

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

**Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique**



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Domaine : Science et technologie

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté par : Benachoura Abd Rouf

Brima Abdelkrim

Thème

**Étude et analyse de la micro-dureté après
l'usinabilité de l'acier AISI 1060 par
fraisage en utilisant la méthode de surface
de réponse**

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

BELLOUFI abderrahim	MCA	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Président
ABDELKRIM Mourad	MCA	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Rapporteur
BENTALEB fayçal	MCB	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Examineur

Année universitaires : 2018/2019

Remerciement

Avant tout, nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant de nous avoir illuminé et ouvert les voies du savoir, et pour nous avoir accordé la volonté et le courage pour élaborer ce travail.

*Au terme de ce modeste travail, Nous tenons à exprimer toute nos gratitude et reconnaissance à notre encadreur **Dr. M. Abdelkrim** d'avoir accepté de diriger ce travail et d'avoir mis à nos disposition tous les moyens qui nous permis de mener à terme cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons aussi à remercier **DR.A. BELLOUFI** pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.*

*Nos remerciements vont également au : **Dr. f. BENTALEB** pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'en faire partie du jury de soutenance.*

Mes remerciements s'adressent également à tous ce qui nous avons aidé faire aboutir ce travail.

*Enfin, à tous les étudiants de notre promotion et nous souhaitons le bon courage à tous les étudiants pour finir ces études, et à tous les enseignants de l'université **KASDI MERBAH OUARGLA**.*

Dédicace

Je tiens à dédier cette mémoire :

*À mon maître de passion, de patience et de persévérance . . . Mon père,
À ma source d'inspiration, de motivation et de bénédiction . . Ma mère,
en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien
permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices
illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour
mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour
tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.*

*À ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui
je dois de l'amour et de la reconnaissance :*

Mes sœurs et mes frères

Toute ma famille

Mes chers amis

À La mémoire de mes grands-pères et mes grands-mères

Table des matières

Introduction général	03
Chapitre I	
Généralités sur le fraisage	
I. Introduction.....	06
I.1 Le fraisage	06
I.1.1 Définition.....	06
I.1.2 Fraisage en opposition et en concordance.....	07
I.1.3 Fraisage en bout et fraisage en roulant	08
I.1.4 Fraiseuses	09
I.2 Les différents types des outils et leurs matériaux.....	10
I.2.1 Propriétés Matériaux des outils.....	10
I.3 Les conditions de coupe.....	11
I.3.1 La vitesse de coupe (V_c en m/min)	11
I.3.2 La vitesse d'avance V_f et avance par dent f_z	12
I.3.3 Le profondeur de passe.....	13
I.4 Les différents types d'opération.....	13
I.5 Usinage à sec.....	14
I.6 Usinage à grande vitesse.....	15
I.7 Phénomène d'usure des outils de coupe.....	15
I.7.1 Les phénomènes mécaniques.....	16
I.7.2 Les phénomènes (physic – chimique).....	17
I.8 Usure des outils de coupe	17
I.9 Les Phénomènes mis en jeu à l'influence outil/pièce	18
I.9.1 La Température de coupe	18
I.9.2 Méthodes de mesure de la température de coupe	18
I.9.3 Effets de la température de coupe élevée sur l'outil et la pièce	20
I.9.4 Formation de couche blanche	21
I.10 La Microstructure de la surface usinée.....	24
I.10.1 Etats de surface.....	24
I.11 Méthode et moyen de mesure de la micro-dureté des surfaces usinées	26
I.11.1 La Dureté.....	26
I.11.2 Mesures de dureté	26
I.11.3 La Micro-dureté.....	29
I.11.4 Control de dureté des surfaces usinées.....	29
I.12 L'acier AISI 1060	31
I.12.1 Composition chimique	31
I.12.2 Propriétés physiques	31
I.12.3 Propriétés mécaniques.....	32
I.12.4 Propriétés thermiques	32
I.12.5 La microstructure du AISI 1060	32

Conclusion.....	33
-----------------	----

Chapitre II

Optimisation des opérations d'usinage

I.1 Introduction.....	35
II.2 Historique (design expert)	35
II.3 Logiciel (Design Expert).....	35
II.4 La Méthode de la Surface de Réponse (MSR).....	36
II.5 Domaine d'application (MSR).....	37
II.6 Formulation de la fonction de réponse	37
II.6.1 plan de surface de réponse	38
II.6.2 Principe du plan d'expériences.....	40
II.6.3 Des modèles séquentiels de carrés.....	41
II.7 Analyse d'un design	41
II.8 Principe de l'optimisation par surface de réponse.....	43
II.9 Application de la méthode de surface de réponse	43
Conclusion	44

Chapitre III

Prédiction de la micro-dureté par la méthodologie de surface de réponse

III.1 Introduction	46
III.2 Procédure et donnée expérimentale	46
III.3 Système design expert.....	47
III.4 Résumé de la conception	47
III.5 Modèle utilisé	47
III.6 Analyse des variances.....	48
III.7 Normal des résidus.....	49
III.8 Les écarts types.....	50
III.9 Courbe 3D de l'influence des paramètres de coupe sur la micro-dureté.....	50
III.10 Équation de régression.....	53
III.11 Condition limite.....	53
III.12 Tests de confirmation.....	55
III.13 Conclusion.....	57
Conclusion générale	59
Référence bibliographique.....	61

Liste des Figures

Chapitre I

Généralité sur l'usinage

Figure I.1	Procédé de fraisage.....	6
Figure I.2	Fraisage en opposition	7
Figure I.3	Fraisage en concordance	7
Figure I.4	Fraisage en boutet frisage en roulant.....	8
Figure I.5	Machine de fraisage	9
Figure I.6	Fraise monobloc.....	9
Figure I.7	Fraise monobloc à plaquettes en carbure de tungstène	10
Figure I.8	Fraise a plaquettes interchangeables.....	10
Figure I.9	Fraise a porte-outils à profiler	10
Figure I.10	Visualisation de la vitesse de coupe	11
Figure I.11	Vitesse d'avance	12
Figure I.12	Profondeur de passe	13
Figure I.13	Usinage a sec	15
Figure I.14	Usinage a grand vitesse	15
Figure I.15	Diagramme d'usure en usinage.....	16
Figure I.16	Usure en dépouille	17
Figure I.17	Usure en cratère	18
Figure I.18	Mesure de la température par thermocouples.....	19
Figure I.19	Pyromètre à infrarouge.....	20
Figure I.20	Couches blanches observées sur le copeau.....	21
Figure I.21	Micrographies des copeaux observées au MEB.....	22
Figure I.22	Analyse de la couche blanche.....	23
Figure I.23	Variation typique de profondeur de la couche blanche avec Vc.....	23
Figure I.24	Micro-géométrie de surface pour diverses vitesses de coupe.....	25
Figure I.25	Principe de la dureté Vickers.....	27
Figure I.26	Principe de la dureté Brinell.....	28
Figure I.27	Principe de la dureté Rockwell.....	29
Figure I.28	Duromètre portable digital à base magnétique.....	30
Figure I.29	Duromètre VICKERS SHIMADZU	31
Figure I.30	Microstructure ferrite-perlitique observée par microscope optique.....	33
Figure I.31	Exemple d'un Changement microstructural de la surface usinée l'acier	33

100Cr6.....

Chapitre II

Optimisation des opérations d'usinage

Figure II.1	L'inter face du logiciel de conception d'expériences Design of Experiments.	36
Figure II.2	Surface de réponse avec courbure.....	38
Figure II.3	Surface de réponse sans courbure.....	38
Figure II.4	Un schéma de conception composite centrale pour une expérience à deux facteurs.....	39
Figure II.5	Un schéma des points d'essai dans une conception Box-Behnken à trois facteurs.....	40

Chapitre III

Prédiction de la micro-dureté par la méthodologie de surface de réponse

Figure III.1	Les entrées et les sorties du système.....	47
Figure III.2	Tracé normal des résidus.....	49
Figure III.3	Résidus vs numéro.....	50
Figure III.4	Représentation 3D de la micro-dureté en fonction de V_c et f_z	51
Figure III.5	Représentation 3D de la micro-dureté en fonction de V_c et a_p	51
Figure III.6	Représentation 3D de la micro-dureté en fonction de f_z et a_p	52
Figure III.7	Cube des valeurs de la micro-dureté en fonction de V_c , f et a_p	52
Figure III.8	Cube de valeurs de la désirabilité de la rugosité en fonction de V_c , f_z et a_p	53
Figure III.9	Graphique de fonction de rampe pour les composants de la micro-dureté...	54
Figure III.10	Graphique en barre 3D de désirabilité.....	54
Figure III.11	Courbe de comparaison entre les valeurs prédictives et les valeurs mesurées pour la micro-dureté de surface.....	56
Figure III.12	Histogramme de comparaison entre les valeurs prédictives et les valeurs mesurées pour la micro-dureté de surface en 3D.....	57

Liste des tableaux

Chapitre I

Généralité sur l'usinage

Tableau I.1	Les différents types d'opération	13
Tableau I.2	Composition chimique acier AISI1060	31
Tableau I.3	Propriétés physiques acier AISI 1060	32
Tableau I.4	Propriétés mécaniques acier AISI 1060	32
Tableau I.5	Propriétés thermiques acier AISI 1060	32

Chapitre III

Prédiction de la micro-dureté par la méthodologie de surface de réponse

Tableau III.1	Données expérimentales.....	46
Tableau III.2	Résumé	47
Tableau III.3	Statistiques sommaires du modèle.....	48
Tableau III.4	Analyse de variance pour la micro-dureté.....	49
Tableau III.5	Contraintes pour l'optimisation des paramètres d'usinage.....	54
Tableau III.6	Solution trouvées.....	55
Tableau III.7	Comparaison des résultats expérimentaux et prévisionnels avec le Pourcentage d'erreur.....	56

Nomenclature

<u>Symbole</u>	<u>Unité</u>	<u>Désignation</u>
V_c	$m / \min$	vitesse de coupe
f_z	$mm / dent$	Avance par dent
N	$tr / \min$	vitesse de rotation
D	mm	Diamètre
Z	$dents$	Nombre de dent de l'outil
V_f	$mm / \min$	vitesse d'avance
a_p	mm	Profondeur de passe
M_c	$m / \min$	Mouvement de coupe
M_f	$mm / \min$	Mouvement d'avance
M_p	mm	Mouvement de pénétration
n	$tr / \min$	vitesse de broche
CBN		Nitride de bore à structure cubique
H_v	H_v	Dureté vikers
H_B	HBR	Dureté Brinell
H_R	HRc	Dureté Rokwell
F	N	Force appliquée
g	m/s^2	Accélération terrestre
MSR		Méthode de Surface de Réponse
R_a	μm	Rugosité moyenne arithmétique
R_z	μm	Profondeur moyenne de la rugosité
$Press$		Erreur résiduelle prédite
Exp		Valeurs Expérimentaux
$Préd$		Valeur prédictif
e_i	$\%$	Erreur

Introduction générale

Introduction Générale

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.[1]

Une machine-outil est une machine, généralement non portable en travail, actionnée par une source d'énergie et destinée à façonner des produits à l'aide de procédés physiques, chimiques ou autres. Le façonnage, qui porte sur des matériaux à l'état solide (métal, bois, verre, plastiques...), peut s'effectuer aussi bien avec ou sans enlèvement qu'avec ou sans apport de matière ou de produit [3]

Parmi les procédés d'usinage on peut citer : le tournage, le fraisage, le perçage,.....

Le fraisage est l'opération d'usinage la plus réalisable pour produire des rainures et avec une surface bien définie et de haute qualité [2]

La compréhension des mécanismes thermomécaniques mis en jeu lors de la formation du copeau est très complexe. En effet, la zone de coupe est difficilement observable car, elle est très localisée et généralement difficile d'accès. La chaleur générée pendant l'usinage, son évacuation et ses conséquences sur la durée de vie des outils sont des problèmes encore plus importants. Elle n'est plus évacuée par les fluides de coupe, et les températures atteintes dans l'outil pendant l'usinage ont beaucoup augmenté. [4] Cette augmentation de la température de coupe a des effets sur les outils de coupe, problème de l'usure prématurée de l'outil et sur les caractéristiques métallurgiques des alliages usinés, problème de changements de la structure au niveau de la couche superficielle des alliages usinés.

Le but des industriels aujourd'hui est d'abaisser au maximum les coûts des opérations d'usinage grâce à l'introduction de nouveaux matériaux de coupe. De ce fait, la modélisation et l'optimisation des conditions opératoires des outils coupe doit contribuer largement au développement et à la productivité.[5]

Les méthodes numériques permettent une très bonne compréhension des phénomènes liés à la coupe. Afin de mieux comprendre et de visualiser les phénomènes de coupe, de nombreux modèles numériques ont été développés grâce à l'évolution rapide de l'informatique [4]

Dans la présente étude, l'effet des paramètres de coupe sur la micro-dureté durant l'usinabilité de l'acier AISI 1060 par fraisage a été étudié à par la méthode de surface de réponse MSR en utilisant logiciel Design-Expert.

Une étude de l'application de la méthode d'optimisation (surface de réponse), pour prédire la micro-dureté de surface pendant les opérations de fraisage de l'acier AISI 1060 en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe, la vitesse d'avance, profondeur de passe).a été présenté dans le dernier chapitre

En conclusion de ce travail nous dressons une comparaison entre les résultats obtenus par deux approches expérimentale et numérique.

Chapitre I

Généralité sur le fraisage

Introduction

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièce par enlèvement de copeaux, le principe de l'usinage par enlèvement de matière est de donner à la pièce brute la forme et les dimensions requises à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. L'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance) [6].

D'une manière générale, les formes des surfaces usinées peuvent être planes ou de révolution. Les principaux usinages sont le fraisage (surface planes) et le tournage (surfaces de révolution) [6].

Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur l'usinage, en représentant quelques détails liés à l'opération de fraisage ainsi que les phénomènes liés à ce procédé tel que l'usure des outils, la température de coupe, la micro dureté des surfaces usinées...

I.1 Le fraisage

I.1.1 Définition

Le fraisage est, dans son principe, un procédé de fabrication mécanique par coupe (l'enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). Aujourd'hui, toute fois, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction [7,8].

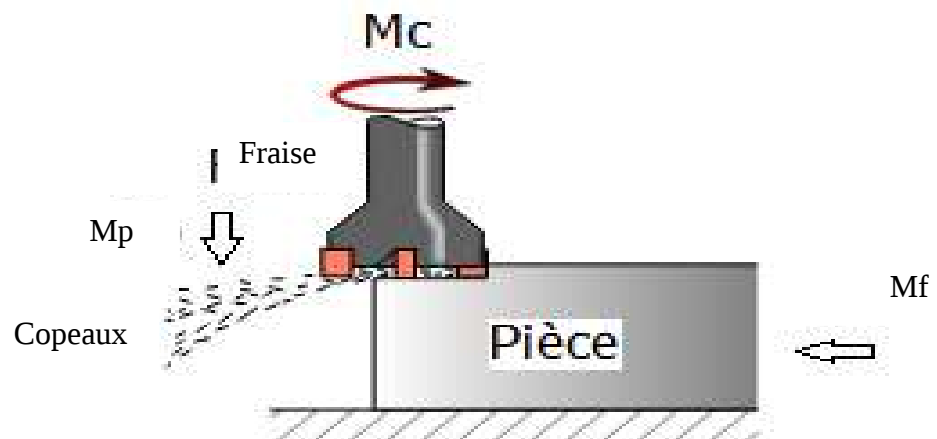


Figure I.1 Procédé de fraisage [9].

I.1.2 Fraisage en opposition et en concordance

a) Fraisage en opposition

L'avance de la dent est opposée à l'avance de la pièce

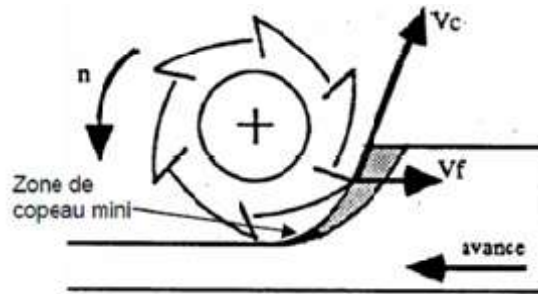


Figure I.2 Fraisages en opposition [10].

- L'attaque de la dent se fait avec une épaisseur nulle, ce qui peut entraîner un refus de coupe (copeau mini) sur la surface à générer.
- Ce frottement entraîne une usure supplémentaire.
- L'attaque se fait sur une surface écrouie par la dent précédente.
- Les efforts de coupe sont importants (refus de coupe).
- Les efforts de coupe tendent à faire sortir la pièce de la mise en position (efforts vers le haut).
- Seul ce mode de travail peut être utilisé sur les fraiseuses ayant des vis sans rattrapage de jeux [7].

b) Fraisage en concordance

L'avance de la dent de même sens que l'avance de la pièce

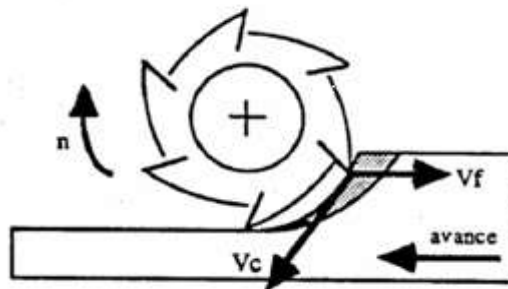


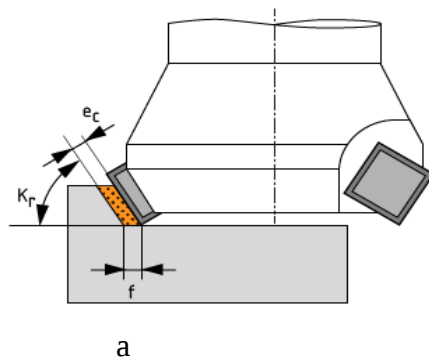
Figure I.3 Fraisages en concordance [7].

- L'attaque de la dent se fait avec l'épaisseur maximale (pas de copeau mini).
- La sortie de la dent se fait sur la surface à générer avec une épaisseur nulle mais le copeau est déjà créé ce qui facilite la coupe.
- Les dents attaquent sur l'épaisseur maxi ce qui génère des chocs, il est intéressant d'avoir plusieurs dents en prise pour limiter les chocs.
- Si on attaque sur une surface brute de fonderie on a une usure rapide [7].

I.1.3 Fraisage en bout et fraisage en roulant

Fraisage en bout

- La surface plane est obtenue par l'enveloppée la trajectoire de la pointe d'outil.
- Si l'axe de rotation n'est pas perpendiculaire à la surface on usine une surface concave.
- Croisées, le copeau ayant une épaisseur sensiblement constante si largeur fraisée $< 0.7 \times \text{diamètre de la fraise}$.
- On préférera toujours le fraisage en bout [12,13].



Fraisage en roulant

- La surface plane est obtenue par le profil de la fraise qui se déplace et génère un plan (travail de forme).
- Le copeau varie de 0 à l'avance / dent ce qui crée des vibrations.
- La surface est composée d'ondulations. Un défaut sur l'arrête coupante est reporté sur la surface [12,13].

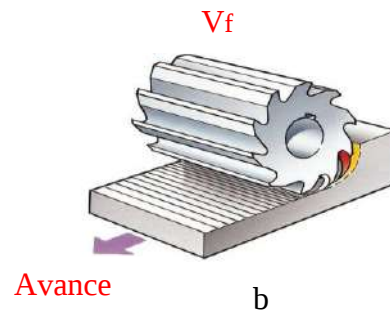


Figure I.4 Fraisage en bout(a)et fraisage en roulant(b)[14].

I.1.4 Fraiseuses

Les fraiseuses ont supplanté certaines machines (raboteuses, étaux limeurs) pour l'usinage de surfaces planes. Ces machines peuvent également servir pour des opérations de contournage. L'outil, une fraise, est fixé dans la broche et est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe). Il peut se déplacer en translation par rapport à la pièce suivant trois directions [13].

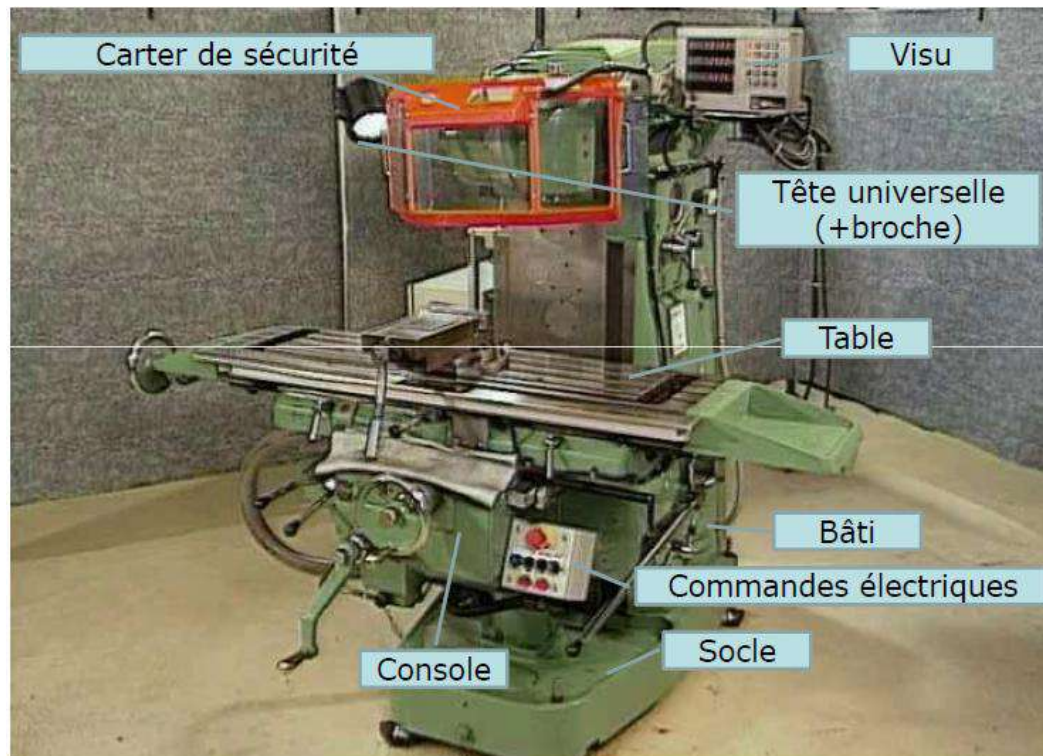


Figure I.5 Machine de fraisage [15].

I.2 Les différents types des outils et leurs matériaux

Les outils permettent d'enlever le copeau. la géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables sur la pièce [16].

a) fraise monobloc

En acier rapide



Figure I.6: Fraise monobloc [16].

b) fraises monobloc à pastilles rapportées

-Plaquettes en carbure de tungstène



Figure I.7: Fraise monobloc à plaquettes en carbure de tungstène [16].

c) fraise à plaquettes interchangeables réversibles non affutables

-Avec ou sans araser



Figure I.8: Fraise à plaquettes interchangeables [16].

D) porte-outils à profiler

- Les coupeurs sont positionnés et maintenus en toute sécurité sur le corps profilé:
- Rémoisseurs (limiteurs d'avance)



Figure I.9: Fraise à porte-outils à profiler [16].

I.2.1 Propriétés Matériaux des outils

La partie active des outils de coupe et donc les matériaux servant à leur constitution doivent posséder certaines propriétés:

- une bonne résistance mécanique au frottement - résistance à l'usure.

- une bonne résistance aux chocs - ténacité.
- une bonne résistance à la pénétration - dureté.
- une bonne résistance à la chaleur - garder ces propriétés à haute température (par exemple dureté à chaud).
- une bonne résistance à la pression.
- une grande stabilité chimique vis-à-vis du matériau usiné et de l'atmosphère environnante (air, liquide de coupe, etc.).
- une faible adhésion avec le matériau usiné sous haute pression et haute température [8].

I.3 Les conditions de coupe

Les paramètres de coupe sont : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Ces paramètres fondamentaux ont une influence significative sur les mécanismes de dégradation des outils de coupe [7].

Avant de réaliser une opération de fraisage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...). Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment [7] :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...)
- La puissance de la machine
- La matière de l'outil (ARS, carbure...)
- La matière usinée (acier, aluminium...) [7].

I.3.1 La vitesse de coupe (V_c en m/min)

C'est la vitesse relative de la pièce par rapport à la pointe d'une dent. C'est un important paramètre de l'outil, qu'elle représentée par un vecteur tangent à l'élément en rotation., elle dépend de (l'outil, la pièce , couple outil-pièce et la machine) [17].

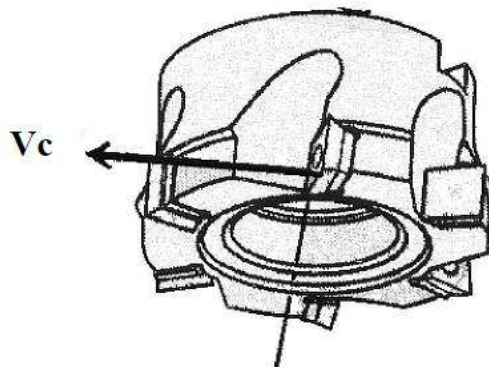


Figure I.10 : Visualisation de la vitesse de coupe [17].

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

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

Avec

D : Diamètre de l'outil de fraisage (mm).

N : Vitesse de broche (tr/min).

V_c : Vitesse de coupe (m/min).

I.3.2 La vitesse d'avance V_f et avance par dent f_z

L'outil de fraisage est un outil avec plusieurs arêtes de coupe. On parlera d'avance par tour et par dent.. Cela représente la distance par courue sur la pièce par une dent après une rotation d'un tour de l'outil.

La vitesse d'avance correspond à la vitesse de déplacement de la pièce par rapport à l'outil pour le déplacement des axes X, Y et Z. [17].

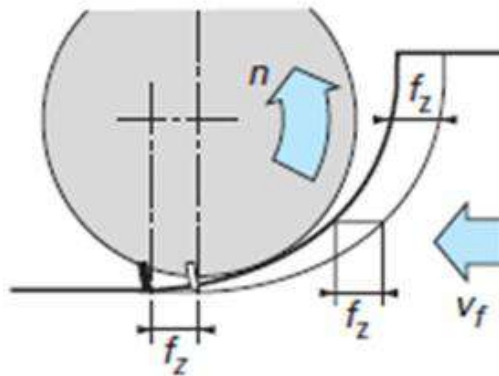


Figure I.11 : Vitesse d'avance [7].

Dans le cas de fraisage la vitesse d'avance V_f [mm / min] est donnée par la formule suivante :

$$V_f = f_z * n_z \quad (I.3)$$

$$f_z = \frac{V_f}{n_z} \quad (I.4)$$

Avec

V_f : Vitesse d'avance en mm/min.

f_z : Avance par dent en mm/dent.

n : Fréquence de rotation en tours par minute (tr/min).

Z : Nombre de dents de l'outil.

I.3.3 Le profondeur de passe

Il est en fonction du type d'opération réalisée et du type de denture (Ravageuse ou Lisse). Les dentures ravageuses limitent les efforts de coupes. Elles permettent de prendre des profondeurs de passe et des avances plus importantes [18].

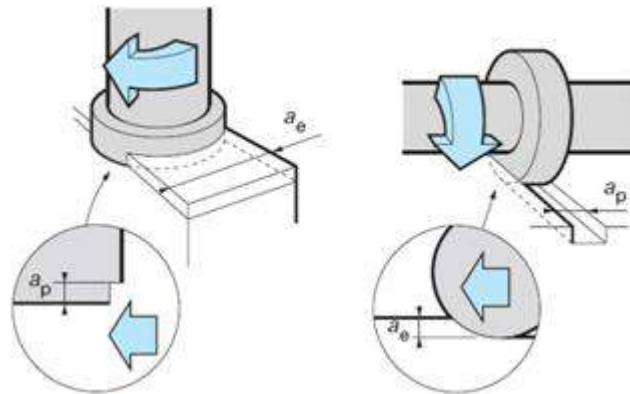


Figure I.12 : Profondeur de passe [7].

I.4 Les différents types d'opération :

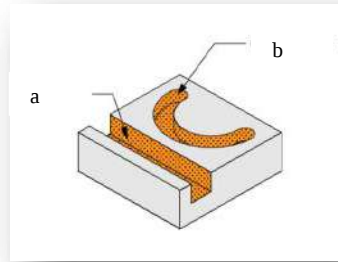
On peut situer plusieurs opérations :

Tableau I.1 : Les différents types d'opération [19].

Opération	Dessin
Surfaçage Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise. (flèche rouge)	
Plans épaulés C'est l'association de 2 plans perpendiculaires.	

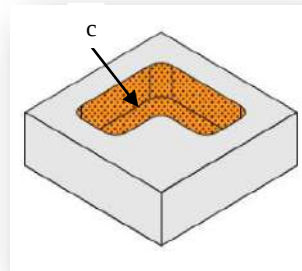
Rainure

C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans. Rainage droite (a), rainure de forme (b) .



Poche

La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconques (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce. (surface cyan « c »)



Perçage

Ce sont des trous. Ils sont débouchant ou borgnes.



I.5 Usinage à sec

Les considérations sanitaires et environnementales poussent depuis une dizaine d'années à l'usinage à sec. Les brouillards de lubrifiants générés lors des opérations d'usinage représentent des risques significatifs pour la santé des personnes travaillant dans l'atelier de production [16].

Le fraisage à sec prolonge la durée de vie des arrêtes .Lors du fraisage à sec des variations de température ont lieu, mais elles restent dans les limites supportées par les nuances carbure .Le fraisage ébauche doit toujours être fait à sec[20].



Figure I.13 : usinage à sec [20].

I.6 Usinage à grande vitesse

L'usinage à grande vitesse (UGV) est une technique d'usinage caractérisée par des conditions de coupe quatre à dix fois plus élevées que lors d'usinage conventionnel, gain en productivité, découpe précise, possibilité d'usiner des matériaux fins..[16].



Figure I.14 : Usinage à grand vitesse [20].

I.7 Phénomène d'usure des outils de coupe

L'usure des outils de coupe est la conséquence de divers mécanismes (phénomène mécanique et phénomène physico – chimique)

En usinage comme dans tous les procédés de mises en forme, des mécanismes d'usure apparaissent. Parmi les plus importants, nous citerons, l'usure par abrasion, l'usure par diffusion et par adhésion. Tous ces modes sont fonction de la température de coupe figure (I.15). [4].

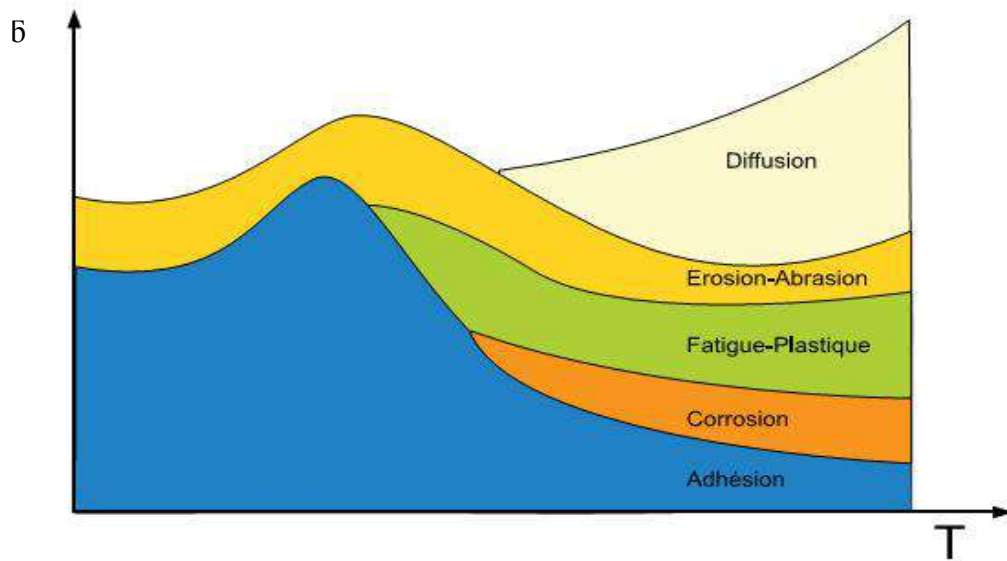


Figure I.15: Diagramme d'usure en usinage[4].

Les différents modes d'usure identifiés dans la littérature sont : l'usure par adhésion, l'usure par abrasion, l'usure par diffusion et l'usure par fatigue. Il faut noter que l'usure par déformation plastique peut être associée à l'usure par abrasion [4].

I.7.1 Les phénomènes mécaniques

a) Abrasion : Ce mécanisme s'opère lorsque la pièce et le copeau frottent avec des pressions de contact importantes sur l'outil et si la matière comporte des constituants (alumine, nitrure, carbure, oxyde) plus durs que l'outil [8].

b) Adhésion : Cette usure est due aux états de surface de la pièce et de l'outil durant l'usinage. Ces entités frottent les unes contre les autres. A cause des fortes pressions il y a des micros – soudures qui se créent et se rompent au cours de l'usinage. Ce processus conduit soit à l'apparition de l'arête rapportée si ces micros – soudures sont plus résistantes que celles de l'outil, soit à l'usure de l'outil, si la micro – soudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil [8].

c) Fissuration : Lors de l'usinage, l'outil est soumis à des contraintes thermiques et mécaniques très importantes. La combinaison des hautes températures à l'interface outil / copeau et des vibrations de l'outil engendrées par la déformation plastique peut provoquer des fissures au sein de l'outil [8].

d) Déformation plastique : La combinaison des hautes températures à l'interface (outil/copeau) et de la pression exercée sur l'outil provoque la déformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe)[8].

I.7.2 Les phénomènes (physico – chimique)

a) Oxydation : Durant l'usinage lubrifié avec le liquide de coupe et à cause de l'élévation de température de l'outil, l'eau contenue dans les fluides de coupe va se vaporiser. Cette vaporisation de l'eau avec l'oxygène de l'air provoque une fragilisation de l'outil par oxydation.

b) Diffusion chimique : Ce phénomène apparaît pour des températures élevées la où la structure de l'outil change sous l'effet de migrations de ses constituants chimiques vers le copeau [8].

I.8 Usure des outils de coupe

a) Usure en dépouille

L'usure en dépouille se manifeste sur la face en dépouille et sur le rayon de bec de l'outil. Elle est due au frottement de la pièce sur l'outil. C'est une forme d'usure fortement abrasive. L'adhésion peut apparaître également dans le cas de l'usinage de matériaux ductiles.

L'abrasion est due à la présence d'inclusions dures dans la matière usinée et aussi à des particules provenant de l'outil qui peuvent s'incruster à l'interface outil/pièce. [4].

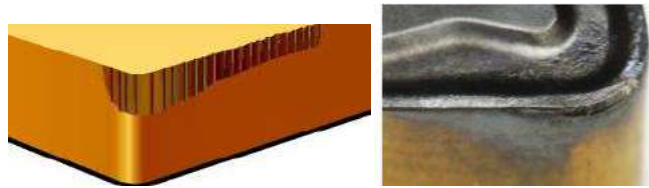


Figure I.16 Usure en dépouille [5].

b) Usure en cratère

C'est la forme la plus courante d'usure de la face de coupe. Elle est caractérisée par la profondeur du cratère KT (figure I.17), une valeur prédominante peut être choisie comme critère de durée de vie de l'outil. Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion [4].



Figure I.17 Usure en cratère [4].

I.9 Les Phénomènes mis en jeu à l'interface outil/pièce

I.9.1 La température de coupe

Les zones de déformation du copeau et de frottement (copeau/outil) étant relativement restreintes, il en résulte d'importantes variations de température dans les volumes directement affectés par le dégagement de la chaleur. D'après les études de Boothroyd, on montre que le gradient de température, dans l'outil peut atteindre les $200^{\circ}\text{C}/\text{mm}$. Dans ces conditions, il est délicat de définir une température de coupe. Si bien qu'en général, la température de coupe représente une valeur moyenne du champ thermique d'une zone particulièrement sollicitée, telle que l'interface (outil/copeau) pour un outil, ou la zone de contact meule pièce dans le cas de la rectification[21].

Dans la mise en forme par enlèvement de matière, la validité des mesures de températures de coupe a toujours été une préoccupation permanente des spécialistes de l'usinage. Notre travail avait pour objectif de rechercher une procédure réaliste et la plus précise possible de mise en évidence des températures à l'interface outil-matière à usiner afin de valider l'intérêt de cette mesure dans la conduite des procédés d'usinage en général. L'étude apporte sur neuf nuances d'outils et quatre aciers de construction. Une analyse complète des propriétés physico-chimiques des nuances outils nous permet d'expliquer le comportement comparé en usinage de ceux-ci en regard des variations simultanées des températures de coupe et autres variables analytiques comme l'énergie de coupe. L'étude permet de mettre en relief les difficultés d'utilisation des mesures de température dans les procédures dites de suivi d'usinage et d'en définir les limites d'intérêt [22].

I.9.2 Méthodes de mesure de la température de coupe :

a) Mesures indirectes de la température de coupe

Avec ces méthodes la température de coupe est mesurée à l'aide d'un vernis thermosensible. Ce dernier est déposé sur l'outil et change de couleur à partir d'une valeur de

température bien définie. La frontière entre deux couleurs présente l'isotherme. D'autres méthodes consistent à introduire une poudre

Dont on connaît le point de fusion, entre deux parties d'une plaquette. Lorsque la température de fusion de la poudre est atteinte, l'essai est arrêté [22]

b) Mesures directes de la température de coupe

b-1 Mesure de la température par thermocouples

La mesure de la température par un thermocouple se base sur le principe suivant : si deux métaux sont soudés à leurs extrémités et si une de ces soudures est portée à une température bien déterminée, l'autre étant maintenue à une température différente, on observera alors une force électromotrice entre les deux jonctions. L'évaluation de cette force, qui dépend des matériaux utilisés, symbolise la température mesurée.

L'avantage des thermocouples est la simplicité, la flexibilité et à moindre coût. Il existe plusieurs types de thermocouples, les plus répandus sont les thermocouples standard et dynamique : [22]

- Thermocouples standards : sont les plus utilisés pour l'évaluation de la température. L'avantage de cette méthode est la possibilité de les utiliser dans tous les procédés de coupe [22].
- Thermocouples dynamiques : est généralement utilisé en tribologie. Cette méthode est pour estimer la température à l'interface outil-copeau pendant l'usinage. L'outil est utilisé comme un élément du thermocouple et la pièce comme étant le deuxième élément[22].

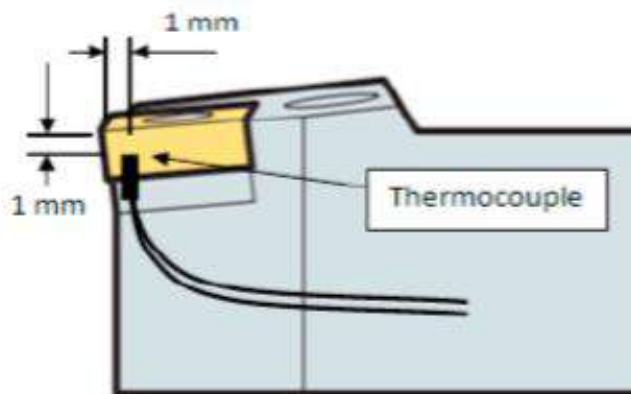


Figure I.18: Mesure de la température par thermocouples [22]

c) Mesure de la température par la méthode optique

La méthode d'implantation des thermocouples reste une technique onéreuse et ne permet pas d'effectuer des mesures de la température de contact outil-copeau. Il est donc nécessaire d'utiliser d'autres systèmes de mesure de température directes qui permettent une acquisition locale et au cours du temps au niveau de la zone de coupe (outil/pièce/copeau), voir même au niveau des zones de cisaillement [22].

Les seules méthodes permettant de faire des relevés de températures de la zone de coupe sur lesquelles l'évolution du contact pièce-outil copeau n'influe pas, sont celles basées sur l'émission d'onde électromagnétique d'un corps lorsqu'il est chauffé [22].

Les techniques les plus répandues sont le pyromètre optique, la caméra infrarouge et la caméra proche infrarouge. Le pyromètre est une technique basée sur l'émission d'onde électromagnétique [22].

Le principe consiste à comparer deux énergies (dans la même bande de longueur d'onde), celle émise par le corps chauffé à celle émise par une source étalon. L'étalonnage d'un pyromètre se fait à l'aide d'un corps noir [22].

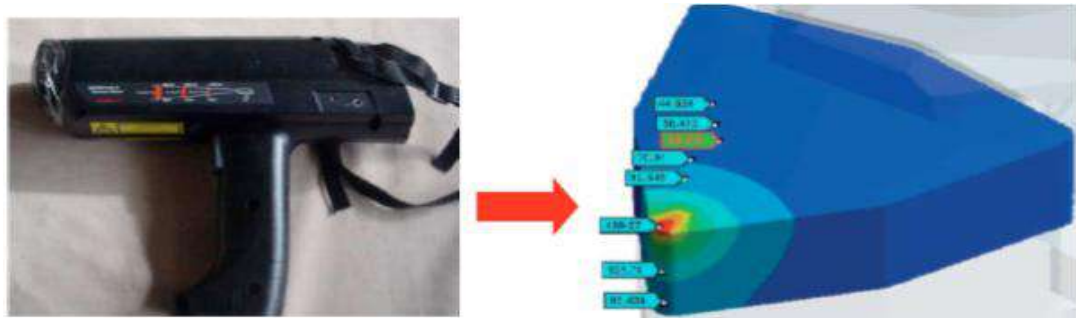


Figure I.19:Pyromètre à infrarouge [23].

I.9.3 Effets de la température de coupe élevée sur l'outil et la pièce

L'effet de la température de coupe, particulièrement quand elle est élevée, est nuisible pour l'outil de coupe et la pièce. Les effets néfastes sur l'outil de coupe sont ; L'usure, qui réduit la durée de vie de l'outil de coupe, La déformation plastique des arêtes de coupe si le matériau de l'outil n'est pas assez dur. 'Thermal flaking', et endommagement des arêtes de coupe dus aux chocs thermiques. Formation de l'arête rapportée.

Les effets néfastes de la température sur la pièce:

- Le manque de précision des dimensions de la pièce à cause de la distorsion thermique l'expansion et la contraction durant et après l'usinage.
- Endommagement de la surface par oxydation, corrosion rapide, inflammation. Induction des contraintes résiduelles sur la surface. Cependant, souvent la

température de coupe élevée permet la réduction des forces de coupe et la puissance de coupe consommée à un point par la réduction de force de cisaillement [24].

I.9.4 Formation de couche blanche

- Analyse des copeaux

Suite aux différentes observations micrographiques, on constate la formation de couche blanche sur la surface du copeau en contact avec l'outil. Son intensité dépend de la microstructure du matériau étudié et des conditions de coupe. Sur les figures présentées précédemment (Figure I 25) ; il est à noter que l'élévation de la vitesse de coupe et d'avance induit des zones blanches plus intenses et un volume plus importante.

Ces zones sont plus importantes dans le cas sans carbure que dans le cas avec carbures[22].

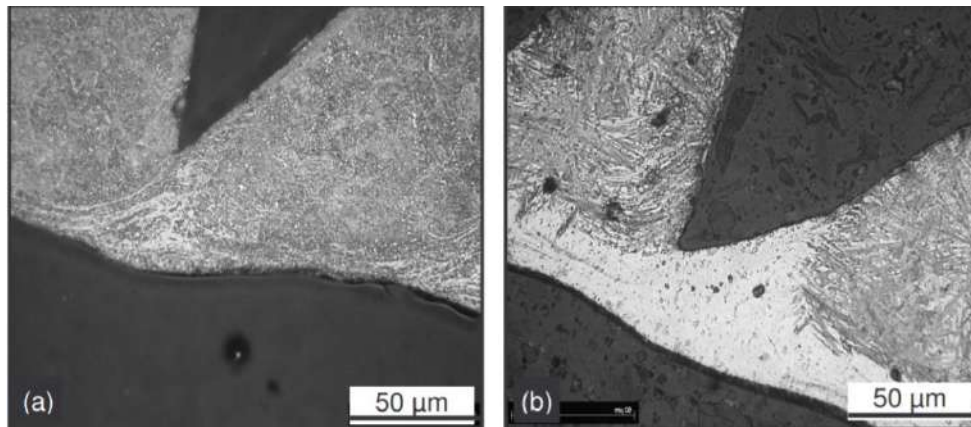


Figure I.20: Couches blanches observées sur le copeau, (a) avec carbures, (b) sans carbure ($V_c=100$ m/min et $f = 0,1$ mm/tr)[22].

Afin d'analyser au mieux ces couches blanches, des observations au microscope électronique à balayage ont été menées. Les Figure I.25a et b présentent deux exemples de couches blanches obtenues respectivement sur deux segments de copeaux avec et sans carbures. Pour les deux états métallurgiques (avec et sans carbures), on observe la formation de zones blanches de physionomies différentes [22].

Pour le cas sans carbure, la zone blanche est homogène et continue entre les différentes zones de cisaillement [22].

Pour le cas avec carbures, les zones blanches sont filaires et présentent des discontinuités entre les différentes zones de cisaillement [22].

La morphologie de ces bandes blanches et leur évolution avec les paramètres de coupe sont expliquées par Ramesh [22].

RAMESH montre que la zone blanche est accentuée lorsque la température de coupe est importante. Ici l'augmentation des paramètres de coupe (vitesse de coupe et d'avance) se traduit par une élévation de la température de coupe ce qui favorise la formation des zones blanches (l'élévation de température va produire de l'austénite qui va se transformer lors du refroidissement en martensite qui apparaît blanche sur les micrographies) [22].

La forme filaire ainsi observée dans le cas du 100Cr6 avec carbures est due à une localisation des températures et des déformations importantes dans de fines bandes. Les carbures non dissouts localiseraient donc le cisaillement dans des bandes très fines d'une épaisseur proche de celle des carbures (environ 2 μm)[22].

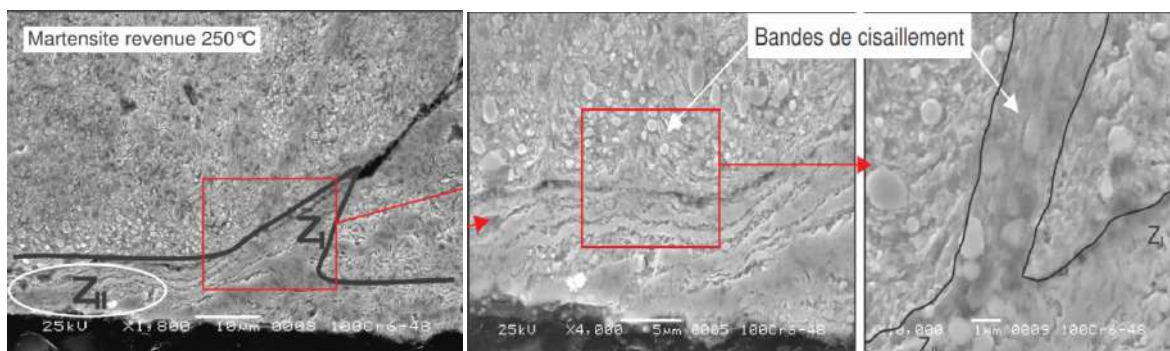


Figure I.21 : Micrographies des copeaux observées au MEB (dureté = 55 HRC, $V_c = 100$ (m/min) et $f = 0,1$ (mm/tr). (a) sans carbure et (b) avec carbures.[22]

Dans cette étude, la température de la face latérale de coupe relative à la température de la zone de cisaillement secondaire, à conditions de coupe similaires, est plus importante dans le cas avec carbures que dans le cas sans carbure. On devrait alors observer une zone blanche plus intense dans le cas avec carbures que dans le cas sans carbure. Pourtant, ce n'est pas le cas ici.

Dans le cote pièce, la formation de couche blanche est considérée comme l'un des aspects les plus importants à prendre en compte lors d'un usinage dur. La Figure I.27 montre une caractéristique typique de la section transversale de la surface usinée FGH95. On peut voir sur la figure I.27 qu'une couche blanche est apparue sur la surface usinée qui est suivie d'un plastique couche de déformation [26].

L'épaisseur de la couche blanche dépend du processus d'usinage. Le terme "couche blanche" provient du fait que la surface apparaît blanche au microscope optique ou sans relief dans un MEB. Ainsi, dans la littérature, le terme "couche blanche" est utilisé comme une phrase générique faisant référence à des couches de surface très dures formées dans diverses conditions, qui apparaissent en blanc au microscope, La couche blanche possède

généralement des grains fins dans certains cas, une structure nano cristalline. Il est plus difficile que le matériau en vrai est plus fragile tout en facilitant le développement de la fissure et propagation dans le matériau. La couche blanche augmente généralement la durée de vie du produit .Ainsi, minimiser ou éliminer la couche blanche serait améliorer la qualité de la surface usinée et la fatigue force [26].

On peut voir sur les figures que la couche blanche formée sur la surface usinée lors de l'usinage dur , la surface usinée est de manière continue et que l'épaisseur de cette couche est d'environ 1 à 3 μm . Par rapport à la microstructure du matériau, cette couche n'a pas de caractéristiques évidentes [26].

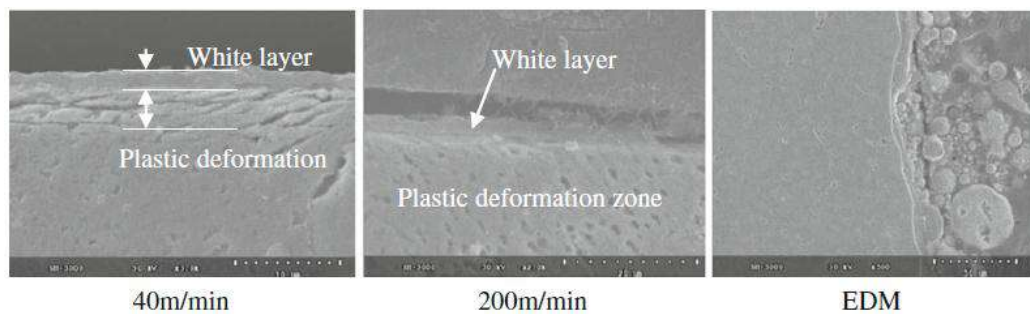


Figure I.22 : Analyse de la couche blanche [26]

Le mécanisme de formation de la couche blanche a été étudié par de nombreux chercheurs. Selon leurs études, la couche blanche résulte de gradients de température élevés, de déformations plastiques sévères, de réactions chimiques, de réchauffement et de refroidissement rapides, d'effets mécaniques de transformations de phase et d'altérations de la microstructure. Ces facteurs sont dus à de nombreux facteurs dans le processus de coupe du métal, tels que les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe)... ; paramètres de l'outil (angle de coupe, angle de flanc, forme et revêtement); Parmi ces facteurs d'influence, la réduction la vitesse a un effet significatif sur la formation de la couche blanche. [27].la figure suivant montre le rôle de vitesse de coupe à la formation de la couche blanche.

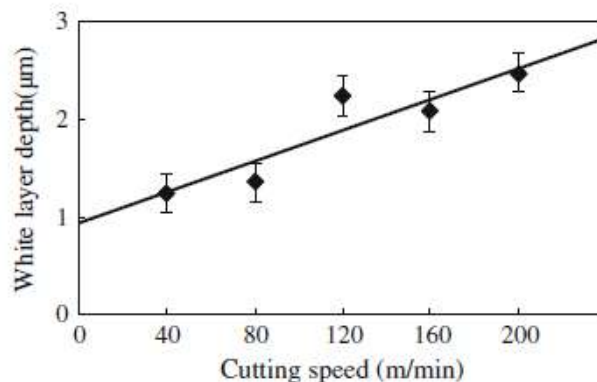


Figure I.23: Variation typique de profondeur de la couche blanche avec V_c [26].

On peut voir à partir des Figure I.28. que l'épaisseur de la couche blanche est de 1,25 (μm) à une vitesse de coupe de 40(m / min); augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Quand la vitesse de coupe augmente à 200 m / min, l'épaisseur de la couche blanche est augmentée à 2,47(μm). Deux raisons principales expliquent cette variation de l'épaisseur de couche blanche avec la vitesse de coupe [26].

La première est la vitesse de coupe plus élevée qui conduit à la température de coupe plus élevée [26].

L'influence thermique est très essentielle pour la formation de couche blanche car la surface usinée est chauffée et refroidis rapidement par la masse non chauffée et l'environnement [26].

Le chauffage et le refroidissement rapides dans la surface usinée conduit à la formation de la couche blanche. Une autre raison de la variation de l'épaisseur de la couche blanche correspond à la coupe la plus élevée vitesse induisant une déformation plastique de surface plus sévère lors d'un usinage difficile [26].

I.10 La Microstructure du surface usinée

I.10.1 Etats de surface

L'état de surface est la couche superficielle de la pièce obtenu par usinage, dont la qualité de cette structure influe fortement le comportement en fatigue. Elle est caractérisée par plusieurs caractères (géométrique, mécanique et métallographique) [25].

L'acier à l'état durci est aujourd'hui fini dans des conditions qui conduisent à des surfaces comparables à celles de la finition précise (R_a de 0,2 à 0,4 μm). Ceci est dû à la disponibilité de céramiques et de nitrure de bore à structure cubique (CBN) de qualité et à des machines outil de grande rigidité. Pour produire des surfaces de bonne qualité avec des avances par tour raisonnables, il faut un outil de grand rayon de bec [8].

La rugosité est un paramètre géométrique considérée comme un défaut de surface, à un caractère micrographique ou macrographique. Elle définit l'état de la structure superficielle. Des études ont montré que la rugosité est influencée par les paramètres de coupe, ce qui confirme que le bon choix de ces paramètres est très important puisque les principales modifications de la couche superficielle sont dues aux températures élevées, les grands gradients de température, les déformations plastiques ainsi que les réactions chimiques et l'absorption chimique dans la nouvelle surface [25].

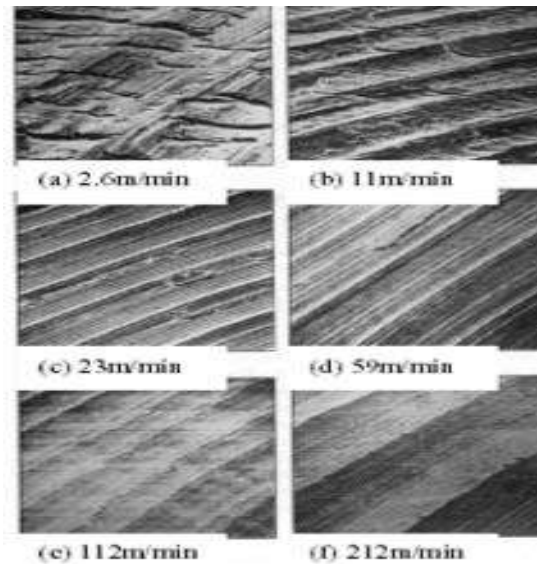


Figure I.24 : Micro-géométrie de surface pour diverses vitesses de coupe [23].

Ces quelques points permettent de penser qu'en usinage à grande vitesse des matériaux durs, l'obtention de l'état de surface souhaité n'est pas un problème. Les défauts obtenus sont plutôt des défauts dimensionnels provenant des déformations locales de la pièce au voisinage de l'outil [8].

Tous les rapports d'expériences montrent que l'état de surface usinée s'améliore avec la vitesse de coupe. La (figure I.29) illustre ces observations pour des vitesses classiques. Les états pratiques mesurés sont très voisins de la rugosité théorique calculée avec la géométrie de l'outil et de l'avance [23].

Influence des paramètres de coupe sur la micro-dureté des surfaces usinées :

Dans le cas des pièces usinées et de leur tenue en fatigue mécanique à grand nombre de cycles, les caractéristiques étudiées seront : la géométrie, les contraintes résiduelles ainsi que l'écrouissage et la microstructure.

L'analyse géométrique d'une surface usinée peut être généralement décrite par des défauts de différents ordres de grandeurs [24] :

- Défauts sont souvent dus à la déformation de la pièce pendant l'usinage, la raideur de la structure de la machine ou les défauts de bridage.
- Défauts d'ondulation sont générés dans le cas du fraisage par la géométrie de l'outil et l'engagement radial de la fraise lors des différentes passes d'usinage.
- Défauts d'ordre correspondent respectivement aux arrachements matière et définissent la rugosité.

L'état de surface est la couche superficielle de la pièce obtenue par usinage, dont la qualité de cette structure influe fortement le comportement en fatigue. Elle est caractérisée par plusieurs caractères (géométrique, mécanique et métallographique)[25].

La rugosité est un paramètre géométrique considérée comme un défaut de surface, elle définit l'état de la structure superficielle [25].

Des études ont montré que la rugosité est influencée par les paramètres de coupe, ce qui confirme que le bon choix de ces paramètres est très important puisque les principales modifications de la couche superficielle sont dues aux températures élevées, les grands gradients de température, les déformations plastiques ainsi que les réactions chimiques et l'absorption chimique dans la nouvelle surface [25].

I.11 Méthode et moyen de mesure de la Micro-dureté des surfaces usinées

I.11.1 La Dureté :

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un corps plus dur, par exemple la bille ou la pointe d'un duromètre. À la différence des minéraux dont la dureté est caractérisée par rayage, on utilise généralement des essais de rebondissement ou de pénétration pour caractériser la dureté des métaux, des matières plastiques et des élastomères. Ces essais ont l'avantage d'être plus simples à réaliser et de donner des résultats reproductibles [39].

La dureté est une mesure de la résistance à la déformation irréversible d'un matériau [28].

I.11.2 Mesures de dureté :

Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, On peut définir l'essai de dureté par deux critères, (H = Hardness c'est la dureté en anglais), une seconde lettre indiquant le type d'essai de dureté (Vickers (V), Brinell (B), Rockwell (R)...etc.).

La surface à tester doit être plane et nettoyée (sans lubrifiant, oxyde ou calamine). Il est nécessaire d'avoir une épaisseur suffisante afin que la pénétration de la bille ne déforme pas le matériau, Nous définissons quelques essais ci-dessous : [23]

1) Essai de dureté Vickers:

Nous symbolisons (HV), La mesure (HV) se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est (d) qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées [40].

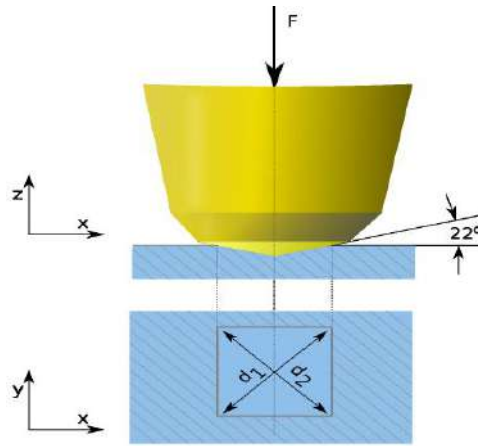


Figure I.25 : Principe de la dureté Vickers[40].

$$HV = \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2} \quad (I.5)$$

HV=dureté Vickers.

F= force appliquée [N].

d=moyenne de diagonales de l’empreinte [mm].

g=Accélération terrestre.[m. s⁻²](9.80665).

Le degré de dureté, est ensuite lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui Norme Européenne pour la dureté Vickers:[24]

- EN ISO 6507-1 - Essai de dureté Vickers - Méthode d'essai.
- EN ISO 6507-2 - Essai de dureté Vickers - Entretien de l'équipement.

Le plus grand soin est à apporter à la préparation de la surface de l'échantillon pour éviter l'introduction de contraintes pendant le polissage. C'est le grand défaut de l'essai Vickers qui est par contre certainement le plus précis[28].

2) Essai de Dureté Brinell :

Il est noté (HB), L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force **F** un pénétrateur ayant une forme de bille diamètre **D**, généralement du carbure poli, dans un métal afin d'en déduire la dureté du matériau. Placer le pénétrateur en contact avec la surface du matériau. Appliquer la force. Maintenir cette charge pendant 10 à 15 secondes. Mesurer sur l'empreinte deux diamètres à 90° l'un de l'autre. La mesure est effectuée à l'aide d'un dispositif grossissant et d'une règle graduée tenant compte du facteur de grossissement[41].

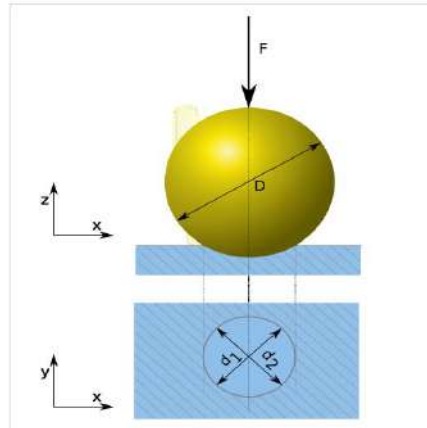


Figure I.26 : Principe de la dureté brinell [41].

$$HB = \frac{2.m}{\pi.D.(D-\sqrt{D^2+d^2})} \quad (I.6)$$

HB= Dureté Brinell.

m =Masse appliquée est de 9.80665 [N].

D=Diamètre de la bille [mm].

d =diamètre de l’empreinte laissée par la bille [mm].

3) Essai de dureté Rockwell

Les essais de dureté Rockwell (HR) sont des essais de pénétration. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge. L'essai se déroule en trois phases [42] :

- Application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0 = 98$ N. Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I. Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesure la dureté Rockwell :
- Application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P.
- Relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

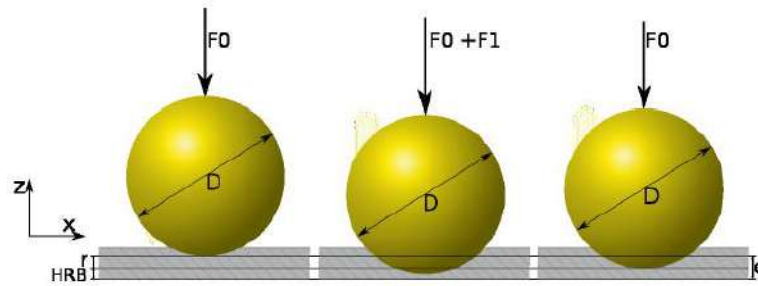


Figure I.27 : Principe de la dureté Rockwell [42].

La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

$$HBR = 130 - \pi$$

4) Dureté de Mohs :

La mesure de la dureté selon l'échelle de Mohs (Mesure de dureté par rayage) dépend de la capacité d'un matériau à rayer un matériau de référence ou à être rayé par un matériau de référence. La mesure est basée sur une échelle de 0 à 10, cette dernière valeur correspondant au diamant qui ne peut être rayé que par un autre diamant [39].

I.11.3 La micro-dureté

Les essais de micro-dureté correspondent à des charges plus faibles. Le pénétrateur est en général de type Vickers. La mesure de la diagonale de l'empreinte est réalisée à l'aide d'un microscope optique [28].

Pour avoir des résultats satisfaisants, il convient de préciser la vitesse de mise en charge, la charge maximum appliquée et la préparation de l'échantillon testé (polissage, traitement thermique) [28].

L'épaisseur de l'échantillon doit être 1,5 fois supérieure à la diagonale, d , de l'empreinte et pour des essais successifs on choisira une distance entre empreintes d'environ 2,5 fois supérieure à la diagonale, d , pour les aciers et 6 fois la diagonale pour les matériaux comme l'aluminium et le cuivre ainsi que leurs alliages [28].

I.12.4 Control de dureté des surfaces usinées

Contrôler la dureté des matériaux qu'ils soient métalliques ou non n'est pas si simple. Plusieurs méthodes sont pratiquées, Il s'agit de choisir la méthode la plus adaptée pour obtenir un résultat correct. En règle générale, la charge doit être choisie de telle sorte que la profondeur de l'empreinte soit inférieure au 10^{ème} de l'épaisseur de la pièce ou de la couche d'un traitement superficiel tout en respectant cette règle, il est conseillé d'appliquer sur le pénétrateur, la charge la plus élevée possible [28].

Plus la charge est faible, plus l'état de surface de l'endroit mesuré doit être poli.

Pour vérifier la dureté des métaux, nous avons plusieurs appareille de mesure, on situe :

1) Duromètre portable digital à base magnétique ROCKWELL/BRINELL

Le D'uromètre portable HBR200-P fonctionne sur le principe ROCKWELL et propose en plus une échelle BRINELL, permettant ainsi d'obtenir des valeurs BRINELL rapidement, par mesure de profondeur de pénétration haute précision, Il permet les essais sur des pièces en acier lourdes et encombrantes, Il peut être utilisé sur des pièces de faible épaisseur ou sur des pièces creuses, La base magnétique assure un posage précis et sûr[28].



Figure I.28: Duromètre portable digital à base magnétique ROCKWELL/BRINELL[28].

2) Duromètre VICKERS SHIMADZU

Les micro-duromètres de la série HMV-G20, ont été spécialement développé pour effectuer avec une grande précision, des essais VICKERS à faibles charges, mais ils permettent aussi de faire des essais BRINELL. Toutes les fonctions et paramétrages sont accessibles depuis l'écran tactile couleur [28].

D'utilisation simple et intuitive, les tests peuvent être réalisés par des opérateurs non spécialistes et non expérimentés. Aide à la sélection des paramètres d'essai "Test condition setting assiste" Application, maintien et relevé de la charge, automatiques, sans intervention de l'opérateur [28].



Figure I.29 : Duromètre VICKERS SHIMADZU [28].

I.12L'acier AISI 1060

Les aciers contenant du carbone comme principal élément d'alliage sont appelés aciers au carbone. Ils contiennent jusqu'à 0,4% de silicium et 1,2% de manganèse. Des éléments résiduels tels que le cuivre, le molybdène, l'aluminium, le chrome et le nickel peuvent également être présents dans ces aciers [38].

I.12.1 Composition chimique

Le tableau suivant présente les différents composants chimiques de l'acier au carbone AISI 1060 :

Tableau I.2 Composition chimique acier AISI1060 [29].

Elément	Contenu(%)
Fer, Fe	98.35-98.85
Manganèse, Mn	0.60-0.90
Carbone, C	0.55-0.660
Soufre, S	≤ 0.050
Phosphoreux, P	≤ 0.040

I.12.2 Propriétés physiques

Le tableau suivant présente les différentes propriétés physiques de l'acier au carbone AISI 1060.

Tableau I.3 Propriétés physiques acier AISI 1060 [29].

Propriétés	Métriques	Impériales
Densité	7.85 g / cm	0.284 lb / in ³
Point de fusion	1510 °C	2750 °F

I.12.3 Propriétés mécaniques

Le tableau suivant montre les propriétés mécaniques de l'acier au carbone AISI 1060 étiré à froid.

Tableau I.4 Propriétés mécaniques acier AISI 1060 [28].

Propriétés	Métriques	Impériales
Résistance à la traction, ultime	620 Mpa	89900 psi
Résistance à la traction, rendement	485 Mpa	70300 psi
Module d'élasticité	190-210 GPa	29700-30485 psi
Module en vrac (typique pour l'acier)	140 ν _c	20300 Ksi
Module de cisaillement (typique pour l'acier)	80 GPa	11600 Ksi
Poissons ratio	0.27-0.30	0.27-0.30
Allongement à la rupture	10%	10%
Réduction de la surface	45%	45%
Dureté, Brinell	183	183
Dureté, Knoop (à partir de la dureté Brinell)	204	204
Dureté, Rockwell B (à partir de la dureté Brinell)	89	89
Dureté, Vickers (à partir de la dureté Brinell)	192	192

I.12.4 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques de l'acier au carbone AISI 1060 sont données dans le tableau suivant :

Tableau I.5 Propriétés thermiques acier AISI 1060 [29].

Propriétés	Métriques	Impériales
Coefficient de dilatation thermique	11 μm / m °C	6.11 μin / in °F
Conductivité thermique	49.8 W / mK	346 U in / hr.ft ² .°F

I.1.5 La microstructure du AISI 1060

La nuance d'un acier est C45 selon la norme AFNOR et est nommé AISI 1060 selon la norme AISI. Il est destiné à la fabrication de pièces mécaniques, de semelles de matrices et de chemins de roulements...etc.

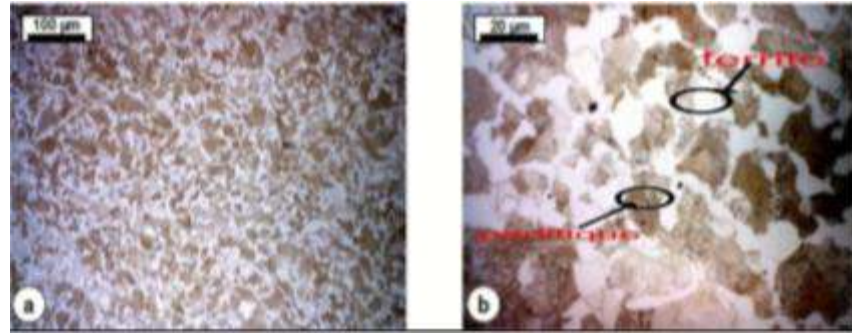
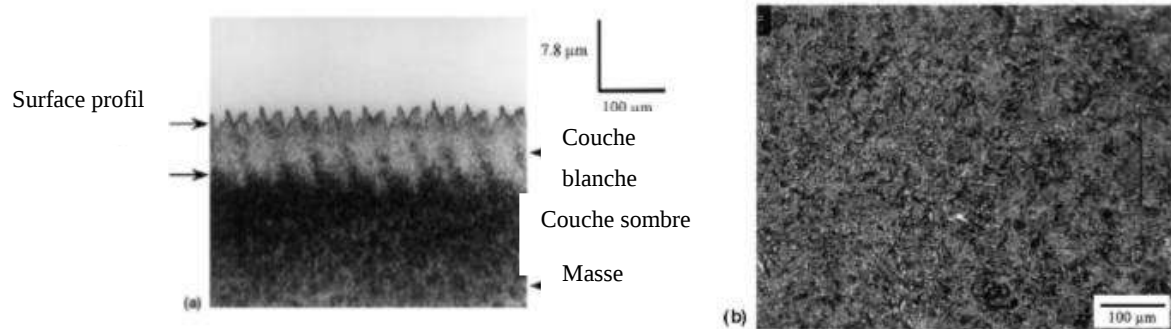


Figure I.30: Microstructure ferrite-perlitique de l'acier C45 observée par microscope optique [27].



a - Microstructure au cœur de l'échantillon.

b - Microstructure de la couche superficielle (couche blanche).

Figure I.31: Exemple d'un Changement microstructural de la surface usinée l'acier 100Cr6[27].

Conclusion

Dans ce chapitre on a commencé par des généralités sur l'usinage en se basant sur le procédé de fabrication par fraisage. Par la suite nous avons étudié quelques phénomènes liés à l'interface outil-pièce pendant les opérations de l'usinage, parmi lesquels la température de coupe qui a conduit à l'apparition des couches blanches ainsi qu'à des transformations métallurgiques au niveau de la couche superficielle des alliages usinés.

Chapitre II

Optimisation des opérations d'usinage

II.1 Introduction

Les méthodes d'optimisation cherchent un rôle important en recherches opérationnelles, les mathématiques appliquées, analyse numérique ...etc. la qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens pour le traitement numérique [30].

Pour améliorer la qualité des produits et des procédés, nous avons plusieurs méthodes d'optimisation (la logique floue, méthode des surfaces des réponses ...etc.) pour minimiser ou maximiser une fonction objectif, ces fonctions comportent des paramètres qui sont généralement soumises à des contraintes.

Dans ce chapitre nous détaillons la méthode de surface de réponse et le logiciel utilisé dans notre étude (Design Expert). Nous présentons également les étapes nécessaires utilisées pour exploiter le logiciel (Design Expert).

II.2 Historique (Design Expert)

1925 : Recherche agronomique (Fisher)

Un domaine où les expériences sont longues, coûteuses et dont les résultats sont sujets à variabilité. Il fallait une méthode permettant de tirer d'un nombre d'essais donné, un maximum d'informations crédibles concernant l'influence des facteurs et leur hiérarchisation.

- 1945-60 : Enrichissement par les statisticiens (Box et Hunter).

Ils introduisent les plans fractionnaires à deux niveaux, les plans composites centrés et les modèles de surface de réponse associés.

- 1960 : Approche qualité (Taguchi)

Construire la qualité en amont, dès la conception. Concevoir des produits performants en moyenne et peu variable autour de cette moyenne rend les performances moins sensibles aux conditions d'utilisation, aux aléas de fabrication et au vieillissement (conception robuste)[31].

II.3 Le logiciel (Design Expert)

Design Expert est un logiciel conçu pour aider à la conception et à l'interprétation des expériences multi-facteurs, nous pourrions utiliser le logiciel pour aider à concevoir une expérience pour voir comment une propriété telle que la résistance à la traction varie avec les changements dans les conditions de traitement - par ex. changements de la vitesse du rotor ou de la pression du piston [31].

Le logiciel propose une large gamme de conception, notamment des factorielles fractionnaires et des plans composites. Il peut gérer les deux variables de processus, telles que la

vitesse du rotor, et variables de mélange, telles que la proportion de résine dans un composé plastique. Design Expert propose des conceptions D-optimales générées par ordinateur pour les cas où les conceptions standard ne sont pas applicables, ou lorsque nous souhaitons améliorer une conception existante - par exemple, pour modèle flexible [31].

Design-Expert vous offre les dernières techniques d'analyse de données multi variées et de plans d'expériences, vous permettant ainsi de réduire votre nombre d'expériences, et donc le temps et le coût de développement de vos produits tout en vous assurant les meilleurs procès. Il contient également des techniques d'analyse de données multi variées poussées, de fonctions d'optimisation élaborées et d'outils de visualisation sophistiqués (2D, 3D, rotations). [32].:

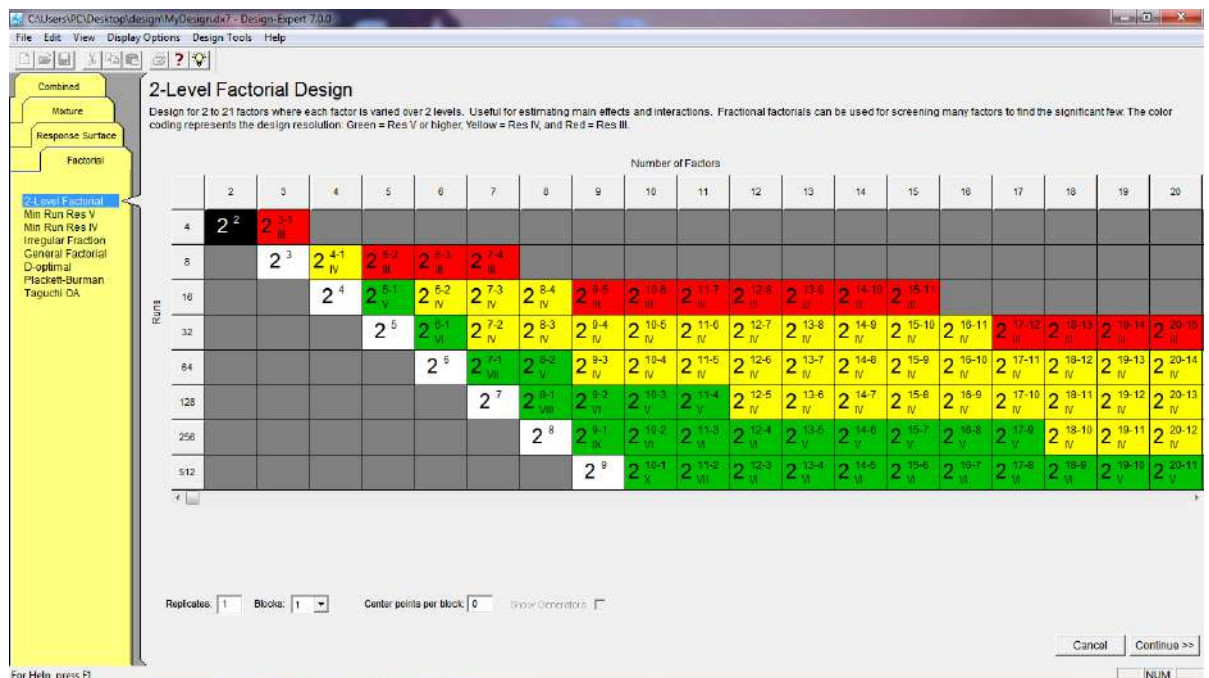


Figure II.1 : L'interface du logiciel de conception d'expériences Design Expert.

II.4 La Méthode de la Surface de Réponse (MSR)

La Méthode de surface de réponse (MSR) (en anglais : Response Surface Methodology) est une combinaison des techniques statistiques et mathématiques utiles pour le développement, l'amélioration et l'optimisation des processus [8].

La réponse d'un système mécanique à des variables aléatoires stimuli peut être obtenue par modèles physiques successifs (appelée surface de réponse physique par la suite), ou par ajustement d'une fonction mathématique (appelée surface de réponse analytique), en général de forme polynomiale, sur une base de données [33].

La méthodologie de surfaces de réponse est largement utilisée en mécanique probabiliste qui est une extension de l'approche déterministe. Elle est un outil de dimensionnement des structures sollicitées par des chargements aléatoires[33].

La M.S.R permet une approche rationnelle des études de sensibilité et fournit des outils d'aide à la décision qui intègre le risque structural et le risque socio-économique [33].

par la suite on va présenter les techniques et les outils de construction de ces surfaces de réponse en mécanique et de les situer dans le cadre plus général de la fiabilité des structures.

II.5 Domaine d'application (MSR)

La méthodologie de la surface de réponse est utile dans la solution de nombreux types de problèmes industriels. Généralement, ces problèmes se répartissent en trois catégories:

1-Mappage d'une surface de réponse sur une région d'intérêt particulière.

2-Optimisation de la réponse. Dans le monde industriel, un problème très important est de déterminer les conditions qui optimisent le processus.

3-Sélection des conditions de fonctionnement pour obtenir les spécifications ou les exigences du client. Dans la plupart des problèmes de surface de réponse, il existe plusieurs réponses dans un certain sens, qui doivent être considérées simultanément [8].

II.6 Formulation des fonctions de réponse

Plusieurs critères permettent de présélectionner le type de formulation de la fonction de réponse à choisir pour représenter les variations de la réponse Y . On peut citer en particulier le niveau de complexité dont dépendent le temps de calcul, la possibilité d'une approche expérimentale et l'état actuel des connaissances notamment des modèles déterministes servant de référence. La construction de surfaces de réponse relève de plus en plus d'une solution mixte basée sur les deux approches usuelles :

- L'ajustement d'un modèle de transfert approché sur une base de données sélectionnée en utilisant des fonctions mathématiques usuelles, en particulier de type polynômial (surface de réponse analytique).

- L'utilisation de lois physiques déterministes dans les quelles sont introduites des variables aléatoires pour rendre compte des variabilités intrinsèques (ex. : hauteur et période de la houle) ou des incertitudes sur les paramètres des modèles [33].

La difficulté de caractériser statistiquement les variables de base s'ajoute à la formulation analytique du transfert. Dans le cas de surfaces de réponse décrivant des états limites, ce problème conditionne le calcul de la fiabilité [34].

II.6.1 Le plan de surface de réponse

Les plans de surface de réponse de second degré est une méthode d'optimisation qui a pour principal but l'évaluation des relations pouvant exister entre les différentes réponses, ainsi que les facteurs appelés (X_1 , X_2 , X_3 ...Etc.) .plusieurs plans factoriels sont employés par cette technique pour l'analyse des résultats à savoir le plan Box-Behenken et le plan Composite centré [35].

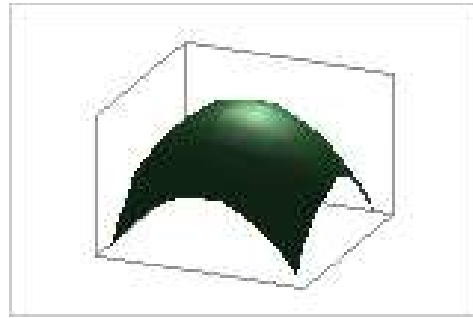


Figure II.2 : Surface de réponse avec courbure [35].

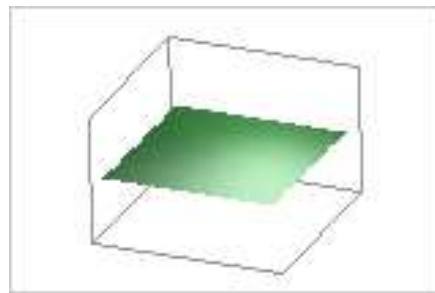


Figure II.3 : Surface de réponse sans courbure [35].

Une équation de surface de réponse se différencie de l'équation d'un plan factoriel par l'ajout de termes au carré (ou de termes quadratiques) qui vous permettent de modéliser une courbure dans la réponse et qui s'avèrent utiles de plusieurs manières :

- Pour comprendre ou mapper une zone d'une surface de réponse. Les équations de surface de réponse modélisent l'influence des changements de variables d'entrée sur une réponse présentant un intérêt.
- Pour rechercher les niveaux de variables qui optimisent une réponse.
- Pour sélectionner les conditions d'utilisation conformément aux spécifications.[36].

Il existe deux principaux types de plans de surface de réponse :

a) Plans composites centrés

Les plans composites centrés peuvent ajuster un modèle quadratique complet. Ils sont souvent utilisés lorsque le plan demande une expérimentation séquentielle, car ces plans peuvent intégrer des informations provenant d'une expérience factorielle correctement

planifiée. C'est le plan de surface de réponse le plus utilisé. Vous pouvez utiliser un plan composite centré pour effectuer les opérations suivantes :

- Estimer efficacement les termes des 1 et 2 ordres.
- Modéliser une variable de réponse avec courbure en ajoutant des points [36].

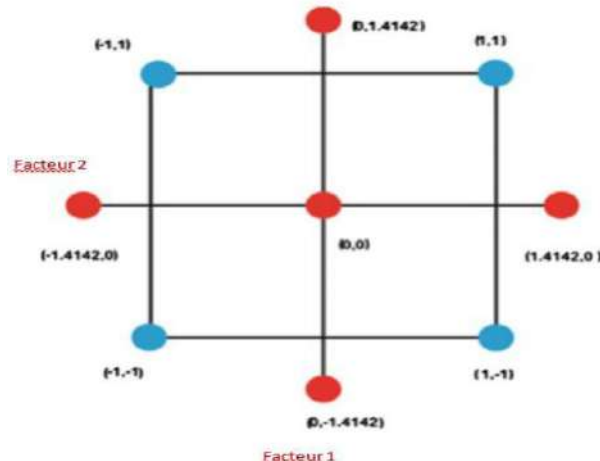


Figure II.4 : Un schéma de conception composite centrale pour une expérience à deux facteurs [8].

Qu'est-ce qu'un plan à face centrée ?

Le plan à face centrée est un type de plan composite centré avec une valeur d'alpha de 1. Dans ce plan, les points axiaux se trouvent au centre de chaque face de l'espace factoriel ; par conséquent, les niveaux sont égaux à ± 1 . Ce type de plan requiert 3 niveaux de chaque facteur. L'ajout de points axiaux adaptés à un plan factoriel ou de résolution V existant permet également de générer ce plan[36].

Lorsque cela est possible, le plan composite centré possède les propriétés souhaitables en matière de blocage orthogonal et de rotation.

▪ Blocs orthogonaux

Souvent, les plans composites centrés sont exécutés sous la forme de plusieurs blocs. Les plans composites centrés peuvent créer des blocs orthogonaux, permettant d'estimer les termes du modèle et les effets de blocs indépendamment et de minimiser la variation des coefficients de régression[36].

▪ Rotation

Les plans pivotants présentent la variance de prédiction constante à tous les points équidistants du centre du plan [36].

b) plan de Box-Behnken

Un plan de Box-Behnken est un type de plan de surface de réponse qui ne contient pas un plan factoriel fractionnaire ou un plan factoriel imbriqué [36].

Les points expérimentaux du plan Box-Behnken sont représentés au milieu des arêtes de chacun des cotes d'une cube. C'est un plan qui peut comporter jusqu'à douze essais, auxquels on peut ajouter des points au centre. Un plan avec trois facteurs est illustré dans la figure suivante [35] :

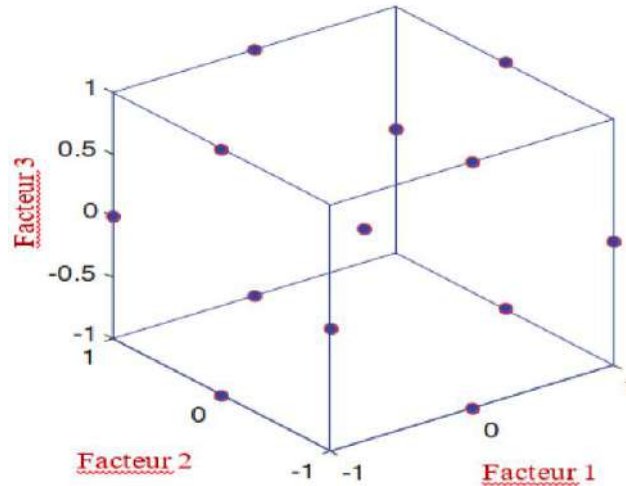


Figure II.5 : Un schéma des points d'essai dans une conception Box-Behnken à trois facteurs [8].

En effet, ces plans permettent une estimation efficace des coefficients de premier et de second ordre. Comme les plans de Box-Behnken comportent souvent moins de points, leur coût peut être moins élevé que celui des plans composites centrés pour le même nombre de facteurs. Toutefois, l'absence de plan factoriel imbriqué les rend inappropriés pour les expériences séquentielles. Les plans de Box-Behnken peuvent également s'avérer utiles si vous connaissez la zone d'exploitation sécurisée de votre procédé. Les plans composites centrés possèdent généralement des points axiaux à l'extérieur du "cube." Ces points peuvent ne pas se situer dans la région à tester ou peuvent être impossibles à réaliser, car ils se situent au-delà des limites de sécurité. Les plans de Box-Behnken, en revanche, n'ont pas de points axiaux et vous pouvez donc être sûr que tous leurs points se situent dans la zone d'exploitation de sécurité. Ils garantissent également que tous les facteurs ne sont jamais simultanément à leur niveau maximum[36].

II.6.2 Principe du plan d'expériences

La méthode du plan d'expériences s'appuie sur une surface de réponse simple (polynômes d'ordre 1 ou 2). Les coefficients propres et d'interaction des variables sont identifiés au moyen d'un minimum d'essais dans le domaine de variation des variables (2 ou 3 niveaux)[34].

Les coefficients propres et d'interaction les plus importants sont la marque des variables et des interactions entre variables les plus significatives. Les variables et interactions non significatives peuvent donc être écartées de l'optimisation ce qui en diminue considérablement le coût. C'est l'opération de débroussaillage[34].

II.6.3 Des modèles séquentiels de carrés

- a) **Moyenne:** La somme des carrés pour l'effet de la moyenne
- b) **Blocs:** Somme séquentielle des carrés pour l'effet de blocage (le cas échéant), après suppression de l'effet de l'interception.
- c) **Linéaire:** Somme séquentielle des carrés pour les termes linéaires. La valeur F teste l'importance de l'ajout de termes linéaires aux effets d'interception et de blocage. Une petite valeur P ($\text{Prob} > F$) Indiquent que l'ajout de termes linéaires a amélioré le modèle.
- d) **2FI:** Somme séquentielle des carrés pour les termes d'interaction à deux facteurs (AB,BC, etc.). La valeur F teste la signification de l'ajout de termes d'interaction au modèle linéaire. Une petite valeur P ($\text{Prob} > F$) indique que l'ajout de termes d'interaction a amélioré le modèle.
- e) **Quadratique:** Somme séquentielle des carrés pour les termes quadratiques (A-carré, B-carré, etc.). La valeur F teste la signification de l'ajout de termes quadratiques au modèle 2FI. Une petite p valeur ($\text{Prob} > F$) indique que l'ajout de termes quadratiques amélioré le modèle
- f) **Cubique:** somme séquentielle de quarts s pour les termes cubiques. La valeur F teste la signification de l'ajout de termes cubiques au modèle quadratique. Une petite valeur p ($\text{Prob} > F$) indique que l'ajout termes cubiques a amélioré le modèle. La colonne "DF" indique les degrés de liberté pour chaque source. En méthodologie de surface de réponse, les degrés de liberté totaux sont égaux au nombre de coefficients du modèle ajoutés ligne par ligne.
- g) **Pour un modèle de mélange:** soit q le nombre de composants dans un mélange. Les degrés de liberté pour les termes linéaires dans un modèle de mélange est (q-1, plutôt que q), car les sommes de les carrés sont corrigés pour la moyenne .Vous devez sélectionner le modèle de degré le plus élevé qui a une valeur p ($\text{Prob} > F$) inférieure à votre niveau de signification choisi [37].

II.7Analyse d'un design :

Une fois que vous avez effectué votre test, vous entrez les valeurs de réponse dans les

colonnes appropriées de l'écran Structure. Si cet écran n'est pas visible, vous pouvez y accéder en sélectionnant Design (Actuel) (dans l'arborescence à gauche de l'écran). Pour analyser une réponse, cliquez sur le nom de la réponse (dans l'arborescence à gauche de l'écran). Vous allez maintenant voir un ensemble d'onglets que vous pouvez utiliser pour accéder à diverses techniques d'analyse et interpréter les modèles ajustés. Vous trouverez ci-dessous quelques remarques sur les fonctionnalités disponibles sous chaque onglet.

- **Effets**

- Tracés semi-normaux et normaux pour mettre en évidence les facteurs actifs.
- Diagramme de Pareto pour donner une image de la taille relative des différents effets.

- **ANOVA**

- Analyse de la variance.

Cela peut parfois être utilisé comme autre moyen de mettre en évidence le facteur actif

- Statistiques récapitulatives.

Une statistique utile ici est celle appelée «Adeq Précision». C'est un type de rapport signal sur bruit qui mesure le rapport de la plage de variation de la réponse prédite à une estimation de l'erreur type de la prédiction. Une valeur élevée indique que la variation que nous observons est importante par rapport à l'incertitude sous-jacente du modèle ajusté.

- **Coefficients de modèle ajusté**

À moins que les interactions ne soient négligeables, les coefficients numériques peuvent être difficiles à interpréter. Il est généralement préférable d'examiner le modèle à travers graphiques - voir ci-dessous.

- **Diagnostics**

- Les parcelles résiduelles

Design Expert propose la gamme habituelle de graphiques résiduels pour vérifier des hypothèses telles que la normalité et la variance constante.

- Tracé Box-Cox pour les transformations de puissance

Cela peut nous aider à décider si nous pouvons améliorer l'ajustement du modèle en mesurant la réponse à une échelle différente - par ex. en utilisant le journal des valeurs de réponse.

- Traces de levier et influence des statistiques

Ces graphiques montrent l'influence des points de données individuels sur le modèle ajusté. L'un des objectifs de la conception statistique est de faire en sorte que nos modèles utilisent de toutes les observations et ne dépendent pas de façon critique de quelques points

seulement. Donc, pour les conceptions standard telles que factorielles, ces statistiques ne seront généralement pas être nécessaire [37].

II.8 Principe de l'optimisation par surface de réponse

L'algorithme d'optimisation est appliqué à une approximation de la fonction objective, Cette approximation est appelée "surface de réponse"[3].

La surface de réponse peut être construite a priori (avant l'optimisation) ou bien au cours du processus d'optimisation (elle peut alors être adaptative). Le coût de l'appel à l'approximation est négligeable. Seul le nombre d'évaluations de la fonction objectif compte. Cette méthode est économique s'il faut moins d'essais pour construire la surface de réponse que pour détecter directement l'optimum

II.9 Application de la méthode de surface de réponse

Une tentative a été faite par **Gai tonde V. N. et al. [43]**. Pour analyser les effets de la profondeur de coupe et du temps d'usinage sur des aspects d'usinabilité. Ces aspects considérés sont : utile. L'étude a été réalisée sur un acier à outil de travail à froid à haute teneur en chrome AISI D2 en utilisant des plaquettes de coupe en céramique classique et wiper. Les auteurs ont trouvé dans l'analyse des résultats que la puissance de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance, tandis que l'effort spécifique diminue, alors que l'effort de coupe requis est faible pour des faibles valeurs d'avance et de temps d'usinage. Ils ont également trouvé que à travers l'analyse de la surface de réponse que la rugosité de la surface diminue à des valeurs plus faibles pour la vitesse d'avance et de temps d'usinage avec des vitesses de coupe plus élevées, alors que l'usure maximale des outils se produise à $V_c = 150$ m/min.

Pour le même matériau, **Davim et Figueira[44]**. ont étudié l'usinabilité de l'acier à outils AISI D2 en utilisant des techniques expérimentales et statistiques. Des opérations de tournage dur ont été effectuées sur un matériau ayant une dureté de 60 HRC. Les tests ont été effectués en utilisant la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et le temps comme paramètres d'entrée, et l'analyse a été effectuée sur la base des réponses. L'influence des paramètres de coupe sur l'usure de l'outil, l'effort spécifique et la rugosité de surface est évaluée durant l'opération du tournage avec des outils de coupe en céramique classique et wiper à l'aide de l'analyse (ANOVA). Ils ont découvert qu'avec des plaquettes de coupe en céramique « wiper », des surfaces usinées avec $R_a < 0,8 \mu m$ sont réalisables. Par conséquent, des qualités de surface (précision dimensionnelle) dans une pièce de précision mécanique, $IT < 7$, sont possibles.

(Barbacki et al., 2003)[45].ont estimé l'épaisseur maximale de la couche blanche et couches sombres dans le tournage d'acier dur en fonction de la vitesse de coupe, de la profondeur de coupe et du taux d'usure de l'outil.

L'enquête sur les variations de dureté à travers l'épaisseur de la pièce a montré que

la dureté de la couche blanche est en moyenne de 100 HV supérieure à celle du matériau en vrac. C'était aussi montré que dans les virages serrés, le refroidissement n'affecte pas l'épaisseur de la couche blanche

(Harrison et al., 2007)[46].ont fait une études sur la couche blanche microstructure montrent que cette couche a une structure nanocristalline avec une taille de grain comprise entre 30 nm à 500 nm, La couche blanche en surface a une épaisseur comprise entre 2 et 20 μm .. L'aspect amorphe et de couleur blanche de cette couche après gravure est ne résulte pas d'une résistance contre un agent d'attaque, mais est dû à une réflexion correcte du rayon incident à partir des petits grains de la surface.

(Siller et al., 2009)[47].ont appliqué un nouvel outil en carbure de tungstène au fraisage de AISI D3 l'acier avec une dureté de 60HRC et a étudié la qualité de surface obtenue. Ils ont observé qu'une rugosité de surface d'environ 0,1 μm à 0,3 μm était réalisable en utilisant cet outil.

(Ding et al., 2010)[48]. ont étudié les forces de coupe et la rugosité de surface dans le fraisage dur de l'acier AISI H13 et est parvenu à la conclusion que la profondeur axiale de coupe et le taux d'alimentation sont les paramètres ayant le plus d'effets sur les efforts de coupe et la rugosité de surface. En optimal la rugosité de surface obtenue était inférieure à 0,25 μm , ce qui indiquait la valeur élevée de processus de fraisage dur. En outre, un modèle linéaire et un modèle quadratique ont été fournis pour estimer les forces de coupe et la rugosité de surface, respectivement.

Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation de la méthode de surface de réponse et le logiciel de conception d'expériences (Design Expert), et à la fin de ce chapitre quelques travaux de recherches basés sur l'utilisation de la méthodologie de Surface de Réponse dans le domaine de l'usinage ont été présenté ce forme de résumés, ce qui nous a permis de comprendre les phénomènes physiques intervenants dans le processus de la coupe ainsi que l'efficacité de la méthode.

Chapitre III

Prédiction de la micro-dureté par la méthodologie de surface de réponse

III.1 Introduction

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs en général est de chercher les conditions optimales d'usinage, qui permettent d'atteindre deux types d'objectifs, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois. Ce chapitre est consacré à présenter la démarche de l'application d'une méthode d'optimisation (surface de réponse).pour prédire la micro-dureté de surface pendant les opérations de fraisage de l'acier AISI 1060 en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe ,avance par dent et profondeur de passe.

III.2 Procédure et donnée expérimentale

Le tableau III. 1 montre les essais qui représentent un plan expérimental de mesure de la micro-dureté du surfaçage d'une pièce par fraisage de l'acier AISI1060, en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe), notons que les essais expérimentaux sont effectués auparavant par notre encadreur.

Tableau III.1 Donnée expérimentales

f_z	V_c	(a_p)		
		0.25	0.5	0.75
0.09	100	125.6	/	129.6
	150	133.4	132.8	136.4
	200	126.4	142.4	130
	250	/	130.6	128.6
	300	122.0	128.6	125.4
0.12	100	130.6	127.4	132.2
	150	134.6	/	141.2
	200	117.4	138.2	/
	250	114.8	131.4	126.6
	300	/	122.2	127.8
0.15	100	131.6	130.2	130.2
	150	/	147.4	136.4
	200	116.8	130.4	131.6
	250	128.4	121.6	125.6
	300	126.6	127.6	127.6
0.18	100	125	/	138.4
	150	137.2	123.4	132.8
	200	131.4	136.4	124.4
	250	123.0	125.4	123.8
	300	137.2	135.4	122

III.3 Système design expert

La figure III.1 ci-dessous représente les variables d'entrées et de sortie du système design expert utilisé pour la prédiction de la micro-dureté pendant les opérations de surfaçage de l'acier AISI1060.

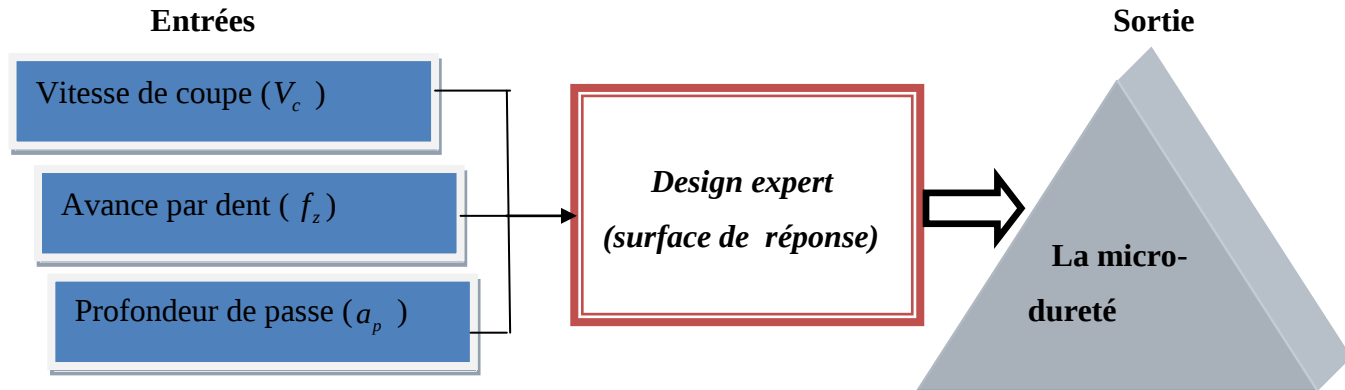


Figure III.1 : Les entrées et les sorties du système

III.4 Résumé de la conception

Le tableau III.2 résume les limites inférieures et supérieures des paramètres de coupe, leurs types et leurs niveaux.

Tableau III.2 Résumé

Résumé de la conception											
Type d'étude		Surface de réponse		Fonctionne		53					
Conception initiale		Central composite		Blocs		Pas de blocs					
Modèle de conception		Quadratique									
Facteur	Prénom	Unités		Type	Limite inférieure	Limite supérieure	Faible codé	Haute codé	signifie r	Std.Dev	
A	V_c	m/min		Numérique	100.0	300.0	-1	1	202.830	70.319	
B	f_z	mm/dent		Numérique	0.09	0.18	-1	1	0.137	0.034	
C	a_p	mm		Numérique	0.25	0.75	-1	1	0.495	0.203	
Réponse	prénom	unité	obs	Une analyse	Minimum	maximum	Signifie r	Std.Dev	ratio	trans	Modèle
Y1	Hv	hv	53	Polynôme	114.80	147.400	129.502	6.422	1.284	none	quadratique

Nous trouvons que la moyenne pour chaque réponse est de 129.502, L'écart type pour chaque réponse est de 6,422 . Le rapport de chaque réponse est de 1,284 .

III.5 Modèle utilisé

Les statistiques sommaires du modèle sont présentées à la table III.3. Le coefficient de détermination, le R au carré ajusté et le R au carré prédit sont plus élevés pour le modèle quadratique. Donc, ce modèle a été suggéré pour une analyse plus approfondie.

Tableau III.3 Statistiques sommaires du modèle

La source	Std.Dev	R-Carré	Adj R-Carré	Préd R-Carré	Press	
<u>Linéaire</u>	<u>6.12</u>	<u>0.1616</u>	<u>0.1103</u>	<u>0.0347</u>	<u>2110.21</u>	
2FI	5.94	0.2588	0.1621	0.0710	2030.93	
Quadratique	5.92	0.3114	0.1672	-0.0081	2203.90	<u>Suggéré</u>
Cubique	5.16	0.5856	0.3663	-0.1657	2548.46	Alias

Les résultats de la table III.3 donnent des valeurs plus faibles pour le modèle Quadratique qui est le modèle suggère pour cette étude.

PERSS: Erreur résiduelle prédite Somme des carrés (Predicted Residual Error Sum of Squares) nous montre l'échelle de la façon dont le modèle correspond à chaque point de la conception.

Adj R-Carré: Mesure de la quantité de variation autour de la moyenne expliquée par le modèle, ajustée pour le nombre de termes dans le modèle. Le R-carré ajusté diminue lorsque le nombre de termes dans le modèle augmente si ces termes supplémentaires n'ajoutent aucune valeur au modèle.

Pred R-Carré: Une mesure de la quantité de variation dans les nouvelles données expliquées par le modèle.

III.6 Analyse des variances

Les données expérimentales analysées par le logiciel Design-Expert. Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) sont présentés dans le tableau III.4 qui révèle que le modèle est significatif puisque sa valeur F est de 2,16. De plus, le tableau III.4 montre également que la vitesse de coupe (A), l'avance par dent (B), la profondeur de passe (C), la valeur quadratique de la vitesse de coupe (A^2), la valeur quadratique de la profondeur de passe (C^2), la valeur quadratique de la vitesse d'avance (B^2), l'interaction entre la vitesse de coupe et la vitesse d'avance (AB), l'interaction entre la vitesse de coupe et la profondeur de passe (AC), et l'interaction entre l'avance par dent et la profondeur de passe (BC), tous ont un effet significatif sur la micro-dureté .

Tableau III.4 Analyse de variance pour la micro-dureté

source	Somme des carrés	Df	Carré moyen	Valeur F	Valeur p	Prob>F
Model	680.70	9	75.63	2.16	0.0445	Significatif
A-Vc	398.60	1	398.60	11.39	0.0016	Significatif
B-fz	2.54	1	2.54	0.073	0.7890	Significatif
C-ap	147.92	1	147.92	4.23	0.0459	Significatif
AB	36.31	1	36.31	1.04	0.3142	Significatif
AC	64.54	1	64.54	1.84	0.1816	Significatif
BC	123.70	1	123.70	3.53	0.0669	Significatif
A ²	0.098	1	0.098	2.811 ^E -003	0.9580	Significatif
B ²	29.71	1	29.71	0.85	0.3621	Significatif
C ²	93.53	1	93.53	2.67	0.1095	Significatif
Résiduel	1505.43	43	35.01			
Manque d'justement	1485.91	41	36.24	3.71	0.2347	No significatif
Pure erreur	19.52	2	9.76			
Cor total	2186.13	52				

III.7 Normal des résidus

La Figure III.2 montre la courbe de probabilité normale pour les résidus de la Micro-dureté. Ce graphique nous montre que le résidu tombe sur une ligne droite ou ils ont très proche de la ligne droite, ce qui signifie que les erreurs sont réparties normalement, indiquant que le modèle est approprié.

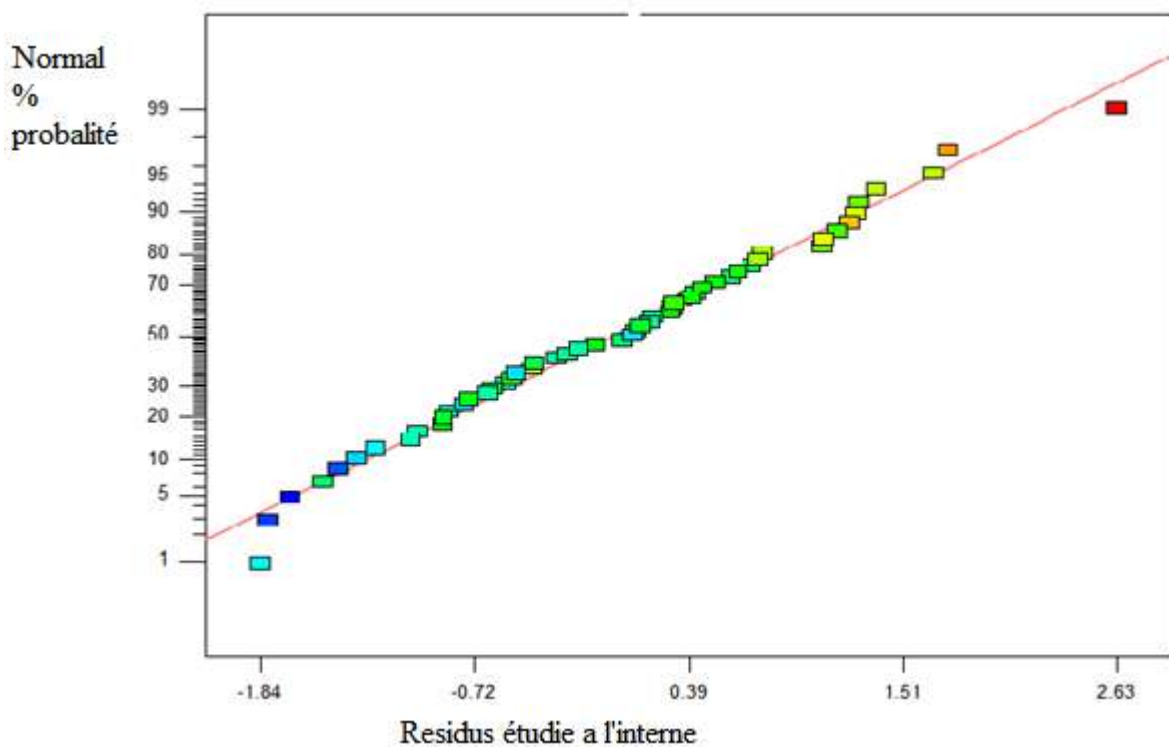


Figure III. 2: Tracé normal des résidus

III.8 Les écarts types

La figure suivante illustre les écarts types séparant les valeurs réelles (expérimentales et ceux prévus) .ils sont disposé d'une manière aléatoire mais ils sont tous inclus dans le domaine de confiance 95%,aucun motif n'affecte donc notre analyse .

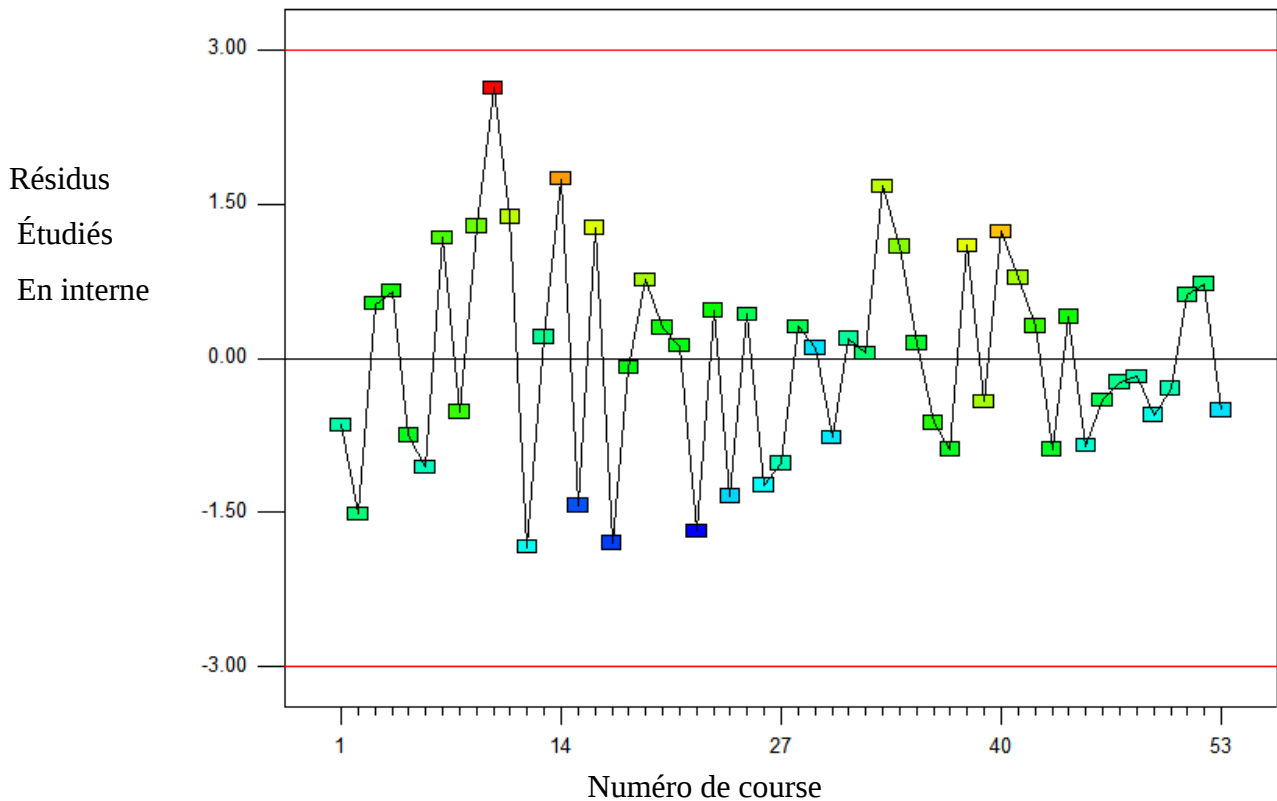


Figure III. 3: Résidus vs numéro

III.9 Courbe 3D de l'influence des paramètres de coupe sur la micro-dureté

Les formes suivantes illustrent les principaux effets de la vitesse de coupe (A),l'avance par dent (B) et la profondeur de coupe (c) sur la micro-dureté de surface.

La figure III.4 montre que plus la vitesse de coupe augmente plus la micro-dureté de surface diminue, l'avance par dent augmente plus la micro-dureté de surface augmente.

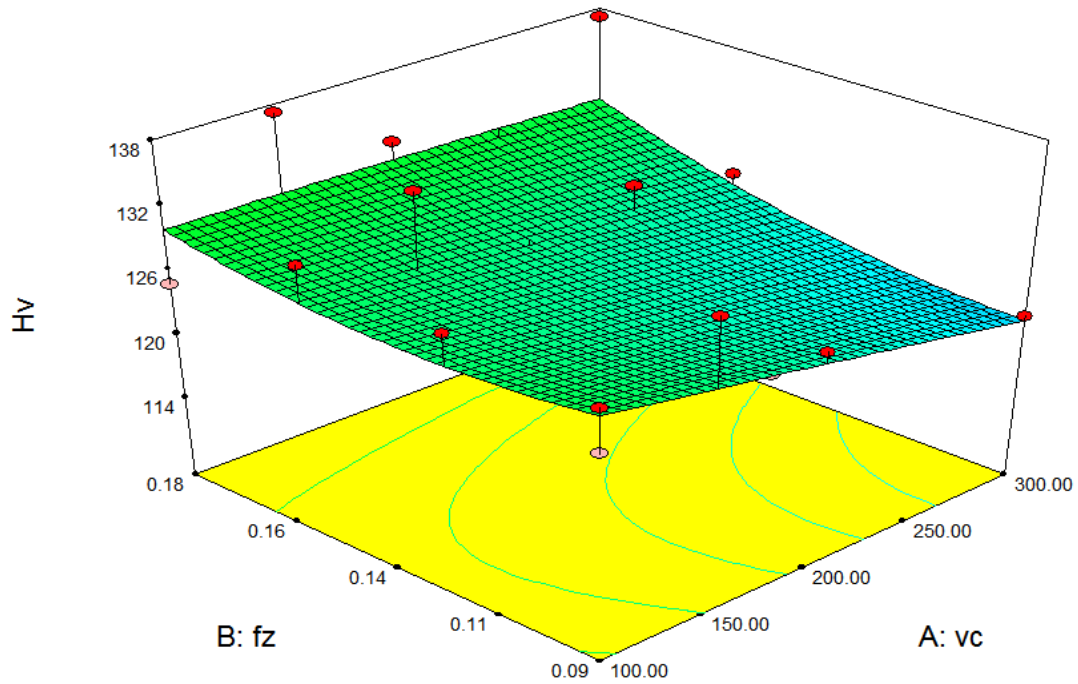


Figure III. 4: Représentation 3D de la micro-dureté en fonction de Vc et fz

La figure III.5 montre que plus la profondeur de passe augmente plus la micro-dureté augmente, la vitesse de coupe augmente plus la micro-dureté de surface diminue.

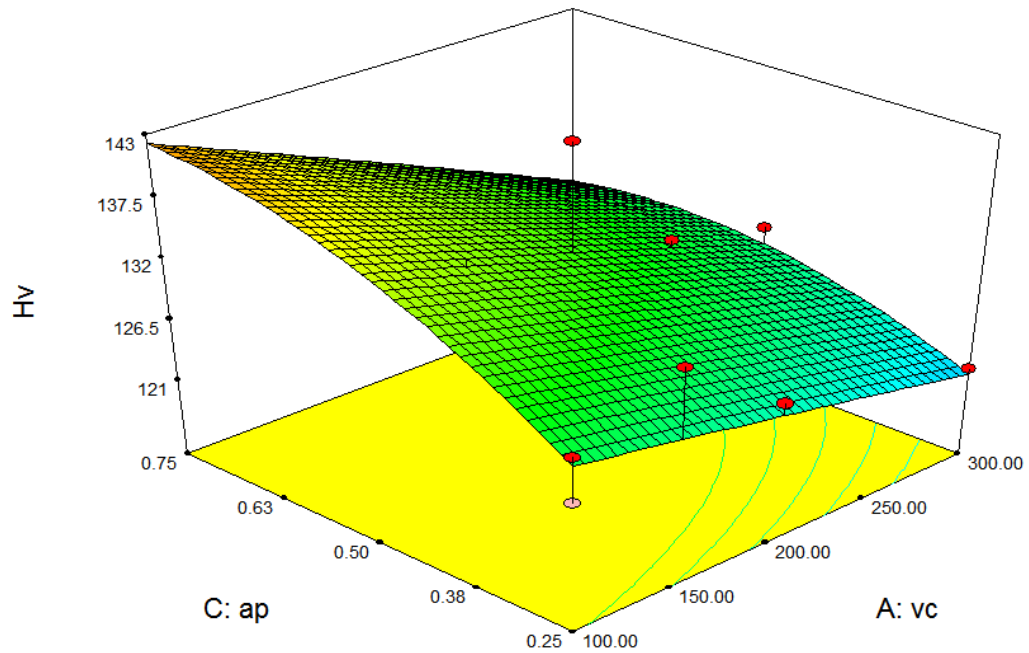


Figure III. 5: Représentation 3D de la micro-dureté en fonction de Vc et ap

La figure III.6 montre que la micro-dureté augmente avec l'augmentation de l'avance par dent et la profondeur de passe.

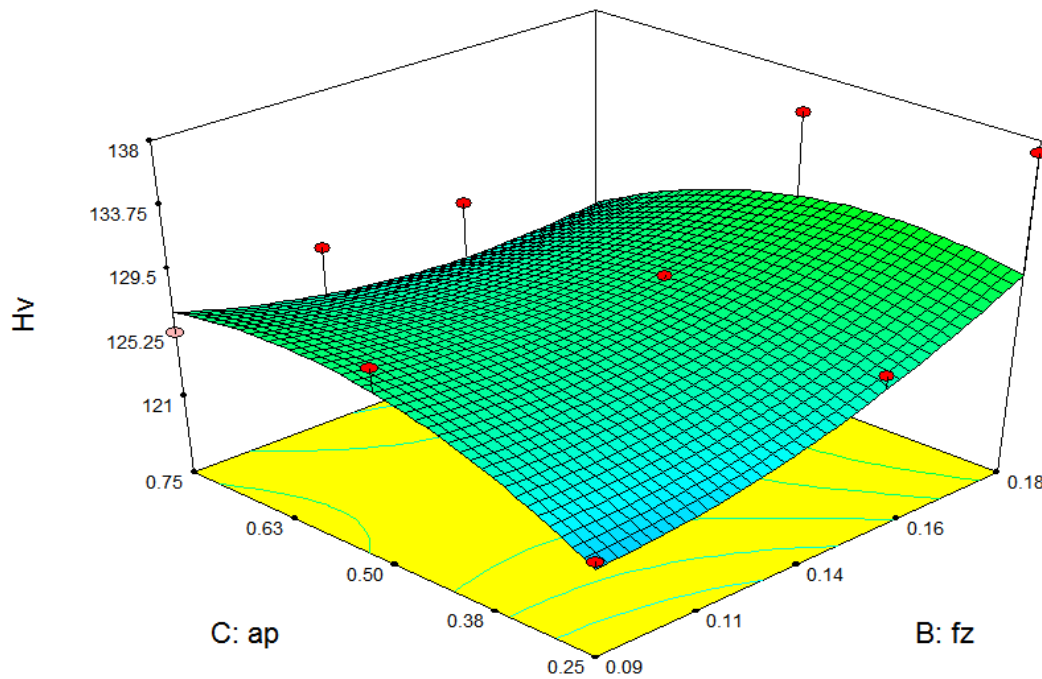


Figure III. 6: Représentation 3D de la micro-dureté en fonction de f_z et a_p

La figure III.7 représente les valeurs limites prédictive de la micro-dureté de coupe dans les huit points du cube en fonction de la combinaison des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, la profondeur de passe, l'avance par dent)

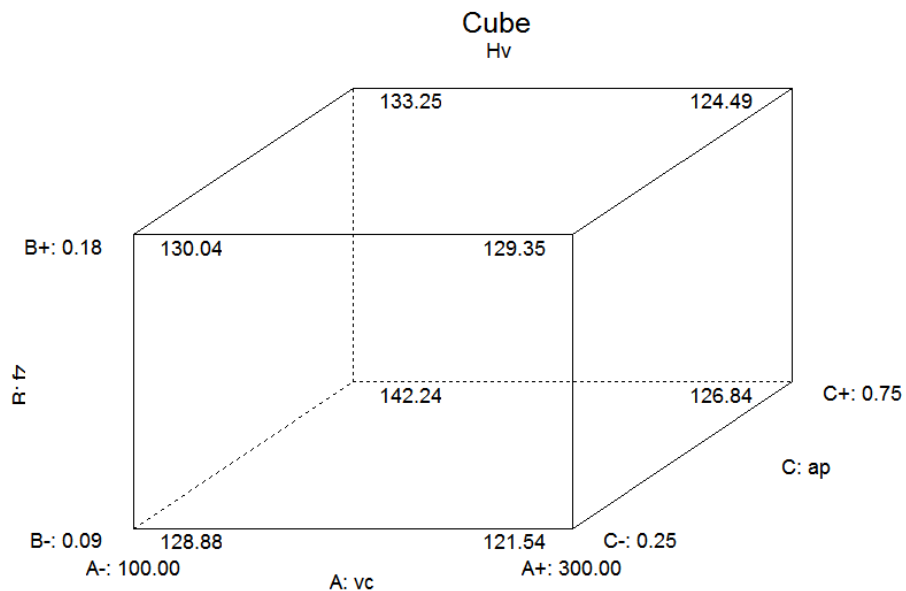


Figure III.7 : Cube des valeurs de la micro-dureté en fonction de V_c et f et a_p

La figure III.8 montre que la valeur de désirabilité augmenter avec l'augmentation de vitesse de coupe (quand $V_c=100$ m/min la désirabilité=0,57, quand $V_c=300$ la désirabilité=0,79). la vitesse d'avance est faible la désirabilité est faible ,la vitesse d'avance est plus élevée la désirabilité est plus élevée (quand $f_z=0,09$ mm/dent la désirabilité =0,57 quand $F_z=0,18$ mm/dent la désirabilité=0,53).on remarque aussi que la profondeur de passe est très

faible la désirabilité est très élevée si la profondeur de passe est très élevée la désirabilité est très faible (quand $a_p=0,25\text{mm}$ la désirabilité=0,79 quand $a_p=0,75\text{mm}$ la désirabilité=0,63)

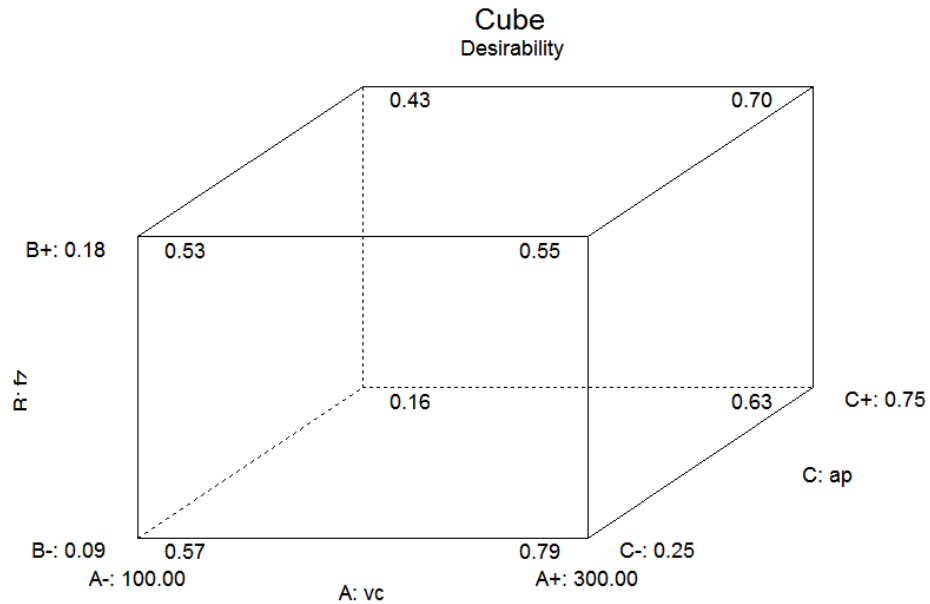


Figure III. 8: Cube de valeurs de la désirabilité de la rugosité en fonction de V_c et f_z et a_p

III.10 Équation de régression

L'équation finale de la micro-dureté de surface (H_v) en termes de facteur réel est donnée ci-dessous :

$$H_v = +125.70615 - 0.0455 * V_c - 194.372 * f_z + 100.514 * a_p + 0.368 * v_c * f_z - 0.0806 * V_c * a_p - 225.557 * f_z * a_p - 1.05216E-005 * V_c^2 + 839.7856 * f_z^2 - 45.425 * a_p^2 \quad \text{III.1}$$

III.11 Conditions aux limites

Les valeurs optimales dans la plage des paramètres d'entrée et les réponses de sortie prévues sont donnés.

La figure III.9 illustre les paramètres d'entrée optimaux pour la réponse multiple, l'optimisation est la vitesse de coupe de 300 m / min, l'avance par dent est de 0,09 mm / dent, profondeur de passe est de 0,25mm.

Le facteur de sortie optimisée est la micro-dureté de la pièce 121,545HV.



Figure III.9: Graphique de fonction de rampe pour les composants de la micro-dureté

Résultat : $V_c=300$ mm/min ; $f=0,09$ mm/dent ; $a_p=0,25$ mm

La micro-dureté optimisé est de $H_v = 121,545$ hv.

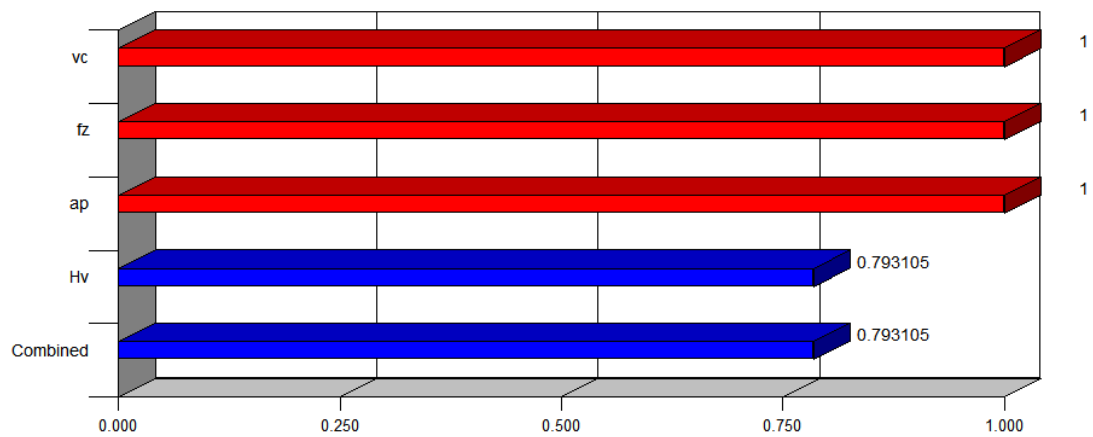


Figure III. 10: Graphique en barre 3D de désirabilité.

La figure III.10 présente le graphique à barres de désirabilité. Pour des conditions de coupe et la réponse avec une combinaison désirabilité est de 0.793 / 100%.

Tableau III.5 Contraintes pour l'optimisation des paramètres d'usinage

Nom	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure
Vc	Dans la gamme	100	300
fz	Dans la gamme	0.09	0.18
ap	Dans la gamme	0.25	0.75
Micro-dureté	minimiser	114.8	147.4

Afin d'étudier les influences des paramètres d'usinage sur la micro-dureté (hv), le tableau III.6 illustre les 21 solutions trouvées à partir du modèle choisi pour l'étude.

Tableau III.6 Solution trouvées

Numéro	vc	fz	ap	Hv	Désirabilité	
1	300.00	0.09	0.25	121.545	0.793	Choisi
2	300.00	0.09	0.25	121.553	0.793	
3	300.00	0.09	0.25	121.662	0.791	
4	300.00	0.10	0.25	121.769	0.786	
5	300.00	0.10	0.25	121.831	0.784	
6	300.00	0.11	0.25	121.922	0.782	
7	300.00	0.11	0.25	122.306	0.770	
8	300.00	0.12	0.25	122.912	0.751	
9	299.64	0.13	0.15	123.148	0.744	
10	300.00	0.15	0.75	123.761	0.725	
11	299.93	0.15	0.75	123.766	0.725	
12	300.00	0.15	0.75	123.776	0.725	
13	300.00	0.16	0.75	123.791	0.724	
14	300.00	0.16	0.75	123.827	0.723	
15	300.00	0.16	0.75	123.861	0.722	
16	300.00	0.14	0.25	124.094	0.715	
17	232.57	0.09	0.25	124.111	0.714	
18	300.00	0.17	0.15	124.222	0.711	
19	300.00	0.18	0.75	124.394	0.706	
20	300.00	0.12	0.75	124.713	0.696	
21	300.00	0.15	0.25	125.175	0.682	

III.12 Tests de confirmation

Dans la plupart des expériences Design-Expert, le rapport d'erreur entre les résultats expérimentaux et prédictifs est calculé. Le Tableau II.7 montre la comparaison entre les tests expérimentaux et prédictifs et le taux d'erreur de chaque test, tandis que la Figure III.11

montre la courbe de comparaison entre les valeurs expérimentaux et les valeurs prédites, indique une petite erreur mais dans les limites acceptables qui prouve que notre modèle développé est efficace pour prédire la micro-dureté.

Des erreurs ont été calculées par la différence entre les valeurs expérimentales principales et les valeurs prédictives. Les valeurs peuvent être calculées en utilisant l'équation suivante.

$$e_i = \left[\left| \frac{H_m - H_p}{H_m} \right| \right] \times 100\% \quad \text{III.2}$$

Erreur moyenne trouvée est de 3.69%, avec une précision de modèle développée est de 96.31%

Le tableau III.7 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites de la micro-dureté avec le pourcentage d'erreur pour chaque valeur de paramètre de coupe.

Tableau III. 7: Comparaison des résultats expérimentaux et prévisionnels avec le pourcentage d'erreur

Vc(mm/min)	f(mm/dent)	ap(mm)	Hvexp	Hv préd	Erreur%
150	0.15	0.25	134.6	127.4	5.34
100	0.18	0.5	140.8	134.4	4.55
250	0.09	0.25	120.2	123.4	2.67
300	0.12	0.25	125.2	122.5	2.16
150	0.12	0.5	137.4	133.3	2.98
200	0.12	0.75	130.3	131.2	0.69
100	0.09	0.5	128.6	138.3	7.5
Erreur moyen					3.69

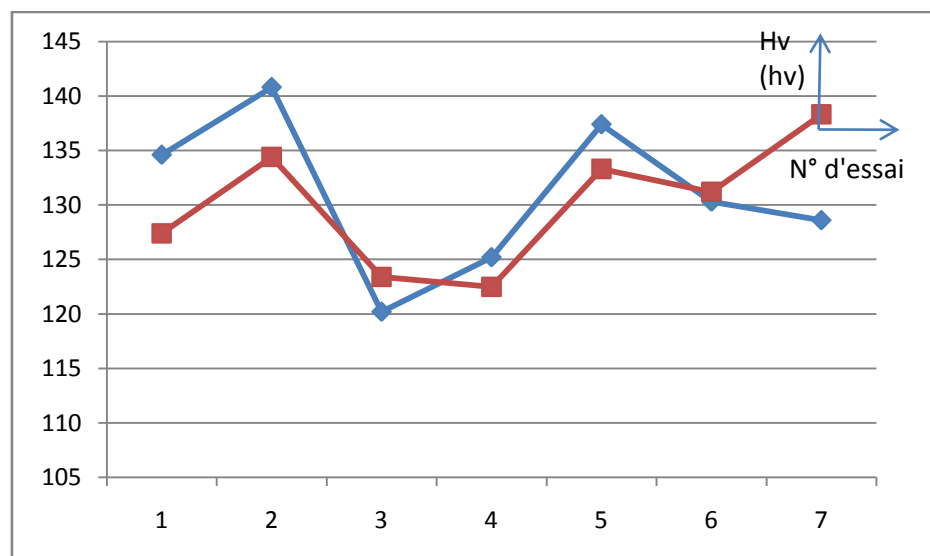


Figure III. 11: Courbe de Comparaison entre les valeurs prédictives et les valeurs mesurées pour la micro-dureté de surface

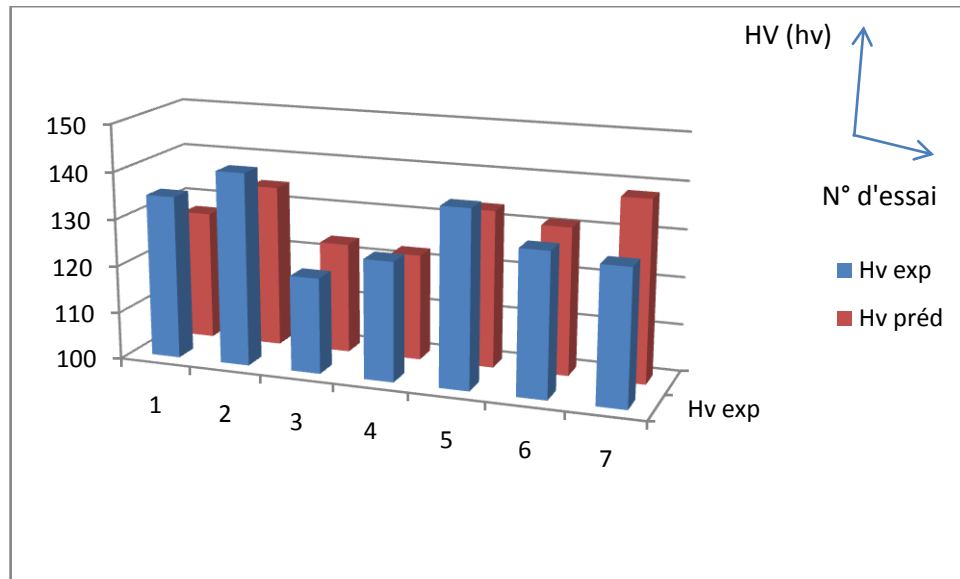


Figure III. 12: Histogramme de Comparaison entre les valeurs prédits et les valeurs mesurées pour la micro-dureté de surface en 3D

La figure III.11 présente une courbe de comparaison entre les valeurs prédictives et les valeurs mesurées pour la micro-dureté de surface, la figure III.12 présente l'histogramme de Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées pour la micro-dureté de surface en 3D. Où on remarque la convergence des résultats prédictifs et les résultats expérimentaux dans les deux cas.

III.13 Conclusion

L'effet des paramètres de coupe ou et leurs interaction (vitesse de coupe, d'avance par dent et profondeur de passe) ont un effet significatif sur la micro-dureté de surface usinée. La méthodologie des surfaces de réponse nous a permis de sélectionner 21 solutions.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les travaux effectués dans ce mémoire de fin d'étude, s'inscrivent dans l'objectif de l'utilisation de la méthode de surface de réponse pour minimiser la micro-dureté de surface usinée afin d'optimiser les paramètres de coupe pendant le fraisage de l'acier AISI 1060.

Cette étude est basée sur une investigation expérimentale et numérique du procédé d'usinage par enlèvement de matière, (cas de fraisage).

Dans la première partie de cette étude, nous avons présenté les procédures d'obtention des pièces par enlèvement de copeau en se basant sur le procédé de fabrication par fraisage avec une synthèse bibliographique sur quelques travaux de recherches qui utilisent les méthodes d'optimisation, une explication de la méthode de surface de réponse et logiciel de conception d'expériences utilisées ont été présentés.

La deuxième partie concerne l'utilisation de la méthode de surface de réponse pour l'optimisation des conditions de coupe et développement d'un modèle mathématique pour prédire la micro dureté de surface après l'usinage.

Les résultats trouvés montrent que la micro-dureté de coupe augmente avec l'augmentation des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par dent, profondeur de passe), et une comparaison entre les résultats expérimentaux et prédictifs ont été faite, le test de confirmation montre que les valeurs prédictives sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, En vue de réduire la micro-dureté, la méthodologie des surfaces de réponse nous a permis de sélectionner 21 solutions.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par (MSR) nous a conduits à conclure que la méthode de surface de réponse est plus fiable avec un erreur moyen de 3.69% et de précision de modèle développé est de 96.31%.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. **Philippe DEPEYRE**, fabrication mécanique, License de technologie et mécanique, Université de la Réunion, 2005.
- [2]. **M. Rajesh**, Une étude expérimentale sur les paramètres de processus influant sur les forces d'usinage lors du fraisage des stratifiés de carbone et de fibre de verre, Thèse de doctorat, 2016.
- [3]. **Dr. BELLOUFI**, Généralités sur les Machines Outils ,mise jour sept 2007,université kasdimerbahourgla.
- [4]. **A. Mourad**, Détermination de la densité de chaleur à l'interface pièce outil: Application au tournage, Thés de Doctorat d'état ,Université Batna 2,2017.
- [5]. **O.Zerti** ,Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA, Thés de Doctorat d'état, université 8 mai 1954,Guelma ,2018.
- [6]. <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/usinage>.
- [7]. **M.lamine_,Y.Hachem**,Prédiction de la Rugosité des Surfaces Usinées lors du Fraisage de l'Acier AISI1060,Mémoire MASTER ACADEMIQUE,Universitékasdimerbahourgla ,2018.
- [8]. **Gouasmia,Chaib**,Mémoire MASTER ACADEMIQUE,Universitékasdimerbahourgla ,2017 .
- [9]. **.S. SFARNI**,Cours de Fabrication Mécanique ,Université Abdelkader Mira –Béjaïa.
- [10]. https://fr.wikiversity.org/wiki/Fraisage/Fraisage_en_opposition_et_en_concordance
- [11]. **Y.Ammari** ,Etude et analyse de la rugosité de surface de l'acier AISI 1060 pendant le fraisage,Mémoire master académique ,Universitékasdimerbahourgla 2018 .
- [12]. https://fr.wikiversity.org/wiki/Fraisage/Fraisage_en_bout,_fraisage_en_roulant
- [13]. **A. Belloufi**, Cours Procédés de Fabrication, Master Maintenance Industrielle, Université d'Ouargla, 2010
- [14]. **B.Remacle**,Bld Revers 80,1030-Bruxelles, septembre 2018.
- [15]. Notice technique fraisage complément centre formation de foulayronnes juillet 2013
- [16]. <http://www.theses.fr/1992NANT2053>
- [17]. **Azom**, AISI 1060 CarbonSteel (UNS G10600), Sep 21 2012.
- [18]. <https://era-industry.com/wp-content/uploads/2014/09/Les-conditions-de-coupes.pdf>.

- [19]. **B. S. karim**, Technologie mécanique , bac aesi électromécanique ,Ecole Normal Technique Moyenne . **Société SANDVIK-COROMANT**, Fraisage, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 7 082, pp. 1-5, 2001.
- [20]. **T. Miller**, product manager –milling high feed miling involves removing as much material as possible in the shortest amount of time .
- [21]. **24 G.Boothroyd,et all**, effect of tool a k wear on the temperatures generated during metal cutting ,Proceedings of the institution of mechanical engineers,1963.
- [22]. **21Farida Benabid**, Etude des transferts thermiques au cours d'une opération d'usinage, influence sur l'usinage a grande vitesse, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2015 .
- [23]. **22M. Habak**, Etude de l'Influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6, Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris ,2006.
- [24]. **23K.J Trigger**, Progress Reportno :1 on chip-tool interface températures,trans asme,vol,70(1948)pp.97-8.
- [25]. **A.Kus,Y.isik et all**, thermocouple and infrared sensor-based measurement of température distribution in metal cutting, article, sensors,15,(2015) 1274-1291.
- [26]. **Du.Jin ,Zh.Lui**, Damage of the machined surface and subsurface in orthogonal milling of FGH95 superalloy,21 march 2013.
- [27]. Design-Expert 8 user's guide ,Multifactor RSM Tutorial Part 1.
- [28]. **j.Paulo** ,Design of Experiments in production ,university of aveiro ,Portugal.
- [29]. **A.Tebibe ,M. H .Arbaoui**, Surveillance de la Température de Coupe Pendant le Tournage de l'Acier AISI 1060,Mémoire master professionnel ,Universitékasdimerbah ourgla,2017.
- [30]. **Rasti A, Shajari S**, Investigation of Surface Roughness, Microhardness and White Layer Thickness in Hard Milling of AISI 4340 Using Minimum Quantity Lubrication, Journal of Cleaner Production (2016).
- [31]. **Richard.Buxton** , Design Expert 7, Mathematics Learning Support Centre ,2007.
- [32]. <https://ritme.com/fr/logiciels/design-expert/>
- [33]. **R.H.Hardin, N.J.A.Slone**, computer-Generated minimal(and larger) Réponsesurface Design.
- [34]. **Revue Modulad**, Les Plans d'expériences, tutoriel numéro 34,2006.

- [35]. **Y.Halhal ,S.Hadroug** ,optimisation par le plan d'expérience Box-Behenken de la production d'une pectinase à partir des écorces d'agrumes ,mémoire de master .université A.Mira-Bejaia .2017
- [36]. <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/>
- [37]. help (Design Expert 7)
- [38]. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6542>.
- [39]. <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73044167>
- [40]. <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Vickers-path-2.svg>
- [41]. <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:BrinellHardness.svg>
- [42]. http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Dureté_rockwell.svg
- [43]. **Smith, G.T., 2002**. Roundness and cylindricity, IndustrialMetrology. Springer, pp. 135-184.Suresh, R., Basavarajappa, S., Gaitonde, V.N., Samuel, G., Davim, J.P., 2013. State-of-the-art researchin machinability of hardenedsteels. Proceedings of the Institution of MechanicalEngineers, Part B:Journal of Engineering Manufacture 227, 191-209.
- [44]. **Davim, J.P., 2010**. Surface integrity in machining. Springer.
- [45]. **Barbacki, A., Kawalec, M., Hamrol, A., 2003**. Turning and grinding as a source of microstructuralchanges in the surface layer of hardenedsteel. Journal of materialsprocessingtechnology 133, 21-25.
- [46]. **Harrison, I.S., Kurfess, T.R., Oles, E.J., Singh, P.M., 2007**. Inspection of white layer in hard turnedcomponents usingelectrochemicalmethods. Journal of manufacturing science and engineering 129,447-452.
- [47]. **Siller, H., Vila, C., Rodríguez, C., Abellán, J., 2009**.Study of face milling of hardened AISI D3 steelwitha special design of carbidetools. The International Journal of Advanced ManufacturingTechnology40, 12-25.
- [48]. **Ding, T., Zhang, S., Wang, Y., Zhu, X., 2010**.Empiricalmodels and optimal cuttingparameters forcutting forces and surface roughness in hard milling of AISI H13 steel. The International Journal ofAdvanced ManufacturingTechnology 51, 45-55.

Résumer

L'optimisation des processus de fabrication prend une place importante au niveau de la recherche scientifique industrielle. Le contexte de nos travaux de cette mémoire c'est comme suite :

On étudier l'effet des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe) sur la micro-dureté de surface pendant l'usinage de l'acier AISI1060. Cette recherche vise à gagner du temps et des outils grâce à la sélection intelligente des conditions de coupe, améliorer la qualité des produits fabriqués et la réduction des coûts des opérations d'usinage.

Après avoir comparé les résultats expérimentaux et les résultats prédictifs, nous avons conclu que l'écart moyen de l'erreur était de 3,69% et la précision de 96,31%, ce qui indiquant que le modèle utilisé est approprié pour cette étude.

Mots clés: Fraisage, Usinage, Température de coupe, L'acier AISI 1060, Micro-dureté de surface, Conditions de coupe, Méthode de réponse de surface.

Abstract

Optimization of manufacturing processes takes an important place at the level of the industrial scientific research. The context of our work in this memory is as follows:

We study the effect of cutting conditions (cutting speed, tooth feed, depth of pass) on the surface micro-hardness during the machining of AISI 1060 steel. This research aims to save time and tools. thanks to the intelligent selection of cutting conditions, improve the quality of products manufactured and reduce the costs of machining operations.

After comparing the experimental results with the predictive results, we concluded that the average deviation of the error was 3.69% and the accuracy was 96.31%, indicating that the model used is appropriate for this study.

Key words: Milling, Machining, Cutting temperature, AISI 1060 steel, Surface micro-hardness, Cutting conditions, Surface response method.

ملخص

التصنيع الأمثل للعمليات يأخذ مكانا هاما على مستوى البحث العلمي الصناعي. سياق عملنا في هذه الذاكرة هو

كما يلي:

ندرس تأثير ظروف القطع (سرعة القطع ، تغذية الأسنان ، عمق التمرير) على صلابة السطح الدقيقة أثناء

تصنيع الفولاذ AISI 1060. يهدف هذا البحث إلى توفير الوقت والأدوات. بفضل الاختيار الذكي لظروف القطع ، مما يسمح لنا في تحسين جودة المنتجات المصنعة وتقليل تكاليف عمليات التشغيل.

بعد مقارنة النتائج التجريبية بالنتائج التنبؤية ، خلصنا إلى أن متوسط الخطأ كان 3.69% والدقة 96.31% ، مما

يشير إلى أن النموذج المستخدم مناسب لهذه الدراسة .

الكلمات المفتاحية: الطحن ، القطع ، درجة حرارة القطع ، فولاذ AISI 1060 ، صلابة السطح ، ظروف القطع ،

طريقة استجابة السطح.