	0,070
Linear	3	0,547114	0,083504	0,027835	1,63	0,349
Square	1	0,003086	0,003086	0,003086	0,18	0,699
Interaction	1	0,045375	0,045375	0,045375	2,66	0,202
Residual Error	3	0,051225	0,051225	0,017075		
Total	8	0,646800				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : F = 5,08 (Ra), F = 1,99 (Rz) et F = 6,98 (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est 5,08 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexpliquée, 1,99 fois plus important pour Rz et 6,98 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-13, la probabilité ($P > F$) associée au test de Fisher (F) est de 0,072 pour Ra, 0,261 pour Rz et 0,070 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 7,2 % (Ra), 26,1 % (Rz) et de < 7,0 % (Rt).

Tableaux IV-14: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,96010	1,89544	-0,507	0,639
Vc	0,00453	0,02751	0,165	0,877
F	9,04762	2,08397	4,342	0,012
Ap	0,12333	0,11670	1,057	0,350
Vc*Vc	-0,00001	0,00010	-0,130	0,903
R² = 83,56%			R²_{ajuste} = 67,11%	

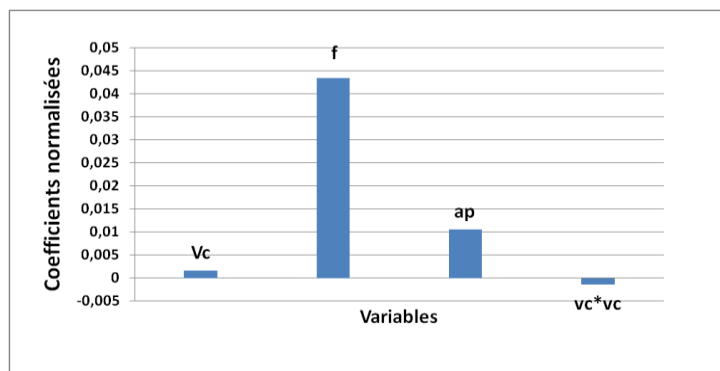
(a)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11,8073	7,6358	1,546	0,197
Vc	-0,0815	0,0577	-1,412	0,231
F	-51,9827	56,2969	-0,923	0,408
Ap	1,0453	0,6562	1,593	0,186
Vc*f	0,5380	0,4085	1,317	0,258
R² = 66,54%			R²_{ajuste} = 33,09%	

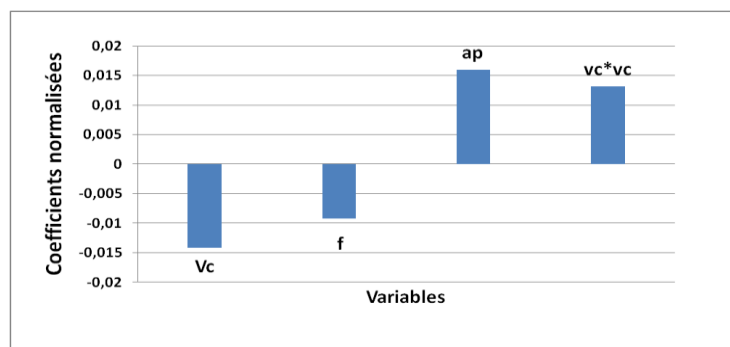
(b)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,87778	2,2436	0,391	0,722
Vc	-0,00652	0,0275	-0,237	0,828
F	-7,02252	10,8303	-0,648	0,563
Ap	0,27000	0,1262	2,139	0,122
Vc*Vc	-0,00004	0,0001	-0,425	0,699
Vc*f	0,12811	0,0786	1,630	0,202
R² = 92,08%			R²_{ajuste} = 78,88%	

(c)



(a)



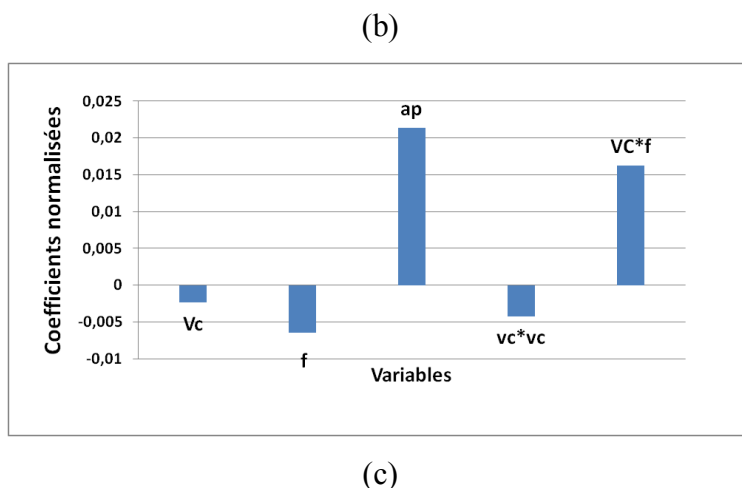


Figure IV.8 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles quadratiques réduits): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (Vc), avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) sur les critères de la rugosité (Ra, Rz et Rt) sont significatifs. En effet, le tableau IV-14(a) prouve que le terme f a des effets significatifs sur la rugosité Ra. Le tableau IV-14(b) montre que les termes ap, Vc et Vc*Vc ont des effets significatifs sur la rugosité Rz. Le tableau IV-14(c) prouve que les termes ap et Vc* f ont des effets significatifs sur la rugosité Rt.

D'après le tableau de test Student nous pouvons obtenir l'équation de régression qui exprime les critères de la rugosité pour ce modèle.

$$Ra = -0.9601 + 0.00453 * Vc + 9.04762 * f + 0.12333 * ap - 0.00001 * Vc * Vc \text{ (IV.13)}$$

$$Rz = 11,8 - 0,08 * Vc - 52 * f + 1 * ap + 0,53 * Vc * f \text{ (IV.14)}$$

$$Rt = 0,9 - 0,007 * Vc - 7 * f + 0,3 * ap - 0,00004 * VC * VC + 0,12 * Vc * f \text{ (IV.15)}$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rz et Rt sont $R^2 = 83,56 \%$, $R^2 = 66,54 \%$ et $R^2 = 92,08 \%$ respectivement. Ces valeurs indiquent que 83,56 %, 66,54 % et 92,08 % d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rz et Rt sont expliquées par les variables indépendantes, et que 16,44 %, 33,46%, et 7,92 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

b. 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 IV-15.

Tableaux IV-15 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles linéaires).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,414896	0,414896	0,138299	8,43	0,021
Linear	3	0,414896	0,414896	0,138299	8,43	0,021
Residual Error	5	0,082060	0,082060	0,016412		
Total	8	0,496956				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	2,87010	2,87010	0,95670	1,81	0,262
Linear	3	2,87010	2,87010	0,95670	1,81	0,262
Residual Error	5	2,64590	2,64590	0,52918		
Total	8	5,51600				

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,547114	0,547114	0,182371	9,15	0,018
Linear	3	0,547114	0,547114	0,182371	9,15	0,018
Residual Error	5	0,099686	0,099686	0,019937		
Total	8	0,646800				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : $F = 8,43$ (Ra), $F = 1,81$ (Rz) et $F = 9,15$ (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est 8,43 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexpliquée, 1,81 fois plus important pour Rz et 9,15 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-15, la probabilité ($P > F$) associée au test de Fisher (F) est de 0,021 pour Ra, 0,262 pour Rz et 0,018 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 2,1% (Ra), 26,2% (Rz) et de 1,8% (Rt).

Tableaux IV-16: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,71979	0,34919	-2,061	0,094
Vc	0,00097	0,00149	0,654	0,542
F	9,04762	1,86787	4,844	0,005
Ap	0,12333	0,10460	1,179	0,291
$R^2 = 83,49\%$			$R^2_{\text{ajusté}} = 73,58\%$	

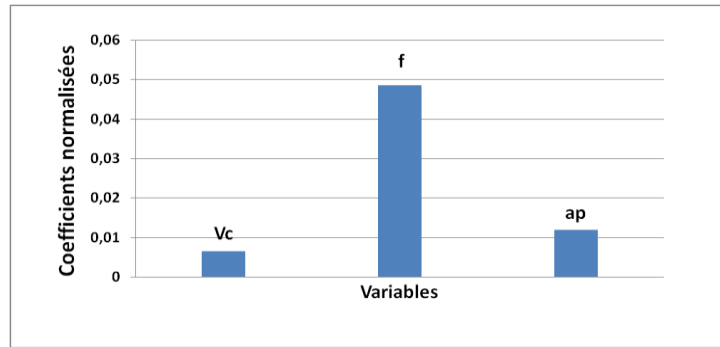
(a)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,0501	1,9828	1,034	0,349
Vc	-0,0062	0,0085	-0,731	0,498
F	21,0119	10,6064	1,981	0,104
Ap	0,5833	0,5940	0,982	0,371
$R^2 = 52,03\%$			$R^2_{\text{ajusté}} = 23,25\%$	

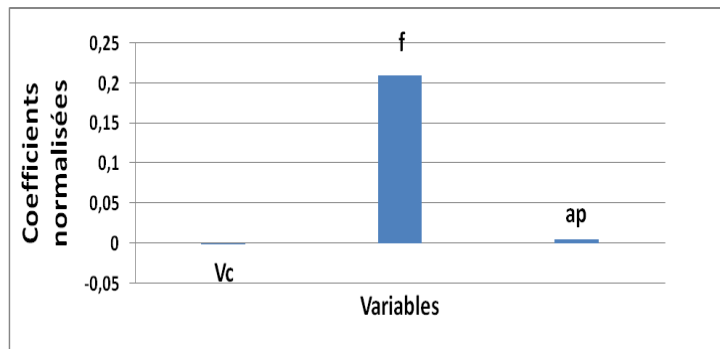
(b)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,7245	0,38487	-1,882	0,119
Vc	0,0007	0,00164	0,454	0,669
F	10,3571	2,05872	5,031	0,004
Ap	0,1600	0,11529	1,388	0,224
R² = 84,59%		R²_{ajusté} = 75,34%		

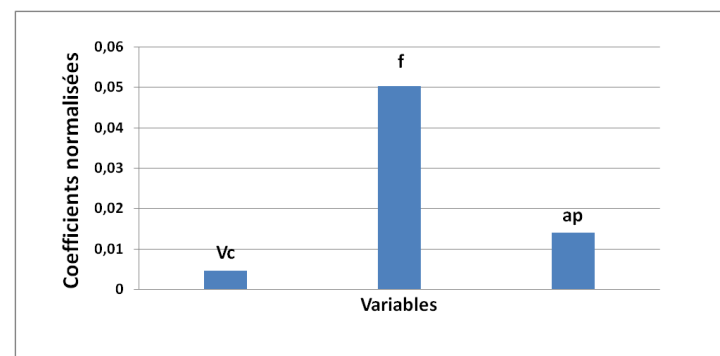
(c)



(a)



(b)



(c)

Figure IV.9 : Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles linéaires): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (Vc), avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) sur les critères de la rugosité (Ra, Rz et Rt)

sont significatifs. En effet, les tableaux IV-16(a), IV-16(b) et IV-16(c) prouvent que le terme f a des effets significatifs sur la rugosité Ra , Rz et Rt .

D’après le tableau de test Student nous pouvons obtenir l’équation de régression qui exprime les critères de la rugosité pour ce modèle.

$$Ra = -0.7198 + 0.001 * Vc + 9.05 * f + 0.12333 * ap \dots\dots\dots(IV.16)$$

$$Ra = -0.7198 + 0.001 * Vc + 9.05 * f + 0.12333 * ap \dots\dots\dots(IV.17)$$

$$Rt = -0,72 + 0,0007 * vc + 10,35 * f + 0,2 * ap \dots\dots\dots(IV.18)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra , Rz et Rt sont $R^2= 83,49 \%$, $R^2 = 52,03 \%$ et $R^2 = 84,59 \%$ respectivement. Ces valeurs indiquent que 83,49 %, 52,03 % et 84,59 % d’une simple variation des critères de la rugosité : Ra , Rz et Rt sont expliquées par les variables indépendantes, et que 16,51 %, 47,97%, et 15,41 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

c. Les courbes de surfaces de réponse

• Pour la rugosité Ra

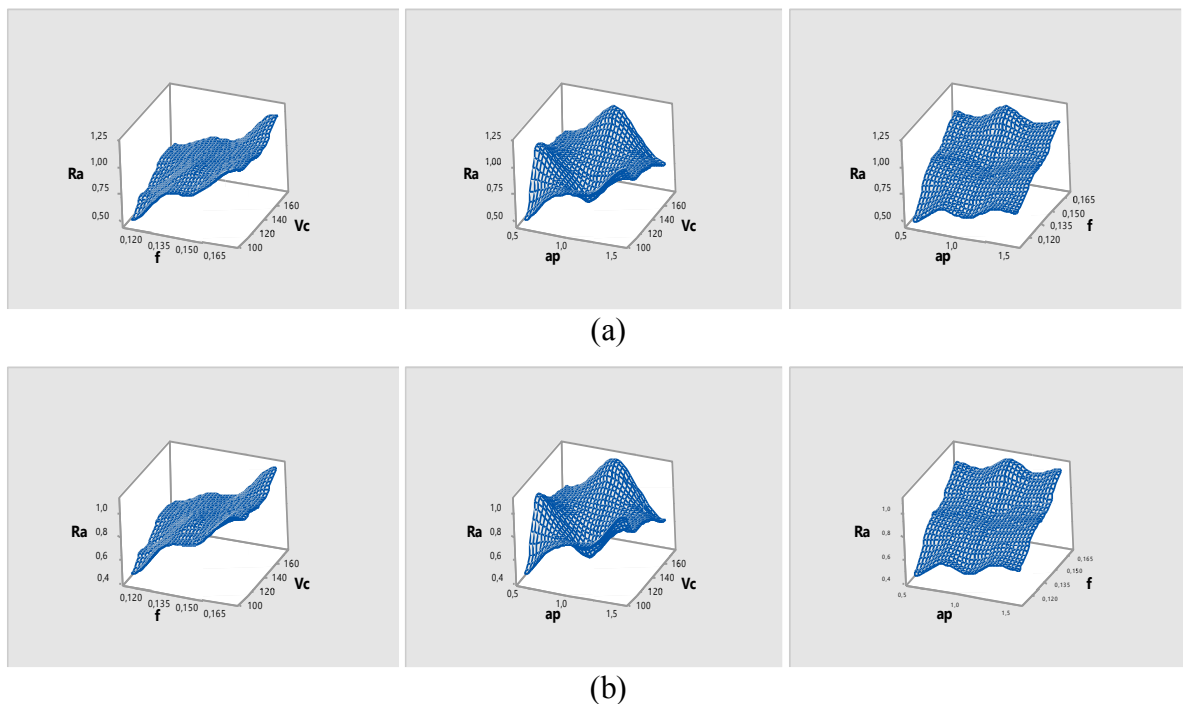
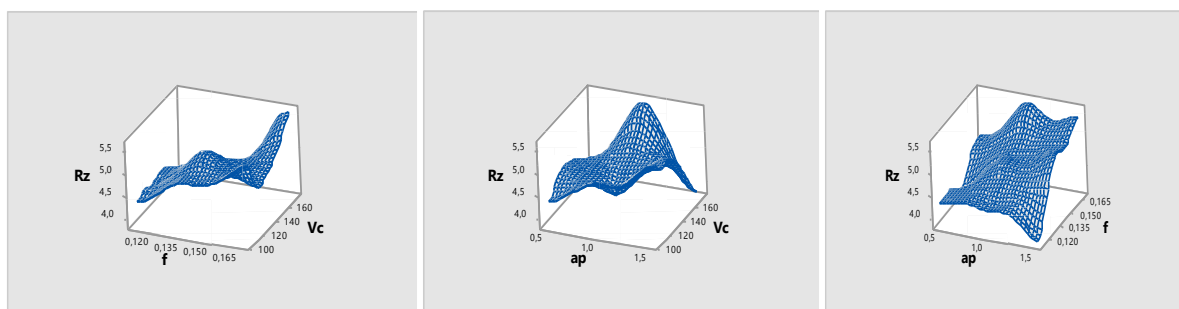
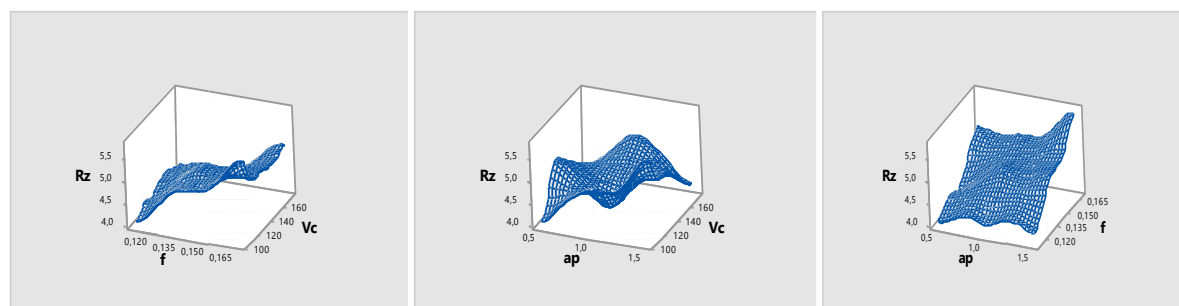


Figure IV.10 : Surface de réponse de la rugosité Ra : (a) MQR, (b) ML.

• Pour la rugosité Rz



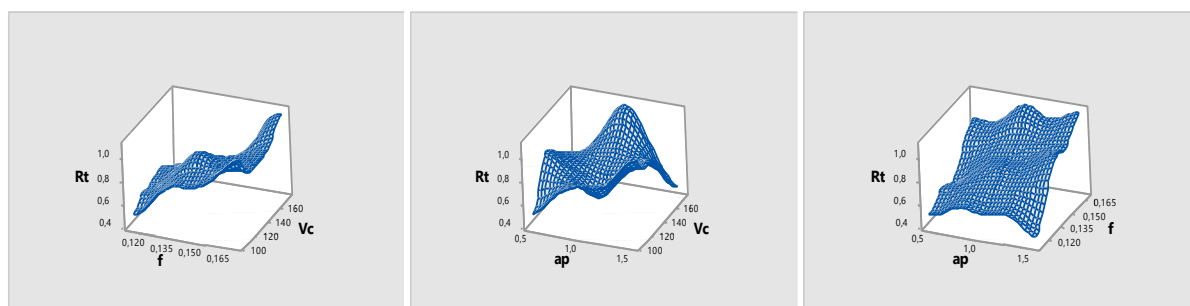
(a)



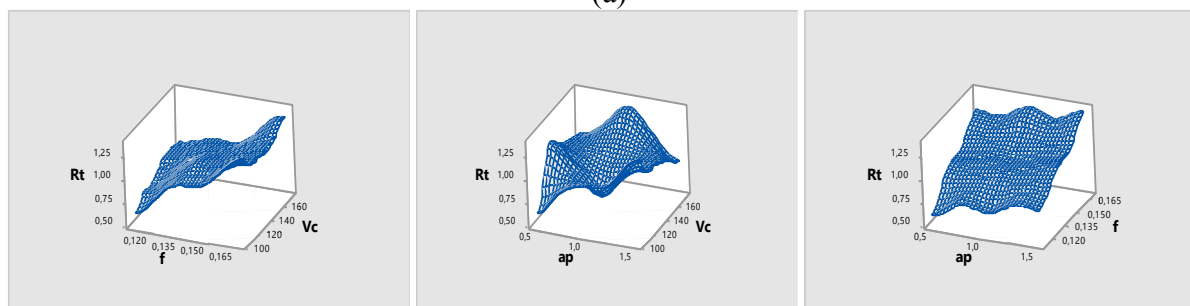
(b)

Figure IV.11 : Surface de réponse de la rugosité Rz : (a) MQR, (b) ML.

• Pour la rugosité Rt



(a)



(b)

Figure IV.12: Surface de réponse de la rugosité Rt : (a) MQR, (b) ML.

d. 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 IV-17.

Tableaux IV-17 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles exponentiels réduits).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,664141	0,664141	0,132828	7,26	0,067
Linear	3	0,600921	0,258290	0,086097	4,71	0,118
Square	1	0,001592	0,029524	0,029524	1,61	0,294
Interaction	1	0,061627	0,061627	0,061627	3,37	0,164
Residual Error	3	0,054876	0,054876	0,018292		
Total	8	0,719016				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0,165690	0,165690	0,041422	1,92	0,272
Linear	3	0,132144	0,060988	0,020329	0,94	0,500
Interaction	1	0,033546	0,033546	0,033546	1,55	0,281
Residual Error	4	0,086465	0,086465	0,021616		
Total	8	0,252155				

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,577222	0,577222	0,115444	6,71	0,074
Linear	3	0,531136	0,200576	0,066859	3,89	0,147
Square	1	0,000264	0,017719	0,017719	1,03	0,385
Interaction	1	0,045822	0,045822	0,045822	2,66	0,201
Residual Error	3	0,051613	0,051613	0,017204		
Total	8	0,628835				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : $F = 7,26$ (Ra), $F = 1,92$ (Rz) et $F = 6,71$ (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est 7,26 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexplicée, 1,92 fois plus important pour Rz et 6,71 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-17, la probabilité ($P > F$) associée au test de Fisher (F) est de 0,067 pour Ra, 0,272 pour Rz et 0,074 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 6,7% (Ra), 27,2% (Rz) et de 7,4% (Rt).

Tableaux IV-18: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-30,9637	17,9827	-1,722	0,184
LN VC	6,8788	3,6698	1,874	0,158
LNF	-15,0898	9,0497	-1,667	0,194
LN ap	0,4255	0,2132	1,996	0,140
LN ap*LN ap	0,5272	0,4150	1,270	0,294
LN VC*LNF	3,3965	1,8504	1,836	0,164
R² = 92,37%			R²_{ajusté} = 79,65%	

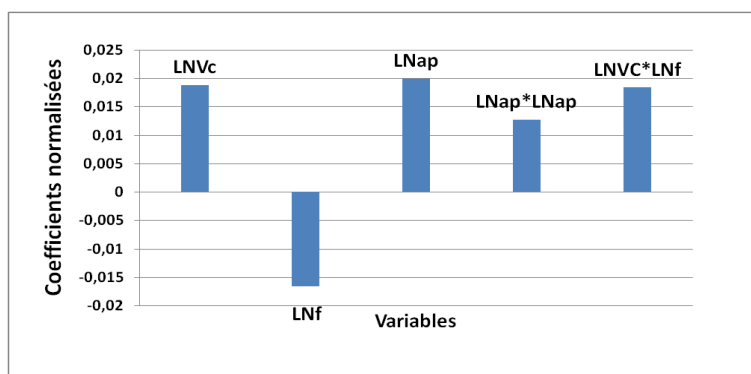
(a)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-16,4300	16,1888	-1,015	0,368
LN VC	3,9250	3,3108	1,186	0,301
LNF	-9,5543	8,1597	-1,171	0,307
LN ap	0,2055	0,1267	1,622	0,180
LN VC*LNF	2,0781	1,6681	1,246	0,281
R² = 65,71%			R²_{ajusté} = 31,42%	

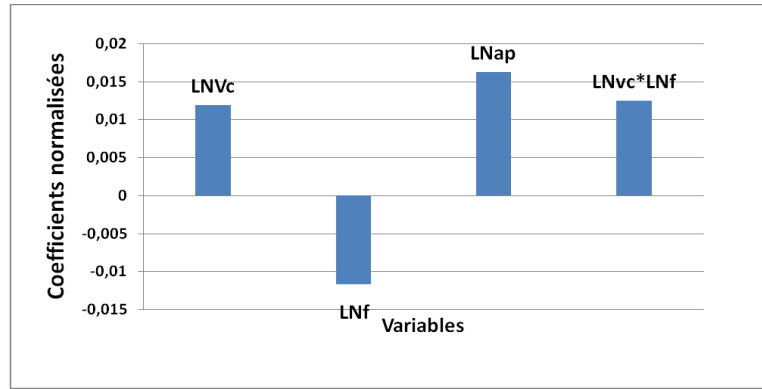
(b)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-26,1345	17,4399	-1,499	0,231
LN VC	5,8992	3,5590	1,658	0,196
LNF	-12,9009	8,7765	-1,470	0,238
LN ap	0,3813	0,2068	1,844	0,162
LN ap*LN ap	0,4084	0,4025	1,015	0,385
LN VC*LNF	2,9287	1,7946	1,632	0,201
R² = 91,79%			R²_{ajusté} = 78,11%	

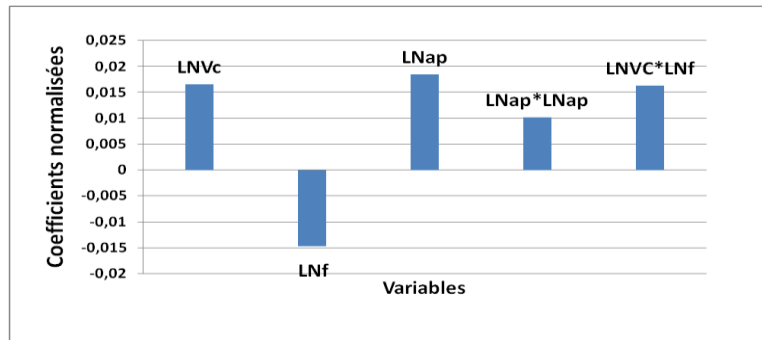
(c)



(a)



(b)



(c)

Figure IV.13: Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles exponentiels réduits): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (Vc), avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) sur les critères de la rugosité (Ra, Rz et Rt) sont significatifs. En effet, les tableaux IV-18(a), IV-18(b) et IV-18(c) prouvent que les termes ln(Vc), ln(ap) et ln(Vc)*ln(f) ont des effets significatifs sur la rugosité Ra, Rz et Rt.

D'après le tableau de test Student nous pouvons obtenir l'équation de régression qui exprime les critères de la rugosité pour ce modèle.

$$Ra = e^{-31} * vc^{6,9} * f^{-15,8} * ap^{0,4} * ap^{lnap^{0,52}} * vc^{lnf^{3,4}} \dots\dots\dots(IV.19)$$

$$Rz = e^{-16,43} * vc^{3,92} * f^{-9,55} * ap^{0,2} * vc^{lnf^{2,07}} \dots\dots\dots(IV.20)$$

$$Rt = e^{-26,1} * vc^{5,9} * f^{-12,9} * ap^{0,4} * ap^{lnap^{0,4}} * vc^{lnf^{2,9}} \dots\dots\dots(IV.21)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rz et Rt sont R²= 92,37 %, R² = 65,71% et R² = 91,79 % respectivement. Ces valeurs indiquent que 92,37 %, 65,71% et 91,79 % d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rz et Rt sont expliquées par les variables indépendantes, et que 7,63 %, 34,29%, et 8,21 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

e. 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 IV-19.

Tableaux IV-19 : Test de Fisher pour les critères de la rugosité :

(a) Ra, (b) Rz et (c) Rt (Modèles exponentiels réduits).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,600921	0,600921	0,200307	8,48	0,021
Linear	3	0,600921	0,600921	0,200307	8,48	0,021
Residual Error	5	0,118095	0,118095	0,023619		
Total	8	0,719016				

(a)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,132144	0,132144	0,044048	1,84	0,258
Linear	3	0,132144	0,132144	0,044048	1,84	0,258
Residual Error	5	0,120011	0,120011	0,024002		
Total	8	0,252155				

(b)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,531136	0,531136	0,177045	9,06	0,018
Linear	3	0,531136	0,531136	0,177045	9,06	0,018
Residual Error	5	0,097699	0,097699	0,019540		
Total	8	0,628835				

(c)

Le test de Fisher (F) est calculé pour les modèles et ses valeurs sont : F = 8,48 (Ra), F = 1,84 (Rz) et F = 9,06 (Rt). Cela signifie que la part de la variance de la rugosité Ra est 8,48 fois plus importante que la part de la variance qui reste inexpliquée, 1,84 fois plus important pour Rz et 9,06 fois plus important pour Rt. Comme indiqué dans les tableaux IV-17, la probabilité ($P > F$) associée au test de Fisher (F) est de 0,021 pour Ra, 0,258 pour Rz et 0,018 pour Rt. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 2,1% (Ra), 25,8% (Rz) et de 1,8% (Rt).

Tableaux IV-20: Tableaux du test de Student : (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,9896	1,3525	1,471	0,201
LN VC	0,1547	0,2465	0,628	0,558
LNF	1,5134	0,3090	4,898	0,004
LN ap	0,1160	0,1129	1,027	0,351
R² = 83,58%		R²_{ajusté} = 73,72%		

(a)

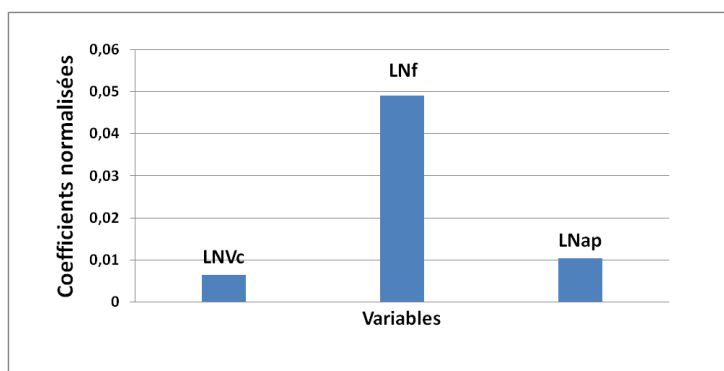
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,6726	1,3634	2,694	0,043
LN VC	-0,1890	0,2485	-0,760	0,481

LNF	0,6039	0,3115	1,939	0,110
LN ap	0,1230	0,1138	1,080	0,329
$R^2 = 52,41\%$			$R^2_{ajusté} = 23,85\%$	

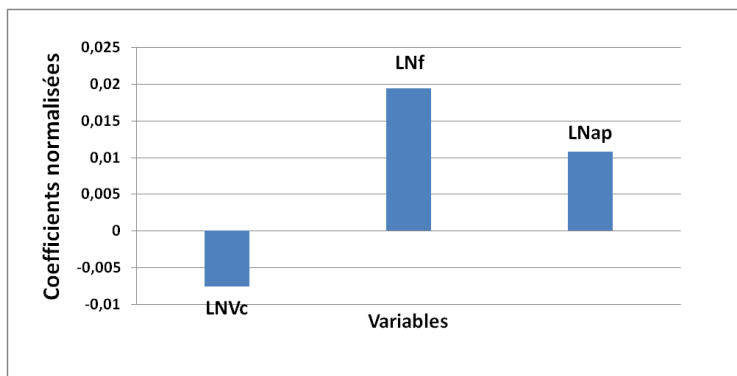
(b)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,2722	1,2302	1,847	0,124
LN VC	0,1011	0,2242	0,451	0,671
LNF	1,4158	0,2810	5,038	0,004
LN ap	0,1298	0,1027	1,263	0,262
$R^2 = 84,46\%$			$R^2_{ajusté} = 75,14\%$	

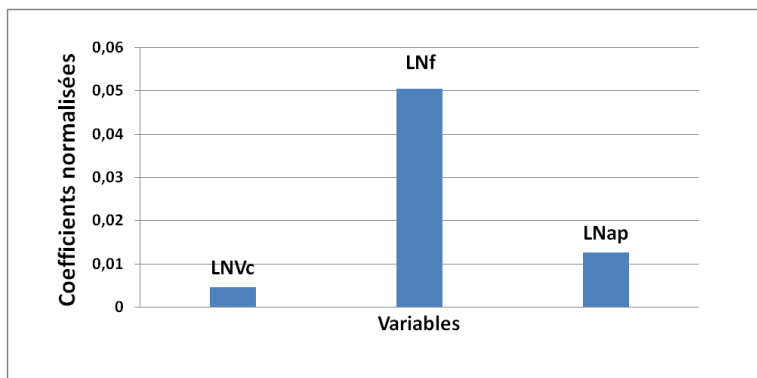
(c)



(a)



(b)



(c)

Figure IV.14: Coefficients normalisés des critères de la rugosité (Modèles de Gilbert): (a) Ra, (b) Rz et (c) Rt.

L'analyse ANOVA prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe (Vc), avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) sur les critères de la rugosité (Ra, Rz et Rt) sont significatifs. En effet, les tableaux IV-20(a), IV-20(b) et IV-20(c) prouvent que le terme ln(f) a des effets significatifs sur la rugosité Ra, Rz et Rt.

D'après le tableau de test Student nous pouvons obtenir l'équation de régression qui exprime les critères de la rugosité pour ce modèle.

$$Ra = e^2 * vc^{0,15} * f^{1,5} * ap^{0,11} \dots\dots\dots(IV.22)$$

$$Rz = e^{3,7} * Vc^{-0,2} * f^{0,6} * ap^{0,12} \dots\dots\dots(IV.23)$$

$$Rt = e^{2,3} * vc^{0,4} * f^{1,4} * ap^{0,12} \dots\dots\dots(IV.24)$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des critères de la rugosité: Ra, Rz et Rt sont R²= 83,58 %, R² = 52,41 % et R² = 84,46 % respectivement. Ces valeurs indiquent que 83,58 %, 52,41 % et 84,46 % d'une simple variation des critères de la rugosité : Ra, Rz et Rt sont expliquées par les variables indépendantes, et que 16,42 %, 47,59%, et 15,54 % respectivement restent par conséquent inexpliquées.

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

IV.3.1 Plan de Box-behnken

Le tableau IV-21 montre les valeurs de la température T1 pour les quatre modèles ainsi que le modèle expérimentale.

Table IV-21 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.
(a) :Ra, (b) :Rz et (c) :Rt.

Essais	Vc	F	Ap	Ra EXP	MQR	ML	MER	MG
1	128	0,112	0,5	0,54	0,43	0,47	0,51	0,49
2	174	0,14	0,5	0,67	0,66	0,66	0,66	0,64
3	128	0,168	0,5	0,82	0,87	0,91	0,89	0,88
4	105	0,14	0,5	0,73	0,74	0,71	0,72	0,70
5	105	0,112	1	0,60	0,67	0,63	0,63	0,63
6	174	0,112	1	0,46	0,58	0,58	0,49	0,57
7	174	0,168	1	1,07	1,02	1,02	1,03	1,01
8	105	0,168	1	1,10	1,11	1,07	0,98	1,12
9	128	0,112	1,5	0,72	0,72	0,76	0,72	0,68
10	174	0,14	1,5	1,02	0,94	0,95	0,93	0,88
11	128	0,168	1,5	1,09	1,16	1,20	1,26	1,21
12	105	0,14	1,5	1,07	1,03	0,99	1,01	0,97
13	128	0,14	1	0,76	0,79	0,84	0,78	0,83

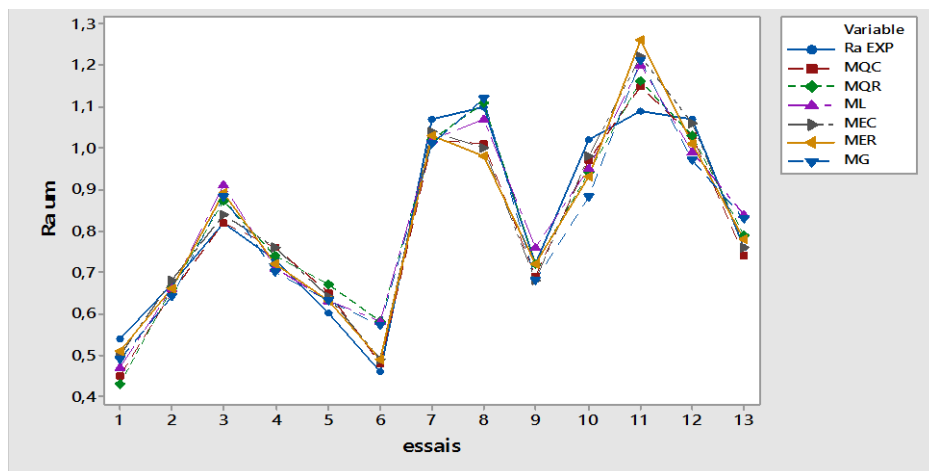
(a)

Essais	Vc	F	Ap	Exp Rz	MQR	ML	MER	MG
1	128	0,112	0,5	3,51	3,41	3,35	3,38	3,34
2	174	0,14	0,5	3,69	3,67	3,67	3,68	3,66
3	128	0,168	0,5	4,65	4,63	4,69	4,55	4,59
4	105	0,14	0,5	4,1	4,19	4,19	4,19	4,21
5	105	0,112	1	4,49	4,43	4,13	4,55	4,15
6	174	0,112	1	3,07	3,20	3,62	3,22	3,61
7	174	0,168	1	5,23	5,36	4,95	5,49	4,95
8	105	0,168	1	5,23	5,18	5,47	5,25	5,70
9	128	0,112	1,5	4,03	4,63	4,57	4,36	4,31
10	174	0,14	1,5	5,46	4,89	4,90	4,75	4,72
11	128	0,168	1,5	5,33	5,85	5,91	5,87	5,93
12	105	0,14	1,5	6,02	5,41	5,41	5,40	5,43
13	128	0,14	1	4,64	4,63	4,63	4,68	4,68

(b)

essais	Vc	F	ap	EXP Rt	MQR	ML	MER	MG
1	128	0,112	0,5	0,66	0,55	0,59	0,64	0,62
2	174	0,14	0,5	0,83	0,81	0,79	0,81	0,78
3	128	0,168	0,5	1	1,03	1,09	1,08	1,06
4	105	0,14	0,5	0,9	0,91	0,86	0,88	0,87
5	105	0,112	1	0,78	0,87	0,78	0,80	0,78
6	174	0,112	1	0,57	0,65	0,71	0,60	0,70
7	174	0,168	1	1,28	1,30	1,21	1,26	1,21
8	105	0,168	1	1,3	1,27	1,28	1,18	1,35
9	128	0,112	1,5	0,86	0,87	0,92	0,88	0,84
10	174	0,14	1,5	1,24	1,14	1,12	1,11	1,06
11	128	0,168	1,5	1,3	1,36	1,42	1,49	1,45
12	105	0,14	1,5	1,3	1,23	1,19	1,22	1,18
13	128	0,14	1	0,94	0,95	1,00	0,96	1,01

(c)



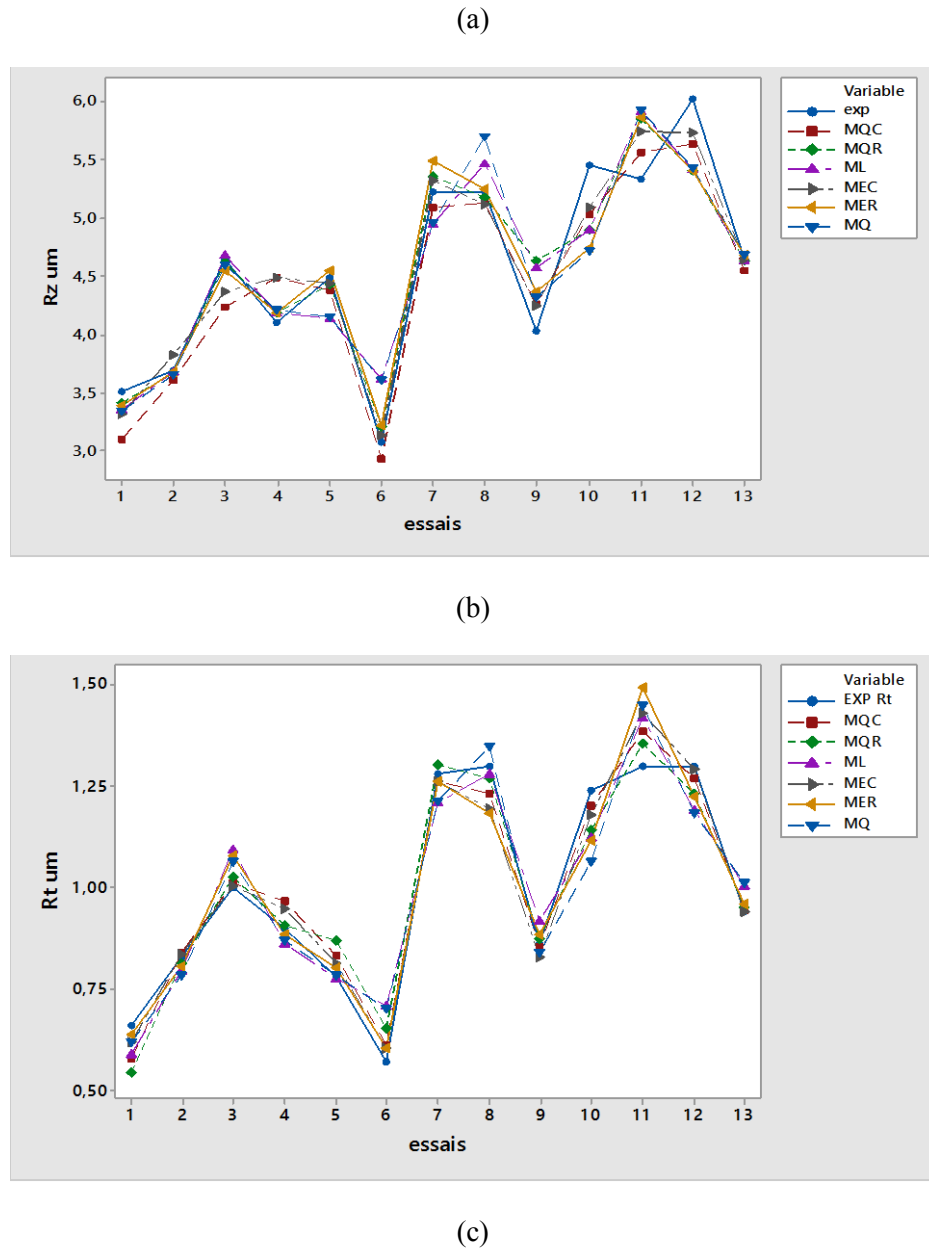


Figure IV.15 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.

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

IV.3.2 Plan de Taguchi

Le tableau IV-21 montre les valeurs de la température T1 pour les quatre modèles ainsi que le modèle expérimentale.

Tableau IV-22 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.

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

Vc	F	Ap	EXP	MCR	LM	MER	MG
105	0,11	0,50	0,57	0,48	0,46	0,61	0,52
105	0,14	1,00	0,60	0,80	0,78	0,73	0,78

105	0,17	1,50	1,13	1,11	1,09	1,07	1,07
128	0,11	1,00	0,61	0,59	0,55	0,56	0,57
128	0,14	1,50	0,89	0,91	0,86	0,98	0,84
128	0,17	0,50	0,91	1,04	0,99	0,96	0,98
174	0,11	1,50	0,56	0,72	0,65	0,61	0,63
174	0,14	0,50	0,73	0,85	0,78	0,80	0,78
174	0,17	1,00	1,22	1,17	1,10	1,28	1,10

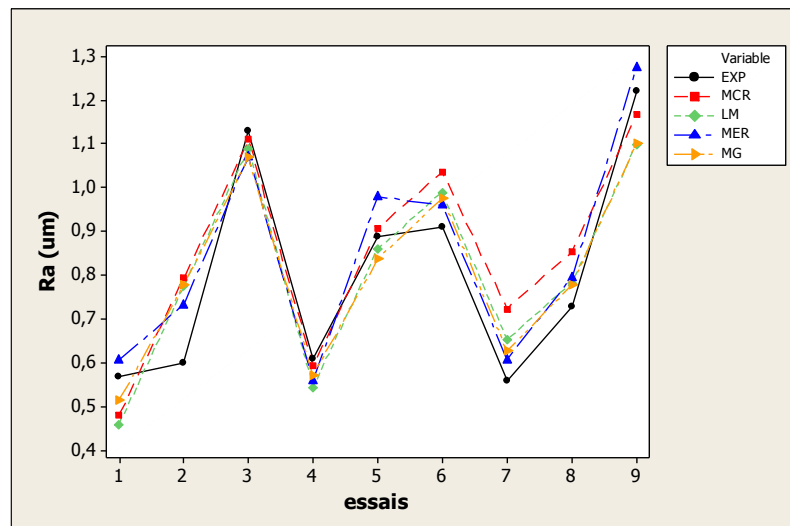
(a)

Vc	F	Ap	EXP	MCR	ML	MER	MG
105	0,11	0,50	3,97	4,31	4,05	4,44	3,95
105	0,14	1,00	4,36	4,91	4,94	5,20	4,90
105	0,17	1,50	5,89	5,51	5,83	5,73	5,74
128	0,11	1,00	5,37	4,33	4,21	4,5	4,12
128	0,14	1,50	4,96	5,28	5,10	5,48	4,95
128	0,17	0,50	4,86	4,72	5,08	4,81	4,84
174	0,11	1,50	3,61	3,88	4,22	4,06	4,07
174	0,14	0,50	3,88	4,01	4,21	4,20	4,08
174	0,17	1,00	5,73	5,64	5,10	5,92	4,94

(b)

Vc	F	Ap	EXP	MCR	ML	MER	MG
105	0,11	0,50	0,70	0,50	0,61	0,97	0,68
105	0,14	1,00	0,77	0,81	1,00	1,20	1,01
105	0,17	1,50	1,37	1,11	1,39	1,69	1,37
128	0,11	1,00	0,79	0,58	0,73	0,96	0,76
128	0,14	1,50	1,11	0,97	1,12	1,57	1,08
128	0,17	0,50	1,12	0,90	1,21	1,42	1,23
174	0,11	1,50	0,70	0,48	0,86	1,06	0,82
174	0,14	0,50	0,88	0,56	0,95	1,22	0,98
174	0,17	1,00	1,44	1,10	1,34	1,94	1,38

(c)



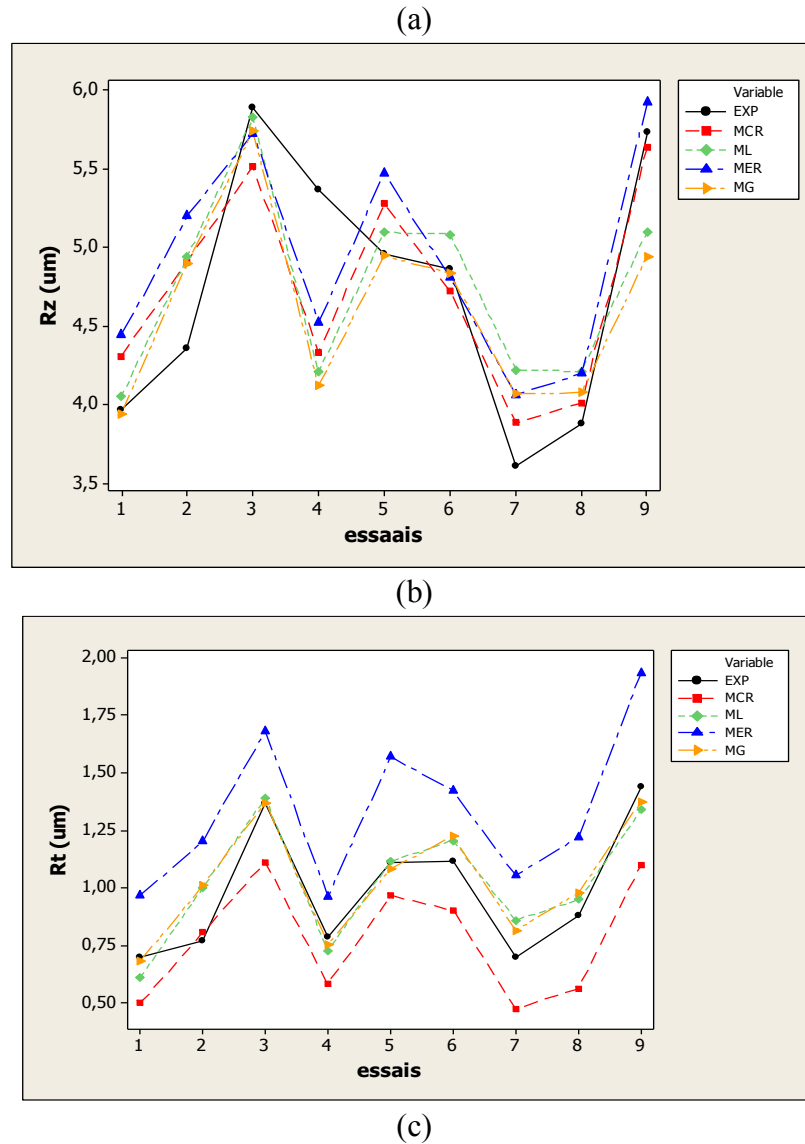


Figure IV.16 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.

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

IV.4 Optimisation par algorithme génétique

Les paramètres d'optimisation sont :

- **Type de vecteur** : Vecteur double ;
- **Taille de la population** : 2000 individus ;
- **Fraction de création** : Uniforme ;
- **Fonction de sélection** : Roulette ;
- **Nombre d'élitisme** : 2 ;
- **Mutation** : Gaussien ;
- **Fonction de croisement** : Heuristique

- **Probabilité** : 0,8 ;
- **Direction de la migration** : Vers l'avant ;
- **Fonction d'hybridation** : fminsearch ;
- **Critère d'arrêt** : 300 génération ;
- **Tolérance** : 1E-006 .

Les résultats d'optimisation sont :

Ra = 0,439 μm pour les paramètres de coupe : $V_c = 170 \text{ m/min}$, $f = 0,112 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,68 \text{ mm}$.

Rz = 2,743 μm pour les paramètres de coupe : $V_c = 173,89 \text{ m/min}$, $f = 0,112 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,5 \text{ mm}$.

Rt = 0,539 μm pour les paramètres de coupe : $V_c = 172,237 \text{ m/min}$, $f = 0,112 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,541 \text{ mm}$.

Conclusion

Nous avons analysés et modélisés les critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse pour deux plans d'expériences ; le plan de Box Behnken et le plan de Taguchi. La meilleure réponse sera optimisée par l'algorithme génétique.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons traité le problème d'optimisation des critères de la rugosité pour choisir les conditions de coupe optimums à l'aide des méthodes d'optimisation spécifique.

Dans ce travail nous avons analysé et modélisé les critères de la rugosité par la méthode de surface de réponse en utilisant le logiciel MINITAB et cela deux plans d'expériences différents le plan de Box et Behnken et le plan de Taguchi. Le meilleur modèle obtenu de ces deux plans sera optimisé par l'algorithme génétique.

Le résultat optimal de la rugosité moyenne arithmétique $R_a = 0,439 \mu\text{m}$ pour les paramètres de coupe : $V_c = 170 \text{ m/min}$, $f = 0,112 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,68 \text{ mm}$. Les paramètres de coupe qui influent plus sur la rugosité R_a sont : La profondeur de passe a_p et l'avance f .

Le résultat optimal de la rugosité maximale **du profil $R_z = 2,743 \mu\text{m}$** pour les paramètres de coupe : $V_c = 173,89 \text{ m/min}$, $f = 0,112 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,5 \text{ mm}$. Les paramètres de coupe qui influent plus sur la rugosité R_z sont : La profondeur de passe a_p et l'avance f .

Le résultat optimal de la rugosité totale de profil $R_t = 0,539 \mu\text{m}$ pour les paramètres de coupe : $V_c = 172,237 \text{ m/min}$, $f = 0,112 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,541 \text{ mm}$. Les paramètres de coupe qui influent plus sur la rugosité R_z sont : La profondeur de passe a_p et l'avance f .

Bibliographie

- [1] **A. Belloufi**, « Cours Procédés de Fabrication », Master Maintenance Industrielle, Université KasdiMerbah Ouargla.2010.
- [2]**S. Benlahmidi, H. Aouici**, Tournage, TP Production/ 2ème année GM&P, Ecole Nationale Supérieure de Technologie.
- [3] **Philippe DEPEYRE** (cour fabrication mécanique).Faculté des Sciences et Technologies. Université de la Réunion.2004/2005.
- [4]Livre Les solutions **SandvikCoromant** aux problématiques d'états de surface. Antoine SARAZIN .2010.
- [5] Atelier machines-outils livre le tournage I.S.B.A. - site Cobegge -.
- [6] **DEBBACHE Abdellatif BENGLIA, Mohammed Bakar**(Optimisation Multi-Passe des Régimes de Coupe En Chariotage), Mémoire Master, Université KasdiMerbah Ouargla (2010/2011).
- [7] **Romain Boulandet1, Hervé Lissek1**, Optimisation d'un absorbeur électroacoustique par plans d'expériences: approche expérimentale et numérique1 LÉMA, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015.13 avril 2010
- [8] **Wolbert, Dominique Merabet ,SmailBouzaza, Abdelkrim Bouhelassa, Mohamed**, Modélisation et optimisation de la photodégradation du 4-méthylphénol dans un réacteur à recirculation en présence d'UV/ZnO , Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) 2009
- [9] **Jacques GOUPY** , LES PLANS D'EXPERIENCES© Revue MODULAD, 2006
- [10]**LegrounAichouche**, La Détection de la lésion par la linéarisation d'un modèle non linéaire de l'image IRM Mémoire de master Université Mohamed KhiderBiskra , 06 Juin 2013
- [11] **Mr. Bou abdallâh Amara** ,Application des algorithmes génétiques Au dispatching économique et environnemental, de master Université Mohamed Khider Biskra en Réseaux électriques, Juin 2012
- [12] **Benyaza Mohamed Salah**, Répartition optimale des puissances dans un Réseau électrique par l'algorithme génétique, Mémoire Master académique universités kasdi Marbach Ouargla en Réseaux électriques, 31 /05/2016.

Bibliographie

[13] **jacques goupy** ,Modélisation par les plans d'expériences , Docteur ès sciences
Ingénieur-conseil Recherche Conseil et Formation, © Techniques de l'Ingénieur, traité
Mesures et Contrôle.

[14]**MaamerideyaeddineNecibabderrahmane**(optimisation des paramètres de coupe pour
minimiser la consommation d'Energie Pendant la Tournage), Université KasdiMerbah
Ouargla,(2014/2015) .

Résumé

L'une des tendances actuelles de la production mécanique est de chercher à obtenir une pièce de qualité requise avec un coût minimum dans des délais les plus courts possible. L'utilisation des techniques d'optimisation est d'un grand intérêt pour ce type de problème.

Le bon choix des paramètres de coupe sont un moyen efficace pour obtenir le cas de surface requise.

Le but de notre travail est de proposer une stratégie d'amélioration appropriée des processus de fabrication, en choisissant les paramètres de coupe appropriés pour obtenir l'état de surface requise pendant le tournage.

Mots clés : Optimisation, Paramètres de coupe, Rugosité, MSR, Algorithme Génétique.

Abstract

One of the current tendencies of mechanical production is to seek to obtain a piece of quality required with a minimum cost in the shortest possible time. The use of optimization techniques is of great interest for this type of problem.

The right choice of cutting parameters is an efficient way to get the required surface case.

The aim of our work is to propose a strategy for the appropriate improvement of the manufacturing processes, choosing the appropriate cutting parameters to obtain the surface condition required during the turning.

Keywords: Optimization, Cut parameters, Roughness, MSR, Genetic algorithm.

ملخص

من أحد الاتجاهات الحالية للإنتاج والبحث في مجال الصناعة الميكانيكية الحصول على منتجات اقتصادية وذات جودة عالية, إن استعمال تقنيات الأمثلة لها فعالية كبيرة في هذا المجال. الاختيار الصحيح لشروط القطع وسيلة فعالة للحصول على حالة السطح المطلوبة. الهدف من عملنا هو اقتراح استراتيجية الأمثلة المناسبة لعمليات التصنيع باختيار شروط القطع المناسبة للحصول على حالة السطح المثلى خلال عملية الخراطة. الكلمات المفتاحية: الأمثلة, شروط القطع, الخشونة, طريقة استجابة السطح, الخوارزمية الجينية.