

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : sciences de l'ingénieur
Département : Génie mécanique.
Domaine : Sciences et techniques
Filière : Master
Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Contribution à l'optimisation des conditions de la coupe discontinue sur la
qualité de fabrication en utilisant des algorithmes intelligents

Présenté par : HARAOUI Thiziri

Encadrant : LAGRED Ahmed Grade : Professeur Université : Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

KALLOUCHE Abdelkader	aitre de conférenceM	<i>Badji Mokhtar Annaba</i>	Président
LAGRED Ahmed	Professeur	<i>Badji Mokhtar Annaba</i>	Encadrant
BENCHIHEB Slimane	aitre de conférenceM	<i>Badji Mokhtar Annaba</i>	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

En tout premier, je remercie Dieu, le tout puissant et miséricordieux qui m'a fourni de la patience au moment de besoin, de la force au moment de la faiblesse et de la volonté face au désespoir.

Je tiens à remercier mes parents pour leur soutien permanent, constant et surtout sans aucune faille ; et pour la confiance qu'ils m'ont toujours accordée, ce qui m'a permis d'avancer en toute quiétude. J'espère qu'ils trouveront en ce modeste travail une récompense de ce qu'ils ont fait pour moi.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur du mémoire Pr. Lagred Ahmed professeur au département de génie mécanique de l'université de Badji Mokhtar - Annaba, qui m'a bien orienté, guidé et aidé au cours de la préparation de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur Benchiheb Slimane, maître de conférences à l'université de Badji Mokhtar – Annaba, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider mon jury du mémoire.

Que Monsieur Kallouche Abdelkader, maître de conférences à l'université de Badji Mokhtar – Annaba trouve ici l'expression de mes plus vifs remerciements pour avoir accepté de participer à mon jury de mémoire et pour toutes ses remarques et commentaires qui ont été extrêmement précieux durant mon cursus universitaire.

Je remercie vivement monsieur Bouchelaghem Mahmoud Abdelaziz, directeur du Laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI), professeur à l'université de Badji Mokhtar – Annaba, qui m'a fait un grand honneur d'avoir pris de son temps pour perfectionner mon travail de mémoire, et pour sa disponibilité immédiate.

Je remercie tous les enseignants de département de génie mécanique.

Je remercie également monsieur Chehaidia Seif Eddine, doctorant du département de génie mécanique de l'université de Badji Mokhtar – Annaba pour sa confiance, ses conseils et pour le temps qu'il m'a consacré.

Je remercie également Mr. Zaida Hamid directeur de TSS, SIDER, EL HADJAR pour son aide et ses remarques précieuses.

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements à ceux qui m'ont encouragé et participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à :

À mes parents pour leur soutien permanent et leur réconfort moral ;

À mes grands-parents ;

À mes oncles Mohand et Seddik ;

À mon cher frère Kouceila ;

À ma chère sœur Thileli ;

À mes amies Amira, Dina, Maya et Samira ;

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

"Inna yasyiwen, iheffedardyimɣur; innayas wayed, iheffedardimmet"

"On apprend jusqu'à l'âge mûr, dit l'un, jusqu'à la mort dit l'autre"

Proverbe kabyle.

Résumé

Les superalliages à base de Nickel ont une résistance thermique et mécanique élevée et sont largement utilisés pour les pièces qui fonctionnent dans des conditions sévères. Il est connu que l'usinabilité est directement influencée par les propriétés mécaniques et physiques. La dureté, qui est une propriété mécanique importante, rend difficile l'usinage des matériaux. Par ailleurs, il est établi qu'en usinage, les paramètres du régime de coupe tels que la vitesse, l'avance, la profondeur de passe et la lubrification ont des effets sur l'état de surface. Le présent travail est orienté vers la modélisation et l'optimisation de la rugosité de surface obtenue par des opérations de fraisage, à sec et avec lubrification, d'un alliage à base de Nickel (Inconel 738) et d'une fraise en carbure revêtu (TiN) en utilisant l'intelligence artificielle, méthode efficace pour la prédiction. A cet effet, nous avons utilisé des modèles empiriques multifactoriels et un estimateur intelligent neuro-flou (ANFIS). Les résultats obtenus montrent que la vitesse de coupe est le facteur le plus significatif sur l'état de surface final, suivi de l'avance par dent. L'estimateur de rugosité à base d'ANFIS s'avère être la meilleure en la comparant aux modèles de régression, grâce à l'aptitude d'ANFIS d'optimiser ses règles et fonctions d'appartenances par un algorithme d'apprentissage des réseaux de neurones. Ce qui permet de trouver la relation entre les entrées et sortie. Les résultats sont satisfaisants aussi bien en termes d'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de corrélation R^2 .

Mots clés

Fraisage ; Inconel 738 ; Carbure revêtu (TiN) ; Rugosité ; Modélisation ; Intelligence artificielle ; ANFIS.

Abstract

Nickel super alloys have high thermal and mechanical strength and have been widely used for parts operating under severe conditions. It is known that the machinability is directly influenced by the mechanical and physical properties. Hardness is an important mechanical property, makes it difficult the machining process. In addition, it has been established that in machining, condition such as cutting speed, feed rate, depth of cut and lubrication have a direct effect on surface finish. The present work is oriented towards the modeling and optimization of the surface roughness in milling of a Nickel-based alloy (Inconel 738) under dry and cooling condition using a coated carbide (TiN) milling tool based on artificial intelligence. For this purpose, we used multifactorial empirical models and an intelligent neuro-fuzzy estimator (ANFIS). The obtained results show that the cutting speed is the most significant factor on the final surface finish, followed by the feed per tooth. The roughness estimator based on ANFIS proves to be the best surface roughness estimator compared to regression models; ANFIS optimize its rules and membership functions through a neural network training algorithm. This makes it possible to find the relationship between inputs and outputs. The results are satisfactory in terms of mean square error (MSE) and the correlation coefficient R^2 .

Keywords

Milling; Inconel 738; Coated carbide (TiN); Roughness; Modeling; Artificial Intelligence; ANFIS.

ملخص

تتميز سبائك النيكل الفائقة بقوة حرارية وميكانيكية عالية وقد تم استخدامها على نطاق واسع للأجزاء التي تعمل في ظل ظروف قاسية. من المعروف أن الآلية تتأثر بشكل مباشر بالخصائص الميكانيكية والفيزيائية. الصلابة هي خاصية ميكانيكية مهمة ، تجعل عملية التصنيع صعبة. بالإضافة إلى ذلك ، ثبت أنه في المعالجة الآلية ، يكون لظروف مثل سرعة القطع ومعدل التغذية وعمق القطع والتزييت تأثير مباشر على تشطيب السطح. العمل الحالي موجه نحو نمذجة وتحسين خشونة السطح في طحن سبيكة من النيكل (Inconel 738) تحت ظروف جافة وتبريدية باستخدام أداة كربيد مطلية (TiN) تعتمد على الذكاء الاصطناعي. لهذا الغرض ، استخدمنا نماذج تجريبية متعددة العوامل ومقدر ذكي عصبي غامض (ANFIS). تظهر النتائج المتحصل عليها أن سرعة القطع هي العامل الأكثر أهمية في تشطيب السطح النهائي ، تليها التغذية لكل سن. أثبت مقدر الخشونة المستند إلى ANFIS أنه أفضل مقدر لخشونة السطح مقارنة بنماذج الانحدار ؛ تعمل ANFIS على تحسين قواعدها ووظائف العضوية من خلال خوارزمية تدريب الشبكة العصبية. هذا يجعل من الممكن إيجاد العلاقة بين المدخلات والمخرجات هذا يجعل من الممكن إيجاد العلاقة بين المدخلات والمخرجات. النتائج مرضية من الخطأ التربيعي (MSE) ومعامل الارتباط R^2 حيث متوسط

كلمات مفتاحية

تفريز; Inconel; ANFIS; كربيد مطلي ; خشونه; سطح; نمذجة; ذكاء الاصطناعي

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : surfaçage. a) usinage de la surface plane (couleur jaune) à l'aide d'une fraise à surfacier. Deux plans épaulés (surfaces rouges) réalisés par une fraise deux tailles, b) fraise à surfacier, c) fraise deux tailles.....	8
Figure. I.2: rainurage. a) exemple d'exécution d'une rainure, b) fraise à rainurer, c) fraise disque	9
Figure I.3: détournage de profil.....	9
Figure I.4: pochage (en vert)	10
Figure I.5: perçage, a) types de trous à percer, b) foret.....	10
Figure I.6: fraisage en roulant. a) travail en opposition. b) travail en avalant.....	11
Figure I.7: fraisage en bout. a) travail en opposition. b) travail en avalant.....	11
Figure I.8 : familles et types d'outil possibles.....	12
Figure I.9: classification des outils.....	13
Figure I.10: céramiques	15
Figure I. 11 : décomposition d'une surface mesurée.....	1/
Figure I.12 : représentation 2D de Ra	19
Figure I.13 : relevé rugosimétrique 3D	19
Figure I.14 : caractérisation d'état de surface. a) ordre 1, b) ordre 2, c) ordre 3, d) ordre 4	20
Figure I. 15 : rugosité théorique	22
Figure I. 16 : paramètres influents sur l'usinabilité.....	23
Figure I.17 : protocole expérimental et appareillage [9]	24
Figure I.18 : les effets moyens de Ra [9].....	25
Figure I.19 : surface de réponse, a) a_p , V_c , b) f_z , a_p , c) f_z , V_c [9]	26
Figure I.20 : protocole expérimental et appareillage [10]	27
Figure I.21 : Les effets moyens de Ra [10]	28
Figure I.22 : surface de réponse Ra (V_c , f_z) [10]	29
Figure I.23 : expérimental et appareillage [11]	29
Figure I.24 : protocole expérimental et appareillages [12]	30

Figure I.25 : corrélation des modèles obtenus [12]	31
Figure I.26 : résultat d'optimisation [12]	32
Figure I.27 : protocole expérimental [13].....	33
Figure I.28 : profilogramme de rugosité de surface obtenu par le régime optimal [13].....	34
Figure I.29 : effets de l'avance et de la vitesse sur le Ra (ébauche). a) via RSM, b) via ANN [14]	35
Figure I.30 : effets de l'avance et de la vitesse sur le Ra (ébauche). a) via RSM, b) via ANN [14]	35
Figure I.31 : rugosimètre Taylor Hobson Surftronic +3 [15].....	36
Figure I.32 : protocole expérimental, a) Installation expérimentale pour l'opération de fraisage en bout, b) Installation pour la mesure de la rugosité de surface [16].	37
Figure I.33 : graphe des effets moyens [16]	38
Figure I.34 : graphe des effets moyens pour Ft [2]	40
Figure I.35 : graphe des effets moyens pour Ra [2]	41

Chapitre II

Figure II.1 : matériels et appareils de mesure utilisés [2]	46
Figure II.2 : comparaison entre les valeurs expérimentales avec et sans lubrification.....	49

Chapitre III

Figure III.1 : graphe des effets principaux sur la rugosité Ra lors de fraisage à sec	55
Figure III.2 : Graphe des interactions sur la rugosité Ra lors de fraisage à sec....	56
Figure III.3 : diagrammes de surface 3D de Ra (fz ,ap) lors de fraisage à sec, a) Vc=45, b)Vc=40, c) Vc=35, d) Vc=30	57
Figure III.4 : normalité de distribution de l'erreur pour le modèle de Ra.....	59
Figure III.5 : comparaison entre les valeurs mesurés et estimés de Ra à sec.....	59
Figure III.6 : graphe des effets principaux sur la rugosité Ra lors de fraisage avec lubrification.....	61
Figure III.7 : diagrammes de surface 3D de Ra (fz ,ap) lors de fraisage avec lubrification, a) Vc=45, b)Vc=40, c) Vc=35, d) Vc=30	62

Figure III.8 : normalité de distribution de l'erreur pour le modèle Ra (avec lubrification)	63
Figure III.9 : comparaison entre les valeurs mesurés et estimés de Ra (avec lubrification)	64

Chapitre IV

Figure IV.1 : structure d'ANFIS	68
Figure IV.2: structure proposée pour l'estimation de Ra, a) visualisation des E/S, b) structure avec règles et fonctions d'appartenances (MFs)	71
Figure IV.3 : fonctions d'appartenances, a) Vc, b) Fz, c) ap, d) arrosage.....	72
Figure IV.4 : surface 3D (ANFIS) de Ra (Fz,ap) lors de fraisage à sec, a) Vc=45, b) Vc=40, c) Vc=35, d) Vc=30	74
Figure IV.5 : Ra (μm) optimale obtenue par ANFIS '(à sec).....	74
Figure IV.6 : surface 3D (ANFIS) de Ra (Fz,ap) lors de fraisage avec lubrification, a) Vc=45, b) Vc=40, c) Vc=35, d) Vc=30	75
Figure IV.7 : Ra (μm) optimale obtenue par ANFIS (avec lubrification).....	75
Figure IV.8: comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par régression linéaire et ANFIS pour Ra (à sec)	77
Figure IV.9. Comparaison de la corrélation entre valeurs expérimentales et prédites pour Ra (à sec)	77
Figure IV.10: comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par régression linéaire et ANFIS pour Ra (avec lubrification)	78
Figure IV.11: comparaison de la corrélation entre valeurs expérimentales et prédites pour Ra (avec lubrification)	78
Figure IV.12: Comparaison à base d'indicateurs statistique, a) R2, b) MSE.....	79

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1: composition chimique d'Inconel 738	54
Tableau II.2 : valeurs naturelles des facteurs et niveaux choisis	60
Tableau II.3 : résultats de la rugosité de la surface usinée du plan factoriel $4^2 \times 2^2$ lors du fraisage d'Inconel 738	47

Chapitre III

Tableau III.1 : analyse de la variance (ANOVA) pour Ra lors de fraisage à sec	54
Tableau III.2 : analyse de la variance (ANOVA) pour Ra lors de fraisage avec lubrification	60

Chapitre IV

Tableau IV.1 : résultats d'apprentissage et test pour une sortie floue constante..	73
Tableau IV.2 : résultats d'apprentissage et test pour une sortie floue linéaire.....	73

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I : Analyse bibliographique

I.1 Introduction	6
I.2 Le fraisage	7
I.2.1. Les opérations de fraisage	8
I.2.2 Le processus de coupe des fraises	11
I.3 Notion sur les outils de coupe	12
I.3.1 Classification des outils de fraisage	12
I.3.2 Matériaux de l'outil	13
I.4 Régime de coupe	16
I.4.1 La fréquence de rotation de la broche	17
I.4.2 La vitesse de coupe.....	17
I.4.3 La vitesse d'avance.....	17
I.4.4 La profondeur de coupe.....	18
I.5 État de surface	18
I.5.1 Généralités	18
I.5.2 Défauts de surface	19
I.6 Usinabilité.....	22
I.7 État de l'art	23
I.7.1 Modélisation et optimisation du fraisage des aciers	23
I.7.2 Modélisation et optimisation du fraisage des alliages d'aluminium	34
I.7.3 Modélisation et optimisation du fraisage des alliages de Titanium	36
I.7.4 Modélisation et optimisation du fraisage des alliages de Nickel	37
I.8 Conclusion	41

Chapitre II : Protocole expérimental

II.1. Introduction	44
II.2. Données expérimentales.....	44
II.2.1. Protocole expérimental.....	44
II.2.2. Plan d'expérience	46
II.3. Méthodes d'analyse des résultats	49
II.3.1. Analyse de la variance (ANOVA)	49
II.3.2. Analyse de régression	50
II.3.3. Analyse graphique.....	51
II.4. Conclusion.....	52

Chapitre III: Influence des paramètres de coupe et modélisation des paramètres technologiques d'usinage

III.1. Introduction	54
III.2. Analyse des résultats et modélisation lors de l'usinage à sec.....	54
III.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)	54
III.2.2. Analyse des effets principaux et leurs interactions sur Ra	55
III.2.3. Diagrammes de surface 3D de Ra.....	57
III.2.4. Modélisation	58
III.3. Analyse des résultats et modélisation lors de l'usinage avec lubrification...59	
III.3.1. Analyse de la variance (ANOVA)	59
III.3.2. Analyse des effets principaux et leurs interactions sur Ra... ..	60
III.3.3. Diagrammes de surface 3D de Ra.....	61
III.3.4. Modélisation	62
III.4. Conclusion	64

Chapitre IV : Application de l'approche d'intelligence artificielle neuro-floue « ANFIS »

IV.1. Introduction	66
IV.2. Paradigme d'intelligence artificielle.....	66

IV.2.1. Réseau de neurones artificiels	66
IV.2.2. La logique floue.....	67
IV.2.3. Système neuro-flou adaptatif (Adaptative Neuro-Fuzzy Inference system « ANFIS »)	67
IV.3. Modélisation du critère de la rugosité de surface (Ra) par ANFIS	73
IV.3.1. Traitement des données	70
IV.3.2. Structure et apprentissage	71
IV.3.3. Diagrammes de surface 3D de Ra en utilisant le modèle ANFIS	73
IV.4. Comparaison entre les modèles ANFIS et régression linéaire	76
IV.5. Conclusion.....	79
Conclusions générales et perspectives	81
Liste des références	

Introduction

Générale

Introduction générale

L'usinage prime sur les procédés de fabrication des pièces mécaniques. Surtout si les tolérances exigées sur le produit final sont faibles [1]. D'une part, l'avancement technologique qu'a connu le domaine de l'automatisation des machines-outils, le développement rapide des techniques de commande numérique, des outils de coupe et des logiciels de dessin et fabrication assistée par ordinateur ont permis le maintien de la compétitivité des divers procédés d'usinage. D'autre part, et dans le même but, une attention particulière est portée sur la modélisation des paramètres technologiques et aussi l'optimisation des conditions de coupe permettant d'améliorer la qualité et la productivité en utilisant les méthodes statistiques.

Problématique

Dans un contexte de compétitivité industrielle de grande envergure, l'optimisation de la productivité est une préoccupation majeure permettant aux industriels de maintenir une place dans un marché où la concurrence est impitoyable. À cet effet la maîtrise des procédés de fabrication est incontournable afin de répondre aux diverses contraintes technico-économiques requises.

Hélas, les ingénieurs se trouvent confrontés à des problèmes limitant leurs efforts destinés à optimiser leurs procédés de fabrication et ainsi atteindre les objectifs escomptés. Actuellement, les méthodes les plus utilisées pour faire ce choix sont des méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants et des utilisateurs des outils coupants (abaques, diagrammes par constat expérimental, etc.). Ces expériences, souvent très coûteuses, donnent une large plage de choix des paramètres en fonction de leurs besoins.

Ce travail constitue une approche alternative d'optimisation des conditions de coupe lors de fraisage de surface, en utilisant des algorithmes intelligents, dont la construction et validation sont basées sur un nombre suffisant d'expériences dans le but de déterminer le régime de coupe optimal conduisant au meilleur état de surface. Ainsi ce travail prend en compte les constats précédents et propose une approche originale d'optimisation du régime de coupe en fraisage par le réseau neuro-flou adaptatif (ANFIS).

Objectifs

- Appréhender les phénomènes mis en jeu dans le cas du fraisage.
- La définition des variables dépendantes et indépendante influençant la coupe et leurs interactions.
- L'étude de l'influence de chaque variable indépendante sur l'état de surface.
- La modélisation mathématique-empirique multifactorielle du procédé de fraisage de face de l'inconel 738 à sec et avec lubrification.
- La proposition d'un système neuro-flou adaptatif (ANFIS) permettant une modélisation efficace du régime de coupe de l'Inconel 738 en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu (TiN).

Contribution

Il existe une littérature abondante sur la modélisation des paramètres technologiques et l'optimisation de régime de coupe en fraisage de face, mais la technique que nous employons dans le cadre de ce travail n'a jamais été mentionnée dans la littérature accessible et relevant du domaine de l'usinage dur (fraisage de face de l'Inconel 738 dont la dureté est de 35-37 HRc).

- La proposition d'un modèle empirique multifactoriel dont la précision est bien meilleure que le modèle empirique unifactoriel proposé par [2].
- De plus, nous avons développé un modèle intelligent capable d'estimer avec exactitude le critère technologique de rugosité Ra en utilisant un réseau hybride, mariant ainsi les réseaux de neurones et la logique floue.
- L'estimateur à base du système neuro-flou adaptatif (ANFIS) proposé est présenté avec détail mathématique nécessaires afin de surmonter le manque de modèle mathématique précis car les nombreux auteurs, qui y ont recours, considèrent l'intelligence artificielle en général, et ANFIS en particulier comme des systèmes « boîtes noires ».

Organisation du mémoire

Ce manuscrit est constitué de quatre chapitres :

Le [chapitre I](#) est consacré à l'analyse bibliographique relative à la thématique abordée dans le cadre du mémoire. Après avoir brièvement décrit le procédé de fraisage, les outils les plus couramment utilisés, ainsi que les principaux matériaux de coupe utilisés, on y présente l'état de l'art de la modélisation et l'optimisation des paramètres de coupe en fraisage.

Ensuite, le protocole expérimental du fraisage de face du super alliage à base de Nickel Inconel 738, en utilisant un outil en carbure revêtu (TiN) ainsi que les principales méthodes d'analyse des résultats sont soigneusement présentées dans le [chapitre II](#).

Le [chapitre III](#) est dédié à l'analyse et l'étude de l'influence des paramètres de coupe et modélisation des paramètres technologiques d'usinage, qui est en l'occurrence la rugosité arithmétique R_a .

L'analyse de la variance ANOVA, est choisie comme méthode d'analyse statistique des résultats expérimentaux et l'analyse des effets principaux à l'aide d'un logiciel Minitab-16. Afin d'identifier et quantifier l'influence des paramètres de coupe sur R_a . Ensuite, les modèles mathématiques qui permettent la prédiction de R_a à sec et avec lubrification sont explicités et leur régression est évaluée en termes d'erreur avec l'erreur quadratique moyenne (MSE) enregistrée entre les valeurs des modèles et celle des expériences et en termes de régression en utilisant le coefficient de corrélation (R^2).

Le [chapitre IV](#) est dédié à la modélisation et l'optimisation du régime de coupe en utilisant ANFIS, afin d'aboutir à un modèle global non linéaire obtenu à partir des données expérimentales présentées dans le [chapitre II](#), et en prenant compte des constats des travaux précédents présentés dans le [chapitre I](#). Afin de vérifier la robustesse et l'efficacité de la méthode que nous avons avancée, une comparaison entre les modèles de régressions linéaire obtenus et le modèle à base d'ANFIS est présenté dans la fin du chapitre.

Les conclusions générales, quelques perspectives, ainsi que des références bibliographiques achèvent ce modeste mémoire.

Chapitre I

Analyse bibliographique

I.1. Introduction

L'usinage est un procédé de fabrication là où la forme souhaitée est obtenue par enlèvement de matière. Ce procédé est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir d'une pièce brute. En effet, cette dernière peut être moulées, extrudées ou forgées, ainsi la principale technique utilisée dans la production des pièces mécaniques pour l'industrie automobile, aéronautique, ferroviaire etc...[3, 4].

Depuis leur apparition, les techniques d'usinage ont connu de multiples améliorations. Les procédés de fabrication par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de rester en phase avec les exigences industrielles, qu'elles soient d'ordre technique, économiques et écologiques.

Le souci de l'ingénieur fabricant est en premier lieu, la qualité de la pièce. Cet objectif dépend de plusieurs facteurs (contrôlables et incontrôlables) que l'ingénieur devait les considérer soigneusement, citons entre autres :

- Quel type de machine faut-il utiliser et suffira-t-elle en termes de puissance et de précision ?
- Quelles sont les conditions de coupe à utiliser pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?
- Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et dans quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ?
- Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? [5].
- La connaissance et la maîtrise de ses éléments est d'une importance primordiale pour mener à bien la fabrication d'une pièce.

Compte tenu des objectifs du mémoire, la prochaine section est dédiée au procédé de fraisage, en allant des généralités les plus basiques aux plus récents travaux les plus récemment publiés, en se focalisant sur l'optimisation des conditions de coupe lors de fraisage.

I.2. Le fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux destiné aux pièces de forme prismatique. Comme son nom l'indique, les opérations de fraisage s'effectuent sur des fraiseuses. Une multitude de machines sont actuellement disponibles, elles se basent sur le même principe mais de technologies différentes. Les plus classiques sont les fraiseuses conventionnelles dont la conception date du début du siècle. Les plus avancées sont les machines automatiques. Et les plus utilisées sont les machines CNC sophistiquées à axes multiples. La différence entre l'automatique et le CNC est que la dernière est pilotée par microcontrôleur séquentiel c.-à-d. code travaillant ligne par ligne. Tandis que les machines automatiques sont contrôlées par des automates et travaillent de façon asservie.

Lorsqu'il est décidé qu'une pièce doit être usinée par fraisage, l'étape suivante consiste à réaliser la gamme de fabrication, en se basant sur le dessin de définition de la pièce. À ce stade le bureau de méthode est appelé à réfléchir sur :

- Le routage d'usinage à suivre, ensuite le détailler en plusieurs phases, selon les exigences techniques souhaitées.
- Adopter l'isostatisme nécessaire. Dans cette étape, l'ingénieur est appelé à assurer la mise en position de la surface usinée par rapport aux référentielles machines, l'immobilisation de la pièce en cours d'usinage et l'absence de déformation au moment de l'ablocage. On doit également satisfaire un dégagement facile des outils et du copeau, ainsi qu'un montage et démontage facile de la pièce.
- Choisir les outils de coupe nécessaires et calculer le régime de coupe adéquat, ainsi que les efforts de coupe. Le calcul des paramètres de coupe est fortement lié au choix de l'outil, ce qui fait que l'ingénieur a moins de liberté sur le choix de ces paramètres.
- Déterminer la stratégie de coupe afin de réduire le temps d'usinage et optimiser son coût. Puisque la trajectoire est aussi un aspect très important, spécialement en fraisage où l'on a une grande latitude sur les paramètres : diamètre, nombre de plaquettes, trajectoire centrée ou non, direction de déplacement, trajectoire complexe (plusieurs segments rectilignes et circulaires).

- Choisir la machine appropriée, ce choix est principalement basé sur l'opération à réaliser, la précision requise, la taille de la pièce à façonner et notamment l'effort de coupe calculé au préalable.

I.2.1. Les opérations de fraisage

a) Le surfacage

Cette opération consiste à réaliser une surface plane. En surfacage, la largeur de la surface à usiner est le critère essentiel de choix du diamètre de fraise. La surépaisseur d'usinage doit être calculée en fonction de la profondeur de coupe maximale que permet d'atteindre la fraise envisagée.

Lors de la coupe des surfaces épaulées, le surfacage est exécuté à l'aide de fraise deux tailles (figure I.1).

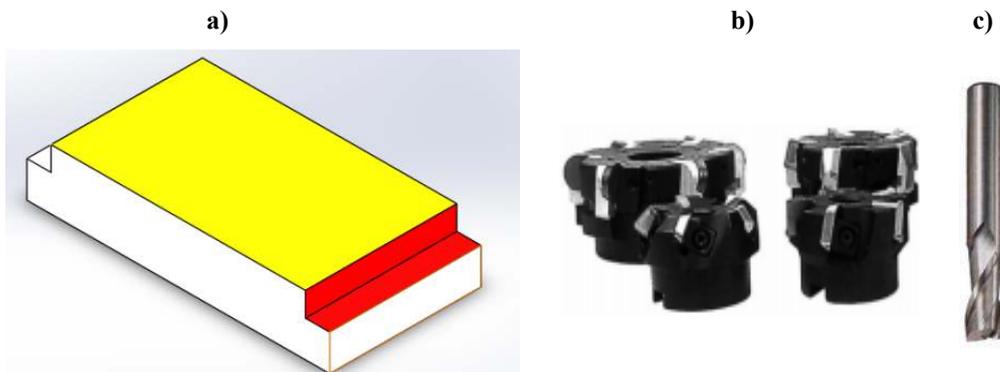


Figure I.1: surfacage. a) usinage de la surface plane (couleur jaune) à l'aide d'une fraise à surfacer. Deux plans épaulés (surfaces rouges) réalisés par une fraise deux tailles, b) Fraise à surfacer, c) fraise deux tailles.

b) Le rainurage

Cette opération consiste à réaliser une rainure à l'aide de fraise 2 tailles ainsi que d'autres fraises de profil utilisées spécifiquement à la forme de rainure à exécuter (té, vé...etc.).

On doit noter qu'en pratique les rainures doivent, de préférence, être usinées avec une fraise-disque plutôt qu'une fraise à rainurer (figure I.2).

Les rainures ont plusieurs faces, qui doivent être usinées simultanément, à cet effet, la largeur de coupe, et la profondeur de coupe, doivent être prises en considération pour le choix de la taille et du type d'outil appropriés.

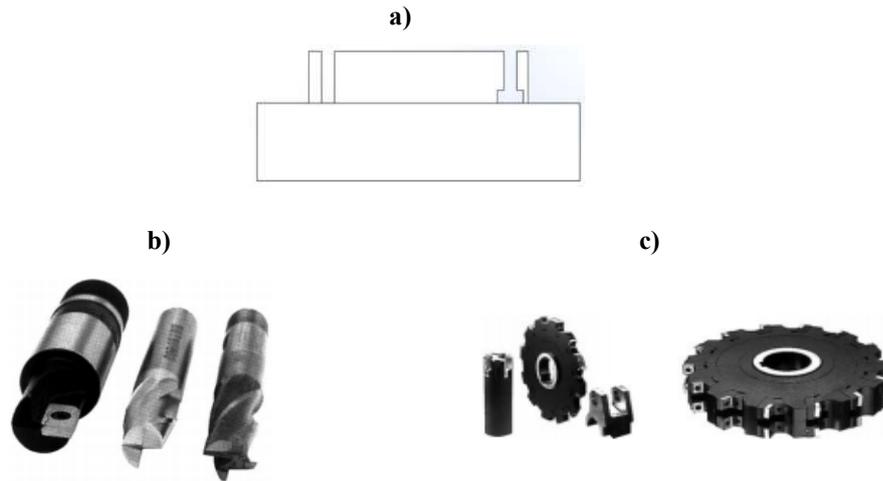


Figure I.2 : rainurage. a) exemple d'exécution d'une rainure, b) fraise à rainurer, c) fraise disque

c) Le profilage

Il s'agit d'un fraisage de forme, où le profil usiné est le résultat de la forme de la fraise utilisée et non des mouvements de coupe.

d) Le détournage de profil

C'est une opération qui consiste à finir le profil d'une pièce à l'aide d'une fraise généralement cylindrique à une taille (figure I.3).

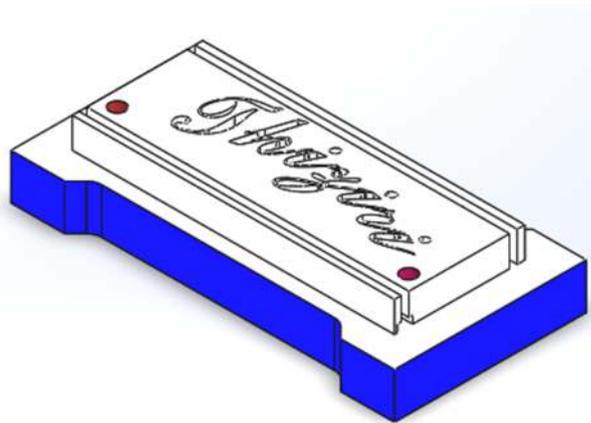


Figure I.3: détournage de profil

e) Le pochage

Cette opération consiste à réaliser une poche. Il s'agit de façonner une forme creuse dans la pièce, délimitée verticalement par des surfaces planes ou cylindriques selon le profil de la poche à façonner (figure I.4).



Figure I.4: pochage (en vert)

f) Le perçage

Cette opération consiste à percer des trous borgnes ou débouchant à l'aide de foret (figure I.5).

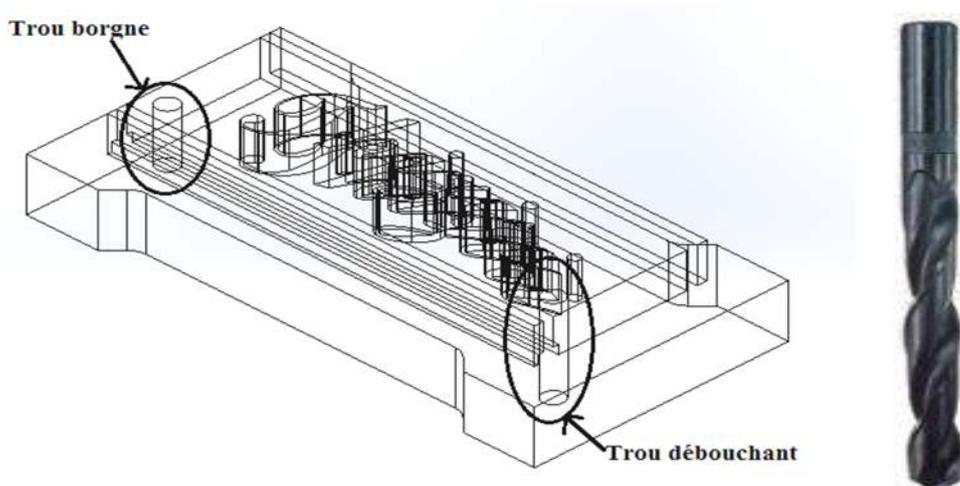


Figure I.5: perçage, a) types de trous à percer, b) foret

Aux opérations déjà citées, les opérations suivantes sont également réalisables en fraisage :

- Surfaçage incliné.
- Fraisage en queue d'aronde.
- Centrage.
- Lamage.

- Alésage.
- Taraudage.
- Tronçonnage.
- Etc.

I.2.2. Le processus de coupe des fraises

a) Fraisage en roulant

On appelle cette catégorie d'opérations fraisage de profil, la surface à réaliser est parallèle à l'axe de la fraise (figure I.6). On travaille soit en opposition soit en avalant (concordance).

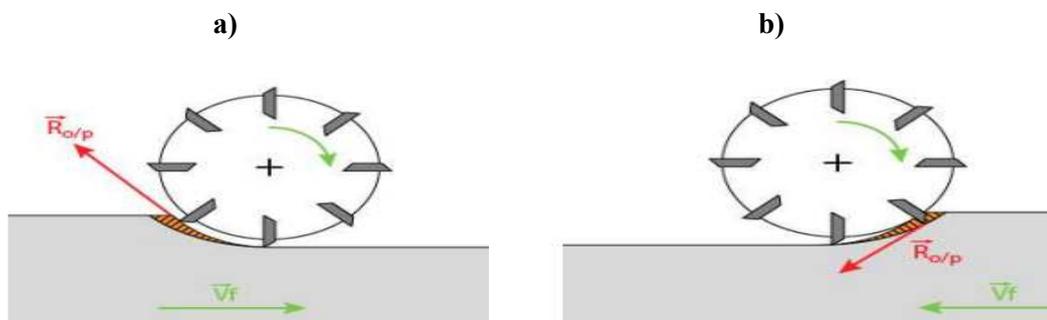


Figure I.6: fraisage en roulant. a) travail en opposition. b) travail en avalant [6]

b) Fraisage en bout

On appelle cette catégorie d'opérations fraisage de face. Pour ce type d'usinage la surface à réaliser est perpendiculaire à l'axe de la fraise (figure I.7). Comme pour le fraisage en roulant, le fraisage en bout peut être réalisé en opposition ou en avalant.

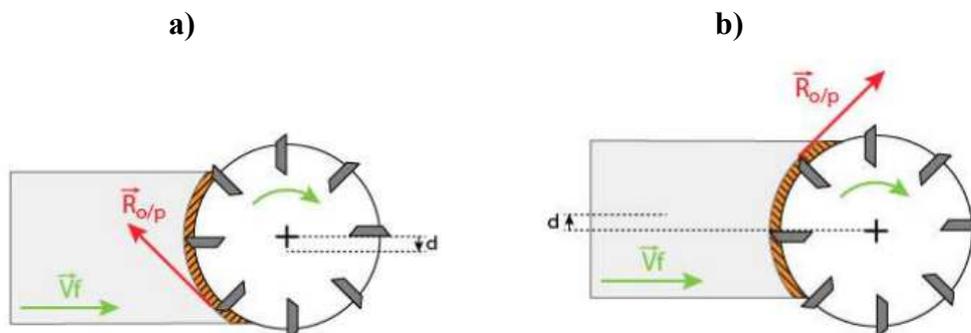


Figure I.7: fraisage en bout. a) travail en opposition. b) travail en avalant [6]

I.3. Notions sur les outils de coupe

I.3.1. Classification des outils de fraisage

Nous avons classé les fraises selon la famille (fraise cylindrique ou fraise de forme) et le type (monobloc ou porte plaquettes) tel que montre la (figure I.8). À signaler que cette classification n'intègre pas la géométrie de coupe (angle de coupe, préparation d'arête).

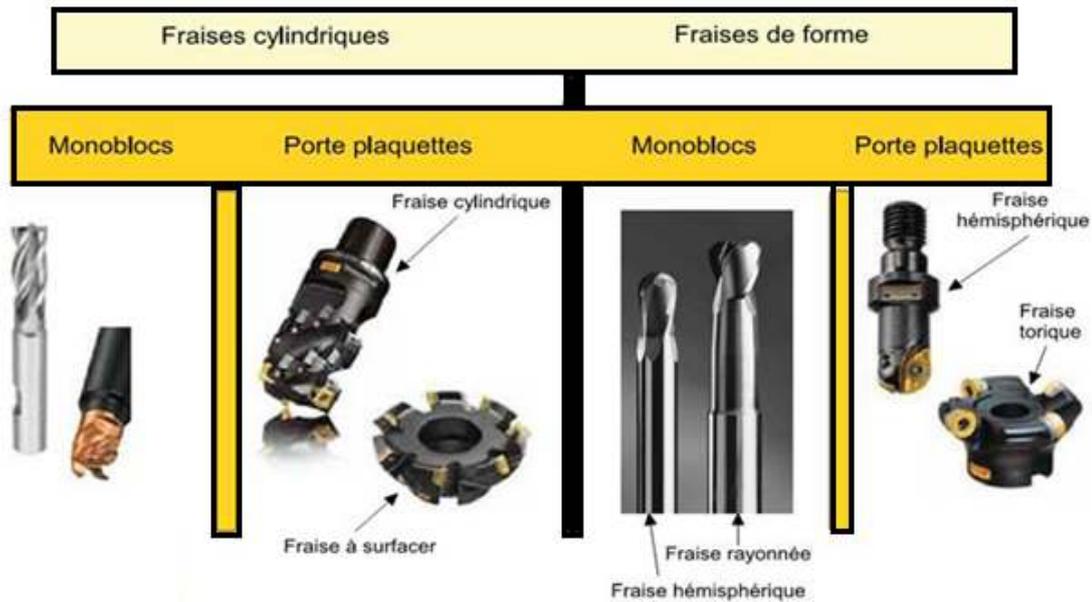


Figure I.8: familles et types d'outil possibles

Après l'analyse de bibliographique des classements des outils, nous avons choisis de classer les outils en plusieurs familles, comme suit :

- Les outils monobloc (arête continue).
- Les outils cylindriques à plaquettes rapportées.
- Les outils hémisphériques à plaquettes rapportées.

Cette classification est liée à la méthode d'obtention des efforts de coupe. Pour les outils monobloc, l'effort de coupe est toujours obtenu en intégrant des efforts élémentaires issus d'éléments discrétisés de hauteur dz , tel que schématisé dans la (figure I.8). La seule différence entre les outils cylindriques et les outils de forme est l'évolution de l'élément discrétisé. Pour les outils monobloc, les efforts de coupe sont la somme des efforts élémentaires. Pour les outils cylindriques à plaquettes rapportées, les efforts de coupe sont définis comme étant la somme des

efforts appliqués sur chaque plaquette à une position angulaire donnée. Pour les outils de forme à plaquettes rapportées, la définition de l'effort de coupe est un compromis entre les deux précédentes familles. L'arête de chaque plaquette est discrétisée en différents éléments de hauteur dz .

L'effort de coupe est alors la somme des efforts de chaque plaquette en contact avec la matière.

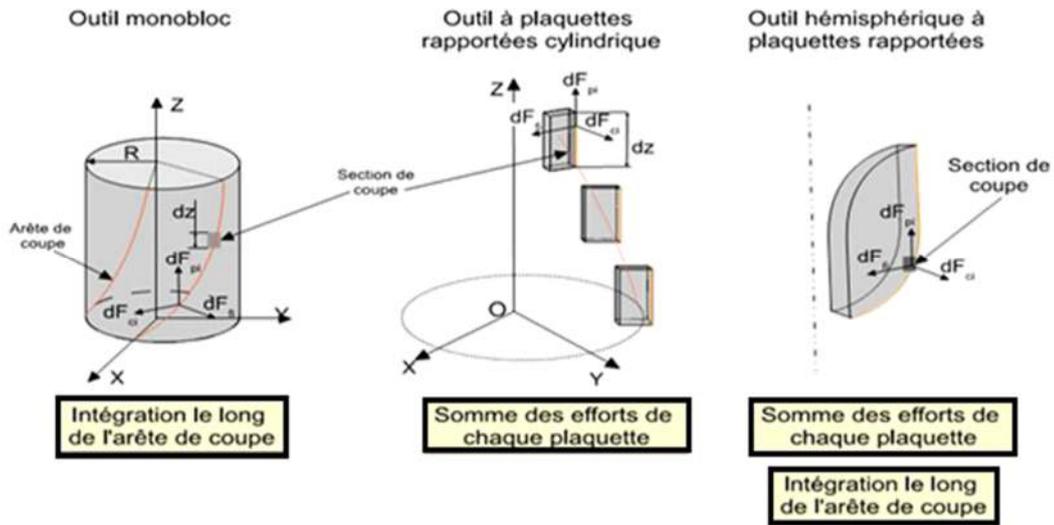


Figure I.9: classification des outils

Il existe une différence fondamentale entre les outils monobloc et les outils à plaquettes rapportées (figure I.9). La géométrie de coupe d'un outil à plaquettes rapportées résulte toujours de l'assemblage de différents éléments où nous pouvons identifier plusieurs sources d'erreurs ou de dispersions. En ce qui concerne les outils monobloc, ils sont souvent réalisés à partir d'un barreau et aucun assemblage n'est nécessaire à son obtention limitant ainsi les sources de dispersions.

1.3.2. Matériaux de l'outil

a) Acier rapides supérieurs ARS

Les outils ARS (acier rapides supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier fortement allié subissant un traitement thermique, il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forêts, où les outils possèdent un faible angle du tranchant. On les utilise avec de faibles vitesses de coupe pour éviter l'échauffement trop important et par conséquent une usure excessive,

généralement ils sont des outils monobloc. En générale la composition chimique est présentée comme suit : 0,7 à 1,6% de carbone, 12 à 20 % tungstène, 3,5 à 10% molybdène, vanadium et cobalt, leur fabrication est réalisée par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres.

b) Carbures

Les outils en carbures sont les plus utilisés grâce à leur intérêt économique. Ils sont en général utilisés sous forme de plaquettes de différentes formes. Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en aciers ordinaire, la partie active de ces outils étant réaffûtée au fur et à mesure de son usure. Il y a deux types d'outil en carbure :

- **Les carbures non revêtus** : sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène de titane ...) et de substance liante (cobalt) qui confère sa ténacité à la plaquette.
- **Les carbures revêtus** : sont des plaquettes de carbure recouvertes d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium.

c) Cermets

Cermet, un terme formé de deux syllabes : « cer » vient de céramique et « met » de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel).

Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co. Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN, et TiCN et du rapport N/(C+N) qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3.

La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques. Les cermets présentent, en outre, une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe

positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige.

d) Céramiques

Les céramiques (figure I.10) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques.

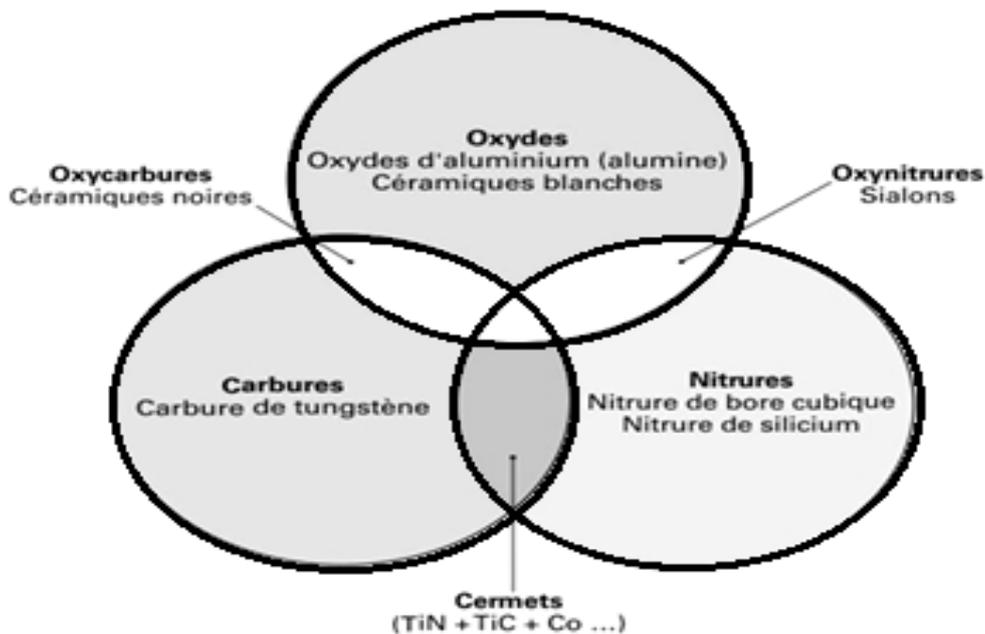


Figure I.10: céramiques [7].

La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3 . Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage des fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à 60 HRC (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation.

D'autres céramiques sont également employées. Les céramiques noires qui sont des mélanges d' Al_2O_3 et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircone (ZrO_2), sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al_2O_3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe. Le nitrure de silicium Si_3N_4 permet, lors de l'usinage de certains matériaux, des vitesses de coupe une fois et demie à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus

rigides ...) il s'emploie à sec. Les céramiques renforcées par des bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées qui leurs confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.

Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes et un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

e) Nitrure de bore cubique (CBN)

Le CBN est une matière très dure adaptée au tournage de l'acier trempé, de la fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions coupe et de l'arête de coupe. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure. Les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition.

f) Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffutage des meules, il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage).

Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650° se transforme en un morceau de graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux.

Mais, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables...etc.

I.4. Régime de coupe

Pour régler les paramètres de l'opération de fraisage, il convient en premier lieu d'établir quelques définitions s'appliquant aux caractéristiques dynamiques de l'outil de fraisage dont le diamètre (D) se déplace contre la pièce.

I.4.1. La fréquence de rotation de la broche

La fréquence de rotation de la broche N (tr/min) est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil, effectue par minute. Il s'agit là d'une valeur dépendante de la machine, calculée comme suit [8] :

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

Où :

N (tr/min) : la fréquence de rotation de la broche.

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

D : diamètre de la pièce.

I.4.2. La vitesse de coupe

La vitesse de coupe V_c ($mm.min^{-1}$) est une valeur spécifique souvent donnée par le constructeur de l'outil, relative au type de matériau et l'opération à réaliser indiquant pour sa part la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné.

La vitesse de coupe est liée à (I.1) par la formule suivante [8] :

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

I.4.3. La vitesse d'avance

La vitesse d'avance V_f ($mm.min^{-1}$) est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps calculée comme suit :

$$V_f = N \times f_z \times Z \quad (I.3)$$

Avec :

V_f ($mm.min^{-1}$) : la vitesse d'avance.

Z : nombre de dents.

fz ($mm.dent^{-1}$) : L'avance par dent.

fz ($mm.dent^{-1}$) est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil à arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes. L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc être exprimée en fonction du nombre d'arêtes de l'outil (dents) (Z) et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par dent [8].

I.4.4. La profondeur de coupe

La profondeur de coupe, axiale (ap). C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce. Autrement dit la profondeur à enlever à chaque passe [8].

I.5. État de surface

I.5.1. Généralités

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce (figure I.11).

Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosimètre 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont alors un profil (mesure 2D exemple (figure 1.12)) ou une surface reconstruite à partir de plusieurs profils (mesure 3D, exemple (figure 1.13)).

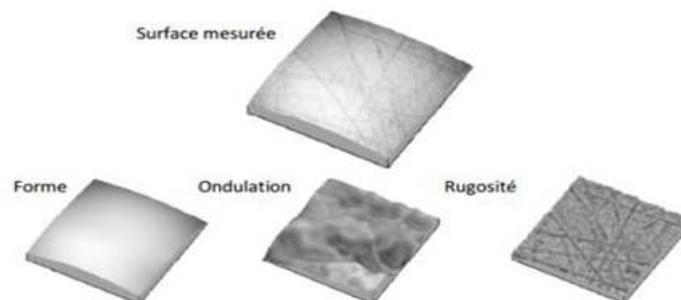


Figure I.11 : décomposition d'une surface mesurée.

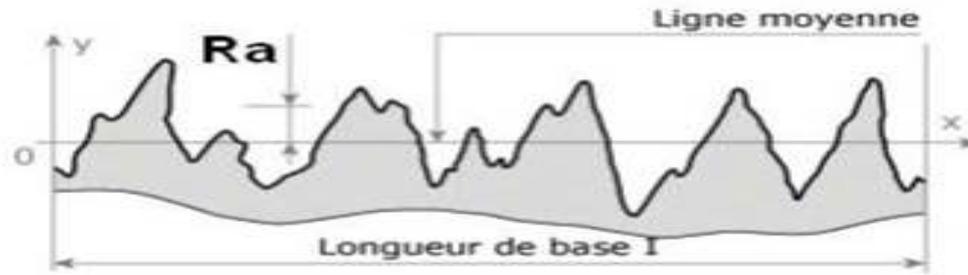


Figure I.12: représentation 2D de Ra

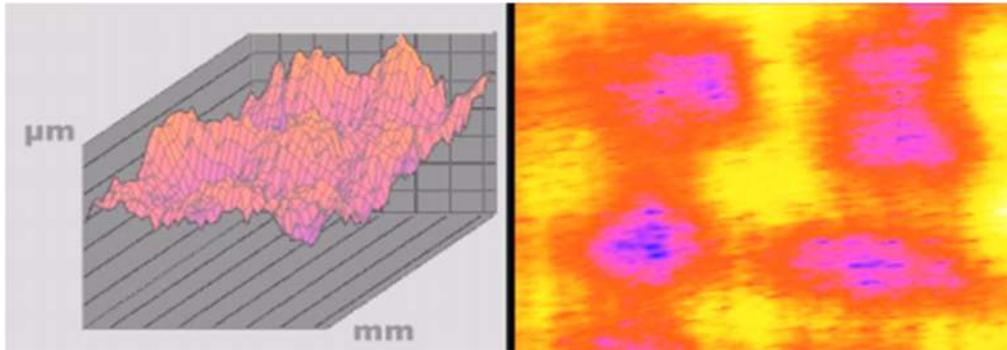


Figure I.13: relevé du rugosimétrie 3D[8]

1.5.2. Défauts de surface

Des méthodes distinctes sont utilisées en fonction du type d'irrégularité à isoler. Ainsi, un filtrage par approximation polynomiale permet de supprimer les défauts du premier ordre (figure I.14).

Le profil filtré peut être alors séparé en deux profils à l'aide d'un filtre gaussien : ondulation d'une part, rugosité d'autre part. Toutes ces étapes sont normalisées [ISO 4288 96]. Les filtres utilisés pour la caractérisation des défauts de surface sont les suivants (figure I.13) [8]:

- a) **Ordre 1** : écart de forme ou de position (ligne moyenne), il est représenté par la ligne moyenne.
- b) **Ordre 2** : ondulations périodiques, l'influence de ces défauts est la même que celle de l'ordre 1.
- c) **Ordre 3** : stries ou sillons.
- d) **Ordre 4** : arrachement de matière, l'influence de ces défauts est la même que celle de l'ordre 3.

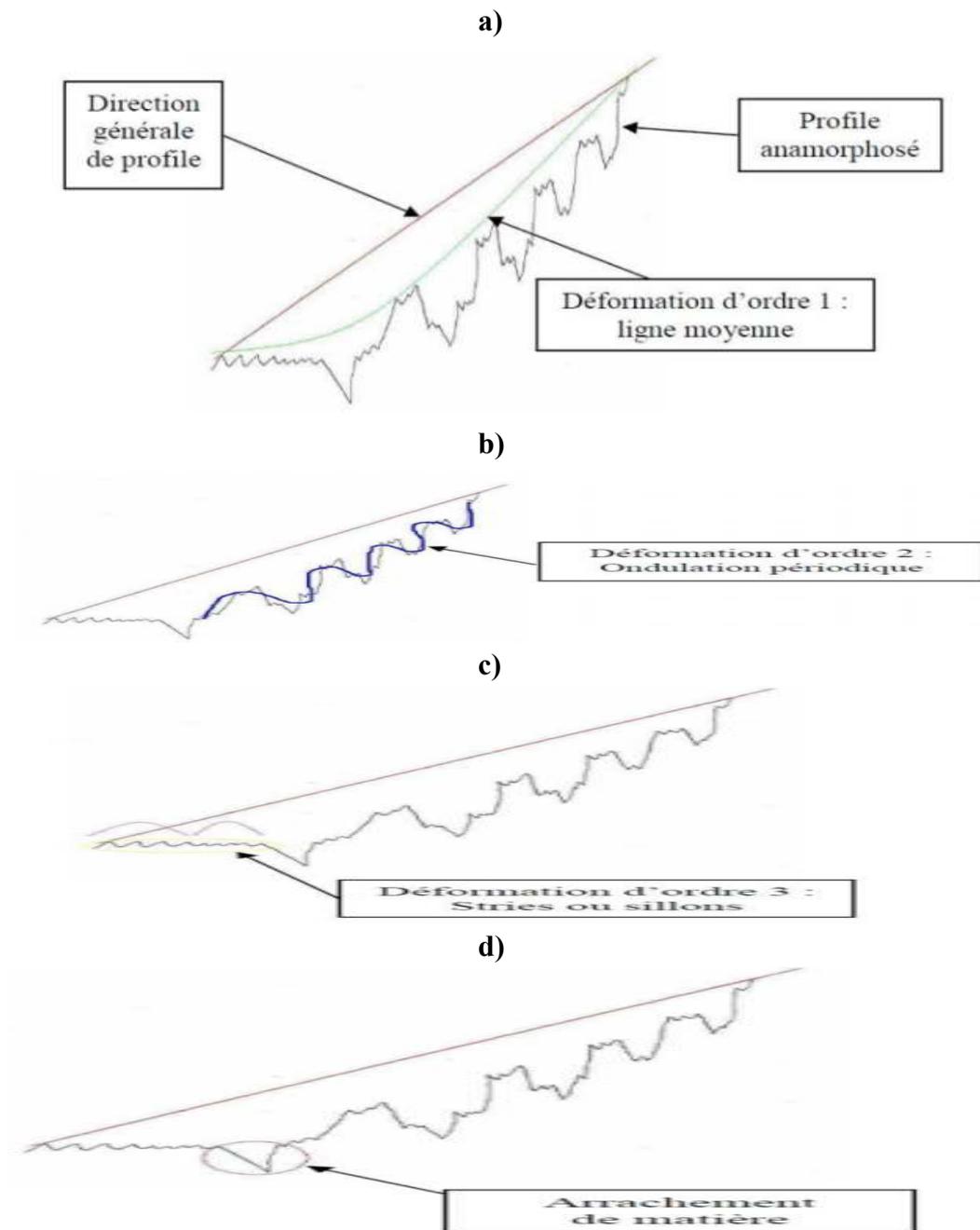


Figure I.14 : caractérisation d'état de surface. a) ordre 1, b) ordre 2, c) ordre 3, d) ordre 4

Ainsi, la fréquence de coupure du filtre est normalisée en fonction de la rugosité arithmétique du profil R_a (μm) (figure I.12). Il existe de nombreux indicateurs mais la pratique montre qu'un nombre restreint (R_a , R_t .) d'entre eux est utilisé. Le paramètre de rugosité le plus fréquemment utilisé est (R_a). Il correspond à la rugosité arithmétique et représente la moyenne arithmétique des

pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation. Son expression est la suivante :

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (I.4)$$

Avec :

Ra ($\mu.m$) : rugosité arithmétique.

N : nombre d'aspérités.

y_i : hauteur des sommets d'aspérités.

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

En fraisage et en tournage, un certain nombre de facteurs agissent particulièrement sur la rugosité. L'état de surface en tournage de finition dépend principalement de l'avance f et du rayon de bec r_ϵ . Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit tenir compte de ces influences. La rugosité théorique (figure I.15) peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal : Si le rayon de plaquette est grand par rapport à l'avance, la hauteur maximale du profil (R_t) est donnée par (I.5) :

$$R_t = \frac{Vf^2}{r_\epsilon} \quad (I.5)$$

Avec :

R_t ($\mu.m$) : rugosité théorique.

r_ϵ (mm) : rayon de bec.

Vf ($mm.min^{-1}$) : l'avance.

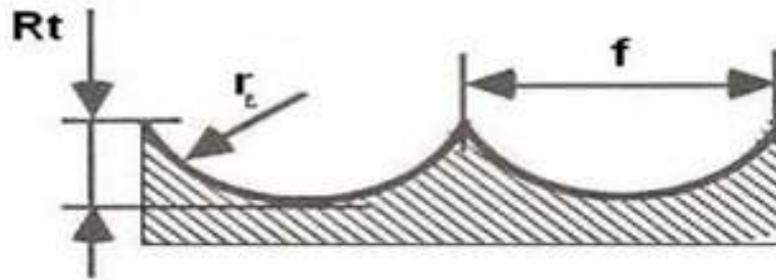


Figure I. 15 : rugosité théorique

I.6. Usinabilité [7]

L'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité plus au moins grande d'un matériau à être amené par enlèvement de copeau, à une forme et à des côtes fixées. Cette faculté étant caractérisée par la vie de l'outil, définie par les critères d'usure dans les conditions d'un type d'usinage. L'aptitude à l'usinage dépend des caractéristiques mécaniques du matériau mis en œuvre, de sa structure micrographique et des phases dispersées dans la matrice dont l'action peut être bénéfique ou néfaste. Ces caractéristiques sont déterminées, dès l'état liquide au cours de l'élaboration du métal de compositions donné, des conditions de sa solidification, de sa forme sous des efforts mécaniques et des cycles thermiques subis.

On distingue aujourd'hui les aciers de décolletage pour lesquels l'usinabilité maximale est recherchée même au détriment des caractéristiques mécaniques (pièce peu sollicitées) et les aciers à usinabilités améliorés qui doivent avoir de hautes caractéristiques après traitement (pièce fortement sollicitées). Les inclusions qui jouent un très grand rôle dans l'usinabilité peuvent être présentes involontairement ou provoqués. Leur morphologie et localisation ont une grande importance. Il semble que l'on puisse dire que toutes choses étant égales par ailleurs, la meilleure usinabilité est obtenue par la combinaison des éléments présents conduisant à la fois des niveaux de dureté et fragilité convenable. Dans le domaine des aciers spéciaux il y a lieu de distinguer les éléments formant des carbures (vanadium, tungstène...), ceux entrant en solution solide dans la matière (nickel, silicium...) et ceux présentant des caractéristiques (manganèse, chrome...).

L'aptitude d'usinage du matériau se réfère principalement à :

- L'état de surface usinée.
- L'effort spécifique de coupe.
- La durée de vie de l'outil.
- De façon générale les paramètres influant sur l'usinabilité et les conséquences requises sont résumés dans la (figure I.16):

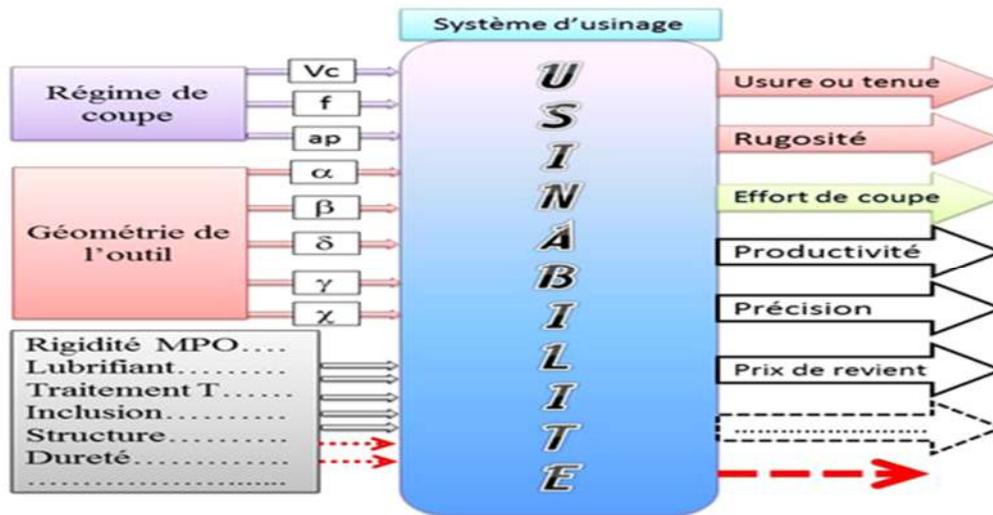


Figure I.16: paramètres influents sur l'usinabilité

I.7.État de l'art

Cette section présente un recueil des travaux qui ont porté sur l'optimisation des conditions de coupe lors du processus de fraisage. Les principales méthodes utilisées sont l'analyse de Taguchi, celle de surface de réponse et l'algorithme bio-inspirés à base d'apprentissage tels que les réseaux de neurones artificiels. En raison du grand nombre de travaux réalisés le choix de ces travaux a été fait selon leurs pertinences, tout en respectant les objectifs de notre projet de fin d'étude.

I.7.1. Modélisation et optimisation du fraisage des aciers

L'étude expérimentale menée par [9] décrite ici, est dédiée à l'optimisation des paramètres de coupe et l'analyse de la rugosité de surface (R_a). Pour cela la méthode de surface de réponse a été utilisée lors de l'opération de fraisage à sec de l'acier C45 (XC48), en utilisant des outils de coupe en carbure métallique. Les résultats obtenus montrent que l'avance est le facteur qui a la plus grande influence sur l'état de surface.

Les expériences et les mesures ont été réalisées et assurées en utilisant :
Machine-outil : fraiseuse à commande numérique (TNC 355 de HEIDENHAIN) de marque DX, d'une puissance de 12,2 kW, d'une vitesse maximale de 2000 tr/min et avec rotation de la table de 360°.

Matière usinée : acier non allié C45 (XC48).

Outils de coupe : carbure P25.

Mesure de la rugosité : rugosimètre TR100.

Du point de vue technologique, l'appareil TR100 se base sur un micro-capteur en forme de diamant. Ce dernier se déplace sur un étendu de 6 mm, avec une vitesse de 1 mm.s^{-1} sur la surface du matériau à mesurer. De plus, les mesures de rugosité prises dans le cadre de cette étude sont Ra.

Dimensions des échantillons : 150 x 100 x 100 mm (figure I.17).

Nombre d'essais : 8.



Figure I.17: protocole expérimental et appareillage [9]

Une analyse statistique des résultats obtenus dans le but de mieux visualiser l'influence des conditions de coupe sur la rugosité Ra. À cet effet, cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification de 5 % et pour un niveau de confiance de 95 %. D'après les résultats obtenus, le facteur de l'avance a une grande influence sur la rugosité de surface Ra avec une contribution de 46,17 %.

Ensuite vient la vitesse de coupe avec une contribution de 28,07 %, et en dernier lieu l'interaction $fz \times ap$ qui a une contribution de 9,80 %.

Ce résultat est spectaculairement apparent en (figure I.18), où la pente de variation de fz est d'un angle, et sa variation de 0.10 à 0.4 (mm dent⁻¹) conduis à une variation de l'état de surface de 0.5 à 2.25 (μm).

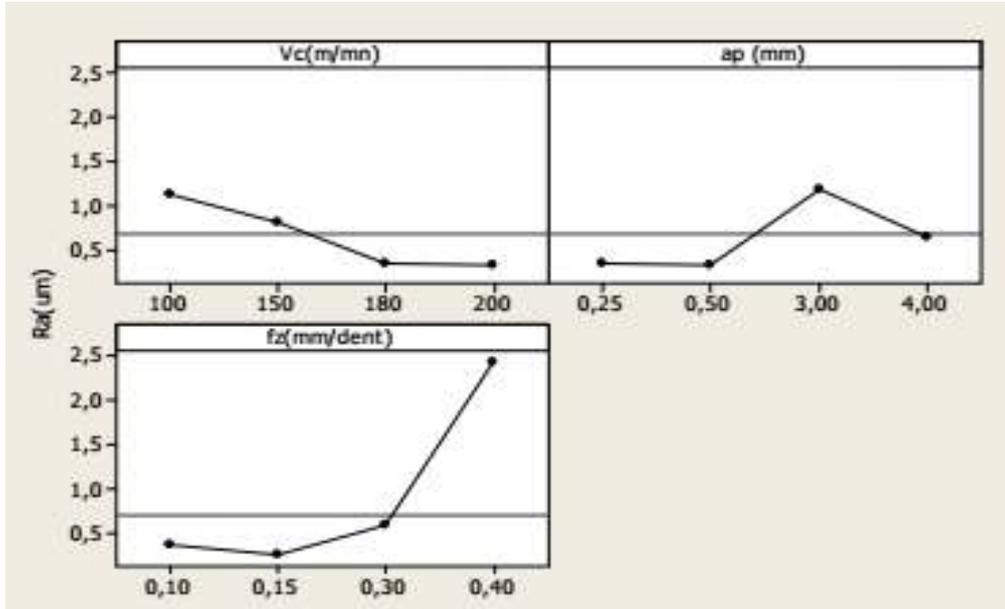


Figure I.18: les effets moyens de Ra [9]

Le modèle de régression linéaire obtenu depuis l'expérience réalisée est comme suit :

$$Ra(\mu\text{m}) = -0.3028 + 0.0087Vc - 2.3169ap - 0.5038fz + 0.0024Vc \times ap - 0.0233Vc \times fz + 7.6490ap \times fz \quad (\text{I.6})$$

Avec une corrélation $R^2 = 98\%$.

La méthodologie de surface de réponse (MSR) permet d'optimiser une ou plusieurs variables afin de déterminer la relation entre les paramètres du processus d'usinage (Vc , f , ap) avec l'état de surface souhaitée (Ra), dans le but de découvrir l'effet de ces paramètres indépendants sur les réponses considérées.

Dans cette étude, les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) de la rugosité Ra (figure I.19), donnant une désirabilité de 1 avec une vitesse de coupe est égale à 180 m/min, une avance : 0,10 mm/dent et la profondeur de passe : 0,25 mm, la valeur minimale de la rugosité est : $Ra = 0,36 \mu\text{m}$ [9].

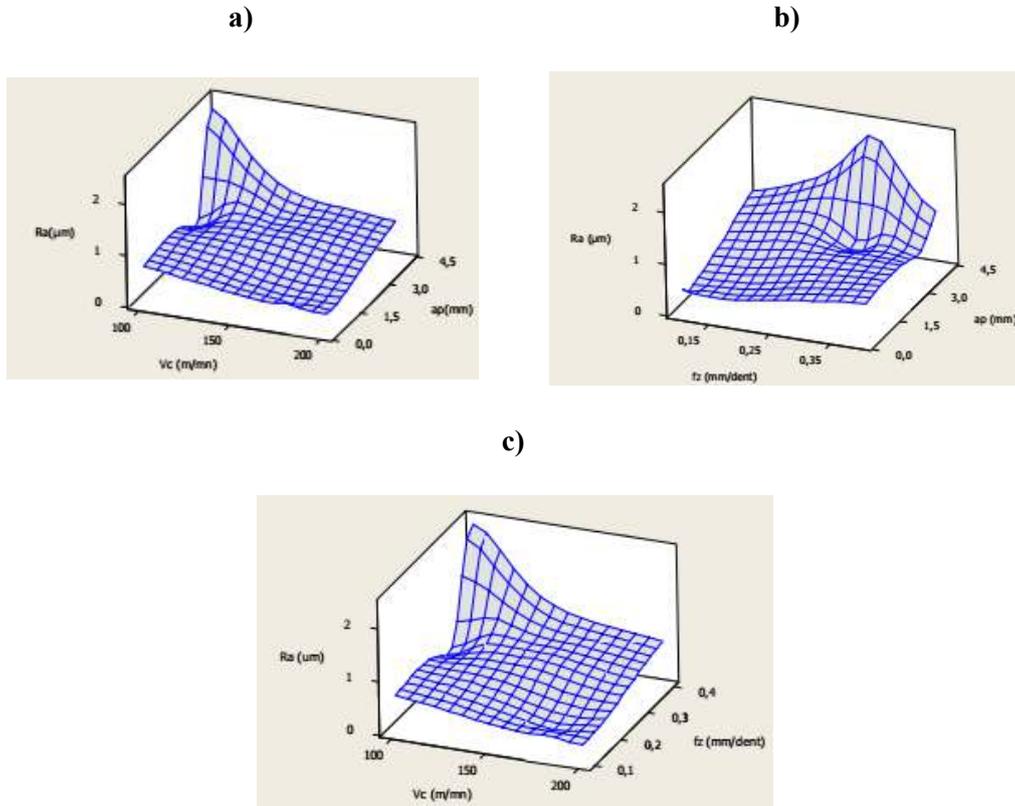


Figure I.19: surface de réponse, a) Ra (ap , Vc), b) Ra (fz , ap), c) Ra (fz , Vc) [9]

Dans les travaux présentés dans [10], les auteurs ont proposé une caractérisation du processus de fraisage de l'acier AISI 52100 (l'acier pour roulements à billes). Les expériences ont été planifiées selon un plan de Taguchi L27, en utilisant un outil avec des plaquettes en carbure à revêtement multicouche de type (TiN, TiCN, TiAlN). Dans le but d'identifier et mieux comprendre l'effet de chaque paramètre de coupe sur l'état de surface obtenu, et la durée de vie de l'outil de coupe, une analyse de variance (ANOVA) a été menée.

Ensuite, des analyses de régression ont menées à la modélisation multifactorielle qui prend en considération l'interaction entre les différents facteurs indépendants du régime de coupe. Ce qui permet la prédiction de la rugosité de surface et l'usure de l'outil lors du processus de fraisage de l'acier AISI 52100.

Enfin, La méthode de la surface de réponse RSM avec une approche de désirabilité a été utilisée afin d'optimiser le régime de coupe ainsi que l'effet de l'interaction entre les paramètres les plus importants et ressortir avec une bonne désirabilité.

Les expériences et les mesures ont été réalisées et assurées en utilisant

Machine-outil : fraiseuse CNC verticale Emco MILL E350.

Matière usinée : acier AISI 52100.

Outils de coupe: un outil avec des plaquettes en carbure à revêtement multicouche de type (TiN, TiCN, TiAlN) (figure I.20).

Mesure de l'usure de l'outil : La mesure de l'évolution de l'usure de l'outil (usure au niveau de la face de dépouille) a été suivie par l'observation incrémentale du temps de coupe à l'aide d'un microscope optique Motic, montré dans la (figure I.20), jusqu'à ce que sa valeur critique de VB max : 0.3 mm soit atteinte. La valeur de rugosité correspondante Ra est enregistrée à l'aide d'un test Mitutoyo Surf Test SJ201.7 (figure I.20).

Dimensions des échantillons : 220 x 80 x 80 mm (figure I.20).

Nombre d'essais : 27.

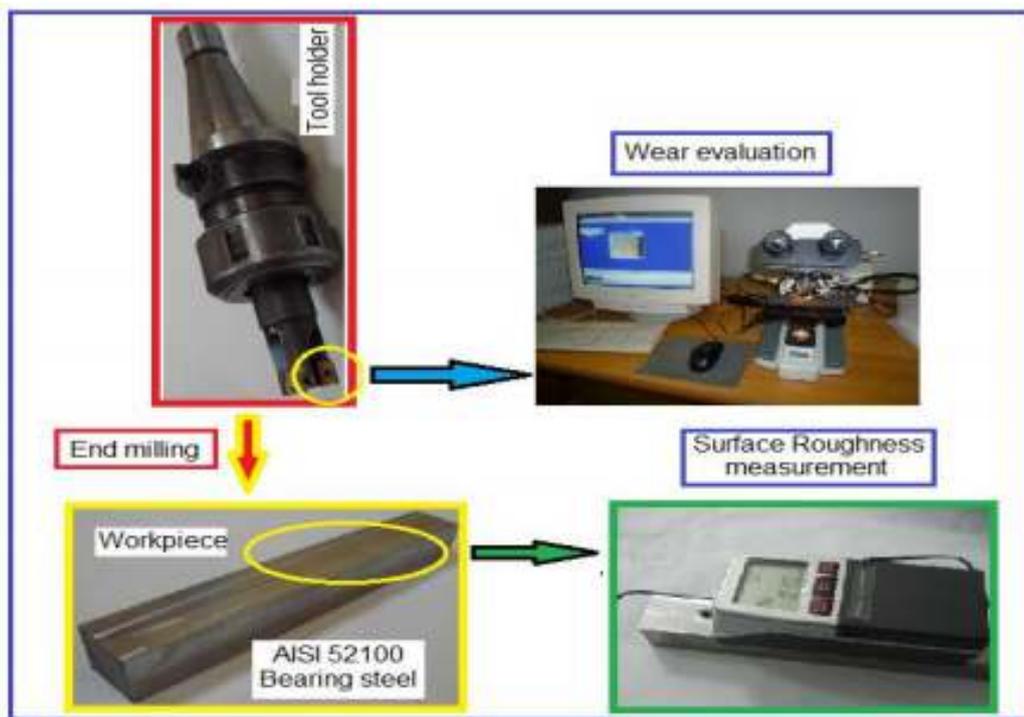


Figure I.20: protocole expérimental et appareillage [10]

L'analyse de la variance a été effectuée pour un niveau de signification de $\alpha=0,05$, et un niveau de 95%. Les facteurs ayant une valeur P inférieure à 0,05 sont considérés comme ayant une contribution statistiquement significative à la performance de la mesure.

L'analyse des variances a confirmé les résultats obtenus par la méthode de Taguchi. Il s'est avéré que l'avance par dent f_z est le facteur à effet le plus

significatif sur la rugosité Ra lors du processus de fraisage tel que confirme le graphe des effets moyens (figure I.21).

La contribution en pourcentage de chaque variable sur la rugosité de surface Ra est fz : 65% puis Vc : 17% et enfin ap : 1,5%. Le modèle linéaire simplifié après élimination des facteurs non significatif est donnée par (I.8) :

$$Ra(\mu m) = 0.3039 + 0.000579Vc + 6.042fz - 0.00554Vc \times fz \quad (I.7)$$

L'analyse de la variance a révélé que la contribution la plus largement dominante pour la durée de vie de l'outil est la vitesse de coupe avec une contribution de 94% devant fz : 2,7% et ap : 0,58%. En outre, elle a révélé que l'interaction (Vc-fz) a un effet significatif sur la durée de vie de l'outil.

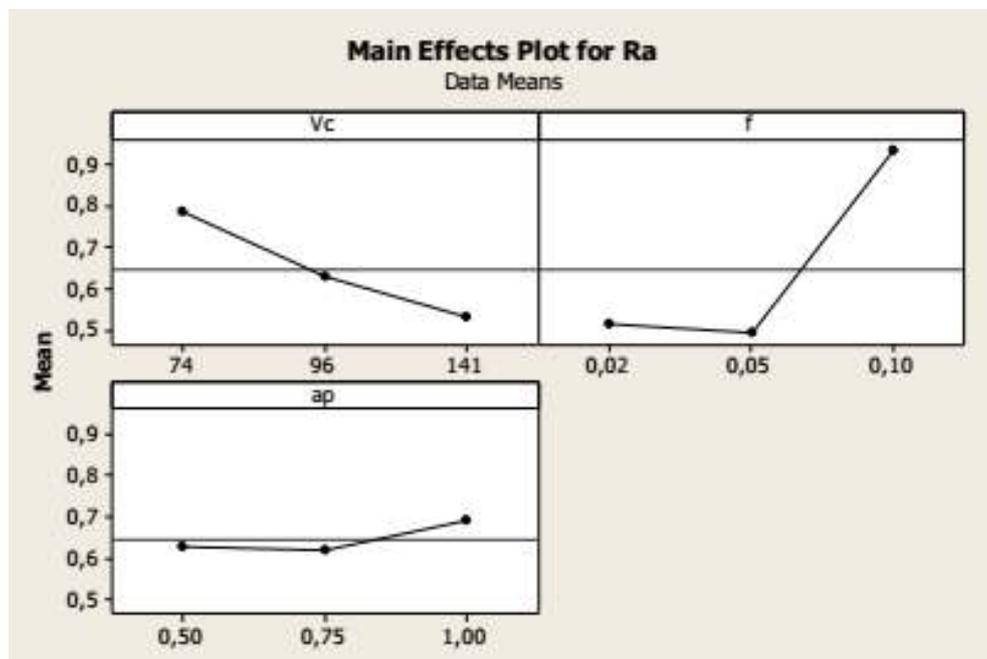


Figure I.21: les effets moyens de Ra [10]

Quant à l'optimisation par RSM (figure I.22), le résultat optimal retrouvé est Vc : 74, ap : 0.02 et fz : 0.5. Ce régime donne une Ra : 0.552 et T : 352.475 avec une désirabilité de 0.786.

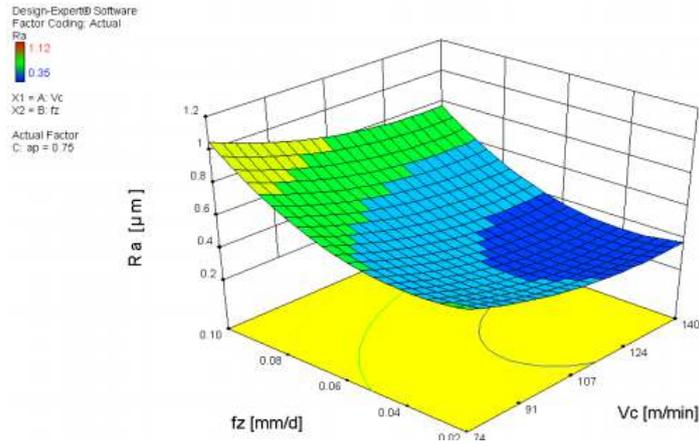


Figure I.22: surface de réponse Ra (Vc, fz)[10]

Un fraisage de face en utilisant le LN₂ est proposé dans [11]. L'étude avait comme objectif l'obtention de pièces fraisées avec une excellente résistance à l'usure. Le taux d'usure dépend du choix approprié de la vitesse, de l'avance et de la profondeur de coupe. Ce travail illustre l'utilisation de stratégies conventionnelles et non conventionnelles pour optimiser les facteurs de fraisage des échantillons en acier inoxydable traités cryogéniquement lors du surfacage, afin d'obtenir l'usure souhaitée.

Les expériences et les mesures ont été réalisées et assurées en utilisant:
Machine-outil : fraiseuse à commande numérique (CNC Spark DTC-12), (figure I.23).

Matière usinée : acier inoxydable AISI 316 (SS316).

Outils de coupe : SDMT 1204PDR-MH-TN450.

Dimensions des échantillons : 100 x 940 x 930 mm.

Nombre d'essais : 31.



Figure I.23: protocole expérimental et appareillage[11]

Les résultats de la régression non linéaire et de l'optimisation des essais particuliers (PSO) sont comparés. La PSO s'avère plus performante que l'approche de la fonction de désirabilité. L'un des particularités de ce travail c'est qu'il a met en évidence l'effet et les résultats du LN2 sur l'usure.

Le but des travaux présentés par [12] est d'optimiser l'énergie consommée CE et Ra lors du processus de fraisage à sec de l'acier AISI H13. L'énergie totale consommée dans la machine-outil peut être divisée en quatre composantes principales, dont l'énergie de démarrage, l'énergie de coupe à l'air, l'énergie de l'étape de coupe et l'énergie du changement d'outil.

Le protocole expérimental et appareillage utilisé dans cette étude est :

Machine-outil : Spinner U620.

Matière usinée : acier non allié C45 (XC48).

Outils de coupe : d=12 mm (aucune information sur la nuance de la matière n'est disponible).

Mesure d'énergie : analyseur d'énergie accompagné d'un système d'acquisition d'information assisté par ordinateur KEW6305 (figure I.24).

Mesure de la rugosité : elle a été prise suivant la direction de coupe en utilisant un rugosimètre Mitutoyo SJ-301 (figure I.24).

Dimensions des échantillons : 350×150 ×25 mm.

Nombre d'essais : 15.



(a) Milling setting



(b) Measuring power



(c) Measuring roughness

Figure I.24: protocole expérimental et appareillage [12]

Les expériences ont été planifiées en utilisant la méthodologie de Box-Behnken. Les relations entre les entrées et les sorties ont été établies à l'aide des modèles de surface de réponse (RSM). L'approche de désirabilité (DA) a été utilisée pour obtenir les valeurs optimales.

L'analyse statistique en utilisant le coefficient de corrélation R^2 , qui présente la proximité des données par rapport à la ligne de régression unitaire. D'où une valeur de corrélation R^2 égale à 1 révèle la corrélation parfaite les valeurs R^2 de l'énergie de coupe et de Ra sont respectivement de 0,9890 et 0,9938, ce qui indique les bons accords entre les valeurs expérimentales et prédictives, voir (figure I.25).

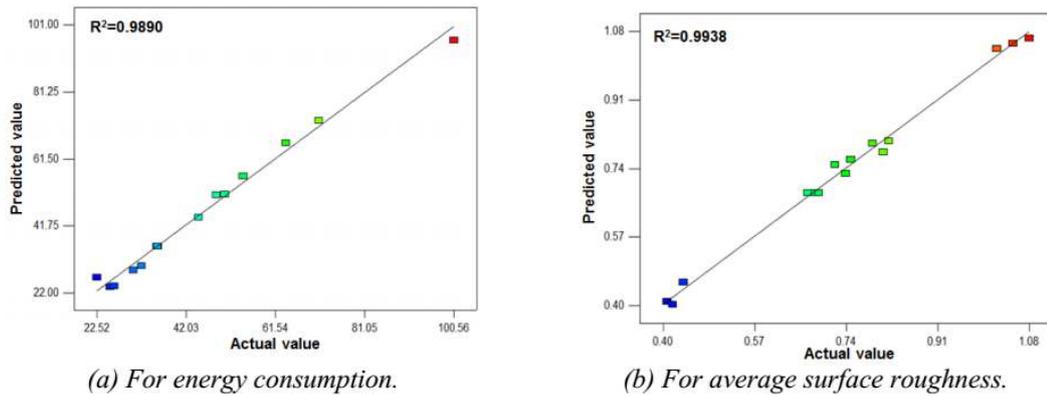


Figure I.25: corrélation des modèles obtenus [12]

En outre, les résultats de l'analyse de variance ANOVA pour CE. Les facteurs ayant une valeur P inférieure à 0,05 sont significatifs. Par conséquent, les termes S, a, f, S x f, S^2 et f^2 sont significatifs. Le facteur avec effet plus significatif est la vitesse de rotation S en raison de la contribution la plus élevée de 48,35 %, suivi de l'avance par dent f 32,72 % et de la vitesse d'avance à 3,78 %, respectivement. L'effet de S^2 et f^2 sont de 6,99 % et 4,00 %, respectivement. Le modèle linéaire obtenu depuis l'expérience réalisée est :

$$Ra(\mu m) = 0.91972 - 0.0018 S - 0.31422 a - 0.88889 f + 0.00028 S \times f - 2.5 a \times f + 0.65278 a^2 + 48.61111 f^2 \quad (I.8)$$

Le régime optimal défini lors de ce travail en utilisant la méthode des surfaces de réponse (figure I.26) s'est avéré ; une fréquence de rotation de la broche est égale à 4500tr/min, une avance : 0,40 mm/min et la vitesse d'avance : 0,007 mm/dent, la valeur minimale de la rugosité est : $Ra = 0,41 \mu m$, et $CE=23.69$ kJ.

Ce qui réduit remarquablement CE et Ra d'environ 33,75% et 40,58%, respectivement, par rapport au régime de coupe initiale.

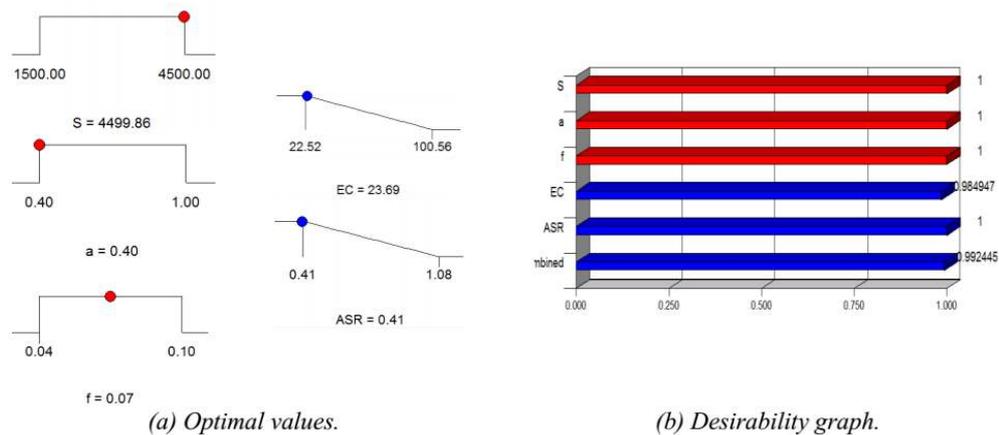


Figure I.26 : résultat d'optimisation [12]

Une optimisation des paramètres de coupe lors de l'opération de surfacage sur une fraiseuse CNC en utilisant un réseau de neurones artificiels (ANN) avec la méthode Edgeworth-Pareto est présentée dans [13]. L'ensemble des paramètres est ajusté pour améliorer la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière en volume unitaire minimal, ce qui permet de réduire les coûts de production et d'améliorer la précision. Un algorithme ANN est conçu sous MATLAB, ayant la structure suivante 3-10-1, l'algorithme proposé dans le cadre de cette étude prédit la rugosité Ra de la surface de la pièce à usiner avec une précision de $\pm 5,78\%$. Une frontière de Pareto sans précédent pour Ra et Tm a été obtenue pour la pièce finie en acier de qualité H en utilisant un algorithme ANN qui a ensuite été utilisé pour déterminer les conditions de coupe optimisées. Selon l'objectif de production, l'une ou l'autre des deux séries de conditions d'usinage optimales peut être utilisée : la première fixe une puissance de coupe minimale, tandis que l'autre fixe un Tm maximal avec une légère augmentation (inférieure à 5%) des coûts de fraisage.

La procédure expérimentale envisagée (figure I.27) consiste en :

Machine-outil : fraiseuse verticale

Matière usinée : acier de qualité H.

Outils de coupe : outils de coupe avec plaquettes en carbure, Sandvik R245-12 T3MPM4240 revêtues ($d=63$, $z=5$). Le porte-outil utilisé est Sandvik R245-063Q22-12M.

Mesure de la rugosité : rugosimètre TESA Rugosurf 90-G.

Dimensions des échantillons : 40 x 100 x 60 mm.

Nombre d'essais : 25.

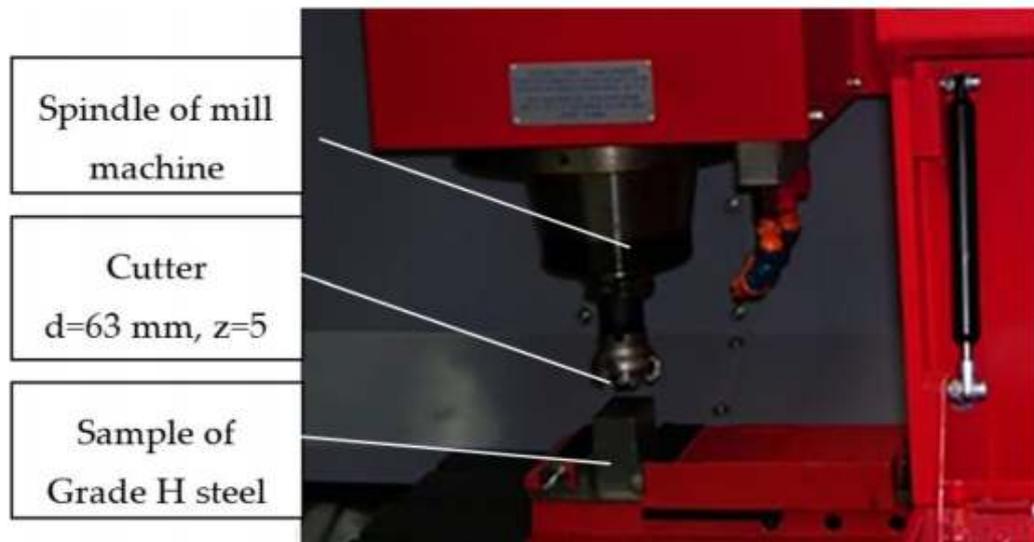


Figure I.27: protocole expérimental [13]

Une approche à base de données a été utilisée, dans un premier lieu, les données expérimentales ont été collectées, ensuite un modèle ANN a été construit afin de déterminer le régime optimal. Cette approche d'optimisation multi-objective est réalisée comme suit :

Étape 1 : Définition du domaine de travail qui représente le domaine de validité du modèle pour le matériau et l'outil choisi. Le domaine fixé est $N : [400 \ 800]$, $V_f : [50 \ 150]$ et $a_f : [0.5 \ 1.5]$.

Étape 2 : Réalisation de l'approximation de R_a et T_m en utilisant le modèle ANN dont la structure est 3-10-1.

Étape 3 : Identification de la courbe de Pareto : décisions optimales et estimations.

Étape 4 : Détermination des estimations de Pareto non dominées.

Étape 5 : Établissement de l'ensemble de points de Pareto qui en résulte en une décision optimale.

Les conditions de coupe optimales obtenues en utilisant l'approche présentée dans [13] sont : une fréquence de rotation de la broche $N : 600$ tr/min, une profondeur de passe $a_p : 1.5$ mm et la vitesse d'avance $V_f : 150$ mm/min, la valeur minimale de la rugosité est : $R_a = 0,142 \ \mu\text{m}$ tel que montré par la (figure I.28).

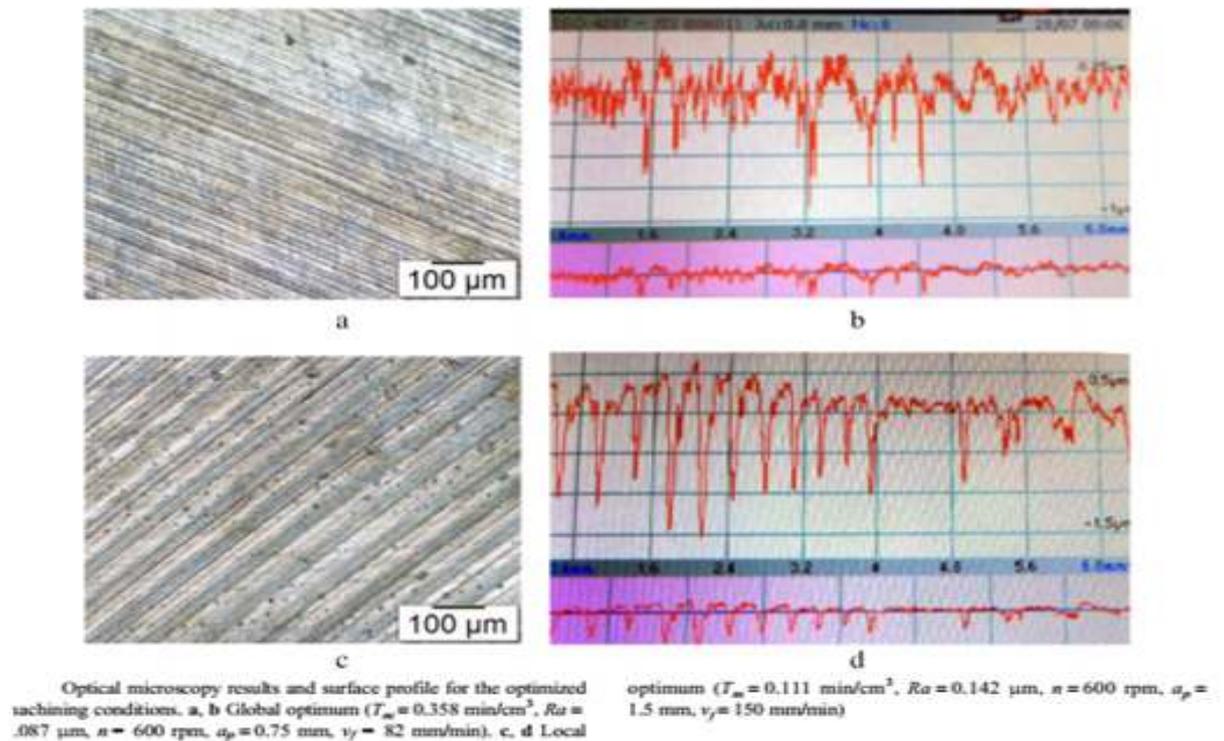


Figure I.28: profilogramme de rugosité de surface obtenu par le régime optimal [13]

I.7.2. Modélisation et optimisation du fraisage des alliages d'aluminium

Dans cet article [14], décrit ici, l'optimisation du régime de coupe lors de l'opération de surfacage avec lubrification a été étudiée afin de minimiser la rugosité de surface et de maximiser le taux d'enlèvement de matière.

Les expériences et les mesures ont été réalisées et assurées en utilisant

Machine-outil : Centre d'usinage Hurco 5HP.

Matière usinée : aluminium 6061-T6.

Outils de coupe : ($\phi = 60 \text{ mm}$, 4 cannelures) avec des plaquettes de grade 1C28M40.

Type de lubrifiant : Sunoco Sunicut 151

Nombre d'essais : 15.

Les effets des paramètres sélectionnés sur les variables du processus (c'est-à-dire la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière) ont été étudiés à l'aide de la méthodologie de la surface de réponse (RSM) et des réseaux neuronaux artificiels. Les paramètres d'usinage optimaux ont été réalisés à l'aide de la RSM et comparés aux résultats expérimentaux. Les résultats obtenus

indiquent la capacité appropriée des méthodes RSM et ANN pour la modélisation et l'optimisation des processus d'usinage.

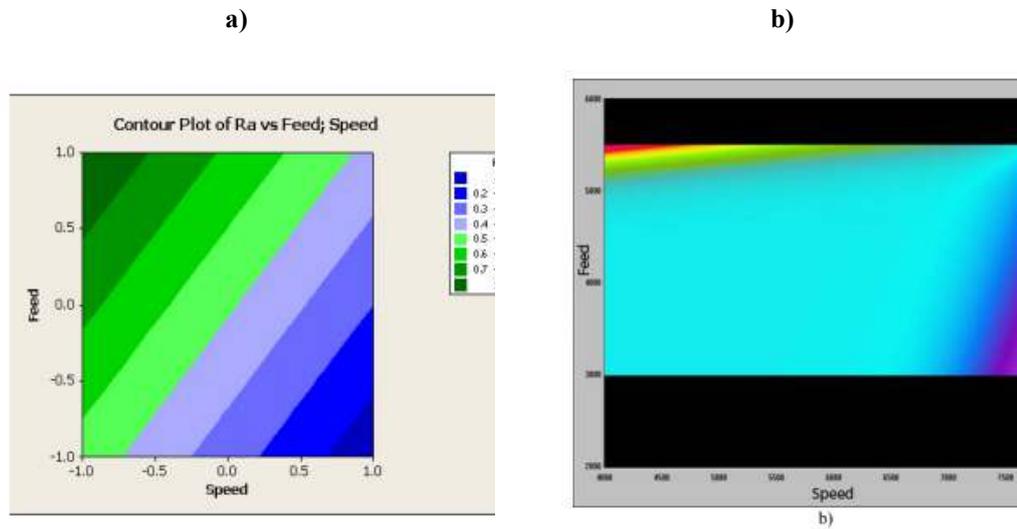


Figure I.29: effets de l'avance et de la vitesse sur le Ra (ébauche). a) via RSM, b) via ANN [14]

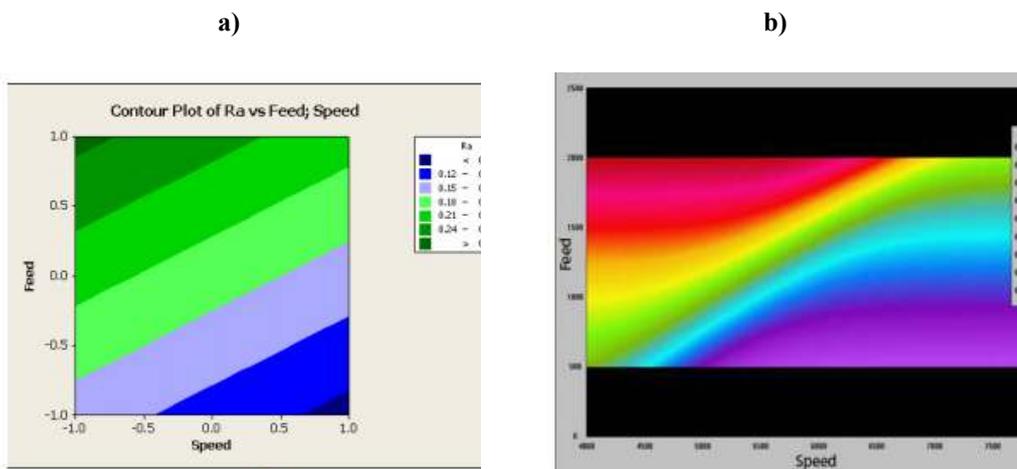


Figure I.30: effets de l'avance et de la vitesse sur le Ra (ébauche). a) via RSM, b) via ANN [14]

L'analyse statistique a montré que le modèle de ANN donne une meilleure corrélation avec les données expérimentales, avec une R^2 de (Ra) égale à 95.46% et 98.74% pour l'ébauchage et finition respectivement. Tandis qu'elle ne dépasse pas 73% en utilisant les RSM pour les deux sous phases (ébauche et finition). Quant au taux d'enlèvement de matière les valeurs de corrélation sont si proches (au voisinage de 99%), avec une légère supériorité d'ANN par rapport à RSM.

Il a été remarqué que le meilleur état de surface est obtenu pour la plus grande vitesse et la plus petite avance pour l'ébauchage et la finition tel que montre les (figure I.29-30).

I.7.3. Modélisation et optimisation du fraisage des alliages de Titanium

Une approche à base de réseau de neurones est avancée par [15]. Cette méthode a pour but la détermination des paramètres de coupe optimaux lors du fraisage du matériau Ti- 6Al-4V. Les données requises pour la modélisation ont été collectées depuis les expériences menées sur le matériau mentionné. Dans le cadre des mêmes travaux une optimisation relativement récente intitulé, le système immunitaire artificiel est ainsi proposé afin de déterminer les meilleures conditions de coupe résultant en une rugosité de surface minimale.

Les expériences et les mesures ont été réalisées et assurées en utilisant:

Machine-outil : Fraiseuse FB4MB.

Matière usinée : alliage de titanium Ti- 6Al-4V.

Outils de coupe : R390-1806 12M-PM (40 mm de diamètre, 6 cannelures) de SANDVIK.

Mesure de la rugosité de surface : rugosimètre Taylor Hobson Surftronic + 3 (figure I.31).

Dimensions des échantillons : 300 x 80 x120 mm.

Nombre d'essais : plan factoriel avec 3 facteurs et 5 niveaux 3^5 .



Figure I.31: rugosimètre Taylor Hobson Surftronic +3 [15]

Les résultats ont montré que la vitesse d'avance doit être la plus faible possible afin d'aboutir au meilleur état de surface. Il a également été observé que les vitesses de coupe et les profondeurs de passe avaient tendance à se rapprocher de leurs limites supérieures afin d'avoir un meilleur état de surface. Dans cette étude, le régime optimal obtenu par la méthode d'intelligence artificielle proposée est : une vitesse de coupe V_c : 112 m/min, une avance f_z : 0,015 mm/dent et une

profondeur de passe : 1.27 mm. La valeur minimale de la rugosité obtenue est R_a : 0,68 μm , contre 0.7 μm collectée depuis l'expérience, ce qui signifie une erreur de 2.85%.

I.7.4. Modélisation et optimisation du fraisage des alliages de Nickel

Cette étude [16], s'est consacré à l'optimisation des paramètres coupe lors de l'opération de fraisage en bout pour le superalliage à base de Nickel avec des critères de réponse multiple basés sur le tableau orthogonal de Taguchi. Neuf séries expérimentales basées sur un réseau orthogonal L9 de la méthode de Taguchi ont été réalisées.

La (figure I.32) montre le protocole expérimental et appareillage utilisés et qui consistent en :

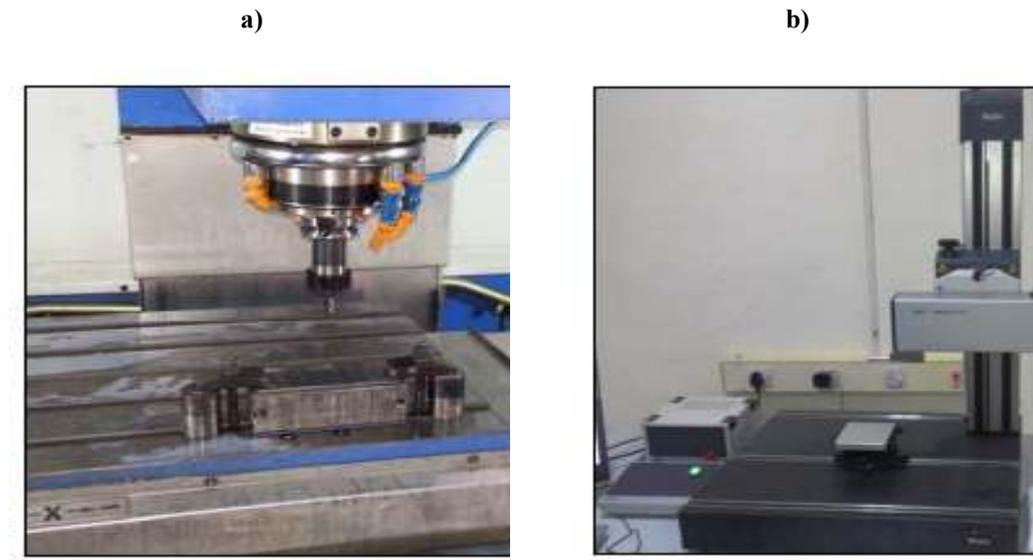


Figure I.32: protocole expérimental, a) Installation expérimentale pour l'opération de fraisage en bout, b) Installation pour la mesure de la rugosité de surface [16]

Machine-outil : Fraiseuse CNC cinq axes à grande vitesse Hass-US. Cette machine de puissance 25 kW , d'une vitesse de broche maximale de

12000 (tr. min^{-1}) et d'une vitesse d'avance de 10 m/min.

Matière usinée : super alliage Inconel 718.

Outils de coupe : carbure de tungstène non revêtu (10 mm de diamètre, 4 cannelures) de SANDVIK.

Mesure de la rugosité :/.

Dimensions des échantillons : 300 x 52 x 6 mm.

Nombre d'essais : 9.

La vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe ont été optimisées en tenant compte de multiples caractéristiques de performance, notamment la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de copeau. Une note relationnelle grise obtenue à partir de l'analyse relationnelle grise est utilisée pour résoudre le processus de fraisage en bout avec les multiples caractéristiques de performance. En outre, l'analyse de variance (ANOVA) est également appliquée pour identifier le facteur dont l'effet est plus significatif sur l'état de surface, qui s'est avéré la vitesse de coupe avec un taux de 56.88%, ensuite la vitesse d'avance et la profondeur de passe avec 34.65% et 6.95% respectivement.

D'après le graphe des effets moyens montré dans la (figure I.33), l'augmentation de la vitesse de coupe engendre une détérioration de l'état de surface tandis que l'inverse se produise pour la vitesse d'avance.

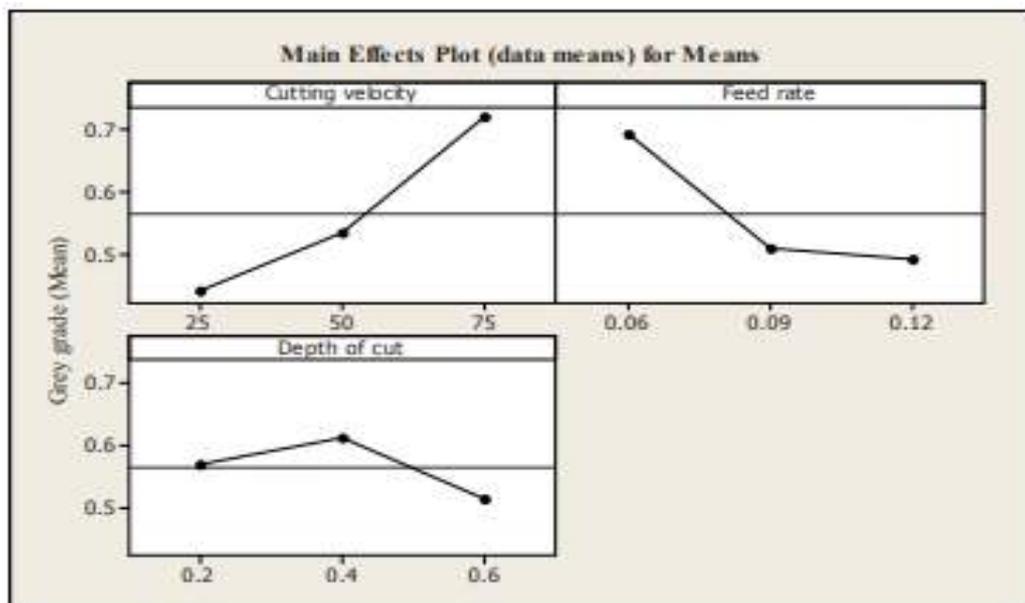


Figure I.33: graphe des effets moyens [16]

Des tests de confirmation et validation ont été effectués pour comparer les résultats expérimentaux et les modèle. Les résultats expérimentaux ont montré que les performances d'usinage dans le processus de fraisage final peuvent être améliorées efficacement grâce à l'approche proposée.

Dans le travail mené par [2], une optimisation des conditions de coupe lors du fraisage du super alliage Inconel 738 est présenté. Un réseau de neurone a perception multicouche MLP est utilisé afin de prédire la rugosité de surface Ra et les efforts de coupe (F_x , F_y , F_z et F_t) en prenant comme entrées la vitesse de coupe la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de passe.

Afin d'étudier le comportement de cet alliage lors du processus de fraisage, un plan d'expérience avec quatre niveaux pour les deux premiers paramètres d'entrée et deux niveaux pour les deux autres, soit au total 64 expériences. Sur la base des résultats expérimentaux, l'effet des paramètres d'entrée sur les sorties, c'est-à-dire les efforts de coupe et la rugosité de surface, ont été étudié, puis une modélisation en premier par un modèle de régression unifactoriel (I.9), ensuite par réseau de neurone dont l'apprentissage est réalisé par les algorithmes génétiques est utilisé.

$$F_t = C_1 a p^x \quad (I.9)$$

Cette approche a montré son efficacité pour le fraisage du superalliage Inconel 738 à sec et avec lubrification. Hélas hormis l'efficacité de cette approche, elle reste très compliquée d'un point de vu algorithmique.

Les expériences et les mesures ont été réalisées et assurer en utilisant :

Machine-outil : Une fraiseuse CNC à trois axes avec microcontrôleur Siemens 810 D. Cette machine est d'une puissance de 5,5 kW, avec une fréquence de rotation maximale de 3150 tr/min, le cône de la broche utilisé était ST40 et la plage de vitesse d'avance est de 2 à 3000 (m/min).

Matière usinée : Inconel 738.

Outils de coupe : outil avec plaquettes en carbure revêtu de type (TiN).

Mesure de la rugosité de surface : Taylor Hobson (modèle : Surtronic-25)

Mesure de l'effort de coupe: un dynamomètre Kistler de type 9255B,(étalonné avant réalisation des expériences).Le dynamomètre est capable de mesurer les forces dans les axes X et Y de 220 (kN) et 210 (kN) dans l'axe Z. Quant à l'acquisition des signaux, elle est assurée par la carte CIO-DAS 1602/12 permettant de connecter le dynamomètre avec l'ordinateur via le logiciel Dynoware.

Dimensions des échantillons: 180 x 110 x 67 mm

Nombre d'essais: 64.

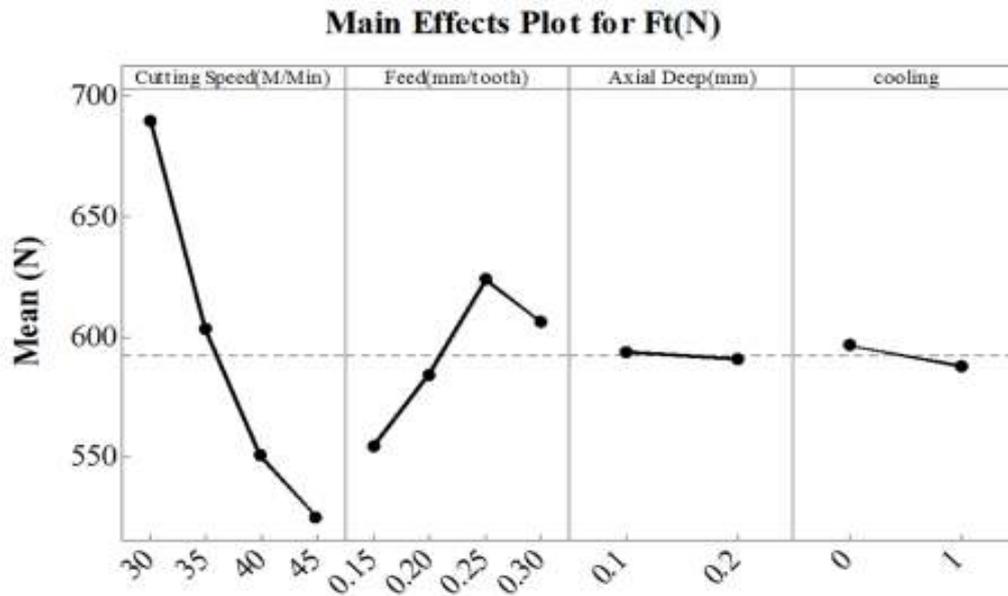


Figure I.34: graphe des effets moyens pour Ft [2]

Le graphe des effets moyens des facteurs choisis sur l'effort de coupe est montré dans la (figure I.34). On que la vitesse de coupe et la vitesse d'avance ont la plus grande influence sur les efforts de coupe. Il a également été observé que lorsque la vitesse de coupe augmente, les efforts de coupe diminuent. Ceci est principalement dû à l'augmentation de la température lors de l'opération de coupe, ce qui rend le matériau plus doux.

Cependant l'augmentation de la vitesse d'avance engendre une augmentation de l'effort de coupe. Quant à la profondeur de coupe, son effet est insignifiant, ce résultat peut être exprimé par la faible variation de la profondeur de coupe qui est d'un dixième de millimètre. En ce qui concerne la lubrification, on remarque que la présence du lubrifiant engendre une diminution de l'effort de coupe car la présence de lubrification engendre une diminution du frottement outil-pièce.

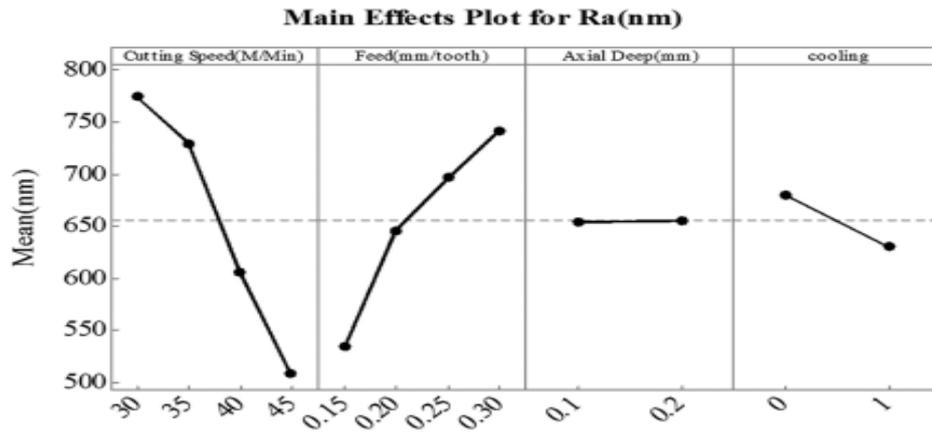


Figure I.35: graphe des effets moyens pour Ra [2]

Le graphe des effets moyens des facteurs choisis sur la rugosité de surface est montré dans la (figure I.35), on constate les facteurs du régime de coupe agissent sur la rugosité d'une façon similaire à celle de l'effort de coupe, avec un effet spectaculaire de l'arrosage, en le comparant à la (figure I.34).

Le modèle de réseau de neurone adopté pour l'estimation des efforts de coupe est d'une structure de 3-8-8-4, produisant une erreur d'estimation de 1.9% avec une régression de 0.99905.

Le modèle de réseau d'estimation de la rugosité de surface par les réseaux de neurones est d'une structure de 3-9-10-1. Cet estimateur est capable de prédire l'état de surface avec une efficacité au voisinage de 97%.

Le régime de coupe optimal s'est avéré : une vitesse de coupe V_c : 45 m/min, une avance de V_f : 0.15 mm/dent et une profondeur de passe a_p : 0.1 mm avec lubrification.

I.8. Conclusion

L'un des objectifs à grande priorité dans tous les procédés d'usinage et particulièrement dans le fraisage, est l'obtention d'un bon état de surface.

Dans ce chapitre, nous avons commencés par la présentation des notions de base sur le fraisage, ensuite, nous avons présentés une étude bibliographique qui portait principalement sur l'influence des facteurs du régime de coupe sur l'état de surface ainsi que leur optimisation.

L'analyse de bibliographie permet de conclure que la méthode de planification des expériences représente un outil puissant, permettant l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques d'une opération d'usinage.

La connaissance de ces influences est primordiale dans la recherche d'une combinaison optimale des paramètres de coupe. Ceci est rendu possible par l'élaboration de modèles mathématiques qui expriment la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques considérés.

Le chapitre suivant est dédié à la description du protocole expérimental du fraisage de l'alliage à base de Nickel Inconel 738 en utilisant un outil en carbure revêtu. Ensuite l'étude de l'influence des conditions de coupe sur la rugosité Ra (μm).

Chapitre II

Protocole expérimental

II.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation de l'ensemble des outils mis en œuvre pour répondre à la problématique et atteindre les objectifs arrêtés de notre projet de fin d'étude.

Cela, consiste en une présentation du protocole expérimental envisagé afin de suivre l'évolution de la rugosité de surfaces obtenue lors de fraisage de face. Ainsi qu'une présentation succincte des différentes méthodes utilisées pour l'analyse des résultats.

II.2. Données expérimentales

Après l'obtention de l'autorisation nécessaire des auteurs pour la reproduction et l'utilisation de ses travaux expérimentaux, les données de l'article **Imani, L., et al. (2020). "Modeling and optimizing of cutting force and surface roughness in milling process of Inconel 738 using hybrid ANN and GA." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 234(5): 920-932.**

II.2.1. Protocole expérimental

Dans cette section est dédiée à la description de la procédure expérimentale envisagée dans les travaux réalisés par [2].

Ces travaux ont été au sujet de l'optimisation du de coupe lors du fraisage du super alliage à base de Nickel (Ni) Inconel 738 est présentée.

Afin d'étudier le comportement de cet alliage lors du processus de fraisage en utilisant un outil en carbure revêtu de type (TiN).

a) Machine-outil

Une fraiseuse CNC à trois axes avec microcontrôleur Siemens 810 D, (figure II.1). Cette machine est d'une puissance de 5,5 kW, avec une fréquence de rotation maximale de 3150 tr/min, le cône de la broche utilisé était ST40 et la plage de vitesse d'avance est de 2 à 3000 (mm.min⁻¹).

b) Matériau

Super alliage à base de Nickel Inconel 738 dont les dimensions sont : 180 x 110 x 67 mm.

L'appellation Inconel est un terme commercial déposé qui désigne un ensemble de 25 alliages à base Nickel. L'Inconel 718, est utilisé surtout à haute température, il est l'un des alliages de cette famille des plus couramment utilisés. Il est considéré par l'industrie comme étant un superalliage réfractaire, c'est-à-dire un alliage contenant une grande quantité de nickel (50 à 55 %) et de chrome (17 à 21 %) et qui peut de façon permanente être utilisé au-dessus de 600 °C. Ses propriétés combinent ainsi de hautes caractéristiques mécaniques dans un large domaine de températures et une excellente tenue à la corrosion et à l'oxydation.

Sa composition chimique est donnée ci-après le (tableau II.1).

Tableau II.1: composition chimique d'Inconel 738 [2]

Élément	Min	Max	Élément	Min	Max
	%			%	
Ni	50	55	Al	3.20	3.70
C	0.09	0.13	Ti	3.20	3.70
Co	3.00	9.00	Al+Ti	6.50	7.20
Cr	15.70	16.30	B	0.007	0.012
Mo	1.50	2.00	Zr	0.03	0.08
Ta	2.40	2.80	Ir	-	0.05
Nb	1.50	2.00	Mn	-	0.02
S	0.60	1.10	S	-	0.015
Si	-	0.3			

c) Outils de coupe

Outil avec plaquettes en carbure revêtu (TiN) (figure II.1).

d) Mesure de la rugosité de surface

Rugosimètre Taylor Hobson (modèle : Surtronic-25).



Figure II.1: matériels et appareils de mesure utilisés [2]

II.2.2. Plan d'expérience

Un plan d'expérience factoriel avec quatre niveaux pour les deux premiers paramètres d'entrée V_c ($m \cdot min^{-1}$), f_z ($mm \cdot dent^{-1}$) et deux niveaux pour les deux autres (a_p (mm), et l'arrosage) $4^2 \times 2^2$ est adopté comme plan expérimental dans cette étude. Ce qui en résulte en 32 essais à sec et 32 essais avec lubrification, soit au total 64 expériences, dont leurs valeurs naturelles sont récapitulées dans le (tableau II.2).

Tableau II. 2 : valeurs naturelles des facteurs et niveaux choisis

Niveaux des facteurs	Valeurs naturelles des facteurs				
	V_c ($m \cdot min^{-1}$)	f_z ($mm \cdot dent^{-1}$)	Niveau de facteur	a_p (mm)	Arrosage
1	45	0.3	1	0.2	Avec
2	40	0.25			
3	35	0.20	2	0.1	Sans
4	30	0.15			

Les mesures prises sont les efforts de coupe F_x , F_y et F_z (mm) et R_a (μm).

Les résultats obtenus sont tabulés dans le (tableau II.3). En raison des objectifs de ce mémoire, seule l'analyse de Ra (μm) est considérée. Pour plus d'information sur l'effort de coupe, consulter [2].

Tableau II.3: résultats de la rugosité de la surface usinée du plan factoriel $4^2 \times 2^2$ lors du fraisage d'Inconel 738

N° d'essai	Vc (m.min ⁻¹)	fz (mm.dent ⁻¹)	ap (mm)	Arrosage	Ra (μm)
1	45	0.3	0.2	1	0.702
2	45	0.3	0.2	0	0.659
3	45	0.3	0.1	1	0.581
4	45	0.3	0.1	0	0.484
5	45	0.25	0.2	1	0.608
6	45	0.25	0.2	0	0.439
7	45	0.25	0.1	1	0.445
8	45	0.25	0.1	0	0.459
9	45	0.2	0.2	1	0.773
10	45	0.2	0.2	0	0.721
11	45	0.2	0.1	1	0.643
12	45	0.2	0.1	0	0.658
13	45	0.15	0.2	1	0.608
14	45	0.15	0.2	0	0.511
15	45	0.15	0.1	1	0.58
16	45	0.15	0.1	0	0.498
17	40	0.3	0.2	1	0.934
18	40	0.3	0.2	0	0.918
19	40	0.3	0.1	1	0.807
20	40	0.3	0.1	0	0.847
21	40	0.25	0.2	1	0.78
22	40	0.25	0.2	0	0.739
23	40	0.25	0.1	1	0.58
24	40	0.25	0.1	0	0.612
25	40	0.2	0.2	1	0.972
26	40	0.2	0.2	0	0.972
27	40	0.2	0.1	1	0.91
28	40	0.2	0.1	0	0.971
29	40	0.15	0.2	1	0.871

30	40	0.15	0.2	0	0.867
31	40	0.15	0.1	1	0.729
32	40	0.15	0.1	0	0.7
33	35	0.3	0.2	1	0.702
34	35	0.3	0.2	0	0.659
35	35	0.3	0.1	1	0.581
36	35	0.3	0.1	0	0.484
37	35	0.25	0.2	1	0.608
38	35	0.25	0.2	0	0.439
39	35	0.25	0.1	1	0.445
40	35	0.25	0.1	0	0.459
41	35	0.2	0.2	1	0.773
42	35	0.2	0.2	0	0.721
43	35	0.2	0.1	1	0.643
44	35	0.2	0.1	0	0.658
45	35	0.15	0.2	1	0.608
46	35	0.15	0.2	0	0.511
47	35	0.15	0.1	1	0.58
48	35	0.15	0.1	0	0.498
49	30	0.3	0.2	1	0.934
50	30	0.3	0.2	0	0.918
51	30	0.3	0.1	1	0.807
52	30	0.3	0.1	0	0.847
53	30	0.25	0.2	1	0.78
54	30	0.25	0.2	0	0.739
55	30	0.25	0.1	1	0.58
56	30	0.25	0.1	0	0.612
57	30	0.2	0.2	1	0.972
58	30	0.2	0.2	0	0.972
59	30	0.2	0.1	1	0.91
60	30	0.2	0.1	0	0.971
61	30	0.15	0.2	1	0.871
62	30	0.15	0.2	0	0.867
63	30	0.15	0.1	1	0.729
64	30	0.15	0.1	0	0.7

La (figure II.2) montre l'évolution de la rugosité de surface selon le plan d'expérience décrit ci-avant. On remarque la présence d'un lubrifiant améliore de façon spectaculaire l'état de surface. Cette amélioration s'explique par la présence

du film du fluide sur l'arête de l'outil ce qu'en résulte en une diminution des sommets d'aspérités formant le profil réel de la pièce.

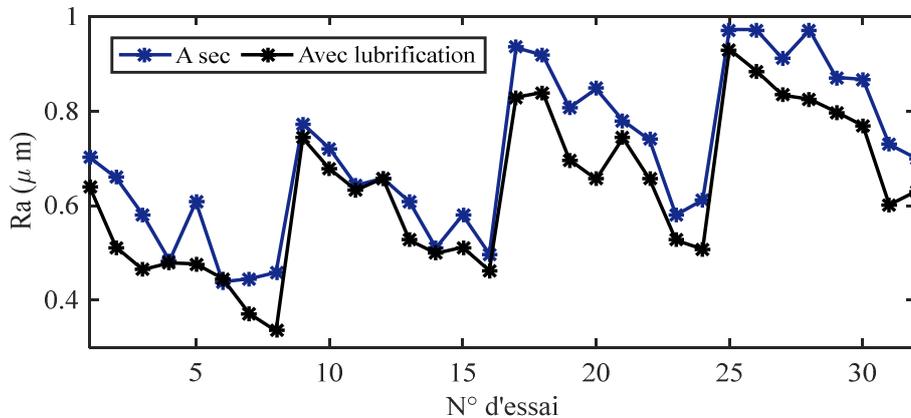


Figure II.2: comparaison entre les valeurs expérimentales avec et sans lubrification

II.3. Méthodes d'analyse des résultats

II.3.1. Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance, connue sous la terminologie ANOVA. Cette se base sur des mesures de variance dans le but de tester l'influence des diverses facteurs sur la réponse d'un modèle donné [9].

Conformément à la littérature, l'analyse effectuée dans notre étude est faite pour un niveau de signification de 5 % ($P \leq 0.05$) et pour un niveau de confiance de 95 %. Le tableau ANOVA indique les valeurs des degrés de liberté (DF), la somme des carrés des écarts (SS), les moyens des carrés (MS), le test de Fisher ou la propriété statistique (F) et la contribution en pourcentage (PC %) de chaque facteur tel que :

$$SS_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i) \text{ représente la moyenne des réponses.}$$

\bar{y}_i : est moyenne des réponses pour les expériences ou le facteur f prend son $i^{\text{ème}}$ niveau.

N : nombre total des expériences.

N_{nf} : le niveau de chaque facteur f.

Les moyens des carrés (MS), sont calculés comme suit :

$$MS_i = \frac{SS_i}{DF_i} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

DF_i : degré de liberté.

La propriété statistique (F) est calculée en divisant $\square\square\square$ (II.2) par le carré moyen résiduel:

$$F_i = \frac{MS_i}{MS_e} \quad (\text{II.3})$$

Finalement l'effet de chaque facteur est calculé par le pourcentage de contribution (PC%), défini comme suit :

$$PC\% = \frac{SS}{SS_{Total}} \times 100 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^f SS_i \text{ est la somme des } SS \text{ décrites par (II.1).}$$

II.3.2 Analyse de régression

Afin de valider l'efficacité du modèle à obtenir, nous avons choisis deux indicateurs statistiques qui sont : l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de corrélation (R^2).

Comme son nom l'indique, MSE nous donne une information globale sur l'erreur enregistrée entre le modèle et les valeurs expérimentales tel que :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (X_i - Y_i)^2 \quad (\text{II.5})$$

X_i : les valeurs du modèle.

Y_i : les valeurs expérimentales.

Le coefficient de corrélation R^2 exprime la relation linéaire entre les valeurs réelles et celle du modèle. Ou, plus R^2 est proche d'un, plus le modèle est plus significatif et fidèle à l'expérience.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{erreur}}{SS_{Total}} \quad (II.6)$$

Avec :

SS_{erreur} est la somme des erreurs des carrées des écarts.

II.3.3 Analyse graphique

Les outils d'analyse graphique représentent un moyen très utile pour faciliter la compréhension et la restitution de l'information, dans le cadre de cette étude nous avons choisis le graphe des effets moyens et le graphe des interactions.

a) Graphe des effets moyens

L'effet moyen d'un facteur est la variation de la réponse lorsqu'un facteur change de niveau. Il consiste à reporter les valeurs calculées à la dernière ligne de la grille de dépouillement en regard de chacun des niveaux d'un facteur.

Pour chacun des facteurs, on relie par un trait les moyennes des résultats d'essais correspondant à chacun des niveaux. La représentation des effets par un segment de droite permettant de juger du signe et de l'amplitude de ces derniers est conventionnellement admise dans la littérature et dans la plupart des logiciels tel que Minitab.

b) Graphe des interactions

Une interaction c'est la dépendance de l'influence d'un facteur en fonction du niveau des autres facteurs. Une interaction peut être double (l'influence de A sur la réponse dépend du niveau de B) ou d'ordre plus élevé (l'influence de A dépend du niveau de B, C, D.. de manière conjuguée) ; en pratique, les modèles de comportement employés se limitent souvent aux interactions doubles.

Le graphe des interactions est construit sur le même principe que le graphe des effets moyen des facteurs, à ceci près que l'on trace plusieurs courbes par facteur, correspondant aux effets moyens calculés selon le niveau d'un autre facteur. Des courbes confondues traduisent une interaction nulle ; des courbes très différentes traduisent une interaction forte.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le protocole expérimental. La composition chimique des échantillons, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences qui ont été réalisées et finalement une présentation des outils d'analyse des résultats qui seront utilisés au chapitre suivant afin de quantifier et comprendre l'effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface.

Chapitre III

*Influence des paramètres
de coupe et modélisation
des paramètres
technologiques d'usinage*

III.1. Introduction

La présente étude est scindée en deux étapes :

- L'analyse statistique, en appliquant l'analyse de la variance ANOVA pour le critère de rugosité étudiée. Cette analyse est réalisée pour une signification ajustée de 5%, c.-à-d., pour un niveau de confiance de 95%. Ainsi que l'analyse de régression et l'analyse graphique afin d'appréhender et mettre en exergue l'influence des facteurs et leurs interactions sur l'état de surface.
- La détermination du modèle mathématique qui permet d'exprimer la relation fonctionnelle entre les paramètres de coupe (V_c , f_z , a_p) et le paramètre technologique d'usinage ciblé qui est en l'occurrence la rugosité de surface R_a (μm).

III.2. Analyse des résultats et modélisation lors de l'usinage à sec

III.2.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Le (tableau III.1) résume les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour la rugosité R_a . Le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface R_a est la vitesse de coupe avec une contribution très élevée de 59.77 %, suivi par l'avance avec une contribution de 31.68% et l'interaction $V_c \times a_p$ avec une contribution de 1.05 %, tandis que le reste des facteurs sont insignifiants

Tableau III.1: analyse de la variance (ANOVA) pour R_a lors de fraisage à sec

Source	DF	SS	MS	F	P	PC%	Remarque
Régression	6	0.807427	0.134571	63.68	< 0.0001	93.86%	Significatif
V_c	1	0.514156	0.514156	243.3	< 0.0001	59.77%	Significatif
f_z	1	0.274068	0.274068	129.69	< 0.0001	31.86%	Significatif
a_p	1	0.006845	0.006845	3.24	0.084	0.80%	Insignifiant
$V_c \times f_z$	1	0.003128	0.003128	1.48	0.235	0.36%	Insignifiant
$V_c \times a_p$	1	0.009	0.009	4.26	0.05	1.05%	Significatif
$f_z \times a_p$	1	0.00023	0.00023	0.11	0.744	0.03%	Insignifiant
Erreur	25	0.052831	0.002113				
Totale	31	0.860258					

III.2.2. Analyse des effets principaux et leurs interactions sur Ra

La (figure III.1) présente l'effet des facteurs principaux sur la sortie, à savoir, la rugosité de surface, la (figure III.2) montre les effets d'interactions entre les facteurs principaux. Dans certaines expériences, les différences entre les réponses obtenues pour un paramètre peuvent ne pas être les mêmes pour tous les paramètres. Dans ce cas de figure, on dit qu'il y a des effets d'interaction. Lorsque les effets d'interaction sont élevés, les effets principaux ne sont pas considérés comme importants et vice versa.

La (figure III.4) montre que l'effet de l'interaction $V_c \times a_p$ est modeste, ce qui permet de se focaliser sur les courbes d'effet moyen avec confiance.

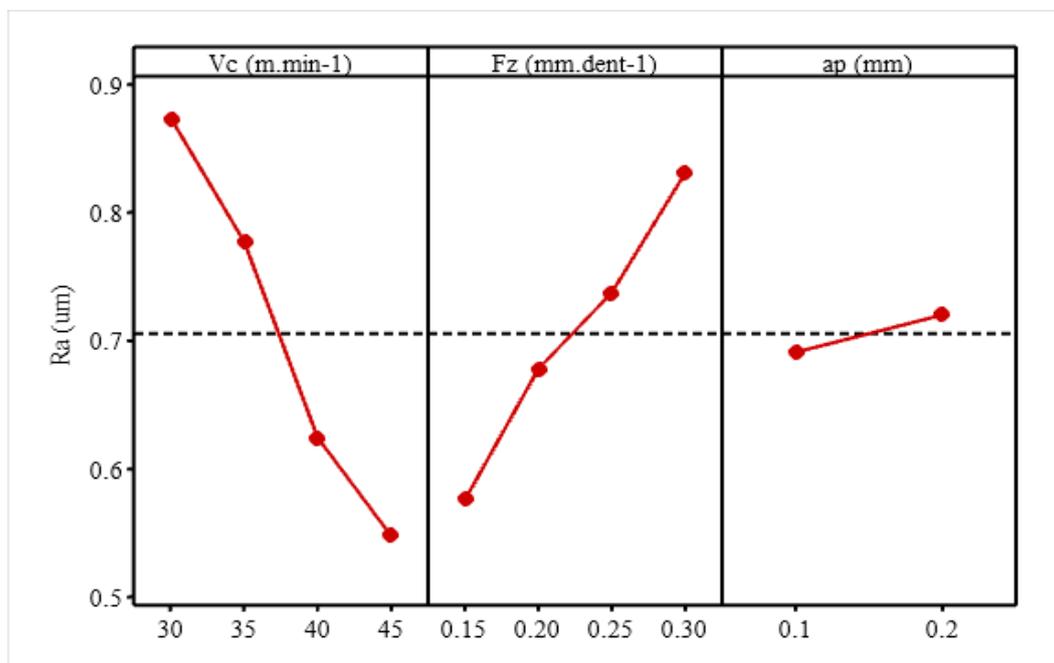


Figure III.1: graphe des effets principaux sur la rugosité Ra lors de fraisage à sec.

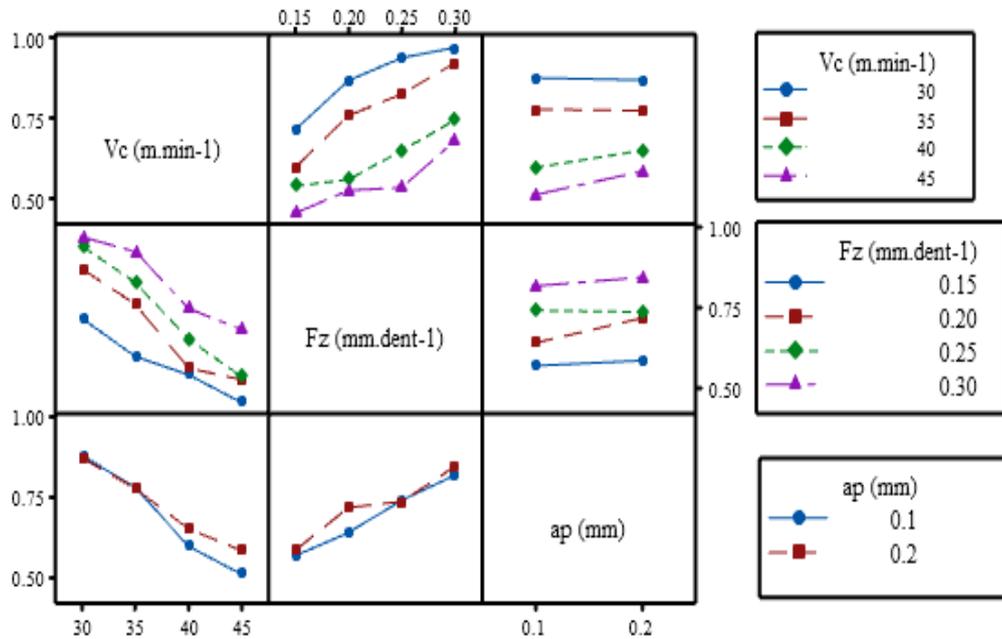


Figure III.2: graphe des interactions sur la rugosité Ra lors de fraisage à sec.

a) L'effet de la vitesse de coupe

Dans le processus de fraisage de ce superalliage, Inconel 738, plus que la vitesse de coupe augmente, plus la qualité de la surface finale s'améliore tel que le montre la (figure III.1), ce qui confirme les résultats de l'analyse de variance ANOVA présentés dans la (section IV.1.1). Il est visible qu'en augmentant la vitesse de coupe, la rugosité diminue. Ce phénomène pourrait être le résultat d'une déformation plastique plus facile lors de l'enlèvement de copeaux due à l'augmentation de la température entre le bec de l'outil et le copeau. En effet, à des vitesses de coupe élevées, son effet sur la rugosité devient véniel.

b) L'effet de la vitesse d'avance

Tel que montre la (figure III.1), plus l'avance est importante, plus la surface est irrégulière après l'usinage.

Ceci s'explique par le fait que lorsque l'avance augmente, le volume des copeaux non déformés augmente, par conséquent, l'état de surface détériore.

c) L'effet de la profondeur de coupe

La (figure III.1) montre également la variation de la rugosité de la surface en fonction de la profondeur de coupe. On observe que la profondeur de coupe a un effet négligeable sur la qualité de la surface finale. La seule restriction de la

profondeur de coupe est la vibration de l'outil, qui serait augmentée en augmentant la profondeur de coupe, mais cela ne s'est pas produit dans les expériences réalisées par [2]. Ceci peut être expliqué par la faible variation de la profondeur de coupe choisie pendant les expériences.

III.2.3. Diagrammes de surface 3D de Ra

Pour une meilleure visualisation des résultats, nous avons utilisés les surfaces tridimensionnelles afin de permettre l'évaluation simultanée des variations de Ra en fonction de fz et ap pour diverses Vc.

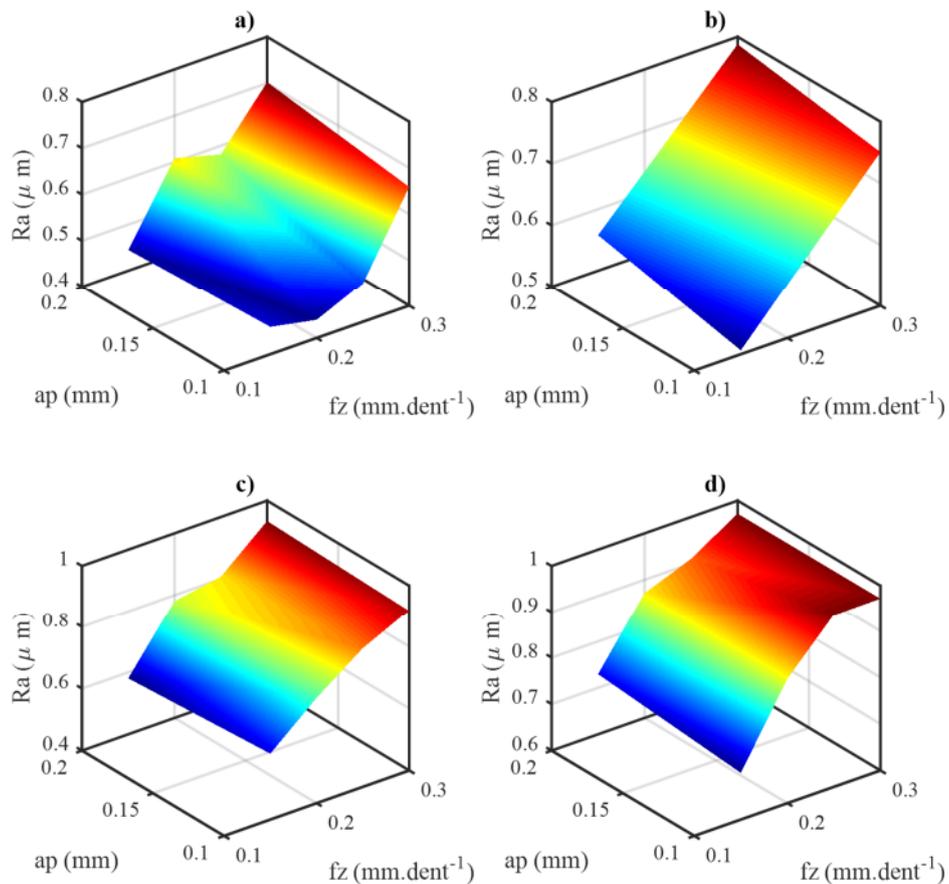


Figure III.3:diagrammes de surface 3D de Ra (fz ,ap) lors de fraisage à sec, a) Vc=45, b) Vc=40, c) Vc=35, d) Vc=30

La (figure III. 3 (a)) représente l'influence de l'avance par dent fz et la profondeur de passe ap en prenant une vitesse de coupe $V_c = 45 \text{ m.min}^{-1}$. D'après cette représentation la combinaison de la profondeur de passe et l'avance de 0.1 et 0.2 respectivement donnent la meilleure rugosité de $0.439 \mu\text{m}$.

Semblablement, pour une vitesse de coupe $V_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$, un meilleur état de surface $R_a = 0.498 \text{ }\mu\text{m}$ est obtenue en prenant l'avance et la profondeur de passe a_p les plus petites tel que montre la (figure III. 3 (b)).

L'influence de l'avance par dent f_z et la profondeur de passe a_p pour une vitesse de coupe $V_c = 35 \text{ m.min}^{-1}$ est montrée dans la (figure III. 3 (c)). Il s'avère que le meilleur état de surface obtenu $R_a = 0.58 \text{ }\mu\text{m}$ quand f_z et a_p sont réglés à 0.1 et 0.15 respectivement.

La (figure III. 3 (d)) représente l'influence de l'avance par dent f_z et la profondeur de passe a_p en prenant une vitesse de coupe $V_c = 30 \text{ m.min}^{-1}$. D'après cette représentation la combinaison de la profondeur de passe et l'avance les plus petites donnent la meilleure rugosité de $0.7 \text{ }\mu\text{m}$.

III.2.4. Modélisation

La première étape est de mettre en place un modèle de comportement de l'évolution de R_a lors du procédé de fraisage. Pour cela, il faut tout d'abord choisir les facteurs qui sont V_c , f_z et a_p et leurs interaction $V_c \times f_z$ et $V_c \times a_p$ et $f_z \times a_p$.

Ensuite établir la relation reliant les entrées à la sortie souhaitée.

Par identification, le modèle obtenu est donné par (III.5) :

$$Ra = 1.178 - 0.02456 V_c + 2.99 f_z - 1.74 a_p - 0.0316 V_c \times f_z + 0.06 V_c \times a_p - 0.96 f_z \times a_p \quad (\text{III.1})$$

La constante rajoutée caractérise les facteurs incontrôlables qui rentrent dans le processus de fraisage. Le modèle obtenu est donne une $MSE = 1.7 \times 10^{-3}$ et un $R^2 = 0.968$ ce qui montre que ce modèle est significatif est peut-être utilisé pour prédire l'état de surface.

Afin de tester la concordance entre les valeurs prévus et expérimentaux la normalité de distribution de l'erreur pour R_a est tracée et montrée dans la (figure III.4).

Malgré que le coefficient de corrélation R^2 est tout prêt de l'unité mais la comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites demeure nécessaire afin de mieux visualiser les limites du modèle.

La (figure III.5) montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision et la robustesse du modèle trouvé.

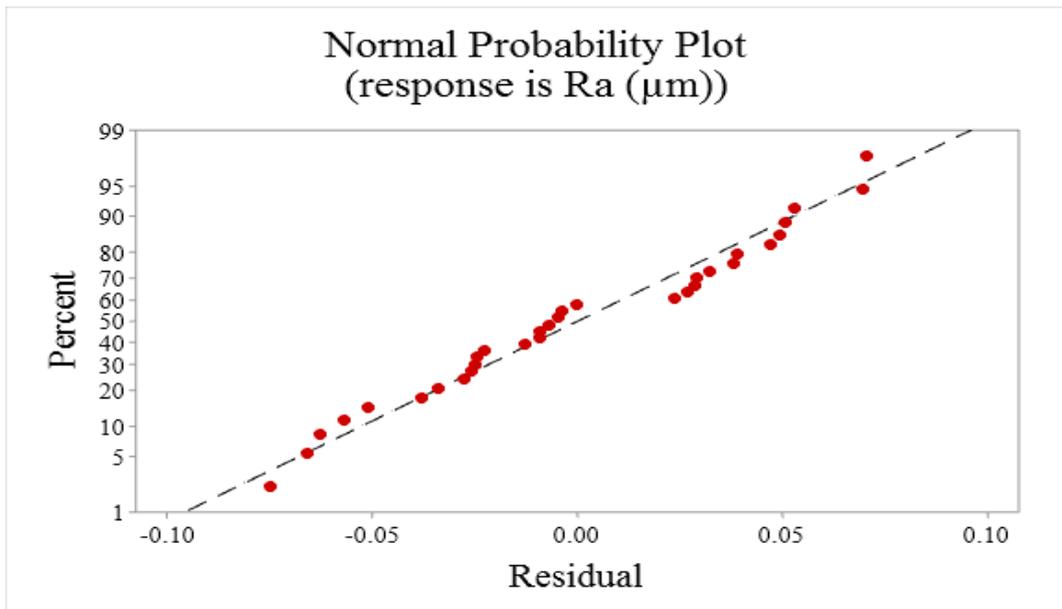


Figure III.4: normalité de distribution de l'erreur pour le modèle Ra

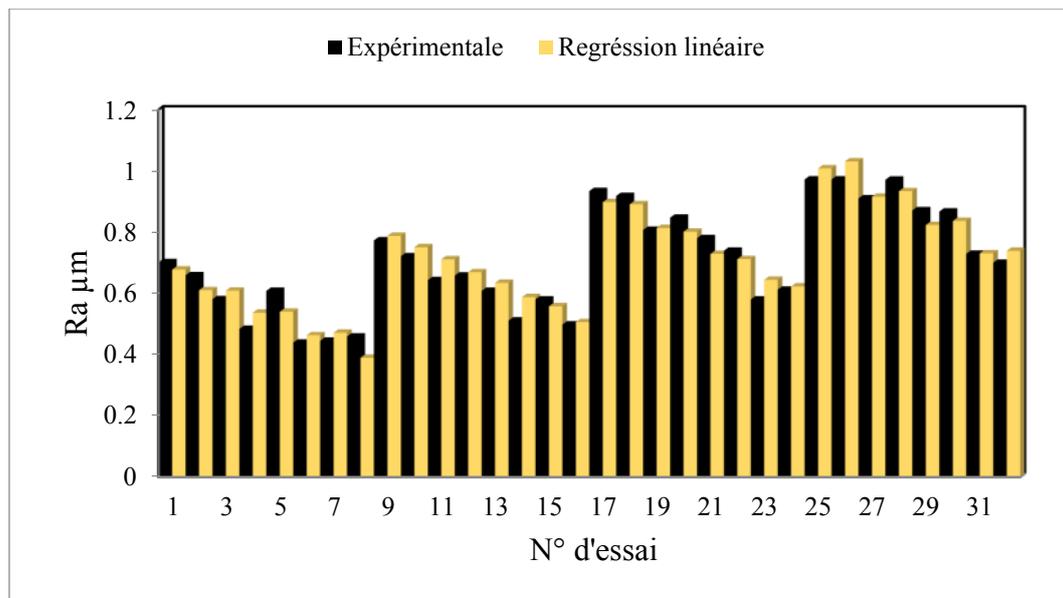


Figure III.5: comparaison entre les valeurs mesurées et estimées de Ra à sec

III.3. Analyse des résultats et modélisation lors de l'usinage avec lubrification

III.3.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour la rugosité Ra lors de fraisage du superalliage à base de Nickel Inconel 738 avec lubrification est donné dans le (tableau III.2) il s'est avéré que le facteur avec le plus important effet sur

la rugosité de surface Ra est la vitesse de coupe avec une contribution de 56.93 %, suivi par l'avance avec une contribution de 35.93% et enfin ap avec une légère contribution de 0.98 %.

Tableau II.2: analyse de la variance (ANOVA) pour Ra lors de fraisage avec lubrification

Source	DF	SS	MS	F	P	PC %	Remarque
Regression	6	0.727882	0.121314	71.42	< 0.0001	94.49%	Significatif
Vc	1	0.438588	0.438588	258.22	< 0.0001	56.93%	Significatif
fz	1	0.276806	0.276806	162.97	< 0.0001	35.93%	Significatif
ap	1	0.007534	0.007534	4.44	0.045	0.98%	Significatif
Vc×fz	1	0.003583	0.003583	2.11	0.159	0.47%	Insignifiant
Vc×ap	1	0.000842	0.000842	0.5	0.488	0.11%	Insignifiant
fz×ap	1	0.000529	0.000529	0.31	0.582	0.07%	Insignifiant
Erreur	25	0.042463	0.001699				
Totale	31	0.770345					

L'analyse montre également qu'aucune interaction entre les facteurs principaux n'est significative, du coup, leur négligence est possible.

III.3.2. Analyse des effets principaux et leurs interactions sur Ra

La (figures III.6) montrent l'impact et les degrés d'influence des paramètres de coupe (Vc,fz,ap) sur la rugosité de surface Ra lors de fraisage avec lubrification.

Il est clair que les meilleures qualités de surface (correspondant à de faibles rugosités : Ra=0.335 (µm) est obtenue lors des combinaisons des faibles avances et des faibles profondeurs pour la plus grande vitesse. On remarque également que l'effet de la vitesse est le plus dominant. Ceci confirme les résultats trouvés par l'analyse des effets principaux lors de l'usinage à sec décrits dans la (section IV.2.1).

D'après les résultats obtenus (figure III.6), on constate qu'une augmentation de la vitesse de coupe entraîne la diminution de la déformation plastique du bec, et donc l'amélioration de la rugosité de la surface. L'augmentation de l'avance entraîne à son tour une augmentation de l'épaisseur des copeaux, la hauteur d'aspérité et par conséquent, un état de surface détérioré.

L'augmentation de la température du principalement à la vitesse de coupe en absence de refroidissement, engendre une augmentation de Ra car la résistance à la traction et au cisaillement diminue avec l'augmentation de la température, tandis que la déformation s'accroît. Mais en présence de lubrification la température est abaissée en continue ce qui contribue à l'amélioration de l'état de surface.

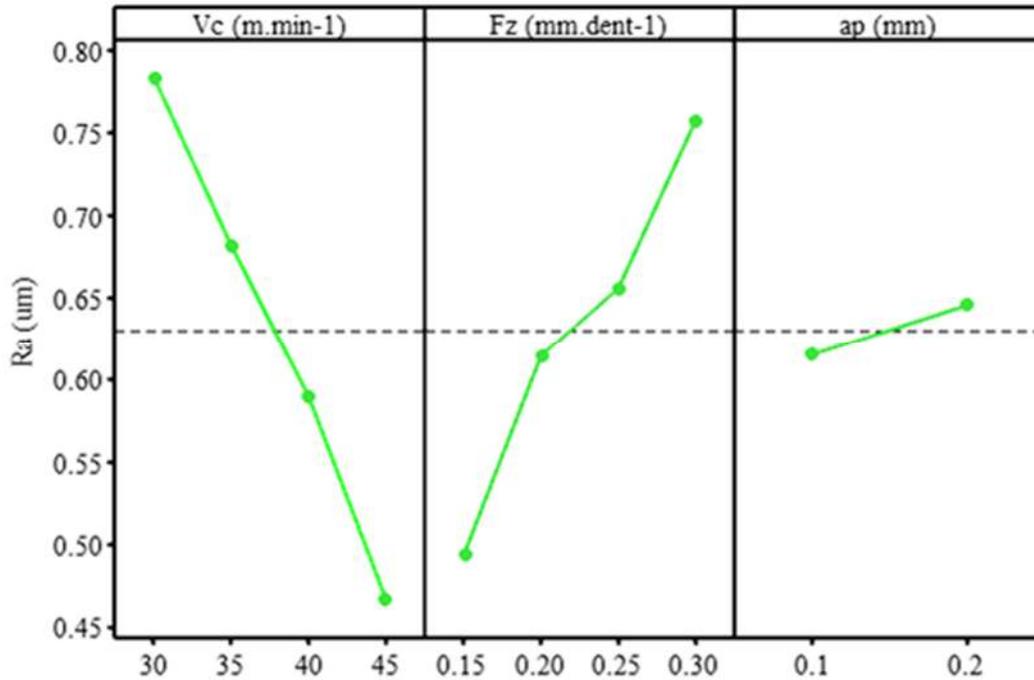


Figure III.6: graphe des effets principaux sur la rugosité Ra lors de fraisage avec lubrification

La (figure III.6) montre également que les variations de la profondeur de coupe n'ont pas un effet important sur la qualité de la surface, et en présence de liquide de refroidissement, la rugosité de la surface diminue.

III.3.3. Diagrammes de surface 3D de Ra

Les surfaces tridimensionnelles sont utilisées dans le but de permettre l'évaluation en symbiose des variations de Ra en fonction de fz et ap pour diverses Vc lors de l'usinage d'Inconel 738 en utilisant un outil en carbure revêtu (TiN).

La (figure III.7) représente l'influence de l'avance par dent fz et la profondeur de passe ap en prenant diverse vitesse de coupe Vc. On remarque que les surfaces on conservées une allure similaire à celle obtenues lors de fraisage à sec avec une

diminution de la rugosité Ra. On remarque également que de la surface augmente en variant l'avance d'une façon plus grande que lorsque l'usinage est réalisé à sec.

D'après les résultats, on remarque que la combinaison de la profondeur de passe et l'avance les plus petites lorsque $V_c = 45 \text{ m.min}^{-1}$ donnent la meilleure rugosité de $0.335 \mu\text{m}$.

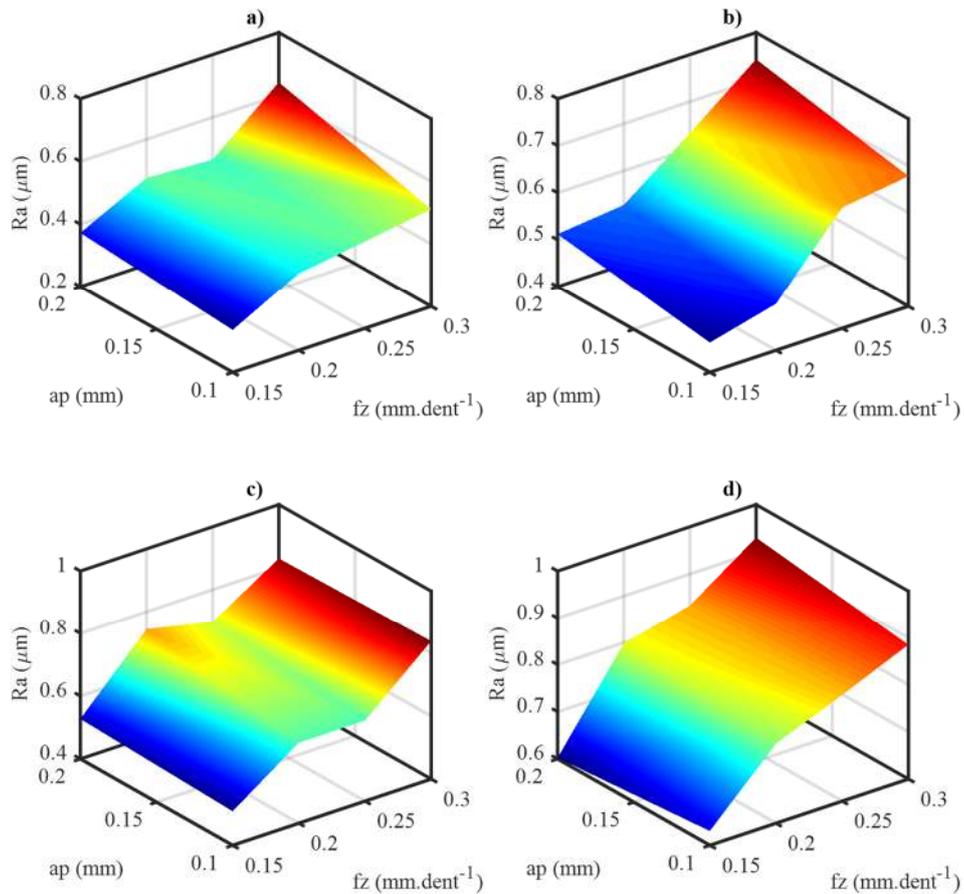


Figure III.7: diagrammes de surface 3D de Ra (fz , ap) lors de fraisage avec lubrification, a) $V_c=45$, b) $V_c=40$, c) $V_c=35$, d) $V_c=30$

III.3.4. Modélisation

Le modèle mathématique obtenu par régression linéaire est :

$$Ra = 0.682 - 0.01608V_c + 2.715 fz - 0.71ap - 0.0339V_c \times fz + 0.0183V_c \times ap - 1.46 fz \times ap \quad (\text{III.2})$$

Le modèle obtenu est donné une $MSE = 0.0017$ et un $R^2 = 0.972$ ce qui montre que ce modèle est significatif est peut-être utilisé pour prédire l'état de surface.

Afin de tester la concordance entre les valeurs prévus et expérimentaux la normalité de distribution de l'erreur pour Ra.

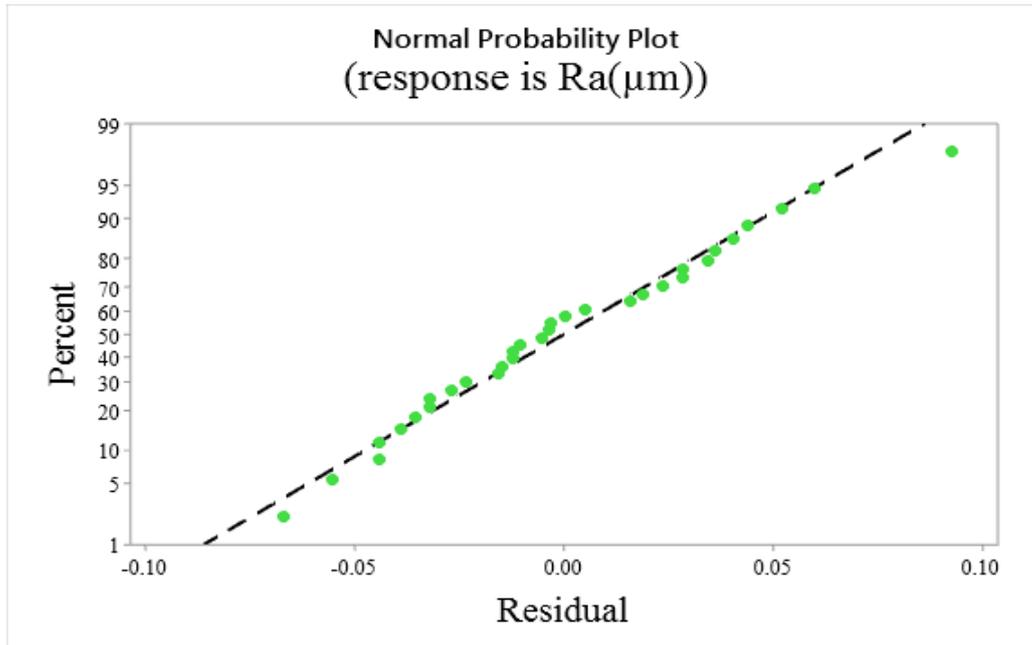


Figure III.8: normalité de distribution de l'erreur pour le modèle Ra (avec lubrification)

La (figure III.8) montre la normalité de distribution de l'erreur pour le modèle de Ra lors de l'usinage avec arrosage. Le résultat confirme que l'erreur est toujours au voisinage de l'intervalle de [-5 5] % ce que le modèle est en mesure de reproduire et prédire fidèlement la rugosité Ra.

La (figure III.9) montre une comparaison entre les mesures de Ra collectées depuis les essais et celle obtenues par modélisation, ce résultat corrobore avec les résultats précédents et confirme l'efficacité et la robustesse de notre modèle.

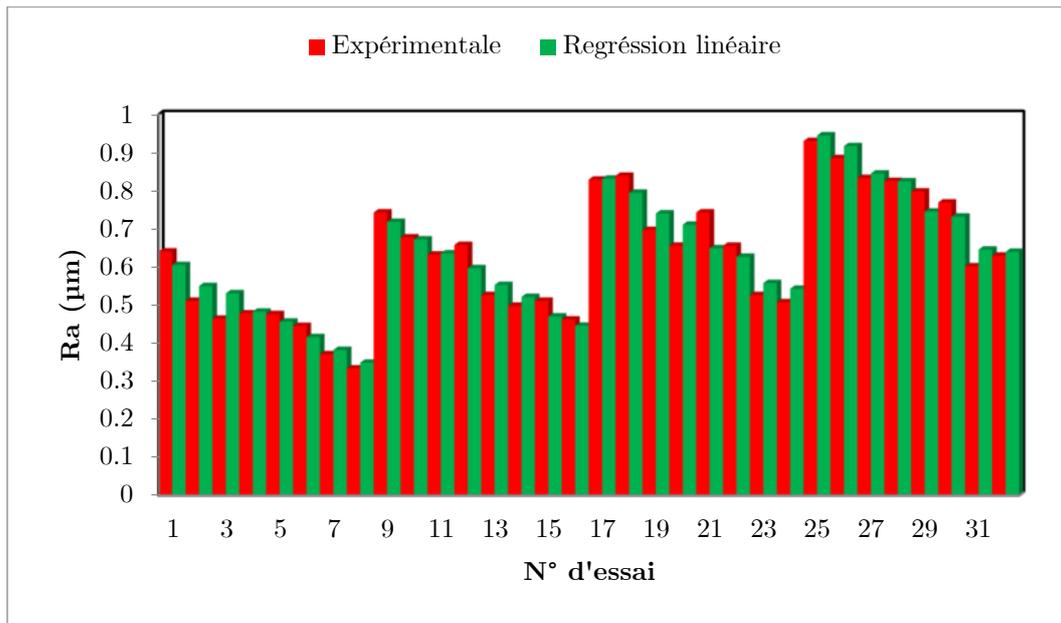


Figure III.9: comparaison entre les valeurs mesurés et estimés de Ra (avec lubrification)

III.4 Conclusion

À travers ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale de fraisage de l'alliage à base de Nickel Inconel 738 en utilisant un outil avec carbure revêtu de type (TiN), ensuite nous avons discuté les outils d'analyse à envisager dans le cadre du même chapitre et finalement se consacrer à l'analyse du degré d'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface lors de fraisage à sec et avec lubrification.

La modélisation par régression linéaire nous a permis de déterminer les modèles mathématiques et les coefficients de détermination de chacun des paramètres. L'analyse de la variance ANOVA et l'analyse des effets principaux à l'aide de logiciel Minitab-16 de la rugosité (à sec et avec lubrification) montre que la vitesse de coupe est le facteur qui a l'influence la plus significative sur la rugosité de surface, suivi par l'avance par dent, tandis que les autres paramètres de coupe n'ont pas d'influence significative sur la de rugosité. Par ailleurs les différents résultats montrent que les interactions générées par les facteurs principaux sont insignifiantes, ou modeste dans le meilleur des cas.

Le chapitre prochain oscille autour de l'optimisation du régime de coupe en utilisant le système neuro-flou adaptatif (ANFIS).

Chapitre IV

*Application de l'approche
d'intelligence artificielle
neuro-floue « ANFIS »*

IV.1. Introduction

Dans le monde industriel, la plupart des entreprises manufacturières sont en concurrence entre elles. À cet effet, si une entreprise a besoin de profits, elle doit fournir des produits de bonne qualité et avoir davantage de clients. Lors de la production de composants de haute qualité, les contraintes de temps peuvent s'accroître, dans le processus d'usinage en général, et celui du fraisage en particulier. Afin de gagner du temps, le plus souvent, les chercheurs utilisent des modèles explicites (empiriques).

Bien que la technique de régression puisse fonctionner. Hélas, cette dernière est parfois inutile face aux systèmes non linéaires, ce qui incite les chercheurs à avoir recours aux techniques d'intelligences artificielles, en guise de modéliser la dynamique des systèmes et des phénomènes non linéaires tels que le processus de coupe lors de fraisage.

IV.2. Paradigmes d'intelligence artificielle

IV.2.1. Réseau de neurones artificiels

Le réseau de neurones artificiels (RNA) est un paradigme de calcul intelligent (computational paradigme) inspiré du cerveau humain. Cependant il ne s'agit pas de reproduire une structure aussi complexe tel que le cerveau humain, mais de mettre en œuvre un algorithme permettant de résoudre des problèmes complexes.

Comme son nom l'indique ces réseaux est principalement constitué d'un ensemble d'éléments interconnectés dites neurones, liés entre eux par des connexions dites biais assimilables, en première approximation, aux synapses du cerveau humain, pondérés par des poids qui eux même fonctionnellement équivalent au potentiel synaptique, dont les poids de signe positifs correspondent aux synapses excitateurs alors que ceux avec signe négatif correspondent aux synapses inhibitrices [17, 18].

L'un des éléments clé permettant au RN (Réseau de Neurones) de répondre aux exigences escomptées est la fonction d'activation puisque chaque neurone calcule sa sortie en appliquant sa fonction de transfert continue et dérivable à ses entrées. La réponse du RN face aux systèmes non linéaires dépend directement de

la fonction d'activation. Cette dernière peut être une fonction seuil simple ou une fonction de tangente, sigmoïde, hyperbolique ou à base radiale [19].

IV.2.2. La logique floue

Les problèmes de représentation et d'utilisation des connaissances sont au centre d'une discipline scientifique relativement nouvelle et en tout cas controversée, qu'on appelle l'intelligence artificielle. Cette technique a mis l'accent, de façon exclusive, sur le traitement symbolique de la connaissance, par opposition à la modélisation numérique utilisée traditionnellement dans les sciences de l'ingénieur, c'est pour cela et jusqu'à une date récente, l'intelligence artificielle a eu un impact limité sur les applications industrielles. Plus récemment, les problèmes de modélisation numérique ont fait un retour dans les applications de l'intelligence artificielle, avec les réseaux de neurones et la logique floue. Les réseaux de neurones proposent une approche implicite de type "boite noire" de la représentation des connaissances, très analogue à la démarche de l'identification des systèmes en automatique. La logique floue est quant à elle plus conforme à l'intelligence artificielle symbolique, qui met en avant la notion de raisonnement, où les connaissances sont codées explicitement. Elle permet de faire le lien entre modélisation numérique et représentation symbolique, ce qui a permis des développements industriels spectaculaires à partir d'algorithmes de traduction de connaissances symboliques en entités numériques et inversement. La théorie des ensembles flous a également donné naissance à un traitement original de l'incertitude. Les ensembles flous ont également eu un impact sur les techniques de classification (tel que le cas des problèmes de diagnostic en mécanique) et ont contribué à la proposition de nouvelles approches pour l'aide à la décision [20].

IV.2.3. Système neuro-flou adaptatif (Adaptative Neuro-Fuzzy Inference system « ANFIS »)

La commande par logique floue a fait l'objet de nombreuses recherches, et a prouvé son efficacité face aux systèmes non linéaires. Cependant le choix optimal des paramètres se fait par expertise ou par essai erreur, ce qui rend cette tâche difficile à réaliser [19].

Les systèmes neuro-flous sont des réseaux hybrides, le réseau neuro-flou adaptatif est considéré le système neuronal le plus performant. ANFIS a été proposé par J S Jang [21], dont l'architecture est équivalente au système de Takagi Sugeno de premier ordre. Ce système est défini comme étant un système d'inférence flou, dont l'adaptation de ses paramètres est assurée par un algorithme d'apprentissage inspiré des réseaux de neurones. On peut considérer ANFIS comme un réseau de neurones dont les sous-couches sont substituées par des règles floues adaptées en ligne par un réseau de neurones adaptatif.

L'architecture ANFIS est très simple, il se compose de cinq couches dont deux adaptatives (carrées), et trois fixes (circulaires) (figure IV.1).

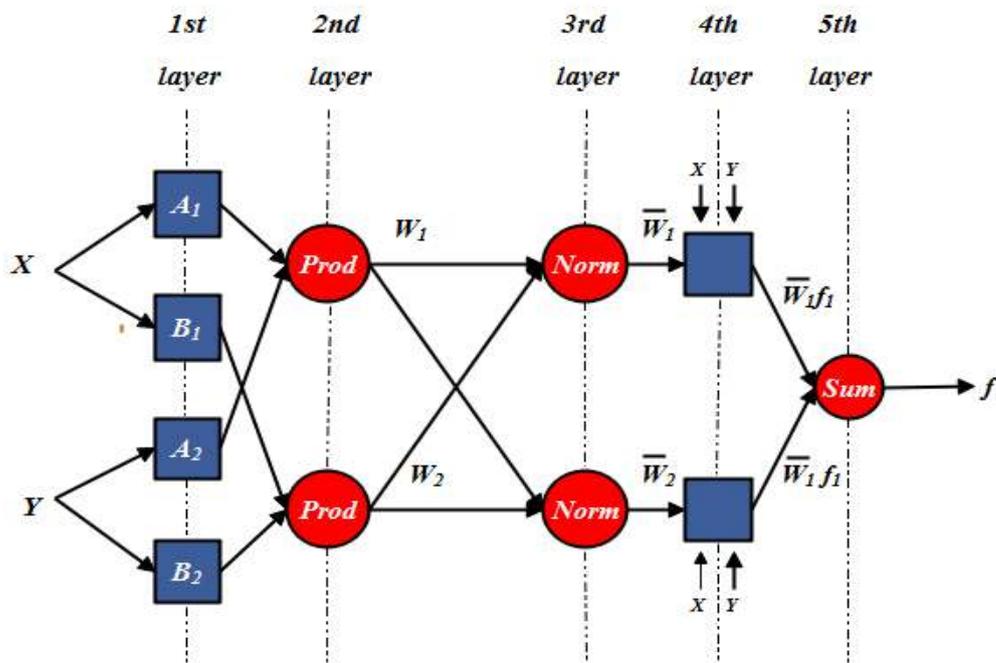


Figure IV.1: structure d'ANFIS

a) Couche 01

Cette couche appelée « Fuzzyfication layer » [8] est constituée d'un ensemble de neurones adaptatifs $A_i(B_i)$. Chaque neurone calcule le degré de vérité d'un sous ensemble flou. En d'autres termes, cette couche est responsable du passage au domaine flou, exprimant les conditions d'appartenance de chaque entrée (membership function).

La fonction d'activation des neurones de la première couche est :

$$O_i^1 = U_{A_i(x)} \quad (IV.1)$$

Où : x désigne l'entrée au nœud i , A_i désigne le label linguistique associé au nœud i .

Les entrées utilisées dans le cadre de cette étude Les valeurs des paramètres de lieux changent, la forme de la fonction d'appartenance change en conséquence, ce qui engendre le changement degré d'activation de chaque nœud.

b) Couche 02

C'est l'ensemble de neurones fixes appelés « Product layer » [19]. Ils assurent le pré-conditionnement des règles. Chaque neurone représente la prémisse d'une règle, et calcule son propre degré de vérité à partir des degrés de vérité des diverses sous ensemble flous reçus de la première couche. Les neurones de cette couche modélisent l'opérateur logique « ET », dont la fonction d'activation est :

$$W_i = U_{A_i(x)} \times U_{B_i(x)} \quad (IV.2)$$

c) Couche 03

Cet ensemble de neurones fixes appelé « normalisation layer », effectue la normalisation de la valeur de vérité de chaque règle (poids), en fonction de la sortie précédente.

$$\overline{W} = \frac{W_i}{W_1 + W_2}, \quad i = 1, 2. \quad (IV.3)$$

d) Couche 04

Cette couche est connue sous la terminologie de « defuzzification layer » constituée de neurones adaptatifs. Cette couche reçoit les poids normalisés et calcule les paramètres conséquents tel que :

$$O_i^4 = \overline{W} f_i = \overline{W}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (IV.4)$$

Où \overline{W} désigne les poids normalisés.

Les paramètres polynomiaux $\{ p_i x + q_i y + r_i \}$ sont appelés paramètres de la conséquence.

e) Couche 05

Cette couche appelée « output layer », constituée d'un seul neurone fixe, à une entrée donnée, dont l'utilité est de délivrer la sortie d'ANFIS en sommant toutes les entrées à partir de defuzzification layer tel que :

$$O_i^5 = \sum \bar{W} f_i \quad (IV.5)$$

L'apprentissage est une phase déterminante pour le réseau ANFIS, puisqu'il permet l'adaptation des paramètres.

Le mécanisme d'apprentissage débute par la construction d'un réseau initial, puis l'application d'un algorithme d'apprentissage sur un couple « entrée/sortie » de données.

La méthode hybride est un algorithme à deux temps, utilisant la descente du gradient, ainsi que la méthode des moindres carrées. Chaque époque d'entraînement comprend un passage en avant et un passage en arrière. La méthode des moindres carrées adapte les paramètres polynomiaux de conséquence lors du passage en avant, en gardant celles de prémisse fixes. Tandis que la méthode la descente du gradient ajuste les paramètres de la fonction d'appartenance de la partie prémisses, tout en fixant les paramètres conséquents lors du passage en arrière. Plus de détails dans [21].

IV.3. Modélisation du critère de la rugosité de surface (Ra) par ANFIS

Pour la modélisation par la méthode d'ANFIS de la rugosité Ra lors de fraisage de face de l'Inconel 738 par un outil en carbure (section II.2).

IV.3.1. Traitement des données

Les résultats expérimentaux présentés dans le (tableau II.3) sont utilisés. Le plan expérimental est composé de 64 essais, dont 32 essais sont employés pour l'apprentissage du réseau (régime à sec) et 32 essais sont choisis pour tester la validité du réseau.

IV.3.2. Structure et apprentissage

La modélisation par ANFIS débute par la construction du système d'inférence flou (FIS) initial. Cette dernière est faite en utilisant la méthode de grille de répartition (grid partitionning), le choix de cette technique est justifié par le faible nombre d'entrées qui sont Vc, fz, ap et l'arrosage.

Dans le but de trouver le jeu de paramètres optimal conduisant à la meilleure approximation de Ra, plusieurs essais ont été faits en utilisant la méthode d'apprentissage hybride, pour une sortie constante et linéaire des diverses fonctions d'appartenances (MFs), triangulaire, trapézoïdale, fonction cloche et la fonction gaussienne.

Nous nous limitons à présenter seulement la structure qui a donné de meilleurs résultats qui est 4-4-2-2 (figure III.2), en utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires (figure III.3).

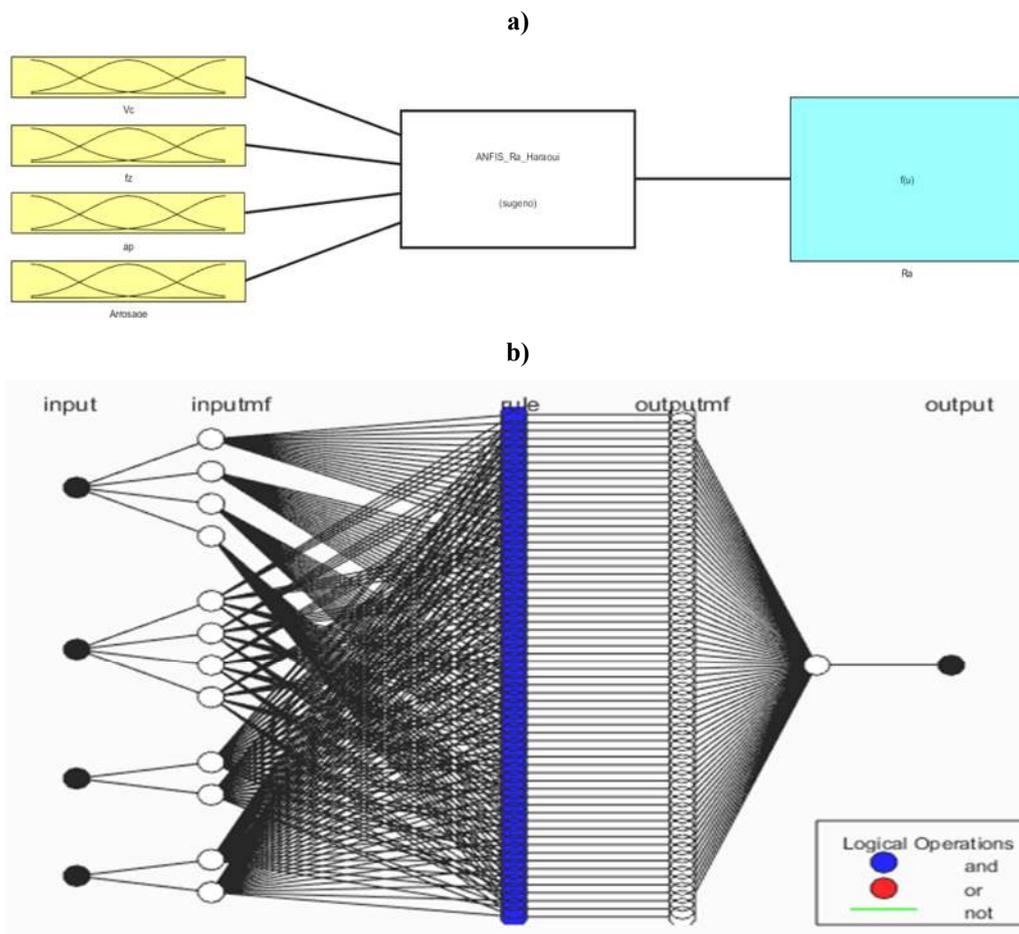


Figure IV.2: structure proposée pour l'estimation de Ra, a) visualisation des E/S, b) structure avec règles et fonctions d'appartenances (MFs)

Le choix de cette structure (4-4-2-2) est relatif au plan d'expérience élaboré au préalable, où nous avons décidés de codifier chaque niveau d'un facteur par une fonction d'appartenance. Cette codification floue est responsable du passage du domaine naturel vers le domaine flou ou les interactions entre les fonctions d'appartenance génèrent des inférences capables de reproduire au mieux le phénomène de coupe de l'Inconel 738.

C'est ensemble flou sont gouvernées par un ensemble de règle inspirées du langage humain du type :

Si Vc est... **ET** fz est ... **ET** ap est ..., **Alors** Ra est ... (IV.6)

La structure que nous avons choisie est régie par $4 \times 4 \times 2 \times 2 = 64$ règles significatives.

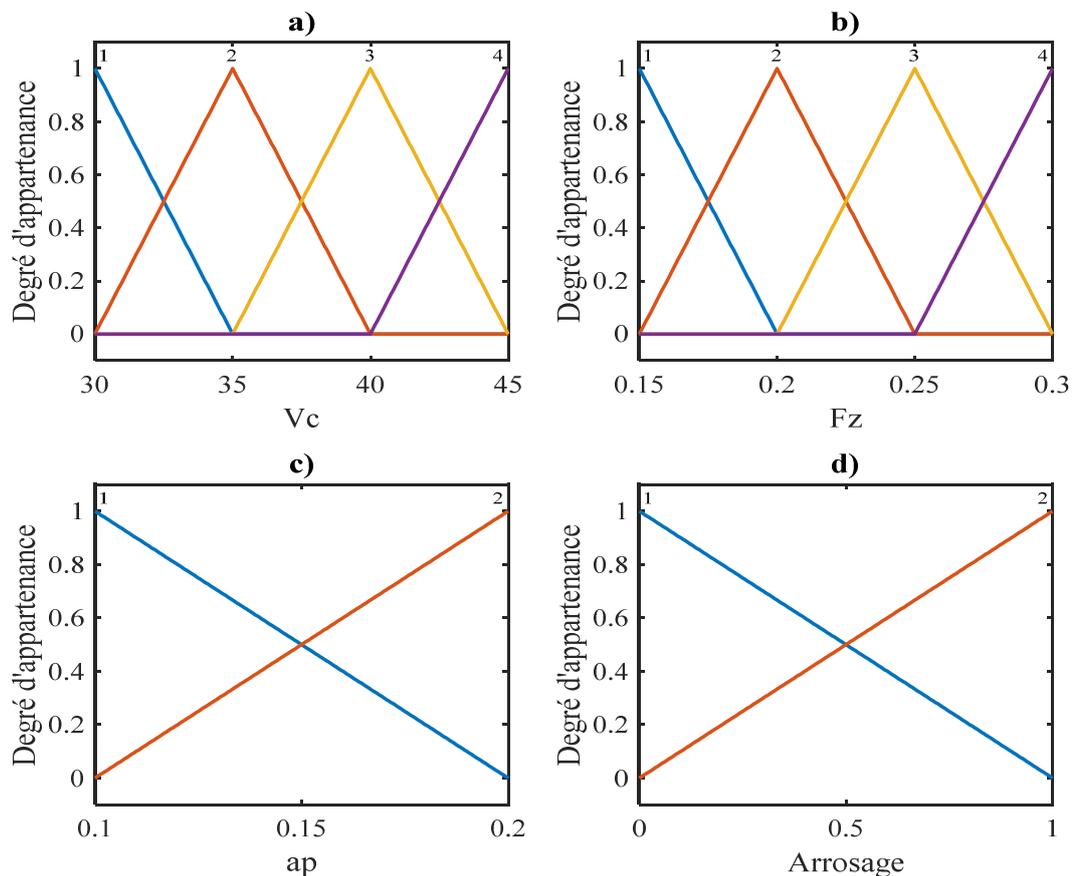


Figure IV.3: fonctions d'appartenances, a) Vc, b) Fz, c) ap, d) arrosage

Les résultats d'apprentissage en utilisant diverse fonction d'appartenance (MFs) pour une sortie floue constante et linéaire après 20 itérations d'apprentissage sont donnés dans les (tableaux IV.1-2). On constate que

l'utilisation des MFs triangulaires avec une sortie floue linéaire conduit à la meilleure estimation de Ra en termes d'erreur quadratique moyenne (MSE) avec 3.04×10^{-15} et 2.9910^{-15} pour l'apprentissage et le teste respectivement.

Tableau IV.1: résultats d'apprentissage et test pour une sortie floue constante

Fonctions d'appartenance (MFs)	Erreur quadratique moyenne (MSE)	
	Apprentissage	Test
Triangulaire	5.05×10^{-13}	3.99×10^{-13}
Trapézoïdale	5.25×10^{-13}	4.21×10^{-13}
Fonction cloche	5.39×10^{-13}	4.07×10^{-13}
Fonction gaussienne	5.44×10^{-13}	4.06×10^{-13}

Tableau IV.2: résultats d'apprentissage et test pour une sortie floue linéaire

Fonctions d'appartenance (MFs)	Erreur quadratique moyenne (MSE)	
	Apprentissage	Test
Triangulaire	3.04E-15	2.99E-15
Trapézoïdale	3.06E-15	3.99E-15
Fonction cloche	1.27E-14	1.47E-14
Fonctiongaussienne	3.11E-14	3.53E-14

On a également remarqué que le fait d'accroître le nombre des MFs nuit au résultat et rend l'algorithme d'apprentissage trop lourd. Ce qui révèle les consignes de [19, 22].

Les résultats montrent que la fonction trapézoïdale donne un résultat très satisfaisant. Cependant, elle reste déconseillée pour l'estimation de la rugosité Ra compte tenu sa forme.

IV.3.3. Diagrammes de surface 3D de Ra en utilisant le modèle ANFIS

Afin de mettre en claire l'évolution du paramètre technologique de rugosité Ra (μm) prédit en utilisant ANFIS, les surfaces tridimensionnelles de Ra (fz,ap) à sec et avec lubrification pour diverse vitesses de coupe sont montrées dans la (figure IV.4) et (figure IV.6) respectivement.

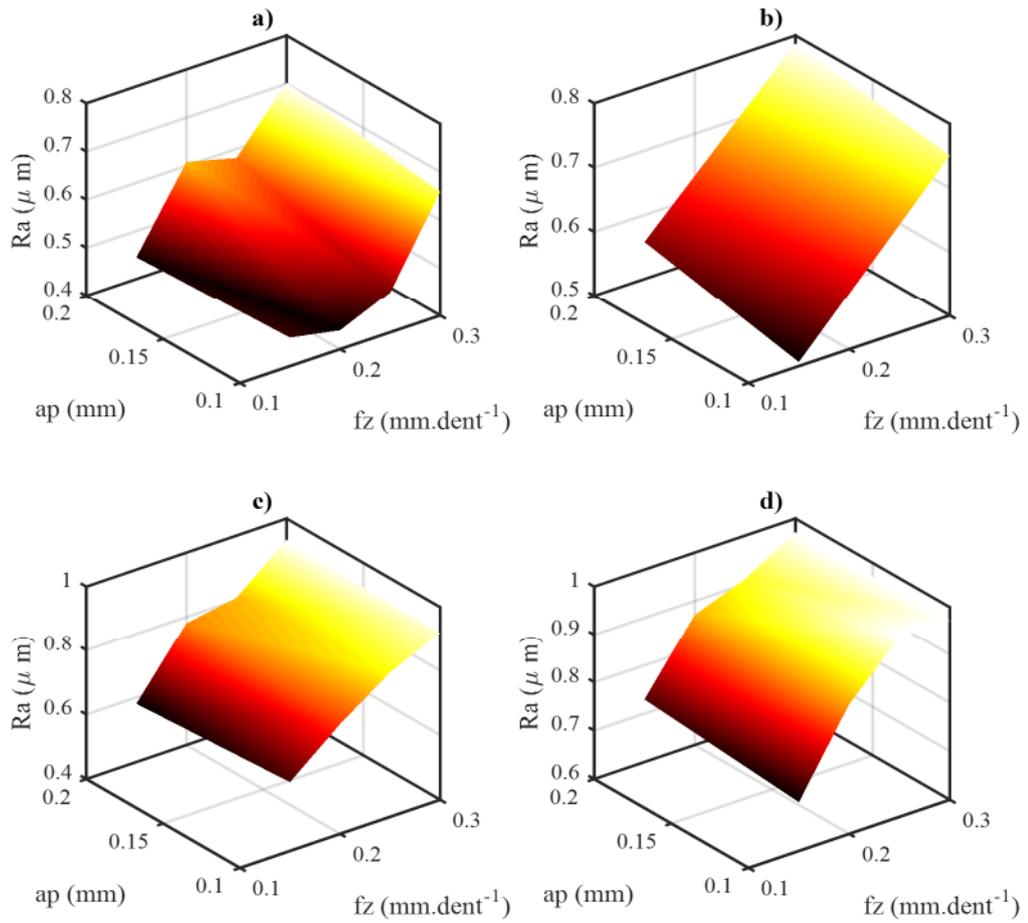


Figure IV.4: surface 3D (ANFIS) de Ra (Fz,ap) lors de fraisage à sec, a) $Vc=45$, b) $Vc=40$, c) $Vc=35$, d) $Vc=30$

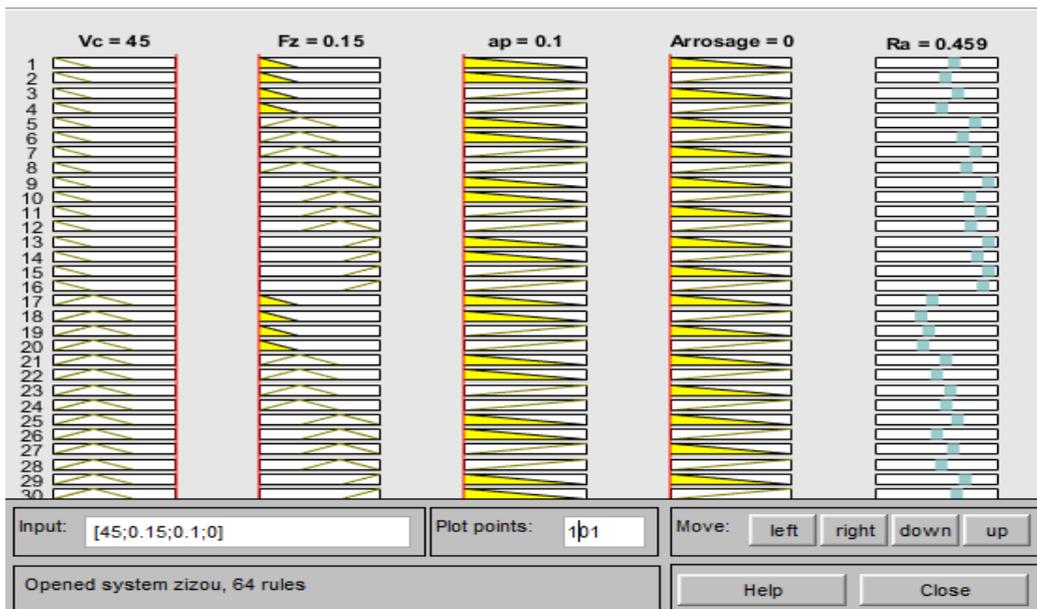


Figure IV.5: Ra optimale obtenue par ANFIS (à sec)

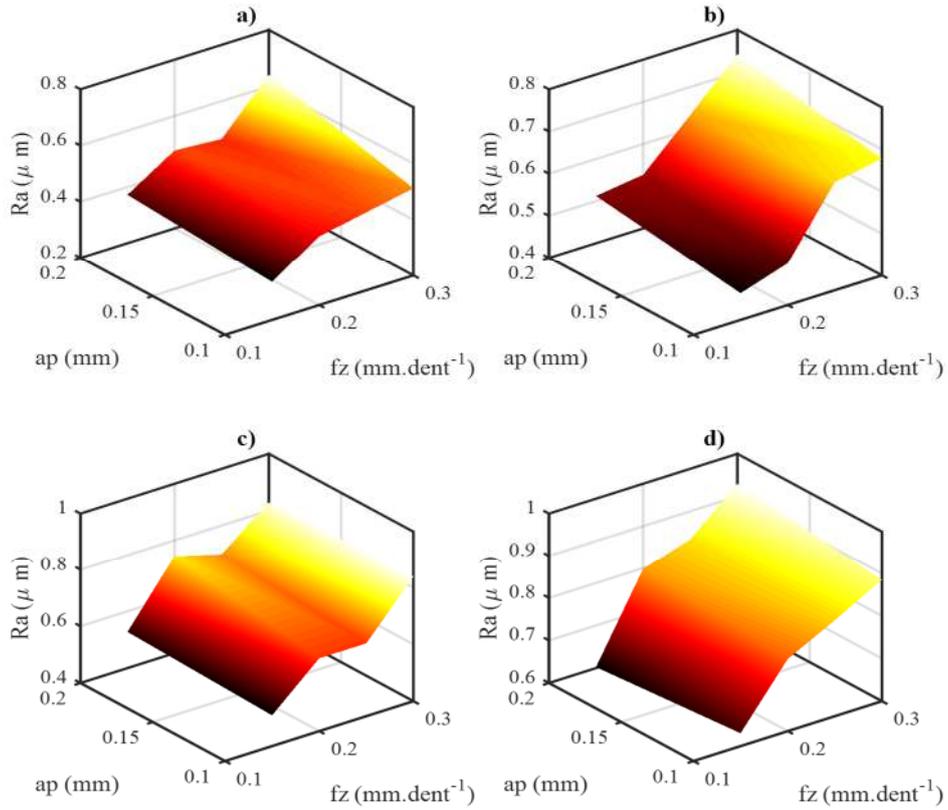


Figure IV.6: surface 3D (ANFIS) de Ra (Fz,ap) lors de fraisage avec lubrification, a) $Vc=45$, b) $Vc=40$, c) $Vc=35$, d) $Vc=30$

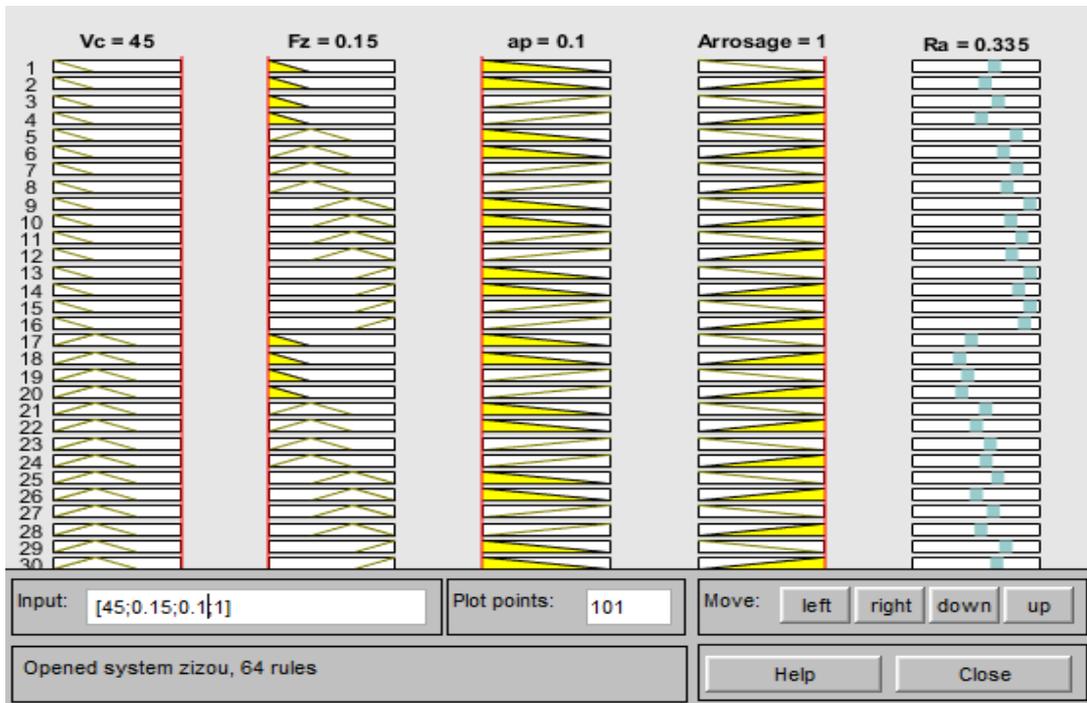


Figure IV.7: Ra optimale obtenue par ANFIS (avec lubrification)

La (figure IV.5-7) montrent les règles adoptées dans le cadre de cette étude. La première confirme l'efficacité de l'estimation de Ra à sec, où la valeur optimale retrouvée est 0.459 (μm) lorsque $V_c=45$, $f_z=0.15$ et $a_p=0.1$. Tandis que la deuxième montre est confirmée la fidélité de l'estimation du modèle proposé sous les mêmes conditions de coupe et avec lubrification qui s'est avéré 0.335 (μm), ce qui corrobore parfaitement avec les résultats expérimentaux. L'évolution de Ra prédite en utilisant ANFIS est très conforme aux résultats expérimentaux, ce qui nous incite à travailler sur la base du modèle proposé en toute confiance.

On doit souligner que malgré l'efficacité du modèle, ceci ne représente qu'une alternative permettant aux ingénieurs de gagner du temps et d'optimiser leurs opérations de coupe dans l'intervalle des essais réalisées. Et que ce modèle ne pourra en aucun cas réduire l'importance de l'exécution pratique de l'opération de fraisage ou mépriser l'importance de l'intervention et l'ingéniosité humaine lors des processus de fabrication.

IV.4. Comparaison entre les modèles ANFIS et régression linéaire

Afin de visualiser la précision des modèles proposés dans le cadre de cet humble mémoire, les graphes montrées dans les (figures IV.8-12) sont utilisées pour comparer les valeurs prédites (fournies par les modèles) du critère de rugosité de surface Ra (μm) en utilisant les modèles de régression linéaire et ANFIS avec les valeurs expérimentales afin d'évaluer l'ajustement des modèles. Les diagrammes à barres montrées dans (figures IV.8) et (figures IV.10) montre une comparaison entre les divers modèles à sec et avec lubrification respectivement. Ils montrent que les valeurs expérimentales et celles prédites par ANFIS sont quasiment les mêmes, contrairement aux valeurs estimées par le modèle empirique de régression linéaire où il y a des valeurs qui sont éloignées des valeurs expérimentales. Ainsi, le modèle ANFIS développé peut effectivement être utilisés pour prédire le critère de rugosité de surface Ra (μm).

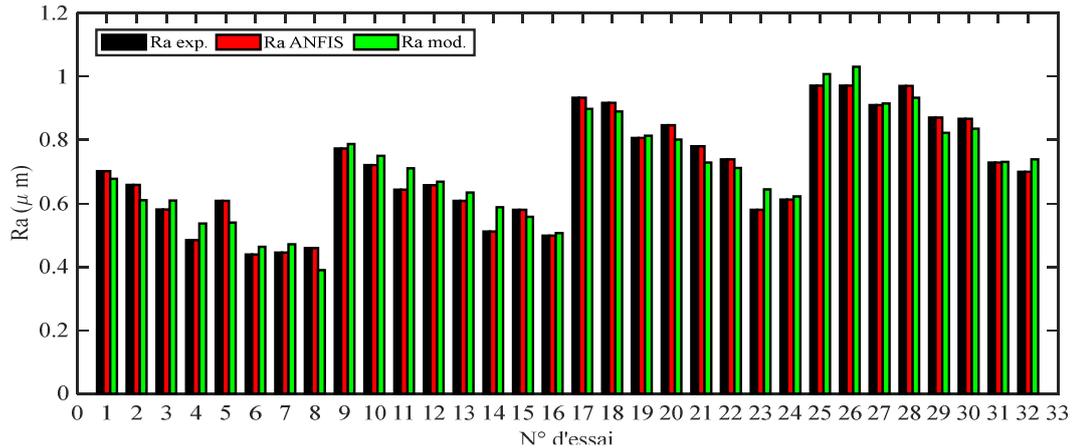


Figure IV.8: comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par régression linéaire et ANFIS pour Ra (à sec)

Ce même résultat est confirmé par la bonne corrélation du modèle ANFIS en apprentissage et test (à sec et avec lubrification) en le comparant au modèle de régression linéaire, tel que l'on peut voir dans les (figures IV.9) et (figures IV.11), où il est spectaculairement apparent que les valeurs du modèle empirique sont légèrement dispersées par rapport aux valeurs expérimentales.

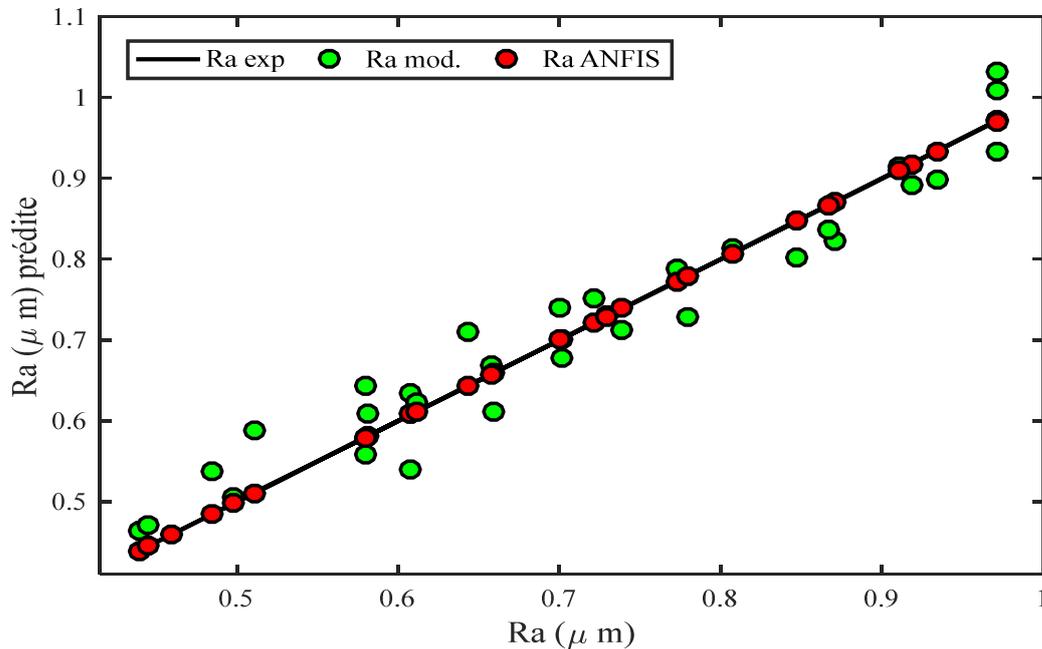


Figure IV.9: comparaison de la corrélation entre valeurs expérimentales et prédites pour Ra (à sec)

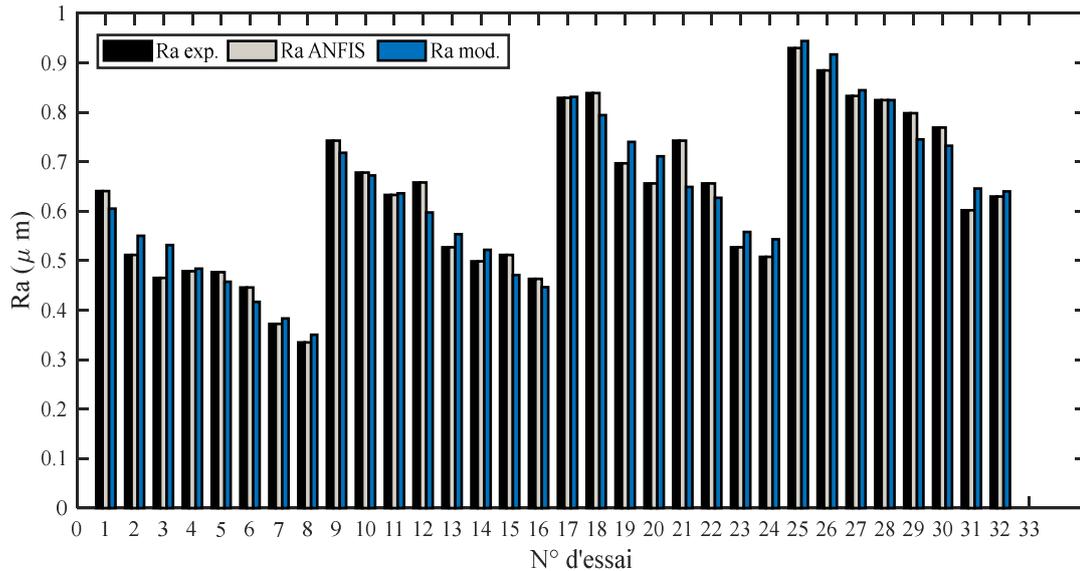


Figure IV.10: comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits par régression linéaire et ANFIS pour Ra (avec lubrification)

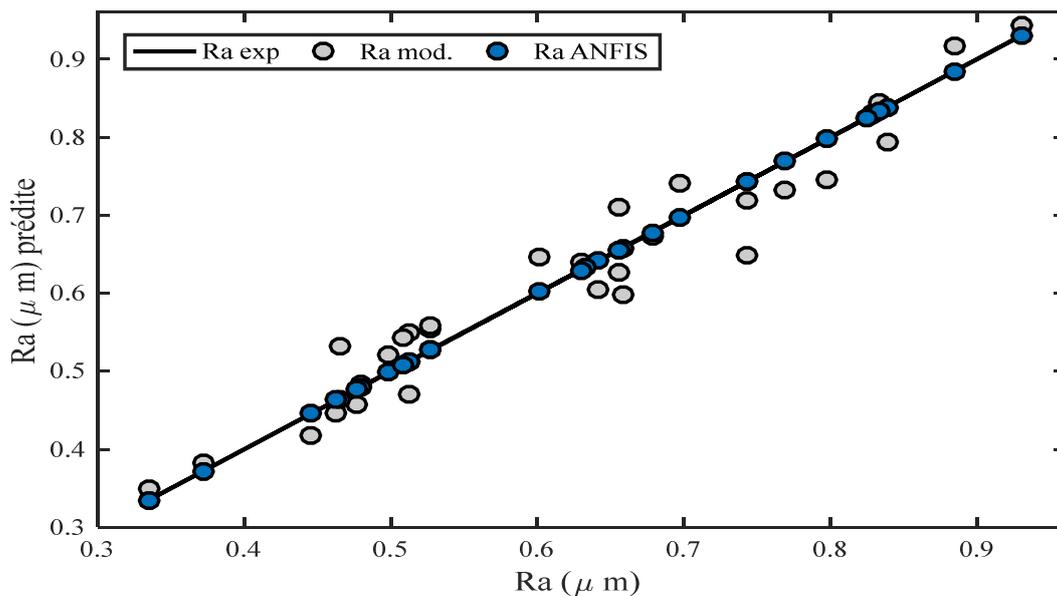


Figure IV.11: comparaison de la corrélation entre valeurs expérimentales et prédites pour Ra (avec lubrification)

La (figures IV.12) montre une comparaison entre les deux modèles. ANFIS s'avère supérieur en termes de corrélation, où une valeur de $R^2=1$ est enregistrée pour les deux régimes de coupes (à sec et avec lubrification) contre des valeurs aux voisinages de 97% pour le modèle linéaire. En termes d'erreur quadratique moyenne (MSE), ANFIS présente une supériorité remarquable avec des erreurs

aux alentours de 10^{-15} (voir (tableau IV.2)) tandis qu'elle ne dépasse pas 1.7×10^{-3} pour le modèle empirique de régression linéaire.

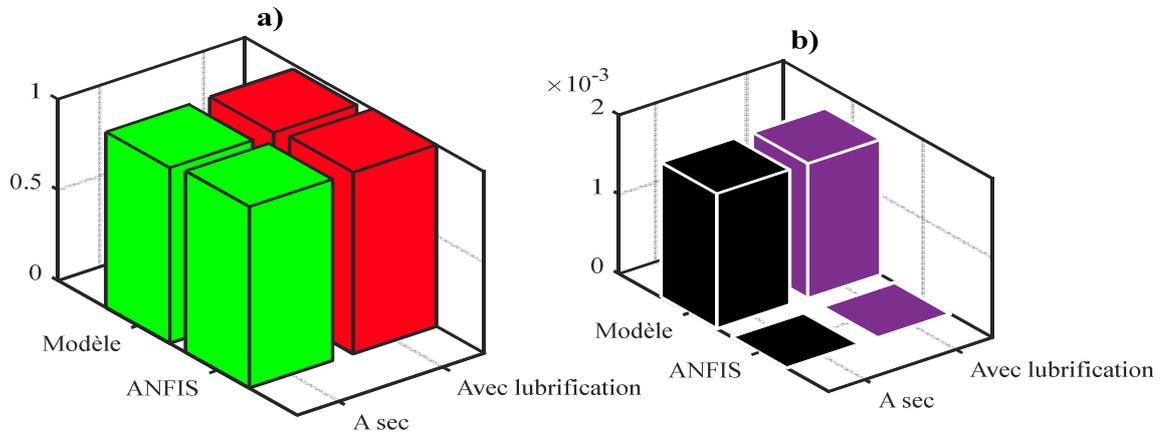


Figure IV.12: comparaison à base d'indicateurs statistiques, a) R^2 , b) MSE

IV.5. Conclusion

Le long de ce chapitre, nous avons présentés et utiliser le réseau neuro-flou adaptatif connu sous la terminologie « Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) » afin de modéliser le critère technologique de rugosité de surface R_a . Après l'analyse et la comparaison des résultats. Il ressortait que l'approche intelligente proposée est plus robuste est fiable par rapport aux modèles empiriques obtenus par régression linéaire et en mesure de reproduire fidèlement le profil de la rugosité R_a .

Conclusions

Générales et perspectives

Conclusions générales et perspectives

Le présent travail nous a permis d'évaluer l'influence des paramètres de coupe lors du fraisage de face du super alliage à base de Nickel Inconel 738 en terme du critère de rugosité de surface Ra. Le développement des modèles prédictifs et permettant d'exprimer la relation entre les conditions de coupe et la rugosité de surface. Les résultats obtenus ont aboutis aux conclusions suivantes :

- La vitesse de coupe et l'avance par dent sont les paramètres de coupe dont les effets sont les plus significatifs sur la rugosité de surface pour L'Inconel 738, avec des pourcentages de contribution de 59.77% et 31.86% lors de fraisage de face à sec pour V_c et f_z respectivement. Quant au régime de coupe avec lubrification des pourcentages de contribution de 56.93% et 35.93% pour V_c et f_z respectivement.
- La vitesse de coupe est demeure le facteur le plus significatif, avec ou sans lubrification.
- La profondeur de passe à un effet minime sur la rugosité de surface.
- Les interactions entre les divers facteurs sont insignifiantes et peuvent être négligées.
- Les modèles de régression linéaire obtenus sont fiables et en mesure de prédire fidèlement la rugosité de surface. Les valeurs du coefficient de régression sont 96.8% et 97.2% pour le régime de coupe à sec et avec lubrification respectivement.
- ANFIS donne un meilleur résultat par rapport à la régression linéaire, avec un coefficient de corrélation R^2 de 1 et une erreur quadratique moyenne de 3.04×10^{-15} et 2.99×10^{-15} pour le régime de coupe à sec et avec lubrification (apprentissage et test).
- Il a été inféré que les fonctions d'appartenances de type triangulaire aboutissent au meilleur résultat. Ce résultat revient principalement à la nature de la fonction qui est la plus sensible aux variations des entrées.
- La proposition d'un nombre de règle égal au nombre d'essai abouti à la meilleure estimation. Ceci s'explique par la simplification du phénomène d'inférence flou lorsque chaque règle est destinée spécifiquement à une expérience donnée.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- La réalisation des essais en prenant 4 niveaux pour la profondeur de passe afin de mieux appréhender son effet sur la rugosité de surface.
- La réalisation de nouveaux tests d'usinage, afin de vérifier la validité des observations effectuées dans d'autres conditions expérimentales. La modification des paramètres tels que la vitesse de coupe, la profondeur de passe.
- L'utilisation d'autres méthodes de modélisation et d'optimisation.
- L'étude de l'évolution de la température de coupe et de la puissance en fonction des conditions de coupe.
- Optimisation d'ANFIS par des algorithmes bio-inspirés tel que les algorithmes génétiques.

Liste des références

- [1] M. FNIDES, "Etude de l'impact des conditions d'usinage sur la rugosité de surface et des vibrations lors de fraisage de face," 2017.
- [2] L. Imani, A. Rahmani Henzaki, R. Hamzeloo, and B. Davoodi, "Modeling and optimizing of cutting force and surface roughness in milling process of Inconel 738 using hybrid ANN and GA," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 234, pp. 920-932, 2020.
- [3] M. Segreti, "Vibrations en coupe orthogonale: Modélisation, étude de stabilité et validation expérimentale," 2002.
- [4] C.-F. Bisu, P. Darnis, J.-Y. K'Nevez, O. Cahuc, R. Laheurte, A. Gérard, *et al.*, "New vibrations phenomena analysis in turning Nouvelle analyse des phénomènes vibratoires en tournage," 2007.
- [5] R. Laheurte, "Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux," Bordeaux 1, 2004.
- [6] "<https://docplayer.fr/10544444-Les-principales-operations-d-usinage.html>."
- [7] F. BAGUR, "Matériaux pour outils de coupe," *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique*, pp. BM7080. 1-BM7080. 16, 1999.
- [8] K. FARES, "MODELISATION DE L'ETAT DE SURFACE ET DU NIVEAU VIBRATOIRE EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME DE COUPE - CAS DU FRAISAGE," MASTER, DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2014/2015.
- [9] F. Khettabi, A. Lagred, and A. Bouchareb, "Contribution à l'amélioration de la qualité de surface en optimisant les paramètres de coupe par la méthodologie de surface de réponse en fraisage à sec," *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, vol. 32, pp. 115-123, 2016.

- [10] M. Bengersallah, S. Benchiheb, and A. Amirat, "Statistical characterisation of end milling of AISI 52100 annealed bearing steel," *Advances in Materials Research*, vol. 7, p. 137, 2018.
- [11] M. K. Rao, R. L. Malghan, S. ArunKumar, S. S. Rao, and M. A. Herbert, "An Efficient Approach to Optimize Wear Behavior of Cryogenic Milling Process of SS316 Using Regression Analysis and Particle Swarm Techniques," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 72, pp. 191-204, 2019.
- [12] X.-P. D. Quoc-Hoang Pham, Tat-Khoa Doan, Xuan-Hung Le, Lan-Huong Luong Thi, Trung-Thanh Nguyen, "OPTIMIZATION OF MILLING PROCESS PARAMETERS FOR ENERGY SAVING AND SURFACE ROUGHNESS," *Transport and Communications Science Journal*, vol. 70, pp. 173-183, 2019.
- [13] A. T. Abbas, D. Y. Pimenov, I. N. Erdakov, T. Mikolajczyk, M. S. Soliman, and M. M. El Rayes, "Optimization of cutting conditions using artificial neural networks and the Edgeworth-Pareto method for CNC face-milling operations on high-strength grade-H steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 2151-2165, 2019.
- [14] M. S. Yazdi and A. Khorram, "Modeling and optimization of milling process by using RSM and ANN methods," *International journal of Engineering and Technology*, vol. 2, p. 474, 2010.
- [15] R. A. Mahdavinejad, N. Khani, and M. M. S. Fakhrabadi, "Optimization of milling parameters using artificial neural network and artificial immune system," *Journal of mechanical science and technology*, vol. 26, pp. 4097-4104, 2012.
- [16] L. M. Maiyar, R. Ramanujam, K. Venkatesan, and J. Jerald, "Optimization of machining parameters for end milling of Inconel 718 super alloy using Taguchi based grey relational analysis," *Procedia engineering*, vol. 64, pp. 1276-1282, 2013.

- [17] A. Khechekhouche, H. Cherif, A. Benakcha, A. Menacer, S. E. Chehaidia, and H. Panchal, "Experimental diagnosis of inter-turns stator fault and unbalanced voltage supply in induction motor using MCSA and DWER," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 8, pp. 1202-1216, 2020.
- [18] H. Cherif, A. Benakcha, I. Laib, S. E. Chehaidia, A. Menacer, B. Soudan, *et al.*, "Early detection and localization of stator inter-turn faults based on discrete wavelet energy ratio and neural networks in induction motor," *Energy*, p. 118684, 2020.
- [19] S. E. CHEHAIDIA, A. ABDEREZZAK, H. KHERFANE, B. BOUKHEZZAR, and H. CHERIF, "AN IMPROVED MACHINE LEARNING TECHNIQUES FUSION ALGORITHM FOR CONTROLS ADVANCED RESEARCH TURBINE (CART) POWER COEFFICIENT ESTIMATION."
- [20] F. Harrouche, "Etude comparative de deux méthodes d'optimisation d'un système de classification des défauts mécaniques par la logique floue," 2019.
- [21] J.-S. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 23, pp. 665-685, 1993.
- [22] A. B. Asghar and X. Liu, "Estimation of wind turbine power coefficient by adaptive neuro-fuzzy methodology," *Neurocomputing*, vol. 238, pp. 227-233, 2017.