

Université 08 mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



**Recherche bibliographique pour l'obtention du diplôme
de MASTER**

Option : Maintenance Industrielle

Présenté par : ATALLAH Hichem

***Modélisation des paramètres technologiques
dans l'usinage du polymère POM-C en utilisant
les méthodes RMS et ANN***

Sous la Direction de :

Pr. YALLESE M.A.
Dr. BENSOUILAH H.

Année universitaire 2015/2016

Remerciement

*Je remercie dieu de m'avoir donné la force et le courage Ainsi
que la volonté d'effectuer mon projet de fin cycle.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Professeur
YALLESEM.A. et docteur **BENSOUILH Hamza** qui ont dirigé ce
mémoire avec intérêt et compétences, et qui ont me conseillé tout
au long de cette période.*

*J'adresse aussi aux enseignantes de notre département de Génie
mécanique d'avoir m'apporté leur soutien pour réaliser ce
travail.*

*J'exprime mes gratitudes et mes remerciements à mes parents et
toute ma famille pour leurs encouragements.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale..... Erreur ! Signet non défini.

CHAPITRE I

I.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
I.2. Généralité sur la coupe des métaux	Erreur ! Signet non défini.
I.2.1. Définition de l'usinabilité.....	Erreur ! Signet non défini.
I.2.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3. Facteurs influençant l'usinabilité	Erreur ! Signet non défini.
I.2.4. Usinage des polymères	Erreur ! Signet non défini.
I.2.5. Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils	Erreur ! Signet non défini.
défini.	
I.3. Les polymères.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.1. Définition.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2. Abréviations de nomination	Erreur ! Signet non défini.
I.3.3. Elaboration des polymères	Erreur ! Signet non défini.
I.3.4. Classifications des polymères	Erreur ! Signet non défini.
I.3.5. Les matériaux composites à matrice polymère	Erreur ! Signet non défini.
I.3.6. Les renforts.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.7. Domaines d'utilisation	Erreur ! Signet non défini.
I.3.8. Mise en œuvre des polymères	Erreur ! Signet non défini.
I.4. Travaux de recherches sur l'usinage des polymères	Erreur ! Signet non défini.
I.4.1. Étude d'usinabilité en micro-usinage de PA66 GF30 Polyamide avec un outil PCD	Erreur ! Signet non défini.
Signet non défini.	
I.4.2. Etude expérimentale et modélisation du processus de coupe de PA 6 / Nano carbonate de calcium Composite	Erreur ! Signet non défini.
I.4.3. Modélisation mathématique d'optimisation de la rugosité de surface dans la transformation du polyamide à base de réseau neuronal artificiel.....	Erreur ! Signet non défini.

SOMMAIRE

I.4.4. Prédiction de la rugosité de surface dans l'usinage du Castamide par ANN **Erreur ! Signet non défini.**

I.4.5. Modélisation et prédiction de la rugosité de surface dans les opérations de tournage en utilisant ANN et RMS **Erreur ! Signet non défini.**

CHAPITRE II

II.1. Introduction **Erreur ! Signet non défini.**

II.2. Matériels utilisés..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.1. Machine-outil..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.2. Matériau utilisé pour les essais d'usinage **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.2.1. propriétés techniques du POM C **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.3. Plaquettes de coupe..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.4. Porte outil..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.5. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.5.1. Chaîne de mesure et caractéristiques **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.6. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.2.7. Autres équipements **Erreur ! Signet non défini.**

II.3. Conditions de coupe **Erreur ! Signet non défini.**

II.4. Planification des expériences **Erreur ! Signet non défini.**

II.4.1. Méthode de planification des expériences **Erreur ! Signet non défini.**

II.5. Conclusion **Erreur ! Signet non défini.**

CHAPITRE III

SOMMAIRE

III.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
III.2. Analyse de variance (ANOVA)	Erreur ! Signet non défini.
III.3. Analyse de régression.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Modélisation des différents critères, Ra, Fz, Pc et MRR, en fonction de Vc, f et ap.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.1.La Rugosité (Ra)	Erreur ! Signet non défini.
III.4.1.1.Modèle mathématique et le coefficient de détermination R2.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.1.2.Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.1.3.Diagrammes de surface en 3D.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.2.Effort de coupe tangentiel (Fz).....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.2.1Modèle mathématique est le coefficient de détermination.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.2.2.Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.2.3.Diagrammes de surface 3D	Erreur ! Signet non défini.
III.4.3.Puissance de coupe (Pc)	Erreur ! Signet non défini.
III.4.3.1.Modèle mathématique est le coefficient de détermination.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.3.2.Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.3.3.Diagrammes de surface 3D	Erreur ! Signet non défini.
III.4.4.Volume de copeau (MRR)	Erreur ! Signet non défini.
III.4.4.1.Modèle mathématique et le coefficient de détermination	Erreur ! Signet non défini.
III.4.4.2.Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4.4.3.Diagrammes de surface 3D	Erreur ! Signet non défini.
III.5. Optimisation des conditions de coupe.....	Erreur ! Signet non défini.
III.5.1.Optimisation Mono-objective.....	Erreur ! Signet non défini.

SOMMAIRE

III.5.2.Optimisation Multi-objective (but combiné, technologique-économique) .. **Erreur ! Signet non défini.**

III.6. Conclusion..... **Erreur ! Signet non défini.**

CHAPITRE IV

IV.1. Introduction **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2. Réseau de neurones artificiels **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.1.Calcul de la valeur prédite **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.2.Les neurones formels **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.3.Différentes fonctions de transfert..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.4.Perceptron simple..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.5.Perceptron multicouches **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.6.Algorithme de rétro-propagation..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.7.Apprentissage..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.3. Modélisation de la rugosité de surface Ra et de l'effort de coupe tangentiel Fz ...**Erreur ! Signet non défini.**

IV.3.1.Modélisation de la rugosité de surface Ra par ANN..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.3.1.1.Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites Ra **Erreur ! Signet non défini.**

IV.3.2.Modélisation de l'effort de coupe tangentiel Fz par ANN..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.3.2.1.Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites Fz..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.4. Comparaison entre les modèles ANN et RMS **Erreur ! Signet non défini.**

IV.5. Conclusion..... **Erreur ! Signet non défini.**

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale **Erreur ! Signet non défini.**

SOMMAIRE

LISTE DE FIGURES

CHAPITRE I

FIGURE. I 1 FORMEE DE MACROMOLECULE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE. I 2 CLASSIFICATION DES PLASTIQUES [11]	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE. I 3 SCHEMA GENERAL DE LA MISE EN ŒUVRE DES POLYMERES THERMOPLASTIQUES [13].	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE. I 4 EFFET D'AVANCE ET LA VITESSE DE COUPE SUR RA.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE. I 5 EFFET D'AVANCE ET LA VITESSE DE COUPE SUR FC.	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE. I 6 EFFET D'AVANCE ET LA VITESSE DE COUPE SUR P.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE .I 7 ORGANIGRAMME DE LA METHODE DE RECHERCHE HARMONIE BASEE SUR LES RESEAUX NEURONES, (RHDNN).....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE .I 8 LES FACTEURS PRINCIPAUX EXPERIMENTAUX SUR RA ET F Ω ...	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE .I 9 L'ARCHITECTURE ANN POUR L'OBTENTION DE RA.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE .I 10 INFLUENCE DE L'AVANCE ET LA PROFONDEUR DE PASSE SUR LA RUGOSITE DE SURFACE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE .I 11 ARCHITECTURE ANN.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE .I 12 ARCHITECTURE DE RESEAU DE NEURONE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE .I 13 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS MESUREES ET PREDITES PAR LA METHODE DE REGRESSION DE RA.....	30
FIGURE .I 14 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS MESUREES ET PREDITES DE RA DANS LA PHASE D'ENTRAINEMENT DU MODELE ANN.....	30
FIGURE .I 15 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS MESUREES ET PREDITES DE RA DANS LA PHASE DU TESTE DU MODELE ANN.....	31

CHAPITRE II

SOMMAIRE

FIGURE II. 1 TOUR PARALLELE MODELE SN40C	32
FIGURE II. 2 EPROUVETTES POUR DIFFERENTS ESSAIS. A)EPROUVETTE BRUTE ; B) EPROUVETTE AVEC DES PALIERS.	33
FIGURE II. 3 PHOTOS DES PLAQUETTES DE COUPE UTILISEES.	34
FIGURE II.4 DIFFERENTES ANGLES DE COUPE.	35
FIGURE II.5 PORTE OUTIL UTILISE.	35
FIGURE II.6 MONTAGE DU DYNAMOMETRE SUR LA TABLE DE LA MACHINE.	36
FIGURE II.7 CAPTEUR D'EFFORT DE COUPE KISTLER.	36
FIGURE II.8 EXEMPLE D'ACQUISITION DU LOGICIEL « DYNOWARE ».	37
FIGURE II.9 CHAINE DE MESURE DES EFFORTS DE COUPE.	38
FIGURE II.10 MESURE DE RUGOSITE SANS DEMONTAGE DE LA PIECE.	38

CHAPITRE III

FIGURE III. 1 VALEURS PREDITES EN FONCTION DES VALEURS EXPERIMENTALES POUR LE CRITERE DE LA RUGOSITE(RA).....	47
FIGURE III.2 DIAGRAMMES DE SURFACE 3D DE (RA) EN FONCTION DE (VC, F ET AP)	48
FIGURE III.3. VALEURS PREVUES EN FONCTION DES EXPERIMENTALES POUR LE L'EFFORT TANGENTIEL (FZ).....	50
FIGURE III.4 DIAGRAMMES DE SURFACE 3D DE (FZ) EN FONCTION DE (VC, F ET AP)	51
FIGURE III.5 VALEURS PREVUES EN FONCTION DES VALEURS EXPERIMENTALES POUR LA PUISSANCE DE COUPE (PC).....	52
FIGURE III.6 DIAGRAMMES DE SURFACE 3D DE (PC) EN FONCTION DE (VC, F ET AP)	53
FIGURE III.7 VALEURS PREVUES EN FONCTION DES EXPERIMENTALES POUR LE CRITERE DE (MRR)	55
FIGURE III.8 DIAGRAMMES DE SURFACE 3D DE (MRR) EN FONCTION DE (VC, F ET AP).....	56
FIGURE III.9 REGIME DE COUPE OPTIMALE POUR RA MINIMALE	57
FIGURE III.10 LES VALEURS DES DESIRABILITES POUR UNE RA MINIMALE	58
FIGURE III.11 VARIATION DE LA DESIRABILITE EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE	58
FIGURE III.12 REGIME DE COUPE OPTIMALE POUR UNE PRODUCTION MAXIMALE	60
FIGURE III.13 VALEURS DE LA DESIRABILITE	60
FIGURE III.14 VARIATION DE LA DESIRABILITE EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE	61
FIGURE III.15 REGIME DE COUPE OPTIMAL POUR UNE RUGOSITE MINIMALE ET UN MRR MAXIMALE ..	62
FIGURE III.16 VALEURS DE LA DESIRABILITE COMBINEE	62
FIGURE III.17 VARIATION DE LA DESIRABILITE EN FONCTION DES CONDITIONS DE COUPE	63

CHAPITRE IV

FIGURE IV.1 RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS.....	66
---	----

SOMMAIRE

FIGURE IV.2 TOPOLOGIE D'UN RESEAU DE NEURONES	67
FIGURE IV.3 REPRESENTATION D'UN NEURONE FORMEL [22].....	68
FIGURE IV.4 DIFFERENTES FONCTION DE TRANSFERT DE RESEAU DE NEURONES [24].....	68
FIGURE IV.5 PROCESSUS D'APPRENTISSAGE DU RESEAU DE NEURONES.....	69
FIGURE IV.6 ARCHITECTURE NEURONALE CHOISIE POUR RA.....	72
FIGURE IV.7 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET PRIDITES POUR RA ..	73
FIGURE IV.8 EVOLUTION DE RA EN FONCTION DES PARAMETRES DE COUPE.....	74
FIGURE IV.9 COMPARAISON DES VALEURS EXPERIMENTALES ET ESTIMEES DE RA	74
FIGURE IV.10 ARCHITECTURE CHOISIE POUR L'EFFORT TANGENTIEL FZ.....	75
FIGURE IV.11 COMPARAISON ENTRE VALEURS EXPERIMENTALES ET PRIDITES POUR LA L'EFFORT TENGENTIEL (FZ)..	77
FIGURE IV.12 EVOLUTION DE L'EFFORT TANGENTIEL EN FONCTION DES PARAMETRES DE COUPE.....	77
FIGURE IV.13 COMPARAISON DES VALEURS EXPERIMENTALES ET ESTIMEES DE L'EFFORT TANGENTIEL FZ	78
FIGURE IV.14 COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET LES RESULTATS PREDITS PAR RSM ET ANN POUR RA	79
FIGURE IV.15 COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET LES RESULTATS PREDITS PAR RSM ET ANN POUR FZ.....	79

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

TABLEAU I. 3 TOLERANCES ACCESSIBLES EN CONDITIONS NORMALES [5] .	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
TABLEAU I. 4 CONDITIONS DE COUPE DES POLYMERES [6].....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
TABLEAU I. 5 NOM ET DESIGNATION DES QUELQUES MATIERES PLASTIQUES [10].....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
TABLEAU I. 6 LES CHARGES EN FONCTION DE PROPRIETE DESIRE [12].....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
TABLEAU I. 7 PROPRIETES PHYSIQUE DU POLYAMIDE P A-6.....	25
TABLEAU I. 8 LES VALEURS EXPERIMENTALES POUR LA CONSTRUCTION DU MODELE	29

CHAPITRE II

TABLEAU II.1 <i>LES PROPRIÉTÉS TECHNIQUES DU POM C. [19]</i>	34
TABLEAU II.2 <i>CARACTÉRISTIQUES DE PORTE PLAQUETTE UTILISÉE.</i>	35
TABLEAU II.3 <i>CONDITIONS DE COUPE POUR LES ESSAIS DES EFFORTS DE COUPE ET DE LA RUGOSITÉ.</i>	39
TABLEAU II.4 <i>MATRICE DE PLANIFICATION POUR UN PLAN DE 27 ESSAIS.</i>	40

CHAPITRE III

TABLEAU III.1 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DE LA RUGOSITÉ ARITHMÉTIQUE RA, EFFORTS DE COUPE (FZ), PUISSANCE DE COUPE (PC) ET VOLUME DE COUPEAU MRR.....	45
TABLEAU III.2 ANALYSE DE LA VARIANCE ANOVA POUR RA	46
TABLEAU III.3 ANALYSE DE LA VARIANCE ANOVA FZ.....	49

SOMMAIRE

TABLEAU III.4 ANALYSE DE LA VARIANCE ANOVA PC	51
TABLEAU III.5 ANALYSE DE LA VARIANCE ANOVA (MRR).....	54
TABLEAU III.6 RESULTATS DES VALEURS OPTIMALES DES PARAMETRES ETUDIES.	57
TABLEAU III.7 RESULTATS DES VALEURS OPTIMALES DES PARAMETRES ETUDIES.	59
TABLEAU III.8 RESULTATS DES VALEURS OPTIMALES DES PARAMETRES ETUDIES.....	61

CHAPITRE IV

TABLEAU IV.1 <i>RESULTATS EXPERIMENTAUX POUR RA ET FZ</i>	70
TABLEAU IV.2 <i>PERFORMANCE DES STRUCTURES ANN DU MODELE DE RA</i>	71
TABLEAU IV.3 <i>VALEURS STATISTIQUES DE L'ANALYSE ANN DE RA</i>	73
TABLEAU IV.4 <i>PERFORMANCE DES STRUCTURES ANN DU MODELE DE FZ</i>	75
TABLEAU IV.5 <i>VALEURS STATISTIQUES DE L'ANALYSE ANN DE FZ</i>	76
TABLEAU IV.6 <i>COEFFICIENTS DE CORRELATION POUR RSM ET ANN</i>	78

Remarques

Erreur :

Remplacer chaque MMR par MRR pour tout le mémoire

Introduction générale

Les pièces de machines au cours de leur durée de vie utile sont significativement influencées par la qualité de rugosité de surface et l'effort de coupe tangentiel, le processus d'usinage est plus complexe, et donc, il est très difficile de développer un modèle complet de prédiction impliquant tous les paramètres de coupe.

Notre mémoire concerne l'étude de la mesure de la rugosité de surface et l'effort de coupe tangentiel pendant le tournage du polymère POM-C en fonction de la variabilité des différents paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) par tours et la profondeur de coupe (a_p).

Un plan d'expérience factoriel complet de 27 essais (L_{27}) est mis en œuvre pour modéliser la rugosité de surface et l'effort de coupe tangentiel. Pour la modélisation nous avons utilisé deux méthodes qui sont, la méthodologie de surface de réponse (RMS) et l'approche par réseau de neurone artificiels (ANN), pour modéliser la rugosité de surface et l'effort de coupe tangentiel lors du tournage du polymère POM-C par un outil en carbure KC 726 M (ISO P20-PVD).

Cette partie du travail débouche sur une comparaison entre les deux méthodes afin de voir la précision et la robustesse des deux méthodes.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne l'étude bibliographique sur l'usinabilité des matériaux et les critères de leurs évaluation, des notions sur le couple outil-matière, les différents matériaux de coupe utilisés en usinage, la classification des polymère POM-C. La fin de ce chapitre débouche sur un résumé de quelques travaux de recherche (publications) qui concernent l'usinage des polymère POM-C ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation des conditions de coupe.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisés tels que ; tour, Rugosimètre, plateforme Kistler pour la mesure des efforts de coupe...etc. Egalement, les matériaux à usinés (polymère POM-C) sont présentés d'une manière détaillée ainsi que l'approche expérimentale adopté

Le troisième chapitre est réservé à une analyse de variance (ANOVA) pour la détermination des facteurs significatifs sur les paramètres technologiques misent en étude (R_a , F_z , P_c , et MRR), d'une part, d'autre part la méthodologie de surface de réponse a été employée pour tirer les modèles

mathématiques et leurs coefficients de déterminations ainsi que le tracé des graphes en 3D qui illustrent l'évolution des différents facteurs rencontrés lors de la coupe en fonction des paramètres de régime de coupe (V_c , f et a_p).

Dans le dernier chapitre, nous utilisons l'approche ANN (réseaux de neurones) pour modéliser la rugosité de la surface et l'effort de coupe tangentiel en fonction de différents paramètres de régime de coupe. lors de l'usinage de polymère POM-C, finalement et pour vérifier l'efficacité et la robustesse de la méthode des ANN, nous avons fait une comparaison entre cette dernière et la méthode de la surface de réponse.

I.1. Introduction

Le tournage est un procédé d'usinage qui permet d'obtenir des formes de révolution extérieures ou intérieures, à l'aide d'outil généralement à tranchant unique ; les quatre procédés de tournage sont :

- Chariotage : l'outil se rapproche plus de la broche qu'il ne se déplace vers l'axe de rotation
- Dressage : l'outil se rapproche plus de l'axe de rotation qu'il ne se déplace vers la broche
- L'alésage : est l'opération qui consiste à usiner avec soin la surface intérieure d'un cylindre ou de toute autre pièce creuse. C'est aussi le résultat de cette opération.
- Copiage : Obtention d'une pièce de révolution dont la génératrice est un profil composé complexe.

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomère.

On distingue parmi ces polymères le polyacétal copolymère en abréviation POM C, existe en couleur blanche naturelle et aussi en noir, l'avantage particulier du POM C est la combinaison idéale à la résistance mécanique, la rigidité et la ténacité. Le POM C est plus rigide et plus solide que les autres thermoplastiques, surtout dans le domaine de températures de 50 à 120 °C, il se distingue par sa grande rigidité, sa grande dureté, une excellente résistance aux chocs également à des températures très basses.

Dans cette recherche bibliographique, nous présentons une étude succincte divisée en deux parties. La première est consacrée aux définitions de quelques phénomènes intervenants dans le processus d'usinabilité, généralités sur les grandes familles des polymères ainsi que leurs domaines d'utilisation.

La deuxième partie est dédiée aux différents travaux de recherches antérieures sur l'usinage des polymères, on a donné aussi une synthèse qui rassemble les pionner chercheurs dans le domaine des polymères.

I.2. Généralité sur la coupe des métaux

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs

intervenants dans le processus de la coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage ...) sur le comportement d'un matériau en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes.

Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage [1].

I.2.1. Définition de l'usinabilité

L'usinabilité est la capacité d'un matériau M1 à être usiné par un matériau usinant M2. Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif de l'usineur. L'usinabilité peut être évaluée à partir d'une combinaison des paramètres suivants :

- L'évolution des efforts de coupe et de la puissance consommée
- Le débit copeaux
- La durée de vie des outils
- La productivité
- L'intégrité de surfaces

La notion d'usinabilité dépend donc d'un critère choisi par l'usineur mais reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût et/ou à la meilleure qualité pièce [2].

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée.

Selon les auteurs; [3] l'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée.

Les techniques d'usinage sont nombreuses, nous les diviser en deux catégories :

➤ **Usinages par méthodes non traditionnelles**

Ces méthodes sont classées en fonction des mécanismes physiques mis en jeu.

- ❖ **méthodes thermiques**, utilisant : les faisceaux d'électron, le plasma, le laser.
- ❖ **méthodes chimiques**, entre autre la dissolution chimique, l'usinage électrochimique.
- ❖ **méthodes mécaniques**, à savoir les jets liquides avec abrasifs, les ultrasons.
- **Usinages par outils coupants (méthodes traditionnelles)**

L'enlèvement de la matière par un outil coupant peut être obtenu par diverses méthodes, principalement fonction des caractéristiques géométriques de la pièce à réaliser : tournage, fraisage, filetage, perçage, alésage, taraudage, opérations de décolletage (chariotage, fonçage, tronçonnage, perçage, ... etc.) [3].

I.2.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût.

Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont [3-4]:

- ✓ La durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps.
- ✓ Les conditions de coupe.
- ✓ Les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe.
- ✓ Le fractionnement du copeau.
- ✓ L'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité.
- ✓ La productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités.

I.2.3. Facteurs influençant l'usinabilité

I.2.3.1. La résistance mécanique

On pense généralement que la résistance mécanique, ou la dureté qui lui est équivalente constitue un indice d'usinabilité significatif. En réalité, des aciers dont la dureté est rendue plus élevée par un traitement de trempe et revenu au lieu d'un traitement de recuit, par contre pour les polymères les éléments d'addition jouent un rôle significatif.

I.2.3.2. Les caractéristiques thermiques

Le **tableau I-1** présente la conductivité thermique de quelques polymères comparé avec d'autres matériaux. Cette caractéristique est en relation étroite avec l'usinabilité car les polymères qui ont une conductivité réduite ne dissipent pas rapidement la chaleur générée lors de la coupe, ce qui conduit à la concentration de la chaleur au niveau du contact pièce-outil-copeau et par conséquent à la diminution de la qualité de surface usinée par l'effet de l'apport du métal sur l'outil de coupe.

Tableau I. 1 Valeurs approximatives de la conductivité thermique pour une série de matériaux.

Matériau	Conductivité thermique W/(m.K°)
Diamant	900 ~ 2320
Argent	429
Cuivre	380
Or	318
Aluminium	200
Acier inoxydable	12,11 ~ 45,0
Polyacétal (POM C)	0.31
Zellamid 250 XPE	0,27
PEEK	0,25
Zellamid 202 PA6	0,23

I.2.4. Usinage des polymères

I.2.4.1. Comportements vis-à-vis de l'usinage

Les caractéristiques des polymères qui, de près ou de loin, ont une influence sur les opérations d'usinage, sont les suivantes [5]:

-le module d'élasticité et la dureté : les plastiques sont très souples par rapport aux aciers (modules compris entre 1 000 et 20 000 MPa) et beaucoup moins durs, ce qui impose, par exemple, des précautions de serrage particulières pour ne pas déformer la pièce ni en marquer la surface.

-les contraintes internes: les pièces en plastique contiennent souvent des contraintes internes après moulage dues, en particulier, au retrait de la matière passant de l'état liquide à l'état solide. Il arrive fréquemment que l'usinage modifie la répartition de ces contraintes. Des précautions doivent

par conséquent être prises pour qu'il n'y ait pas d'accumulation de contraintes susceptibles d'entraîner des fissurations. Un des remèdes peut être de pratiquer un recuit des pièces après moulage. La vitesse de refroidissement est un élément essentiel pour réduire les contraintes internes. Plus la température de recuit est élevée, plus la baisse de température doit être lente (**tableau I.2**).

Parfois, l'usinage est réalisé après dégrossissage d'une ébauche. Dans ce cas, l'ébauche est généralement sans contraintes car celles-ci sont libérées lors du dégrossissage.

-la dilatation et la conductivité thermique : les matières plastiques non chargées ont des coefficients de dilatation thermique généralement compris entre 50 et 200 $\mu\text{m/m.K}$. Ce sont des matériaux isolants, sauf ceux chargés de particules métalliques ou de fibres de carbone. La combinaison de ces 2 caractéristiques, grande dilatation thermique et faible conductivité, fait que la chaleur engendrée par l'opération d'usinage reste concentrée sur la zone usinée et entraîne une déformation thermique importante, voire un risque de dégradation thermique.

Tableau I. 2. Exemples de conditions de recuit sur plaques extrudées [5]

Matière	Température (°C)	Durée de chauffage selon épaisseur	Refroidissement
Polyéthylène – HD	120	2 h pour 20 mm à 7 h pour 120 mm	Baisse de 10 °C par heure et retirer les pièces à environ 25 °C
Polypropylène	140		
PVDF	150	1,5 h pour 10 mm à 2,5 h pour 30 mm	

-l'usure des outils : une grande partie des plastiques non chargés ont un comportement autolubrifiant et ne créent pas d'usure importante des outils. Par contre, ceux qui comportent des charges minérales (verre) ont tendance à accentuer l'usure des outils traditionnels d'usinage par enlèvement de copeaux.

-l'hygrométrie : certains polymères absorbent un taux important d'humidité (polyamides, par exemple). Les phénomènes d'absorption ne sont pas instantanés mais se produisent au bout de quelques minutes, voire de quelques heures. Cela modifie les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles.

Il faut donc tenir compte du comportement du polymère en présence d'humidité, de la durée d'usinage, de la présence ou non d'un liquide de refroidissement, de l'ambiance hygrométrique de l'atelier, du fait que l'échauffement dû à l'usinage va sécher le matériau en surface, etc.

-*l'électrostatique* : certains plastiques développent des charges électrostatiques superficielles importantes par frottement, qui attirent les copeaux ou la poudre issus de l'usinage.

I.2.4.2. Spécificité du procédé

Les polymères ne sont généralement pas conducteurs d'électricité, l'usinage par électroérosion est donc impossible. D'autre part, l'usinage par ultrasons convient aux matériaux durs, ce qui n'est pas le cas des plastiques. Cela limite les procédés à l'usinage conventionnel, souvent qualifié d'usinage par enlèvement de copeaux et à la découpe par laser ou au jet d'eau.

L'usinage par enlèvement de copeaux des plastiques présente les caractéristiques générales suivantes :

-Matériaux d'outils`

- **Aciers rapides**: ce sont les moins chers à l'achat ; ils ont une durée de vie moins longue, surtout avec les matériaux renforcés de fibres de verre. L'acier rapide est un acier allié comportant du carbone, du chrome et du tungstène (parfois du molybdène, du vanadium et du cobalt).

- **Carbures** : ils ont une plus grande résistance à l'abrasion que les aciers rapides et sont d'un bon rapport prix/usure. L'outil peut être entièrement en carbure de tungstène (de cobalt, de titane ou de tantale parfois) ou plus souvent, car moins cher, constitué d'une plaquette rapportée et fixée sur un support métallique classique.

- **Diamants**: Ce sont les plus chers et ils sont plutôt réservés à l'usinage de composites très abrasifs.

De nombreux développements sont en cours pour mettre au point des outils plus résistants à l'usure possédant des revêtements à base de nitrure de titane, par exemple.

● Fluides de refroidissement

- l'eau, sous forme de jet liquide continu ou vaporisé en fines gouttelettes.
- le mélange eau-huile soluble (dans la mesure où l'huile est compatible avec le plastique).
- l'air, sous forme d'air comprimé soufflé ou par aspiration.

Dans ce 2^{ème} cas, il s'agit d'usinage créant de la poudre ou des copeaux très petits ; on a alors l'avantage de les récupérer dès leur formation.

Parfois, le refroidissement n'est pas nécessaire. C'est le cas de certains usinages de matières plastiques à faible coefficient de frottement (polyéthylène par exemple). Dans ce cas très particulier, il peut être intéressant de prévoir quand même un soufflage d'air comprimé pour repousser le copeau et éviter qu'il ne vienne s'enrouler autour de l'outil. Il est en effet fréquent que le copeau ne se fragmente pas pendant l'usinage.

- **Fixation des pièces**

La précaution essentielle consiste à éviter toute déformation. Il faut penser aussi que l'effort d'usinage est inférieur à celui nécessaire pour usiner une pièce similaire en acier ; il n'est donc pas nécessaire de serrer la pièce plastique avec le même effort.

Les plastiques sont plus souples que les métaux et fléchissent davantage que ces derniers ; c'est pourquoi les profondeurs de passe et les avances ne doivent pas être excessives.

On obtient généralement les meilleurs résultats en travaillant à très grande vitesse avec une faible avance et des outils bien affûtés et lisses.

- **Tolérances dimensionnelles**

Les mesures des cotes doivent toujours être effectuées après retour de la pièce à la température ambiante. Une tolérance de 0,1 à 0,2 % de la cote nominale est accessible sans précautions spéciales (**tableau I.3**).

- **Hygiène et sécurité**

L'usinage de certains plastiques peut créer un seul et unique copeau non fragmenté.

À l'inverse, l'usinage de ceux très chargés en fibres de verre produit une poussière qui peut provoquer des risques pour l'opérateur et des dégradations sur les machines (rayures des glissières).

D'autre part, l'échauffement des plastiques pendant l'usinage peut générer un dégagement de gaz, en très petite quantité, mais qui à la longue peut s'avérer nocif pour l'opérateur (exemple le polyoxy-méthylène dégage du formol, le PVC dégage des composés chlorés). Des aspirations efficaces sont alors impérativement recommandées. Il y a lieu, en cas de doute, de se renseigner sur les risques encourus et les précautions à prendre auprès de la Caisse régionale d'assurance maladie ou de l'Institut national de recherche et sécurité.

Tableau I. 3 Tolérances accessibles en conditions normales [5]

Dimensions (mm)	Tolérance (mm)			
	tournage	fraisage	rabotage	perçage
≤ 25	0,04	0,05	0,1	0,05
25 à 50	0,05	0,08	0,15	–
50 à 100	0,08	0,1	–	–
100 à 300	0,1	0,15	–	–
> 300	0,15 à 0,3	0,18 à 0,25	–	–

I.2.4.3. Conditions de coupe des polymères

Les plastiques ont une faible conductibilité thermique. Il convient donc d'éviter tout échauffement dû à l'usinage sous risque de générer des contraintes internes préjudiciables à la géométrie et à la fiabilité de la pièce finie.

-Outil de coupe – tranchant des outils

La qualité du tranchant et le bon dégagement du copeau sont plus important que la nature du matériau de l'outil. Le meilleur fini de surface est obtenu avec une pointe d'outil arrondie.[6]

-Angles, avances et vitesses de coupe :

Tableau I. 4 Conditions de coupe des polymères [6]

		unités	PA	POM	PETP	PE/PP	PTFE	PUR	PMMA	PVC expansé	PVC	PS	PC
tournage	angle de dépouille α	°	5 à 10	5 à 10	5 à 10	10 à 15	5 à 12	10 à 15					
	pente d'affutage γ	°	5 à 15	5 à 10	5 à 10	5 à 10	5 à 10	15 à 25					
	avance f	mm/tr	0,1 à 0,3	0,1 à 0,4	0,1 à 0,4	0,2 à 0,5	0,1 à 0,3	0,1 à 0,3					
	vitesse de coupe Vc	m/min	>200	>300	>300	>250	>150	~150	250		200 à 700	140 à 500	

		unités	PA	POM	PETP	PE/PP	PTFE	PUR	PMMA	PVC expansé	PVC	PS	PC
fraisage	angle de dépouille α	°	10 à 20	5 à 15	5 à 15	10 à 20	10 à 20	15 à 30					
	pente d'affutage γ	°	5 à 15	5 à 15	5 à 15	5 à 15	5 à 20	5 à 20					
	avance f	mm/tr	>0,03	>0,02	>0,02	>0,05	>0,03	>0,05				0,1 à 0,5	0,1 à 0,5
	vitesse de coupe Vc	m/min	<1000	<1000	<1000	<1000	<800	<300	1800	10 à 15	<1000	1000	100 à 150

		unités	PA	POM	PETP	PE/PP	PTFE	PUR	PMMA	PVC expansé	PVC	PS	PC
sciage à ruban	angle de dépouille α	°	20 à 30	20 à 30	20 à 30	15 à 30	20 à 30	20 à 40					
	pente d'affutage γ	°	2 à 5	0 à 5	0 à 5	5 à 8	5 à 8	5 à 10					
	pas de denture	mm	3 à 8	2 à 5	2 à 5	3 à 10	5 à 8	5 à 10					
	vitesse de coupe Vc	m/min	>500	>1000	>1000	~1000	>300	~200		1200	1200	500 à 1500	
sciage circulaire	vitesse de coupe Vc	m/min	~3000	~3000	~3000	~3000	~2500	~2000	3000	300	3000		

		unités	PA	POM	PETP	PE/PP	PTFE	PUR	PMMA	PVC expansé	PVC	PS	PC
perçage	angle de dépouille α	°	5 à 15	5 à 10	5 à 10	10 à 15	10 à 16	5 à 10					
	pente d'affutage γ	°	10 à 20	15 à 30	15 à 30	10 à 30	5 à 20	20 à 30					
	angle de pointe α ₀	°	60 à 115	60 à 90	60 à 90	60 à 90	110 à 130	>90					
	avance f	mm/tr	0,1 à 0,3	0,1 à 0,3	0,1 à 0,3	0,2 à 0,5	0,1 à 0,3	0,2 à 0,4					0,1 à 0,5
	vitesse de coupe Vc	m/min	50 à 150	50 à 200	100 à 150	100 à 200	150 à 300	20 à 60		30	50 à 400	30 à 120	50 à 100

I.2.5. Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils

I.2.5.1. Essai d'usure de longue durée à vitesse constante

Pour des conditions de coupe déterminées, on effectue des essais à des vitesses de coupe différentes, et on relève la durée de vie de l'outil, on effectue ainsi plusieurs essais. Cette méthode classique est très sûre, mais elle est assez longue et laborieuse et exige une quantité assez considérable de matière à usiner et plusieurs outils.

I.2.5.2. Essai d'usure à vitesse croissante:

Afin d'abrèger la durée des essais et réduire la consommation du métal, on fait travailler l'outil jusqu'à détérioration de l'arête (ou jusqu'à un degré d'usure déterminé), avec des vitesses croissantes suivant une loi bien déterminée.

- La croissance continue (par exemple: dressage sur tour d'une face plane, l'outil avance radialement).
- La croissance peut être obtenue par chariotage conique.
- Ou croissance par paliers, si le tour est équipé d'un variateur de vitesse.

I.3. Les polymères

I.3.1. Définition

Un polymère est une macromolécule formée par l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités répétitives, dénommées monomères. Leur masse molaire est très élevée et souvent supérieure à 10 000 g/mol [7].

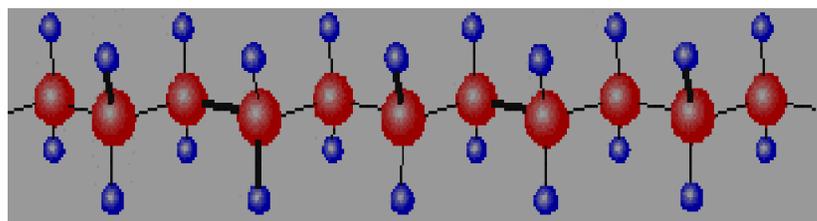


Figure. I 1 formée de macromolécule

Le centre d'étude des matières plastiques donne une définition acceptable qui est la suivante :

«Une matière plastique est un mélange contenant une matière de base qui est susceptible d'être moulé ou qui a été moulé. La matière de base est en général un mélange de macromolécules au hauts polymères organiques ou semi-organique à caractère résineux, résultat le plus souvent d'une réaction naturelle ou artificielle de polycondensation ou de polymérisation » [8].

I.3.2. Abréviations de nomination

Les polymères peuvent être désignés de façon abrégée, à l'aide de sigles anglo-saxons **Tableau I-5**.

Ainsi, dans le langage courant, on parle beaucoup plus de PVC pour Poly (Vinyl Chloride) que de PCV poly (chlorure de vinyle) [9].

Tableau I. 5 Nom et désignation des quelques matières plastiques [10].

Designations	Appellation	Appellation commercial
P 6G	Polyamide 6G	Ertalon 6 XAU+, Ertalon LFX, Nylatron MC 901, Nylatron NSM.
PA 11	Polyamide 11	Rilsan, Ertalon 11 SA; Grilon .
PA 12	Polyamide 12	Vestamid, Grilon, zellamid 1200.
PC	Polycarbonate	Axxis PC; Lexan; Makrolon; Erta PC; Xantar; Panlite; Calibre; Durolon; Novarex; Sinvet.
PEBD.	Polyéthylène Basse Densité	Lupolan, Vestolen, Hostalengur
PEHD	Polyéthylène Haute Densité	Ertalen HD, Cesticolor, Cestidur, Cestitech, Cestiguide, Cestishield, BorolèneCestilite, Ultrawear, Alathon, Alcathène, Baylon, Bluemax, Celene, Cestilène, Dekalen, Dylan, Eltex, Hostalen, Lotrene, Polydur.
PEEK	Polyéther- éthercétone	Victrex-PEEK, Ketron. zellamid 1500

I.3.3. Elaboration des polymères

Les polymères sont synthétisés en reliant entre elles par des liaisons covalentes des petites molécules, appelées molécules de monomère, molécules monomères ou plus simplement monomères. Après leur synthèse, les polymères ne sont jamais utilisés tels quels. On leur ajoute diverses substances qui modifient leur comportement, en remplissant différentes fonction [9].

- stabilisants : le polymère « pur » est fragile, il peut subir sous l'action de divers agent des réactions de dégradation, qui se traduisent par une modification de la structure chimique (oxydation) et/ou une diminution de la masse molaire, et entraînent une altération des propriétés physiques. L'emploi de stabilisants permet de limiter ces phénomènes.

- additifs pour faciliter la transformation : lubrifiants, agents de démoulage, etc.

- colorants : pigments minéraux (dioxyde de titane) ou organiques (noir de carbone).

- plastifiants : pour rendre le matériau plus souple.

- charges (carbonate de calcium, mica, talc) et renforts (fibres de verre) : l'objectif peut être une réduction du cout, mais on cherche en général une amélioration des propriétés mécaniques (augmentation du module d'élasticité).

- renforcement au choc : nodules de caoutchouc.

- additifs anti-combustion, etc.

Mise en œuvre : Elle peut se faire à partir de poudres (revêtements), de solutions ou d'émulsions (peintures, colles et adhésifs, fibres Kavlar), de l'état fondu (cas le plus fréquent), de l'état caoutchoutière (soufflage de bouteilles) ou de l'état solide (étirage de fibres et de films, usinage de pièces mécanique).

Utilisation, mettant à profit les propriétés des polymères : Faible cout, faible masse volumique (en générale de 0.9 à 1.5 g/cm³ et pouvant descendre à 0.4 g/cm³ dans le cas de mousses), propriétés mécaniques (résistance au choc), optiques (transparence), thermiques et électriques (caractère isolant), physico-chimiques (effet barrière, résistance à la corrosion).

I.3.4. Classifications des polymères

Les polymères peuvent être classés selon divers critères, [9].

I.3.4.1. Selon la structure chimique et la microstructure:

Nous ne présentons ici que les éléments intervenants dans la classification:

✓ **Constitution** : polymères à chaîne carbonée ou non (silicones), homo- et copolymères.

✓ **Dimensionnalité** : polymères linéaires, ramifiés, réticulés.

✓ **Enchaînements des unités constitutives dans les copolymères** : copolymères statistiques, alternés, à blocs, greffés.

✓ **Configuration**: isotatique, syndiotactique, atactique.

I.3.4.2. Selon la structure des polymères:

On peut les classer en quatre types d'état :

✓ **L'état amorphe**: dans lequel les arrangements moléculaires n'ont pas d'ordre prédéfini. Les macromolécules ont enchevêtrées en pelotes. Cette absence d'ordre engendre une absence de point de fusion, l'existence d'une température de transition vitreuse qui marque le passage d'un état vitreux (où le matériau se comporte comme un verre, c'est-à-dire dur et cassant) à un état caoutchoutière (où les chaînes peuvent glisser plus facilement), ainsi qu'une transparence dans le visible comme cela est le cas du polystyrène « cristal » ou du poly (chlorure de vinyle) « cristal » qui sont tous deux amorphes.

✓ **L'état amorphe orienté**: où les arrangements moléculaires sont tous orientés dans la même direction.

✓ **L'état cristallin**: caractérisé par un arrangement organisé des molécules. Les chaînes s'organisent de façon ordonnée et compacte. Le cristal polymère est décrit par son réseau et son motif. Le réseau caractérise la périodicité dans les trois directions de l'espace. Les principales caractéristiques de l'état cristallin sont une compacité supérieure à celle de la phase amorphe, l'existence d'un point de fusion et l'absence de transition vitreuse, une rigidité supérieure à celle de la phase amorphe.

✓ **L'état semi cristallin**: qui associe à la fois un arrangement organisé et des zones amorphes. On rencontre généralement soit des polymères amorphes, soit des polymères semi-cristallins.

I.3.4.3. Selon l'origine :

On peut classer les polymères en trois groupes:

✓ **Les polymères naturels** : cellulose, caoutchouc naturel, etc.

✓ **Les polymères artificiels**: dérivés des polymères naturels : nitrate et acétate de cellulose, ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre).

✓ **Les polymères synthétiques:** produits dans des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation.

I.3.4.4. Selon le mode de synthèse:

Polymérisas et polycondensats.

I.3.4.5. Selon les propriétés:

Une des propriétés mises en cause est l'influence d'une élévation de température. Une autre est le comportement élastique. Il en résulte qu'on distingue trois grandes familles **Figure I-1**.

✓ **Les thermoplastiques:** qui sont des composés formés par addition et fondent lorsqu'on les chauffe. Ce sont des matières transformables à l'état fondu. Dans la plupart des procédés de fabrication, les thermoplastiques sont chauffés, puis formés par moulage, injection, extrusion ou thermoformage, avant d'être refroidis afin que le produit fini conserve sa forme. On trouve aujourd'hui de nombreux types de thermoplastiques offrant une vaste gamme de propriétés intéressantes. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre, pour un usage dans de nombreux produits de tuyauterie et autres composants. Certains d'entre eux peuvent supporter des températures atteignant 315 °C. D'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73 °C. Ils ne s'oxydent pas, ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques. De par leur légèreté, leur haute résistance mécanique et leur résistance aux effets de l'environnement, les thermoplastiques constituent un matériau idéal pour de très nombreuses applications. Dans cette catégorie de polymères, on distingue entre autres le polyéthylène basse et haute densité (PE), le polystyrène (PS), le polychlorure de vinyle (PVC), le polypropylène (PP), le poly-méthacrylate de méthyle (PMMA), le polyamide (PA), le polycarbonate (PC), les polyesters saturés, ...

✓ **Les thermodurcissables :** durcissent quand on les chauffe. Ils sont très employés comme pièces de structure thermostable. On les met en forme lorsqu'ils sont encore à l'état mou. Les réticulations et pontages ont lieu dans toutes les directions, empêchant tout ordre d'orientation, provoquant l'isotropie du matériau. Cela ressemble à un enchevêtrement de lianes s'accrochant les unes aux autres par des tentacules en de multiples points. Ils sont généralement utilisés dans l'automobile, l'aéronautique, l'aéronavale, les équipements de ski, ... On distingue les polyesters insaturés, les résines phénoliques ou les résines époxy.

✓ **Les élastomères** : quant à eux, sont aussi appelés caoutchouc. Ils peuvent être étirés de plusieurs fois leur longueur d'origine, et reprennent leur forme initiale sans déformation permanente. Les molécules de ces polymères sont désordonnées. Les élastomères possèdent une excellente capacité d'absorption des chocs. Ils sont utilisés dans la fabrication des pneumatiques, des matelas, des semelles de chaussures.

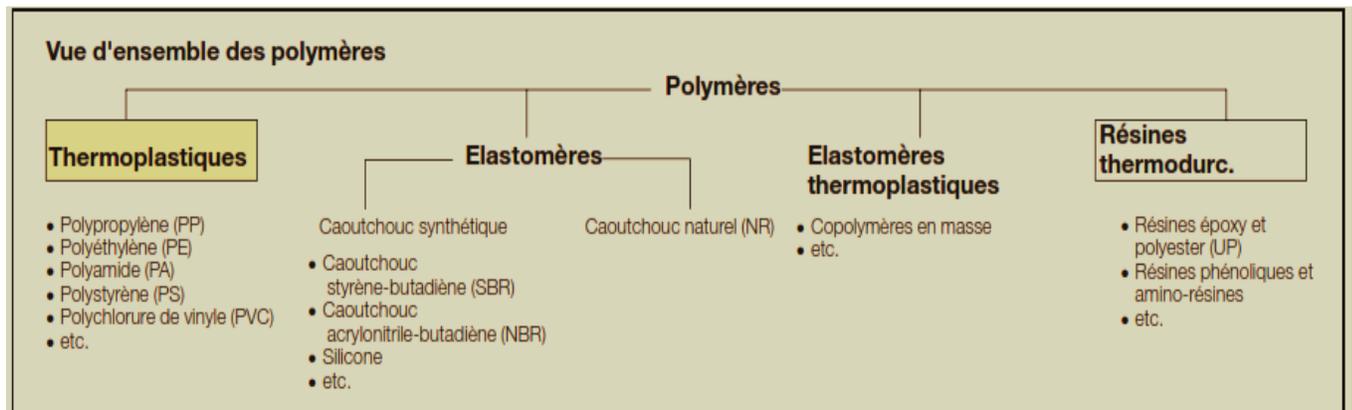


Figure. I 2 Classification des plastiques [11]

I.3.4.6. Selon l'importance économique:

Pour les polymères comme pour tout produit industriel, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux.

✓ **Les polymères de grande diffusion**: dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. Exemples: PE, PP, PS, PVC.

✓ **Les polymères à hautes performances**: dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés.

✓ **Les polymères techniques**: dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes, exemples : polyamides, PET.

I.3.4.7. Selon l'utilisation:

Colles et adhésifs, peintures, vernis, mastics, matières plastiques, caoutchoucs, fibres textiles, mousses, etc.

En fonction du cycle de vie: matériaux jetables (durée de vie inférieure à un an), durables (1 à 20 ans), pour infrastructure (durée de vie supérieure à 20 ans).

I.3.5. Les matériaux composites à matrice polymère

D'une manière générale, les propriétés d'un polymère seul sont insuffisantes pour conférer à l'objet que l'on veut fabriquer toutes les propriétés souhaitées en terme de rigidité, résistance mécanique, légèreté ou autre propriété physico-chimique, électrique, optique.

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite. La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons. Nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive sur les matériaux composites mais nous nous concentrerons sur ceux dont la matrice est constituée d'un polymère [12].

I.3.5.1. Les matrices polymères

Le rôle de la matrice polymère est de recevoir les renforts, répartir les contraintes, apporter la tenue de la structure et donner la forme désirée au composite. On peut utiliser des polymères thermoplastiques ou des polymères thermodurcissables tels que ceux qui ont été présentés précédemment dans ce chapitre.

Les thermoplastiques se présentent sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme et les refroidir pour les fixer. Cette opération est réversible. Les matrices thermoplastiques ont de faibles propriétés mécaniques; un renforcement par l'incorporation de charge leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Les matrices les plus courantes sont le poly (chlorure de vinyle) qui est utilisé dans la fabrication des tuyauteries, le poly (acétate de vinyle) que l'on trouve dans les colles et adhésifs, le polyéthylène dont on se sert pour fabriquer les jouets, les bouteilles de shampoing ou les sacs de supermarchés, le polypropylène pour les boîtes alimentaires ou les revêtements de sols, le polystyrène qui intervient dans la composition des contenants alimentaires, de la vaisselle jetable, des jouets ou des vitres.

Les thermodurcissables durcissent de façon définitive lors de leur synthèse. La transformation est donc irréversible. Ce sont les matrices les plus utilisées dans la production de matériaux composites. On trouve les résines polyester qui, associées à des fibres de verre ont une bonne tenue à la température et aux agents chimiques, les résines époxy qui possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques, et les résines phénoliques qui résistent bien au feu [12].

I.3.6. Les renforts

L'incorporation d'une charge au sein d'une matrice permet d'agir sur plusieurs propriétés du matériau composite formé:

- ✓ Propriétés physico-chimiques (résistances aux produits acido-basiques...).
- ✓ Propriétés mécaniques (résistances aux chocs, à la compression, aux cisaillements...).
- ✓ Propriétés électriques (amélioration de la conductivité ou de la résistance),
- ✓ Facilité de mise en œuvre.

- ✓ Réduction du coût....

Les renforts sont répartis en trois familles qui sont:

- Les charges organiques: ce sont des polymères qui peuvent apporter une bonne tenue mécanique.

- Les charges minérales : qui sont souvent utilisées comme additifs et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du composite tout en réduisant son prix de revient.

- Les charges métalliques : qui améliorent les propriétés électriques et thermiques du composite.

On peut également les classer selon leurs aspects. On distingue ainsi:

- les charges particulières renforcées dont certaines peuvent permettre de modifier la masse volumique du composite, ses propriétés électriques, mécaniques et physicochimiques. Elles sont généralement de petites tailles et peuvent être sphériques, en paillettes.

- les charges particulières inertes qui, de par leur faible coût, réduisent le prix du composite. Ce sont essentiellement des minéraux comme le carbonate de calcium, la craie, la silice ou le kaolin. Ce type de charge peut éventuellement augmenter la dureté et la résistance à la rupture du composite.

- les fibres qui peuvent être minérales (verre, carbone, céramique) ou organiques, et conférer au composite un module de Young, une résistance à la rupture ou une conductivité électrique élevés.

Le tableau I-6 rassemble les propriétés courantes qui peuvent être modifiées par l'incorporation, dans une matrice polymère, d'une charge telle que celles évoquées ci-dessus

Tableau I. 6 Les charges en fonction de propriété désiré [12].

<i>Physico-chimiques</i>	Résistance à la corrosion	Zinc
<i>Nucléaire</i>	Boucliers antiradiations	Plomb, carbure de bore
<i>Thermiques</i>	Transfert de chaleur	Aluminium, alumine, beryllium, silice, or, argent
	Réduction de chaleur	Fer, aluminium, silice

I.3.7. Domaines d'utilisation

Les polymères ont envahi tous les domaines de notre vie quotidienne, c'est pourquoi les exemples ci-dessous n'offrent qu'une vue très partielle de la réalité :

- ✓ Vêtements et textiles : fibres textiles naturelles et synthétiques, non tissés, skaï, simili cuir.
- ✓ Maroquinerie chaussure : skaï, simili cuir, mousses isolantes.
- ✓ Ameublement : skaï, simili cuir, colles, vernis, mousses.
- ✓ Articles ménagers: Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle.
- ✓ sports-loisirs: cannes à pêche, coques de bateaux, piscines, bandes magnétiques, DVD.
- ✓ Emballage alimentaire (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boîtes à œufs) ou industriel (flacons de détergents, sachets et sacs, casiers, sacs poubelles).
- ✓ Transports et en particulier l'automobile (boucliers, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, réservoirs d'essence).
- ✓ Industrie électrique et électronique: boîtiers, gainage de câbles, façades de téléviseurs.
- ✓ Industrie chimique: tuyauteries, cuves, revêtements.
- ✓ bâtiment-travaux publics : peintures, isolation, revêtement de sol, tuyauteries, géotextiles.
- ✓ Agriculture: irrigation, arrosage, serres, bâches.

✓ Hygiène: verres de lunettes, lentilles de contact, prothèses, matériel hospitalier (seringues, poches, tubes pour transfusion), couches.

I.3.8. Mise en œuvre des polymères

La mise en œuvre des polymères thermoplastiques s'effectue selon le schéma général de la **Figure I-2**. Le polymère est mélangé à différents produits (stabilisants, lubrifiants, plastifiants, charges, etc.) pour élaborer une formulation qui se présente le plus souvent sous forme de poudre ou de granulés. Cette formulation est ensuite fondue (cas des polymères semi cristallins) ou plastifiée (cas des polymères amorphes), à la fois par conduction thermique depuis les parois de l'outillage de mise en forme et par dissipation d'énergie mécanique. Cette matière liquide très visqueuse est ensuite forcée dans un outillage qui va donner une première forme au produit : tube, jonc, film, pièce injectée, etc. Cette matière thermoplastique mise en forme est alors refroidie, dans certains cas étirée et biétirée, pour obtenir le produit semi-fini. De ce processus de mise en forme, des paramètres d'étirage et de refroidissement, vont dépendre la microstructure du polymère, et donc ses propriétés [13].

Parmi les nombreuses techniques de mise en œuvre des polymères est l'usinage par des tours conventionnelles ou à commande numérique sa concerne principalement les produits longs (barres), en trouve aussi d'autres opérations d'usinage (perçage, fraisage, taraudage) dans la mise en œuvre des produits plats, comme elles précèdent souvent un assemblage à l'aide de moyens mécaniques: vis, boulons, rivets.

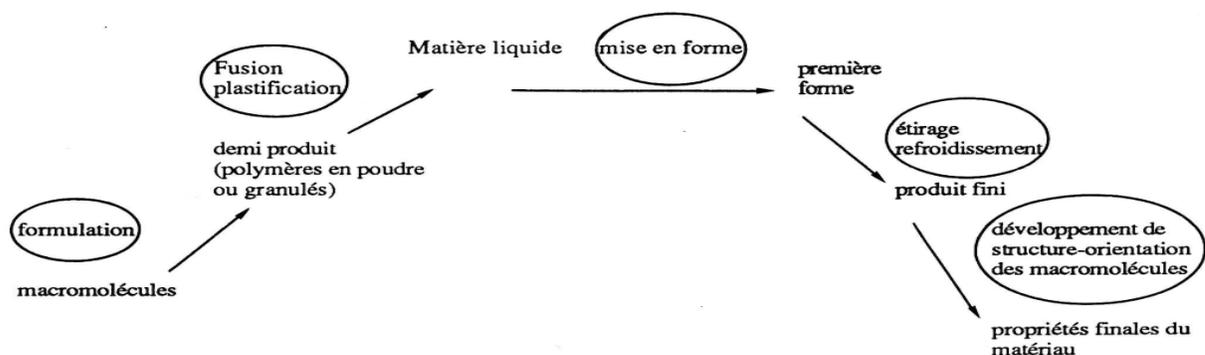


Figure. I 3 Schéma général de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques [13].

À l'usinage qui est l'opération de mise en œuvre par enlèvement de matière à l'aide d'un outil de coupe, on associe le concept d'usinabilité concernant une nuance ou une famille de nuances [5].

I.4. Travaux de recherches sur l'usinage des polymères

Cette partie récapitule la recherche dans la littérature existante reliée à l'usinage des polymères. L'objectif est de faire une étude à partir de ces articles publiés et de comprendre les travaux accomplis concernant l'usinage de ces polymères jusqu'à nos jours. Dans cette recherche on a trouvé que beaucoup d'auteurs ont étudié l'influence de la matière à usiner, ainsi que : Les paramètres de coupe optimaux, l'influence des types de substrats sur l'usinabilité de ces polymères ; Plusieurs articles ont été publiés dans ces domaines, parmi eux on cite,

I.4.1. Étude d'usinabilité en micro-usinage de PA66 GF30 Polyamide avec un outil PCD

Les fibres de verre sont ajoutées aux polyamides non renforcés pour améliorer les propriétés mécaniques aussi bien que des propriétés thermiques. Bien que les polyamides soient des produits près des formes nettes, l'usinage doit être effectué pour satisfaire les conditions dimensionnelles et les besoins d'assemblage.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude réalisée par **V.N. Gaitonde ; et al [14]**. Les auteurs ont fait une analyse des effets des paramètres de coupe, la vitesse de coupe (V_c) et l'avance par tour (f) sur des aspects d'usinabilité, tels que l'effort de coupe (F_c), rugosité de la surface (R_a), effort de coupe spécifique (K_s) et puissance de coupe (P) pendant le micro-usinage du polyamide renforcé de 30% de fibres (PA66 GF30) avec un outil en diamant poly-cristallines (PCD).

La méthodologie de surface de réponse (MSR) a été employée. Lors de la mesure de la rugosité de la surface, les auteurs ont répété la mesure à six reprises et la moyenne arithmétique (R_a) a été adoptée. Les résultats des expériences sur le micro-usinage du polyamide renforcé trouvés par les auteurs montrent que:

1- L'analyse de la variance (ANOVA) indique que les modèles quadratiques sont proportionnels à l'intervalle de confiance de 99%.

2- L'effort de coupe augmente avec l'augmentation de l'avance par tour pour n'importe quelle valeur de la vitesse de coupe. De plus, l'effort de coupe diminue avec l'augmentation de (V_c). L'effort de coupe est sensible à des valeurs élevées d'avance par rapport à des petites valeurs de ce paramètre, et cela à toutes les valeurs de vitesse de coupe.

3- La rugosité de la surface diminue avec des valeurs basses d'avance et des valeurs plus élevées de la vitesse de coupe (**Figure. I.4**).

4- L'effort de coupe spécifique est minimal à une avance de 60 $\mu\text{m}/\text{tr}$ et d'une vitesse de coupe de 200 m/min (**Figure. I.5**).

5- Les augmentations de puissance avec l'avance par tour pour toute valeur donnée de vitesse de coupe. Les valeurs plus basses de la vitesse de coupe et de l'avance par tour est nécessaire pour réduire au minimum la puissance (**Figure. I.6**).

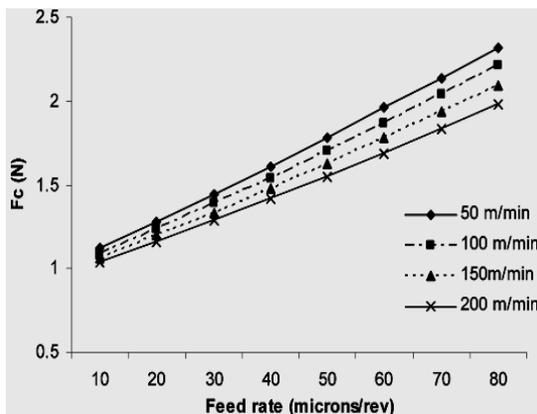


Figure. I 5 Effet d'avance et la vitesse de coupe sur F_c .

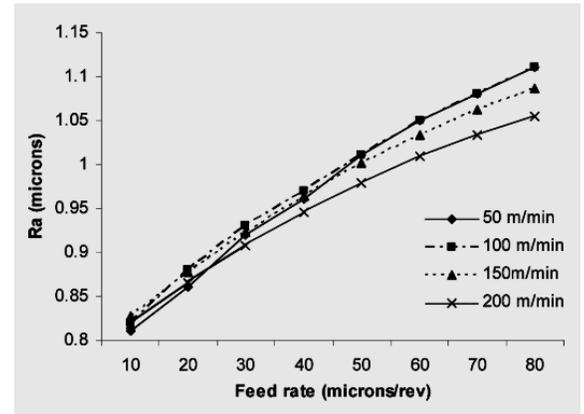


Figure. I 4 Effet d'avance et la vitesse de coupe sur R_a .

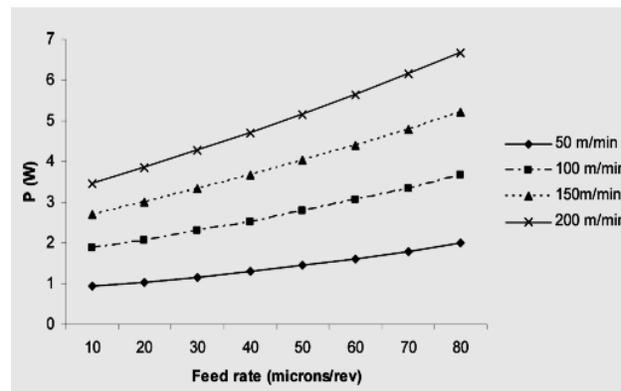


Figure. I 6 Effet d'avance et la vitesse de coupe sur P

I.4.2. Etude expérimentale et modélisation du processus de coupe de PA 6 / Nano carbonate de calcium Composite

Les nano composites polymères sont apparus comme une nouvelle classe (alternative) des matériaux avec la croissance rapide de l'utilisation des produits industriels en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques, poids, thermiques et physiques.

Les résultats de ce travail ont révélé que :

- L'augmentation en teneur en carbonate de calcium nano dans polyamide PA 6/Nano diminue les efforts de coupe d'une façon considérable **Figure .I 8 (a)**, mais par contre elle n'a pas d'effet significatif sur la rugosité de surface.
- Les résultats de la modélisation de la rugosité de surface et de la force de coupe totale ont montré que l'approche de modélisation de recherche harmonie basée sur les réseaux neurones est efficace, fiable, et peut être employée dans la modélisation du processus de coupe de polyamide 6/Nano carbonate de calcium composite.
- L'usinage d'un Pa 6/Nano composite exige des force moins importante qu'un Pa 6 pur qui ne contient pas des particules en carbonate de calcium, ce qui signifie que les particules NCC agissent en tant que lubrifiant pour réduire la force de coupe totale.
- L'effet de paramètres de coupe tels que la vitesse et l'avance de coupe sur la force totale et la rugosité de surface dans le tournage de Pa 6 / Nano carbonate de calcium composite est semblable à celui de l'usinage des métaux, **Figure .I 8 (b-d)**

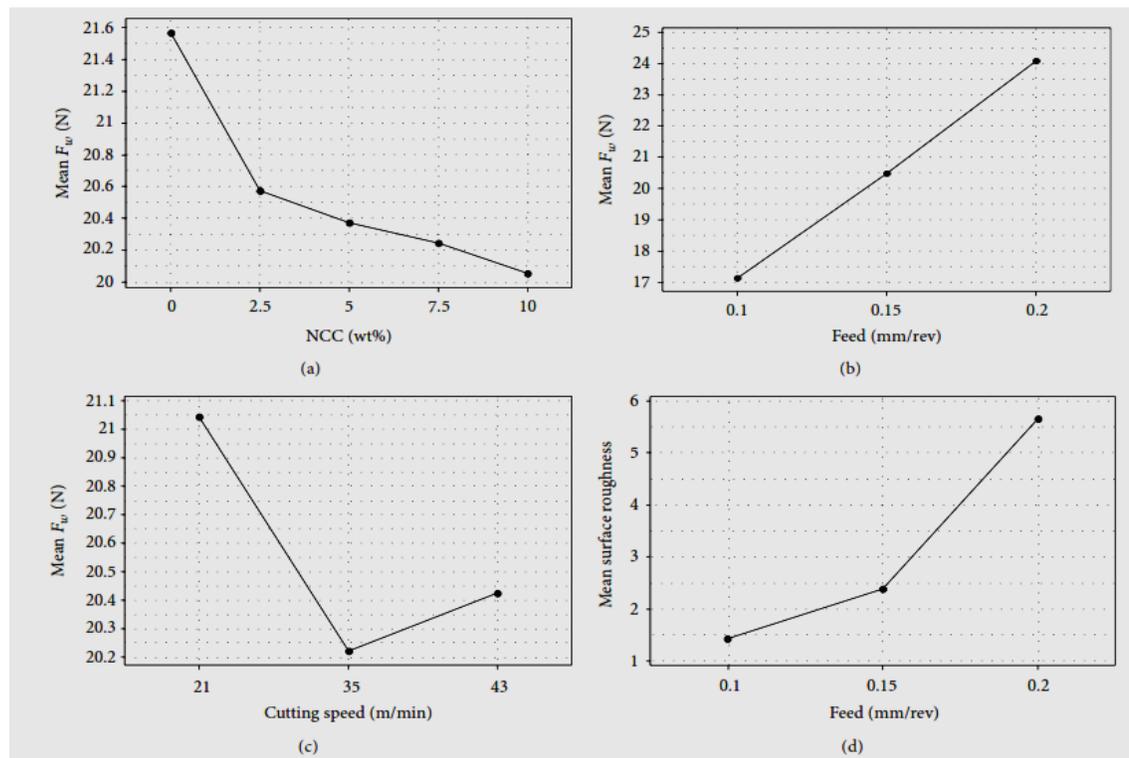


Figure .I 8 Les facteurs principaux expérimentaux sur Ra et F_w

I.4.3. Modélisation mathématique d'optimisation de la rugosité de surface dans la transformation du polyamide à base de réseau neuronal artificiel

Le travail de recherche réalisé par **Madic et al.[16]** présente une méthodologie mathématique de modélisation de la rugosité de surface lors du tournage du polyamide (P A-6) avec des outils en Chromant, (**Tableau I.7**) les auteurs ont choisi de travailler avec une approche de réseaux de neurones artificiels.

Tableau I. 7 Propriétés physique du polyamide P A-6

<i>Masse volumique g/cm³</i>	1.14
<i>La ductilité linéaire N/mm²</i>	80
<i>Module d'élasticité N/mm²</i>	3200
<i>résistance aux chocs Charpy KJ/m2</i>	>3
<i>La dureté N/mm2</i>	82
<i>La température de moulage °C</i>	220
<i>Conductivité thermique à 20 °C, W/(Km)</i>	0.23
<i>Coefficient thermique d'expansion linéaire moyen entre 20-60°C, m/(mK)</i>	$90 \cdot 10^{-6}$

Le modèle de la rugosité de surface développé par les auteurs prend en considération les termes principaux des paramètres de coupe, tels que l'avance par tours, la vitesse de coupe, la profondeur de passe et le rayon de bec de l'outil.

Les auteurs ont utilisé un plan d'expérience de Taguchi L₂₇, avec quatre facteurs d'entrée (V_c , f , a_p et r) qui varient en trois niveaux, ce plan Taguchi va minimiser le nombre d'expérience en conservant les informations recherchées, ce qui rend ce type de plans l'un des plus robuste.

En plus de la modélisation par ANN, (**Figure .I.9**) les auteurs ont appliqué une méthode d'optimisation simple afin de minimiser la rugosité de surface et par la suite le régime optimal a été déterminé.

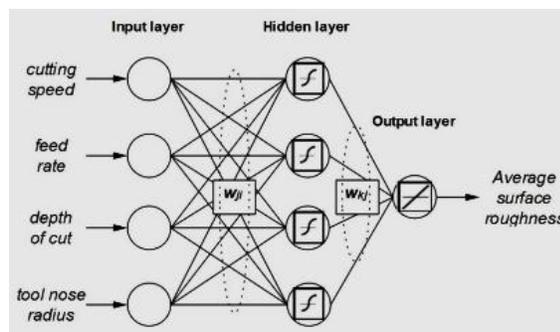


Figure .I.9 L'architecture ANN pour l'obtention de Ra

Il est à noter que le modèle ANN utilise une fonction d'activation de type tangente hyperbolique (équation 1) dans la couche cachée, et une autre fonction linéaire pour la couche de sortie, l'emploi du logiciel MATLAB s'avère approprié pour le traitement de tel problème.

$$a = \text{tansig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-2 \cdot n}} - 1$$

I.1

Le modèle réalisé a été employé afin de tracer les réponses graphiques en 3D, **Figure I.10**, les tracés ont pris en considération la combinaison entre l'avance par tour et la profondeur de passe en variant la vitesse de coupe et le rayon de l'outil entre (65.03-213.88 m/min) et (0.4-0.8 mm), respectivement.

Les conclusions tirées de ce travail, montrent que l'avance est le facteur dominant qui affecte la rugosité de surface, suivi par le rayon d'outil et la profondeur de passe, quant à la vitesse de coupe, son effet n'est pas significatif comparé aux paramètres précédents.

Les résultats de rugosité de surface minimale sont obtenus avec la combinaison de la faible avance, une faible profondeur de passe, faible vitesse de coupe et un grand rayon de bec de l'outil.

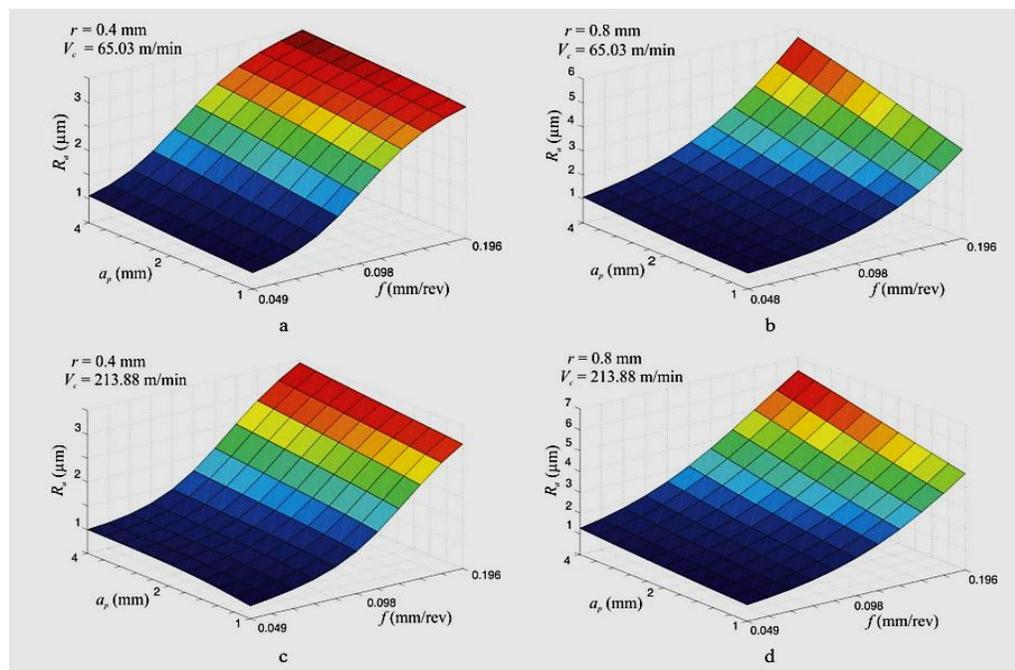


Figure I.10 Influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface à des différentes combinaisons de V_c et r .

I.4.4. Prédiction de la rugosité de surface dans l'usinage du Castamide par ANN

Le Castamide est une de polyamide qui est largement utilisé dans l'industrie à cause de son poids léger et sa haute résistance à la corrosion d'une part, et d'autre part à sa résistant à l'impact.

On le trouve dans plusieurs domaines industriels tels que : l'emballage, le textile, l'industrie chimique, la construction et les machines lourdes.

En particulier, dans la fabrication des organes de machines comme les engrenages dans les rugosi-mètres de surface, qui vont par la suite déterminer la précision de l'état de surface.

Le but de cette étude réalisée par **S. Aykut, [17]** est de prédire la rugosité de surface (R_a) lors du fraisage (CNC) d'un Castamide de type PLOIKES (PA6 G) par des broches en Carbure-Tungstène constituées de quatre arêtes tranchantes à un angle hélicoïdale de 30° .

Les paramètres de coupe sont : vitesse de coupe, avance de coupe, profondeur de coupe et type de l'outil de broche; qui ont été organisés dans plan d'expérience de 15 essais, le paramètre de sortie est la (R_a).

Une modélisation par réseaux de neurones artificiels (ANN) a été adoptée par l'auteur, il a pris dans son modèle quatre couches constituées de 6 neurones à l'entrée, 2 neurones pour chacune des couches cachées et une seule sortie qui représente la rugosité de surface (**Figure .I.11**)

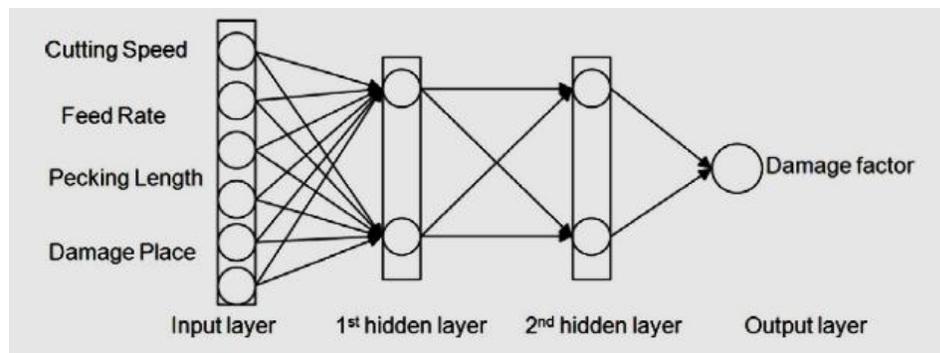


Figure .I 11 Architecture ANN

Les données expérimentales ont été utilisées pour entraîner (70%) et tester (30%) le modèle ANN dynamique. Cette étude a montré les points suivants :

- 1) Les résultats du modèle ANN sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales de R_a ;
- 2) Le taux de corrélation du modèle est de 83,6% et le taux d'erreur minimum est de 0,02.

- 3) Les résultats prédits par le modèle ANN sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales utilisées pour l'entraînement et le teste du modèle, et l'erreur dans ces deux cas n'a pas dépassée 20%.
- 4) L'emploi d'un modèle ANN qui dispose d'un nombre supérieure aux paramètres technologique dans la couche d'entrées est applicable est donne des résultats fiables.
- 5) Les résultats expérimentales collectées dans la littérature peuvent être introduites dans le modèle ANN pour augmenter son domaine d'utilisation.
- 6) Le modèle ANN développé peut être aussi utilisé pour faire le bon choix des paramètres de l'outil de perçage, diminué les dommages avant fraisage et au début de n'importe quel processus de fraisage du Castamide,

I.4.5. Modélisation et prédiction de la rugosité de surface dans les opérations de tournage en utilisant ANN et RMS

Les pièces de machines au cours de leur durée de vie utile sont significativement influencées par la qualité de rugosité de surface. Le processus d'usinage est plus complexe (plusieurs paramètres technologiques), et donc, il est très difficile de développer un modèle complet de prédiction impliquant tous les paramètres de coupe.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail réalisé par **Ilhan et al** [18]. Il concerne l'étude de la mesure de la rugosité de surface pendant le tournage de l'acier AISI 1040 en fonction de la variabilité des différents paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) par tours et la profondeur de coupe (a_p).

Un plan d'expérience factoriel complet de 27 essais (L_{27}) est mis en œuvre pour augmenter la limite de confiance et la fiabilité des données expérimentales, **Tableau I.8**. Les auteurs ont utilisé les réseaux de neurones Artificielles (ANN) et des approches de régression multiple, Equation 2 pour modéliser la rugosité de surface de lors du tournage l'acier AISI 1040 par des plaquettes en carbures avec revêtement.

Tableau I. 8 Les valeurs expérimentales pour la construction du modèle

Test no.	V (m/min)	f (mm/rev)	a (mm)	Ra (µm)
1	150	0.12	1	1.02
2	150	0.12	2	1.18
3	150	0.12	4	1.12
4	150	0.2	1	1.68
5	150	0.2	2	1.34
6	150	0.2	4	1.83
7	150	0.35	1	3.55
8	150	0.35	2	3.52
9	150	0.35	4	3.5
10	219	0.12	1	0.79
11	219	0.12	2	0.93
12	219	0.12	4	1.13
13	219	0.2	1	1.66
14	219	0.2	2	1.61
15	219	0.2	4	1.85
16	219	0.35	1	3.75
17	219	0.35	2	3.8
18	219	0.35	4	3.86
19	320	0.12	1	0.74
20	320	0.12	2	0.9
21	320	0.12	4	0.97
22	320	0.2	1	1.91
23	320	0.2	2	1.9
24	320	0.2	4	1.93
25	320	0.35	1	3.67
26	320	0.35	2	3.69
27	320	0.35	4	3.82

Ils ont fait une comparaison entre les deux méthodes de modélisation en utilisant des méthodes statistiques telles que la méthode d'analyse de variance (ANOVA).

Les résultats trouvés par les auteurs montrent clairement que les modèles proposés sont capables de faire la prédiction de la rugosité de surface.

Cette étude a confirmé que le modèle ANN estime la rugosité de surface avec une grande précision par rapport au modèle de régression multiple.

$$R_a = 0.130 + 0.00088V + 3.54f - 0.011a + 0.000005V^2 + 14.4f^2 + 0.0174a^2 + 0.00848V \times f + 0.000059V \times a - 0.194f \times a \quad \text{I.2}$$

Dans cette étude, la structure du réseau ANN choisi pour la modélisation et par le suite la prédiction de la rugosité de surface Ra est illustrée dans la **Figure .I.12**

L'architecture du ANN adopté ce compose en trois facteurs d'entrée qui sont V, f et ap, d'une couche cachée de cinq nœuds, et d'une seule sortie qui représente la rugosité de surface Ra.

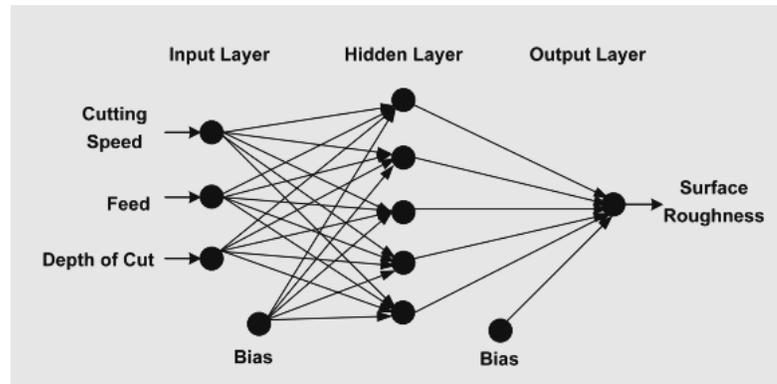


Figure .I 12 Architecture de réseau de neurone.

La **Figure .I.13** montre la comparaison entre les valeurs mesurées et prédites réalisées par le modèle de régression multiple, il a été bien confirmé la bonne corrélation entre les deux résultats.

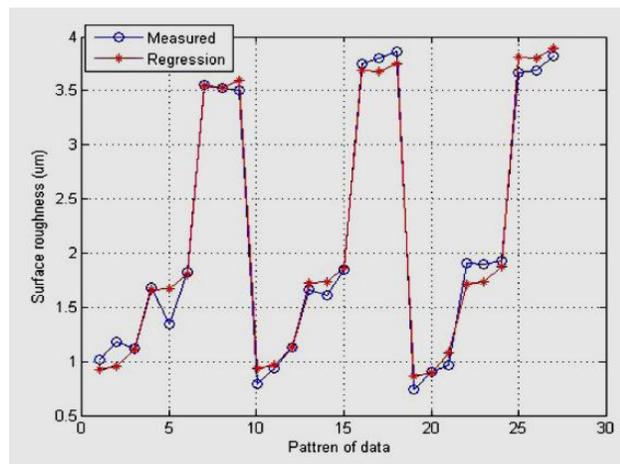


Figure .I 13 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites par la méthode de régression de Ra

Les **Figure. (I.14 et I.15)**, montrent la comparaison des valeurs mesurées et prédites de la rugosité de surface, lors des phases d'entraînement et de teste du modèle ANN, respectivement.

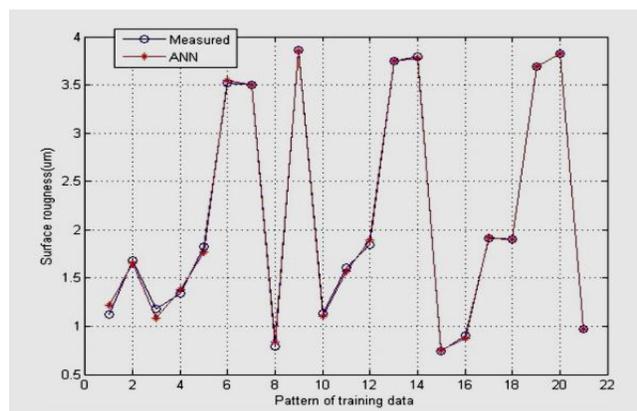


Figure .I 14 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra dans la phase d'entraînement du modèle ANN.

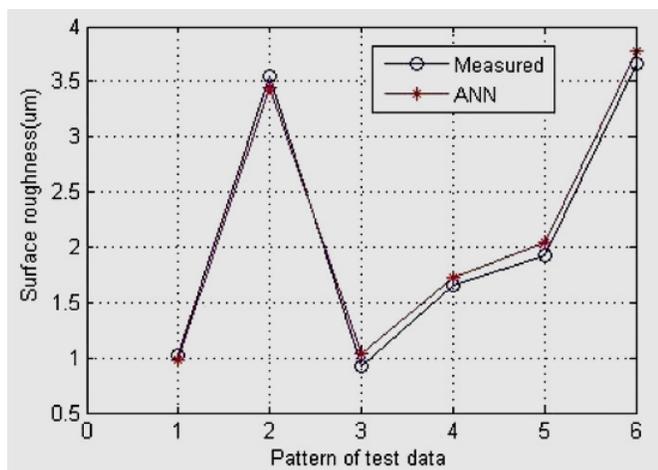


Figure .I 15 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra dans la phase du teste du modèle ANN.

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, un banc d'essais comportant un tour, une plateforme pour l'acquisition des efforts de coupe, un Rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université de 8 Mai 1945, Guelma.

II.2. Matériels utilisés

II.2.1. Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle **SN40C** de puissance sur la broche égale à 6.6KW (*figure II-1*).

Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suit (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min.

Les avances disponibles sont: (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24...0,8) mm/tr.



Figure II. 1 Tour parallèle modèle SN40C

II.2.2. Matériau utilisé pour les essais d'usinage

Le **POM C** (résine ULTRAFORM, HOSTAFORM) est plus résistant à l'hydrolyse (jusqu'à 60° ou 70°) aux bases fortes et à la dégradation thermo oxydantes, il est conforme aux directives relatives aux denrées alimentaires. Le **polyacétal (POM C)** à une bonne

reprise d'élasticité, il est insensible aux fendille ments par contrainte et présente d'excellentes propriétés d'usinabilité.

Le **POM C** est le matériau le plus employé en Europe et possède la gamme de dimension la plus étendu en semi produit.

Il possède de faible absorption d'humidité, dureté et rigidité élevées, et de bonne résilience et résistance aux chocs même à basse température. Il a une très bonne résistance à la fatigue. Toutes ces caractéristiques importantes s'ajoutent aux rapports coût/performance impressionnant.

Ce matériau est recommandé pour la réalisation de pièces mécaniques (roues dentées, roues à cames, coussinets et roues fortement chargées) ou décolletées de précision.

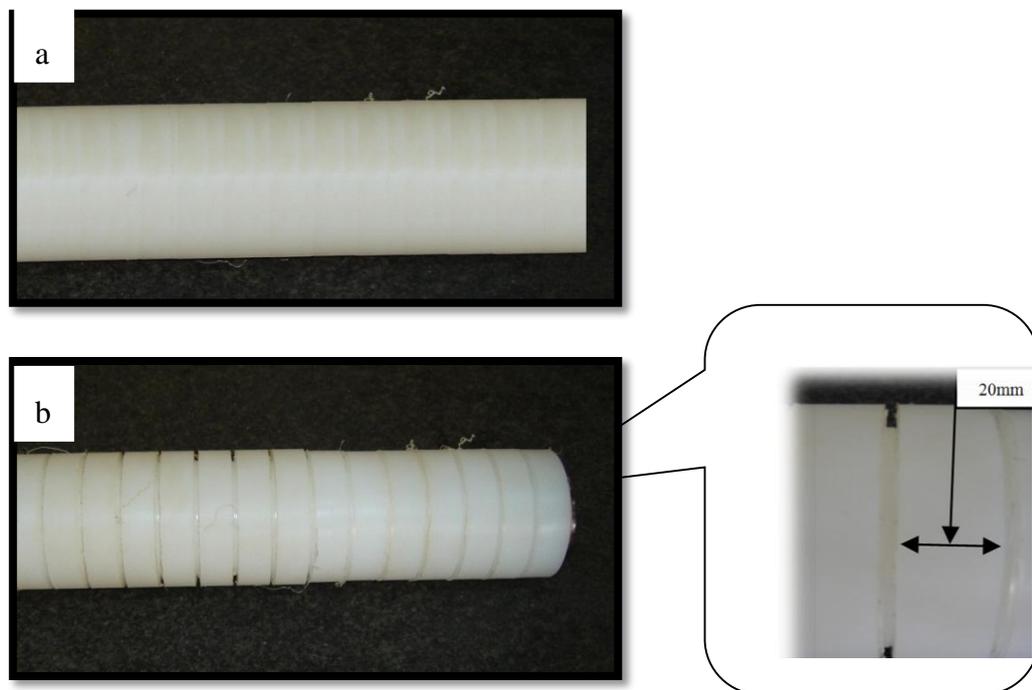


Figure II. 2 *Éprouvettes pour différents essais. a)Éprouvette brute ; b) Éprouvette avec des paliers.*

Pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe (V_c , f et a_p), on a utilisé des éprouvettes qui ont un diamètre $\Phi=70$ avec des paliers de 20mm de longueur (*figure II-2b*).

II.2.2.1. propriétés techniques du POM C

Les caractéristiques physiques et mécaniques de POM-C sont mentionnées au tableau II.1

Tableau II.1 les propriétés techniques du POM C. [19]

Générales	Valeurs	Unités
Densité	1.41	g/cm ³
Absorbation d'humidité	0.2	%
Mécaniques	Valeurs	Unités
Résistance à la traction	67	MPa
Allongement à la rupture	30	%
Module d'élasticité à la traction	2800	MPa
Résistance aux chocs	6	KJ/m ³
Dureté à la bille	150	MPa
Dureté shore D	81	Echelle D
Thermiques	Valeurs	Unités
Température de fusion	165	C°
Conductibilité thermique	0.31	W/(m*k)
Capacité thermique spécifique	1.5	KJ/(Kg*k)
Température d'utilisation à long terme	50 – 100	C°
Température d'utilisation à court terme	140	C°
Electriques	Valeurs	Unités
Constante diélectrique	8.3	-
Facteur de perte diélectrique 50Hz	0.002	-
Rigidité diélectrique	40	Kv/mm
Résistance volumique	1010	Ω*cm
Résistance spécifique	1010	Ω

II.2.3. Plaquettes de coupe

Les plaquettes utilisées dans nos essais sont en carbure métallique. Ils sont amovibles de forme carrée *figure II-3*, et la désignation des plaquettes de coupe sont matériau en carbure, le grade de revêtement KC 725 M (ISO P20-PVD)



Figure II. 3 Photos des plaquettes de coupe utilisées.

II.2.4. Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la désignation est indiquée au *tableau II-2*.

Tableau II.2 Caractéristiques de porte plaquette utilisée.

Désignation	Marque	χ	Λ	γ	Λ	χ_r
CSBNR25x25M12	TIZIT SIMPLEX	45° 70°	6°	6°	6°	15°

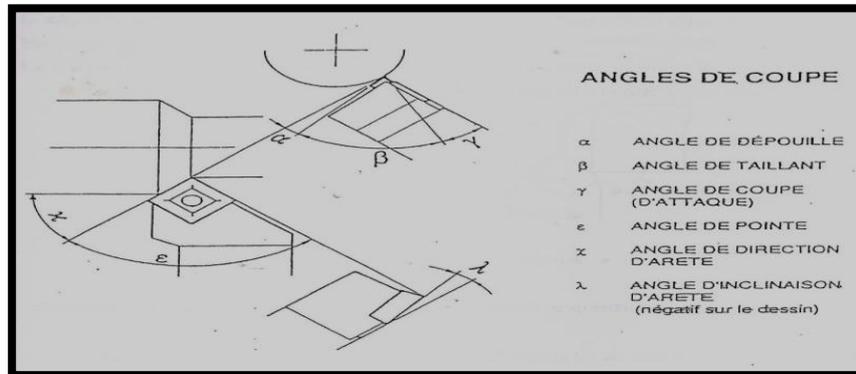


Figure II.4 Différentes angles de coupe.



Figure II.5 Porte outil utilisé.

II.2.5. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (**KISTLER 9257 B**) *Figure II-7*, qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite: la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation *figure II-6*. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz *figure II-7*.

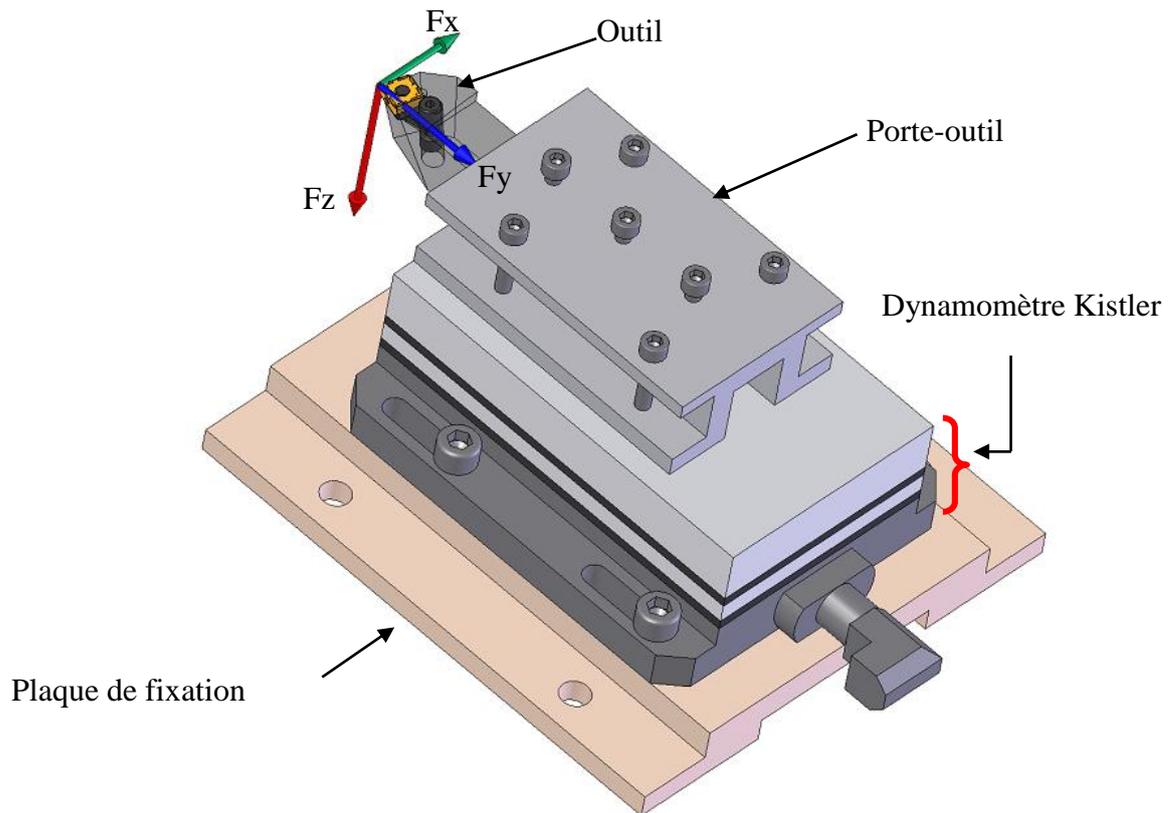


Figure II.6 Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

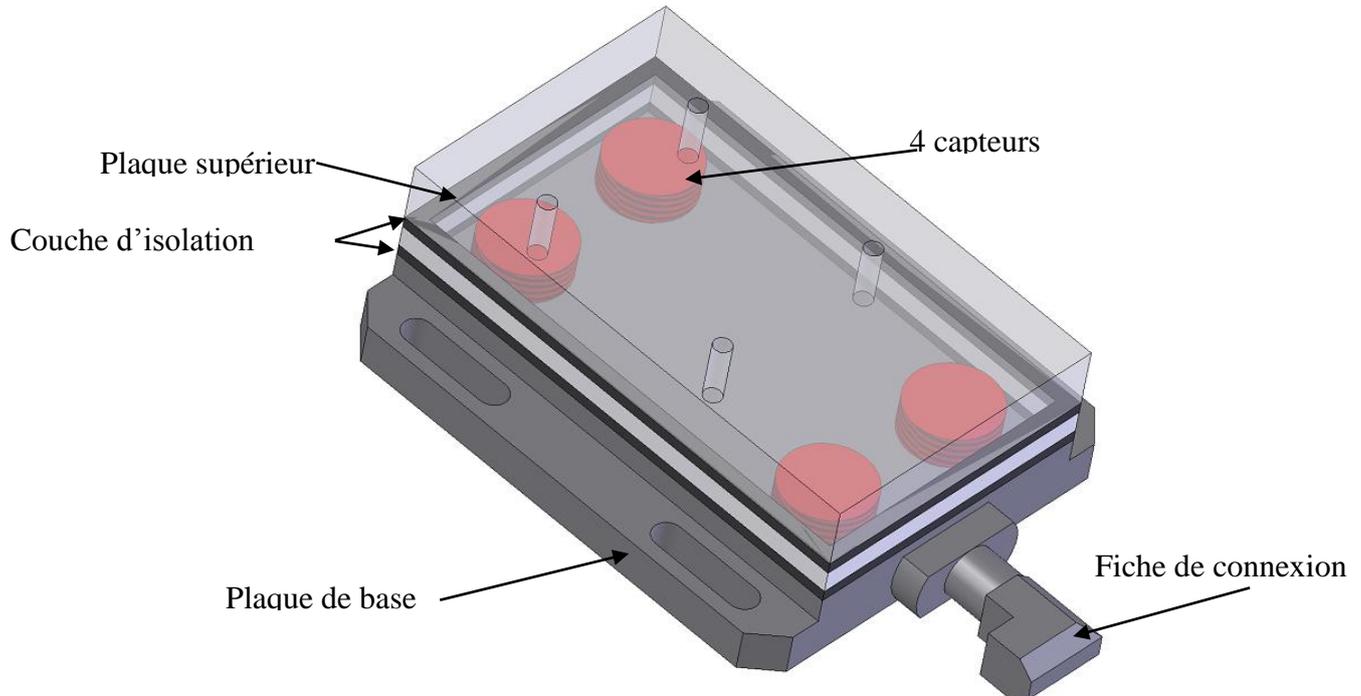


Figure II.7 Capteur d'effort de coupe KISTLER.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité

centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La **figure II-8** présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes des efforts de coupe (Force axiale: F_x , Force radiale: F_y et Force tangentielle: F_z).

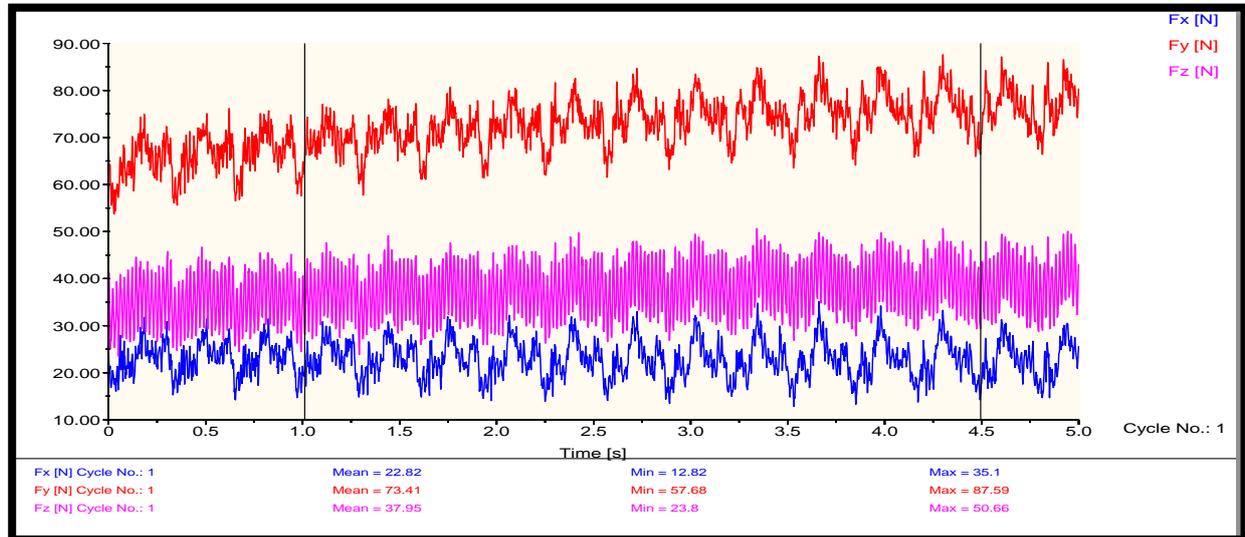


Figure II.8 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

II.2.5.1. Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à 3 composantes (9257 B): La porte outil type 9403 visible est employée pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 **figure II-9**.

- ✓ Grande rigidité, fréquence propre très élevée ;
- ✓ Large gamme de mesure ;
- ✓ Bonne linéarité, sans hystérésis ;
- ✓ Faible interaction (<1%) ;
- ✓ Utilisation simple (prêt à l'emploi) ;
- ✓ Construction compacte ;
- ✓ Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- ✓ Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- ✓ Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- ✓ Ordinateur personnel (PC) ;

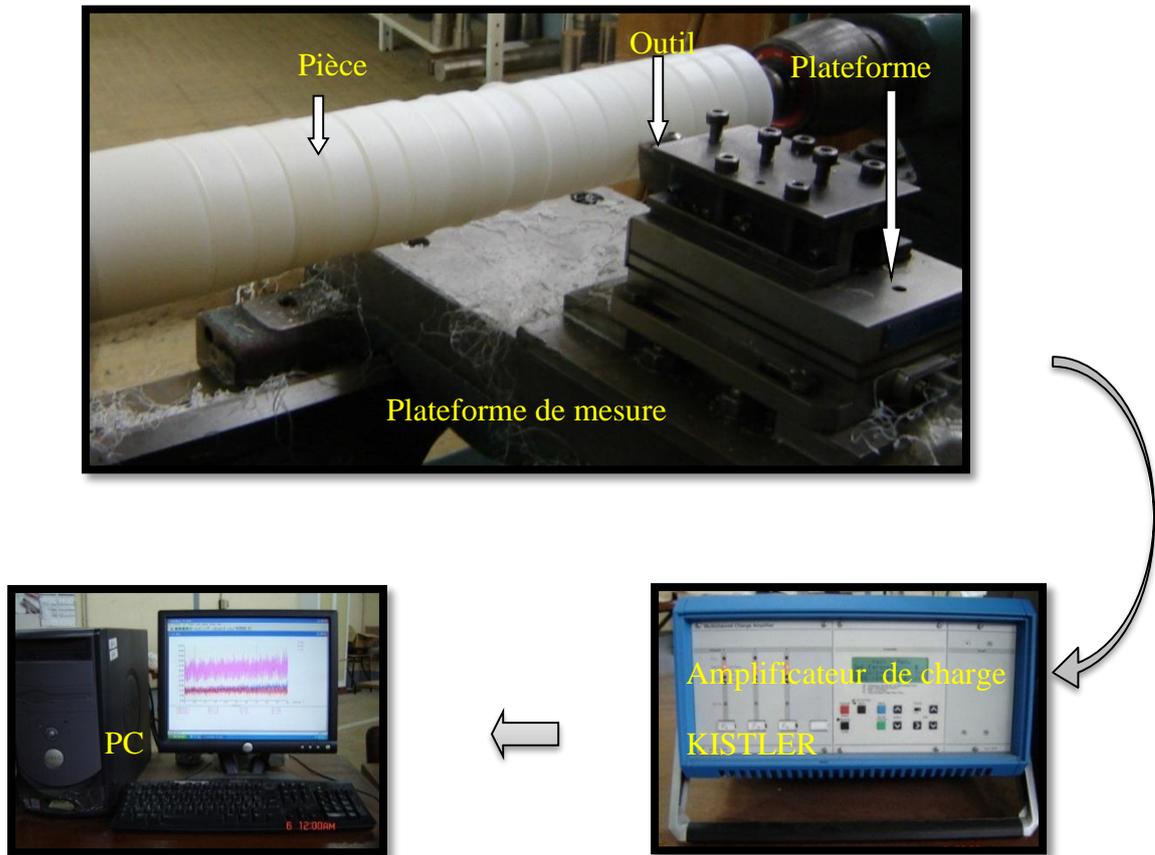


Figure II.9 Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.2.6. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure de la rugosité (R_a), nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) Surf test 201 (Mitutoyo) *figureII-10*. Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.

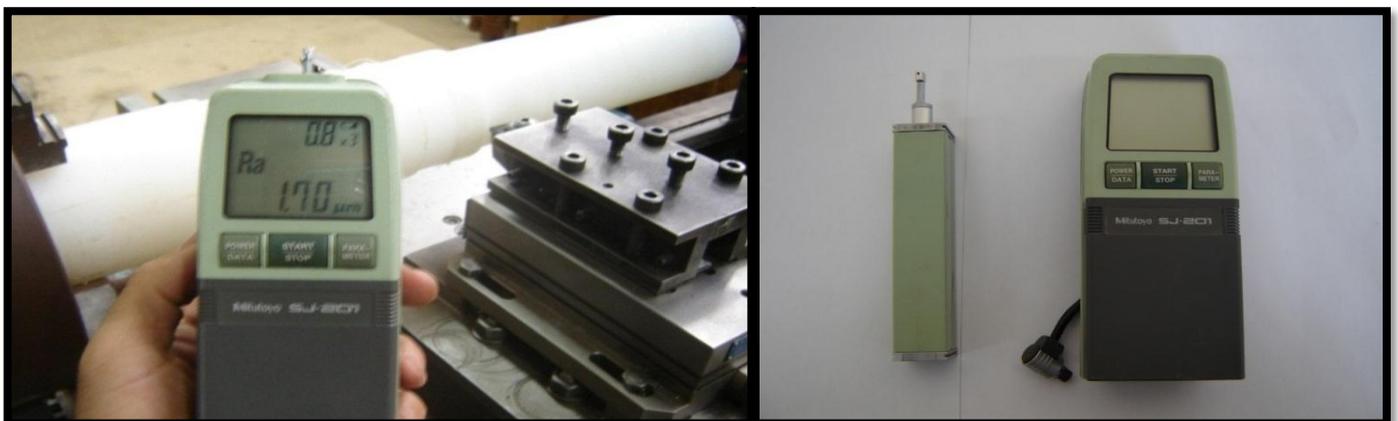


Figure II.10 Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

II.2.7. Autres équipements

- ✓ un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
- ✓ un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.

II.3. Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Les conditions de coupe utilisées pour nos essais sont indiquées dans les *tableaux II.3 et II.4*. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

Tableau II.3 Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité.

Les paramètres d'entre	Valeurs
f (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.24
a_p (mm)	1 ; 2 ; 3
V_c (m/min)	314 ; 440 ; 628

II.4. Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f , a_p), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité, la puissance et volume de copeau représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

II.4.1. Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

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

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe, Puissance et volume de copeau). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

$$N = q^k \quad \text{II. 1}$$

Où N: nombre d'essais; q : nombre de niveaux de variations des facteurs de base;

K: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors: $N=3^3=27$.

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II.4.

Tableau II.4 Matrice de planification pour un plan de 27 essais.

N°	Paramètres d'usinage			Les paramètres de réponse			
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	Pc (W)	MRR (mm^3/min)
1	314	0.08	1	0,67	22,98	120,26	25120
2	314	0.08	2	1,22	34,99	183,11	50240
3	314	0.08	3	1,61	22,38	117,12	75360
4	314	0.16	1	1,04	14,15	74,05	50240
5	314	0.16	2	1,3	41,63	217,86	100480
6	314	0.16	3	2,31	52,45	274,44	150720
7	314	0.24	1	2,58	9,67	50,60	75360
8	314	0.24	2	2,47	86,92	454,88	150720
9	314	0.24	3	4,17	88,5	463,15	226080
10	440	0.08	1	0,56	19,7	144,46	35200
11	440	0.08	2	1,13	29,12	213,54	70400
12	440	0.08	3	0,68	19,92	146,08	105600
13	440	0.16	1	1,3	20,17	147,91	70400
14	440	0.16	2	1,69	45,93	336,82	140800
15	440	0.16	3	2,79	41,16	30,84	211200
16	440	0.24	1	2,69	16,25	119,16	105600
17	440	0.24	2	2,51	70,39	516,19	211200
18	440	0.24	3	3,57	82,09	601,99	316800
19	628	0.08	1	0,3	10,99	115,02	50240
20	628	0.08	2	1,19	18,46	193,21	100480
21	628	0.08	3	0,54	7,09	74,20	150720
22	628	0.16	1	0,72	14,98	156,79	100480
23	628	0.16	2	1,2	43,36	453,83	200960
24	628	0.16	3	2,06	39,93	417,93	301440
25	628	0.24	1	2,41	10,14	106,13	150720
26	628	0.24	2	2,27	66,6	697,08	301440
27	628	0.24	3	3,42	75,07	785,73	452160

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. Les propriétés techniques des éprouvettes et les caractéristiques des outils de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été choisies. Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les différents résultats des essais réalisés.

III.1. Introduction

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs en général est de rechercher les conditions optimales d'usinage, qui permettent d'atteindre deux types d'objectifs, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois. Ce chapitre est consacré à présenter les résultats de la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés.

Ces modèles permettent de mettre en évidence la relation entre les éléments du régime de coupe à savoir, la vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (f) et la profondeur de passe (a_p) et les réponses étudiées qui sont : Rugosité arithmétique R_a , efforts de coupe (F_z), la puissance de coupe (P_c) et le volume de copeau MRR.

Les résultats ont été traités statistiquement afin de proposer un régime de coupe optimal, pour atteindre ces objectifs, on a fait appel à la méthodologie de surface de réponse (MSR), aussi, pour faire une analyse de la variance (ANOVA) et pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (SR), nous avons utilisé le logiciel statistique appelé «**Design Expert 9**».

Par ailleurs, l'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés.

III.2. Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA) est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le processus d'usinage, elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie [20]. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par P -value et F -value d'ANOVA.

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

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

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

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

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

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

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad \text{III. 2}$$

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

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad \text{III. 3}$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

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

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad \text{III. 4}$$

III.3. Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (*association*) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre l'entrée, appelé dans notre cas, les conditions de coupe (vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (f), la profondeur de passe (ap)) et la sortie (Y), défini comme un des aspects d'usinabilité (paramètres technologiques d'usinage) est donnée par l'expression :

$$Y = \varphi(V_c, f, ap) \quad \text{III. 5}$$

Où : φ est la fonction de réponse.

L'approximation des Y est proposé au moyen d'un modèle mathématique généralement non-linéaire (*quadratique*), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres de coupe. Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \varepsilon_{ij} \quad \text{III. 6}$$

$$(\varepsilon_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij}) \quad \text{III. 7}$$

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

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

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{III. 8}$$

avec y_i valeur de la réponse calculée à la i^{me} expérience ;

\bar{y}_i valeur mesurée à la i^{me} expérience ;

\bar{y} valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%, à chaque fois que la valeur de F -calculée est supérieure à la valeur de F -table. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérées statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, plus le modèle est compatible avec les valeurs réel (expérimentaux).[21]

III.4. Modélisation des différents critères, Ra, Fz, Pc et MRR, en fonction de Vc, f et ap

Les résultats expérimentaux correspondant à la rugosité Ra, l'effort tangentiel Fz, la puissance Pc et le volume du copeau MRR sont présentés dans le tableau (III-1). Ces résultats ont été obtenus suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe, vitesse de coupe (Vc), avance par tour (f) et profondeur de passe (ap), lors de l'usinage de polymères POM-C par un outil en carbure KC 726 M (ISO P20-PVD).

Tableau III.1 Résultats expérimentaux de la Rugosité arithmétique Ra, Efforts de coupe (Fz), puissance de coupe (Pc) et volume de copeau MRR

N°	Paramètres d'usinage			Les paramètres de réponse			
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	Pc (W)	MRR (mm^3/min)
1	314	0.08	1	0,67	22,98	120,26	25120
2	314	0.08	2	1,22	34,99	183,11	50240
3	314	0.08	3	1,61	22,38	117,12	75360
4	314	0.16	1	1,04	14,15	74,05	50240
5	314	0.16	2	1,3	41,63	217,86	100480
6	314	0.16	3	2,31	52,45	274,44	150720
7	314	0.24	1	2,58	9,67	50,60	75360
8	314	0.24	2	2,47	86,92	454,88	150720
9	314	0.24	3	4,17	88,5	463,15	226080
10	440	0.08	1	0,56	19,7	144,46	35200
11	440	0.08	2	1,13	29,12	213,54	70400
12	440	0.08	3	0,68	19,92	146,08	105600
13	440	0.16	1	1,3	20,17	147,91	70400
14	440	0.16	2	1,69	45,93	336,82	140800
15	440	0.16	3	2,79	41,16	30,84	211200
16	440	0.24	1	2,69	16,25	119,16	105600
17	440	0.24	2	2,51	70,39	516,19	211200
18	440	0.24	3	3,57	82,09	601,99	316800
19	628	0.08	1	0,3	10,99	115,02	50240
20	628	0.08	2	1,19	18,46	193,21	100480
21	628	0.08	3	0,54	7,09	74,20	150720
22	628	0.16	1	0,72	14,98	156,79	100480
23	628	0.16	2	1,2	43,36	453,83	200960
24	628	0.16	3	2,06	39,93	417,93	301440
25	628	0.24	1	2,41	10,14	106,13	150720
26	628	0.24	2	2,27	66,6	697,08	301440
27	628	0.24	3	3,42	75,07	785,73	452160

III.4.1. La Rugosité (Ra)

Le tableau (III.2) qui concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité (Ra) montre que le facteur d'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) ont une grande influence avec des contributions de 67.61%, 15.67% respectivement, l'analyse indique aussi que l'effet la vitesse de coupe (Vc) sur la rugosité Ra est faible.

Tableau III.2 Analyse de la variance ANOVA pour Ra

Source	Somme des carrés	D.L.	Moyen de Carré	Valeur de F	p-valeur Prob> F	Cont %	Remarques
Modèle	24.6784	9	2.742	17.4931	0		<u>Signifiant</u>
Vc	0.5904	1	0.5904	3.7666	0.0691	2.18	Non signifiant
f	18.3204	1	18.3204	116.8764	0	67.61	Signifiant
ap	4.2468	1	4.2468	27.0927	0.0001	15.67	Signifiant
Vc * f	0.0066	1	0.0066	0.0422	0.8397	0.02	Non signifiant
Vc * ap	0.1027	1	0.1027	0.655	0.4295	0.38	Non signifiant
f * ap	0.396	1	0.396	2.5265	0.1304	1.46	Non signifiant
Vc ²	0.0539	1	0.0539	0.3435	0.5655	0.20	Non signifiant
f ²	0.495	1	0.495	3.1578	0.0935	1.83	Non signifiant
ap ²	0.2217	1	0.2217	1.4143	0.2507	0.82	Non signifiant
Résiduel	2.6648	17	0.1568			9.83	
Total	27.3431	26				100.00	

III.4.1.1. Modèle mathématique et le coefficient de détermination R²

L'équation (III.9) exprime le modèle de la rugosité arithmétique (Ra) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$\begin{aligned}
 Ra = & +0.41305 + 3.51187 \times 10^{-3} \times Vc - 7.12629 \times f - 0.36922 \times ap + 1.85700 \times \\
 & 10^{-3} \times Vc \times f - 5.85385 \times 10^{-4} \times Vc \times ap + 2.27083 \times f \times ap - 4.02526 \times 10^{-6} \times Vc^2 + \\
 & 44.87847 \times f^2 + 0.19222 \times ap^2
 \end{aligned}
 \tag{III. 9}$$

Où, le coefficient de détermination : R²=90.25%.

III.4.1.2. Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

La figure (III.1) montre qu'en général il y a une faible dispersion des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite à 45° qui représente le cas idéal.

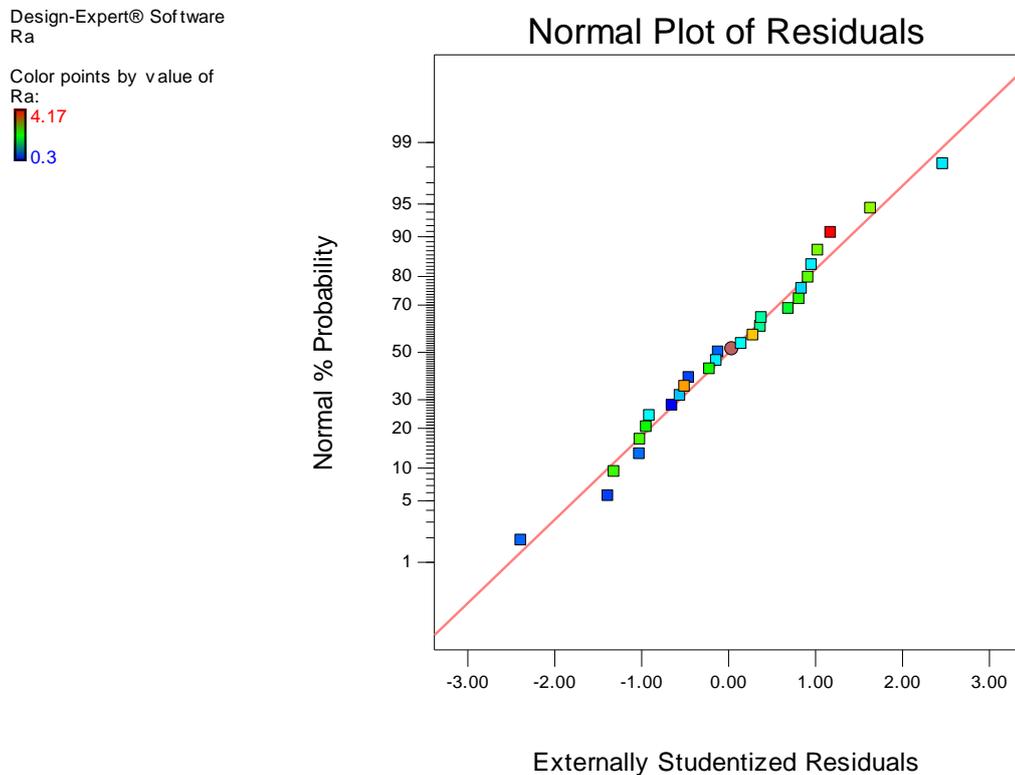


Figure III. 1 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour le critère de la rugosité(R_a).

III.4.1.3. Diagrammes de surface en 3D

La figure (III.2) permet d'évaluer l'influence simultanée de (f , V_c), (f , a_p), (a_p , V_c) sur le critère de rugosité de surface (R_a). La figure indique que la pente de l'avance (f) est la plus importante suivie par (a_p). La meilleure rugosité de la surface usinée est obtenue avec une petite avance par tour (f), et une grande vitesse de coupe.

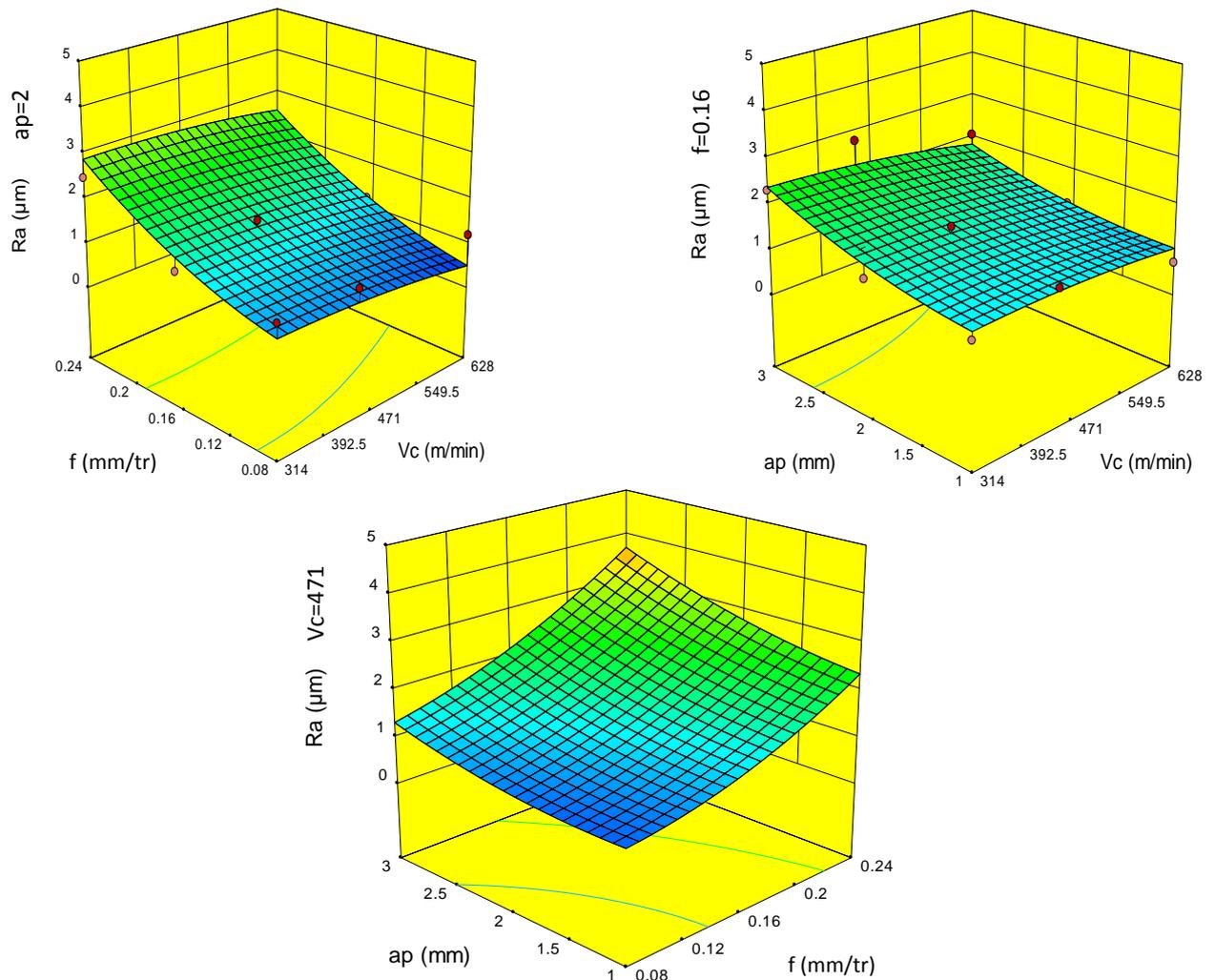


Figure III.2 Diagrammes de surface 3D de (R_a) en fonction de (V_c , f et ap)

III.4.2. Effort de coupe tangentiel (F_z)

Les résultats de l'ANOVA de la composante (F_z) sont présentés dans le tableau (III.3) ; Cette analyse montre que l'avance par tour (f) est le facteur le plus influent sur (F_z) avec une contribution de 33.36%, suivie par la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 26.60% , suivie, par l'interaction entre l'avance par tour et la profondeur de passe ($f * ap$) avec une contribution 22.34%, et le terme (ap^2) a une contribution de 10.24% .

Tableau III.3 Analyse de la variance ANOVA Fz

Source	Somme des carrés	D.L.	Moyen de Carré	Valeur de F	p-valeur Prob> F	Cont %	Remarque
Modèle	16497.5901	9	1833.0656	44.7377	0		<i>Signifiant</i>
Vc	420.9835	1	420.9835	10.2745	0.0052	2.47	<i>Non signifiant</i>
f	5693.499	1	5693.499	138.9552	0	33.36	<i>Signifiant</i>
ap	4539.4415	1	4539.4415	110.7893	0	26.60	<i>Signifiant</i>
Vc * f	11.5485	1	11.5485	0.2819	0.6024	0.07	<i>Non signifiant</i>
Vc * ap	67.6664	1	67.6664	1.6515	0.216	0.40	<i>Non signifiant</i>
f * ap	3812.0545	1	3812.0545	93.0368	0	22.34	<i>Signifiant</i>
Vc²	2.6245	1	2.6245	0.0641	0.8032	0.02	<i>Non signifiant</i>
f²	75.2368	1	75.2368	1.8362	0.1931	0.44	<i>Non signifiant</i>
ap²	1747.3991	1	1747.3991	42.6469	0	10.24	<i>Signifiant</i>
Résiduel	696.5518	17	40.9736			4.08	
Total	17194.142	26				100.00	

III.4.2.1. Modèle mathématique est le coefficient de détermination

Ce modèle permet de décrire la relation entre l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe. Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez élevé.

$$Fz = 3.99287 + 0.013307 \times Vc - 436.16577 \times f + 55.62498 \times ap + 0.077603 \times Vc \times f - 0.015028 \times Vc \times ap + 222.79167 \times f \times ap - 2.81009 \times 10^{-5} \times Vc^2 + 553.29861 \times f^2 - 17.06556 \times ap^2 \quad \text{III.10}$$

Où, le coefficient de détermination $R^2=95.95\%$

III.4.2.2. Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

Cette figure (III.3) montre qu'en général il y a une faible dispersion des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite à 45° qui représente le cas idéal.

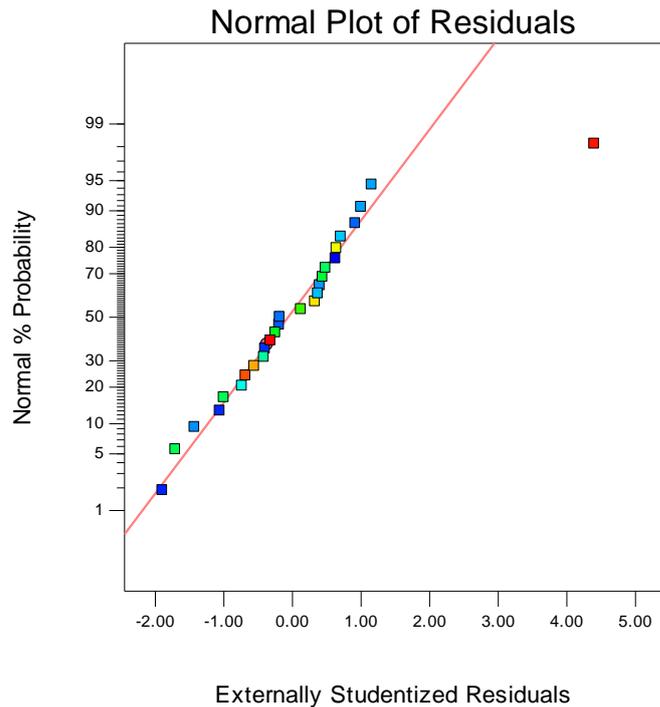
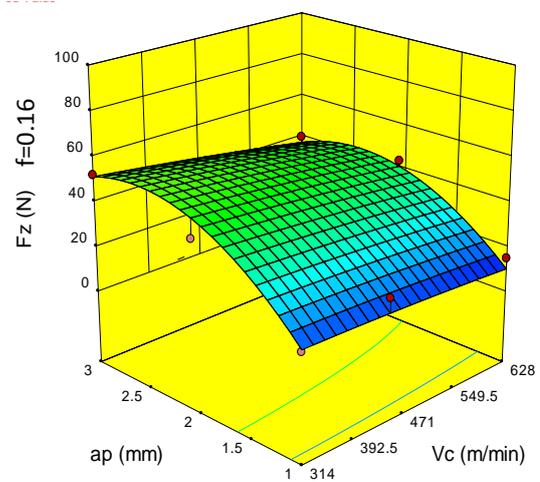
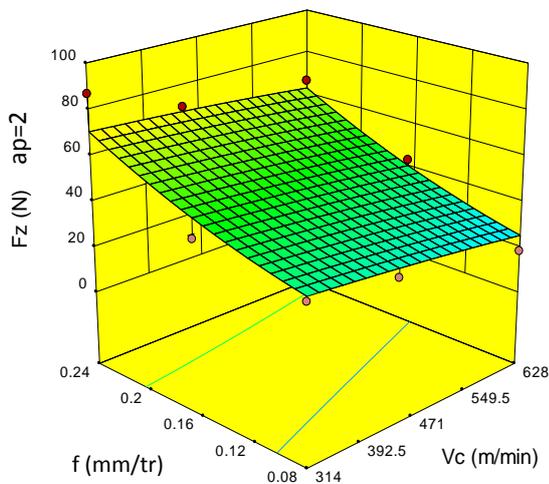
Design-Expert® Software
FzColor points by value of
Fz:
88.5
7.09

Figure III.3. Valeurs prévues en fonction des expérimentales pour le l'effort tangentiel (F_z).

III.4.2.3. Diagrammes de surface 3D

La figure (III.4) présente la réponse de la composante tangentielle de l'effort de coupe (F_z) en (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation. La figure montre que la pente de l'avance (f) est supérieure aux autres facteurs ce que implique que ce facteur a l'influence la plus significative suivi par la profondeur de passe (ap), et l'interaction entre les deux facteurs ($f * ap$).



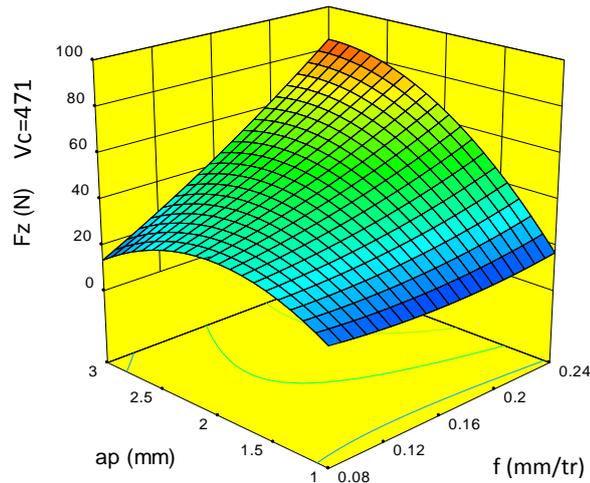


Figure III.4 Diagrammes de surface 3D de (F_z) en fonction de (V_c , f et ap)

III.4.3. Puissance de coupe (P_c)

Le tableau (III.4) présente l'analyse de la variance ANOVA de la puissance de coupe (P_c).

D'après les résultats de l'ANOVA on constate que l'avance par tours (f), est le facteur qui a la plus grande influence avec une contribution de 31.32 %, suivi par la profondeur de passe (ap) avec une valeur de 17.52%, en dernier lieu l'interaction ($f*ap$) avec une valeur de contribution de 18.96 % et (ap^2) avec une contribution de 10.78%.

Tableau III.4 Analyse de la variance ANOVA P_c

Source	Somme des carrés	D.L.	Moyen de Carré	Valeur de F	p-valeur Prob> F	Cont %	Remarque
Modèle	1007451.88	9	111939.097	15.4896	0		<u>Signifiant</u>
V_c	60604.2113	1	60604.2113	8.3861	0.01	5.27	Non signifiant
f	360052.706	1	360052.706	49.8223	0	<u>31.32</u>	Signifiant
ap	201453.422	1	201453.422	27.8761	0.0001	<u>17.52</u>	Signifiant
$V_c * f$	37741.2975	1	37741.2975	5.2225	0.0354	<u>3.28</u>	Signifiant
$V_c * ap$	9572.8311	1	9572.8311	1.3246	0.2657	0.83	Non signifiant
$f * ap$	217976.999	1	217976.999	30.1626	0	<u>18.96</u>	Signifiant
V_c^2	1011.121	1	1011.121	0.1399	0.713	0.09	Non signifiant
f^2	14372.373	1	14372.373	1.9888	0.1765	1.25	Non signifiant
ap^2	123953.71	1	123953.71	17.1521	0.0007	<u>10.78</u>	Signifiant
Résiduel	122854.504	17	7226.7355			10.69	
Total	1130306.38	26				100.00	

III.4.3.1. Modèle mathématique est le coefficient de détermination

Le modèle quadratique représentant la variation de la puissance de coupe (P_c) en fonction des éléments du régime de coupe est donné par :

$$P_c = +439.79879 - 1.21729 \times V_c - 6132.51192 \times f + 327.31850 \times a_p + 4.43633 \times V_c \times f + 0.17874 \times V_c \times a_p + 1684.70833 \times f \times a_p + 5.515171 \times 10^{-4} \times V_c^2 + 7647.30903 \times f^2 - 143.73222 \times a_p^2 \quad \text{III. 11}$$

Où, le coefficient de détermination $R^2=89.13\%$.

III.4.3.2. Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

La figure (III.5) montre qu'en générale il y a une bonne concordance entre les valeurs des résultats prévus par le modèle quadratique et ceux obtenues par calcul en fonction des mesures expérimentales.

Design-Expert® Software
Pc

Color points by value of
Pc:

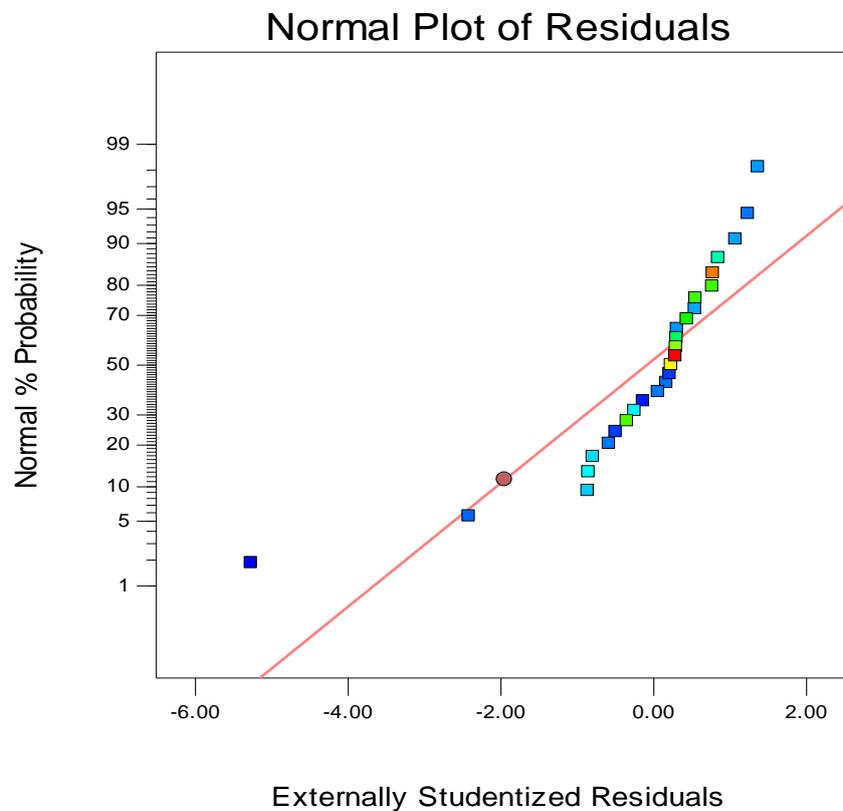


Figure III.5 Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour la puissance de coupe (P_c).

III.4.3.3. Diagrammes de surface 3D

La figure (III.6) permet d'évaluer les diagrammes d'influence des paramètres (V_c , f), (V_c , a_p), (f , a_p) sur la puissance de coupe (P_c).

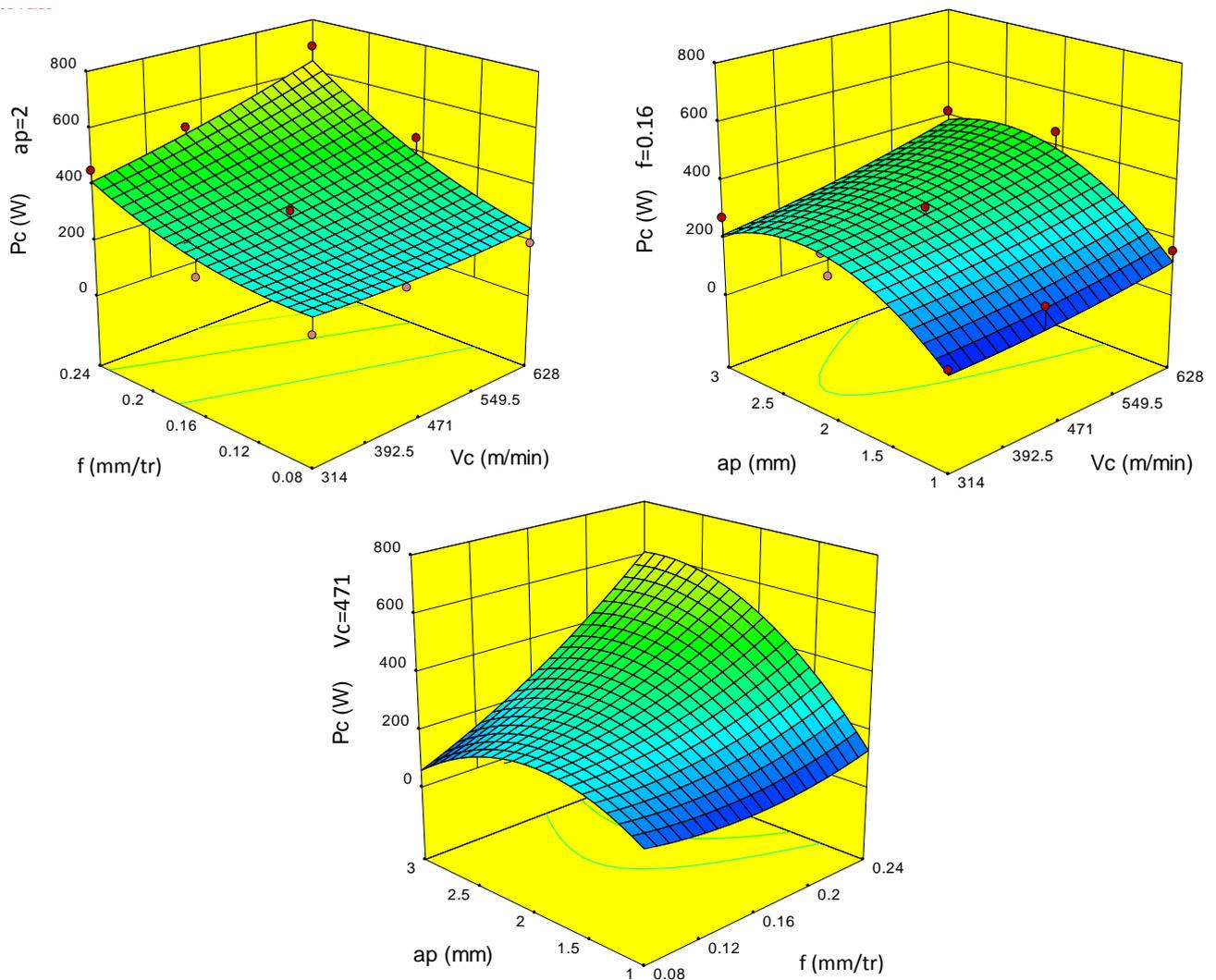


Figure III.6 Diagrammes de surface 3D de (P_c) en fonction de (V_c , f et a_p)

III.4.4. Volume de copeau (MRR)

Les résultats de l'ANOVA du volume de copeau (MRR) sont présentés dans le tableau (III.5), l'analyse des résultats montre que l'avance (f), et la profondeur de passe (a_p) sont les facteurs qui ont la plus grande influence avec une valeur de contribution similaire égale à 36.08 % ; suivi par la vitesse de coupe (V_c) avec une valeur de contribution égale à 16.14 %. A noter que, toutes les interactions ont aussi une influence significative avec moins d'ampleur sur le volume de copeau (MRR).

Tableau III.5 Analyse de la variance ANOVA (MRR)

Source	Somme des carrés	D.L.	Moyen de Carré	Valeur de F	p-valeur Prob> F	Cont %	Remarque
Modèle	273238.8693	9	30359.8744	403.71	0		Signifiant
Vc	45433.0368	1	45433.0368	604.15	0	16.14	Signifiant
f	101572.7906	1	101572.791	1350.7	0	36.08	Signifiant
ap	101572.7906	1	101572.791	1350.7	0	36.08	Signifiant
Vc * f	7670.5792	1	7670.5792	102	0	2.72	Signifiant
Vc * ap	7670.5792	1	7670.5792	102	0	2.72	Signifiant
f * ap	16298.0181	1	16298.0181	216.72	0	5.79	Signifiant
Vc ²	0	1	0	0	1	0.00	Non signifiant
f ²	0	1	0	0	1	0.00	Non signifiant
ap ²	0	1	0	0	1	0.00	Non signifiant
Résiduel	1278.4299	17	75.2018			0.45	
Total	274517.2992	26				100.00	

III.4.4.1. Modèle mathématique et le coefficient de détermination

L'équation (III.12) exprime le modèle du volume de copeau (*MRR*) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions correspondantes.

Modèle réduit :

$$MMR = +147.41333 - 0.32000 \times Vc - 921.33333 \times f - 73.70667 \times ap + 2.00000 \times Vc \times f + 0.16000 \times Vc \times ap + 460.66667 \times f \times ap \quad \text{III. 12}$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2=99.53\%$

III.4.4.2. Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux

La figure (III.7) montre qu'en général il y a une dispersion des résultats relativement acceptable, en effet le nuage de points est assez proche de la droite à 45° qui représente le cas idéal.

Design-Expert® Software
MMR

Color points by value of
MMR:

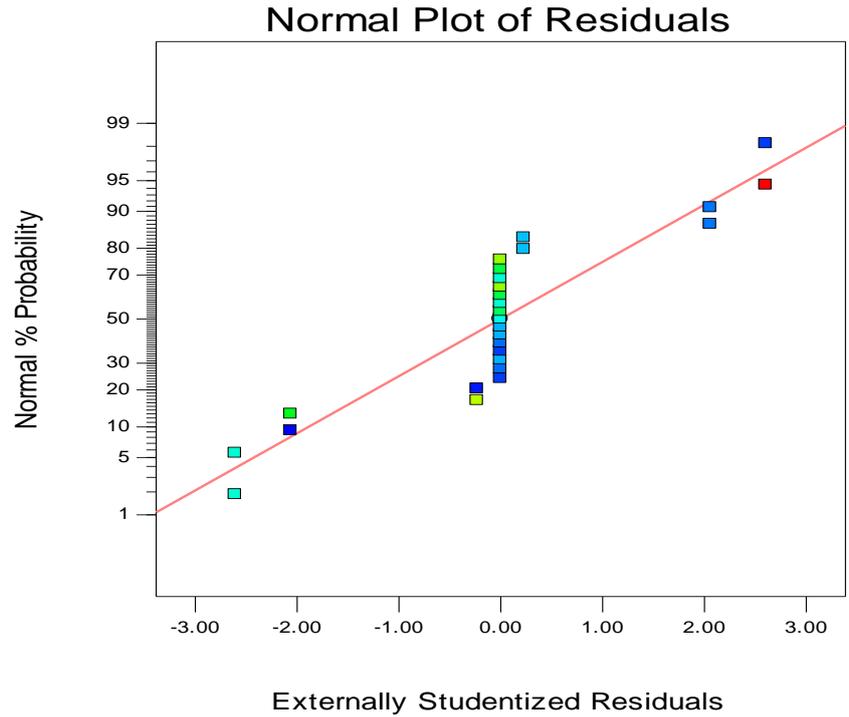
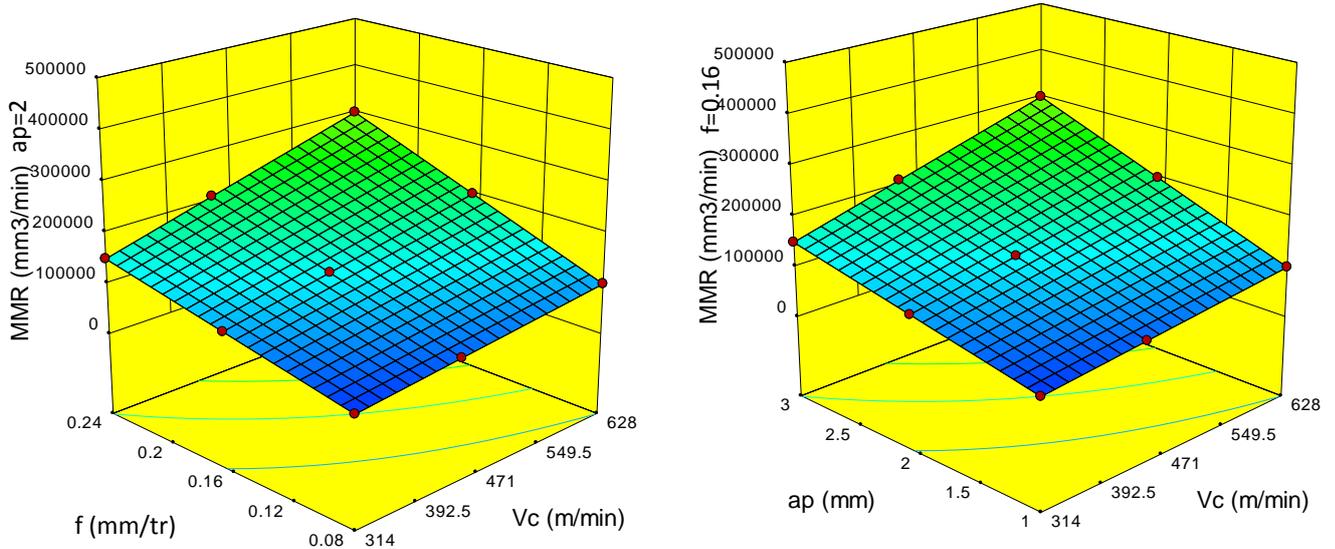


Figure III.7 Valeurs prévues en fonction des expérimentales pour le critère de (MRR)

III.4.4.3. Diagrammes de surface 3D

La figure (III.8) présente la réponse du volume de coupeau (MRR) en (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation. Les graphes 3D ci-dessous représente les effets des paramètres de coups (V_c , f et a_p) sur le facteur technologique (MRR), ce dernier augmente d'une manière significative à des valeurs maximales de (V_c , f , et a_p).



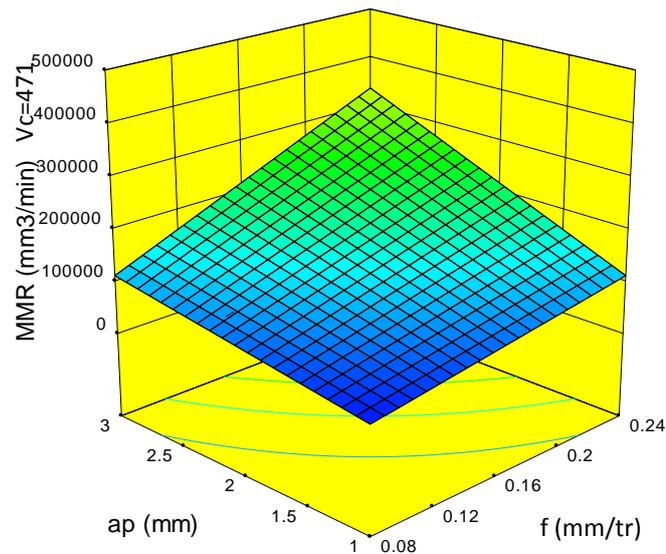


Figure III.8 Diagrammes de surface 3D de (MRR) en fonction de (V_c , f et a_p)

III.5. Optimisation des conditions de coupe

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- 1- Faible effort de coupe (F_z) ; gain en énergie électrique (Cout économique).
- 2- Bon état de surface (R_a) ; amélioration de la qualité de production.
- 3- Faible puissance de coupe (P_c) ; gain en énergie électrique (Cout économique).
- 4- Volume de copeau maximal (MRR) ; productivité.

Cette optimisation Multi-objectifs nous permet de déterminer le bon régime d'usinage et d'atteindre les buts tracés préalablement.

III.5.1. Optimisation Mono-objective

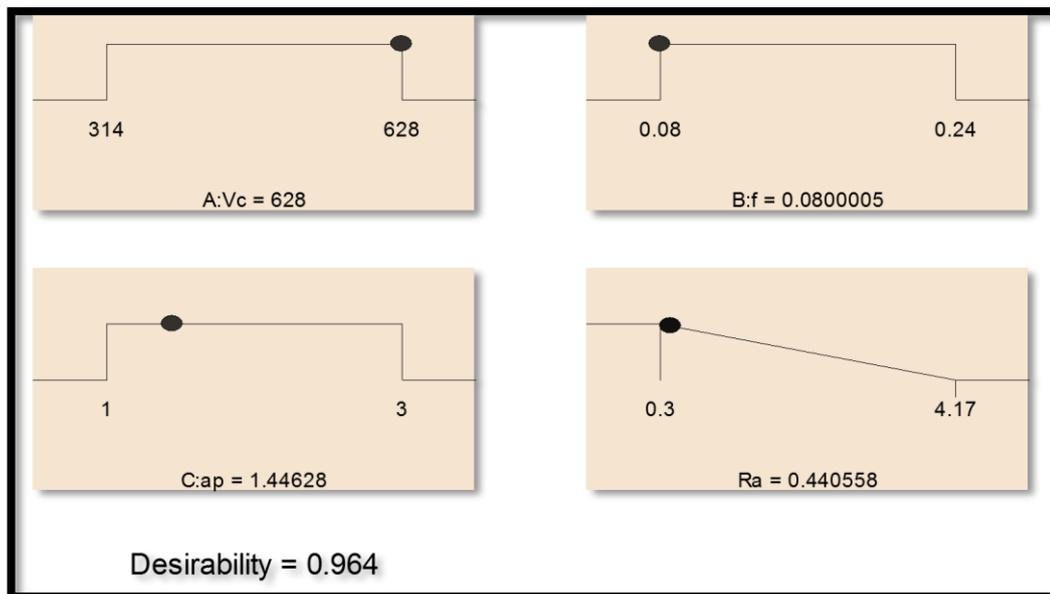
a) But technologique (qualité de surface)

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, obtenues en utilisant le logiciel (**Design-Expert 9**), sont présentées dans le tableau (III.6) et la figure (III.9).

Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs minimales du critère de rugosité (R_a), est les autres paramètres (P_c , F_z et MRR) sont d'une importance minime, alors le régime de coupe à adopter correspond à une vitesse de coupe (V_c) de 628 m/min, une avance par tour de 0.08mm/tr et une valeur de (a_p) 1.443 mm

Tableau III.6 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.

Nombre	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Désirabilité	
<u>1</u>	<u>628</u>	<u>0.08</u>	<u>1.443</u>	<u>0.441</u>	<u>0.964</u>	<u>Selecte</u>
2	627.999	0.08	1.434	0.441	0.964	
3	627.999	0.08	1.424	0.441	0.964	
4	628	0.08	1.484	0.441	0.964	
5	627.999	0.08	1.401	0.441	0.964	
6	628	0.08	1.509	0.441	0.963	
7	628	0.08	1.379	0.441	0.963	
8	627.999	0.08	1.369	0.442	0.963	
9	628	0.08	1.33	0.443	0.963	
10	627.997	0.08	1.563	0.443	0.963	
11	627.998	0.081	1.458	0.443	0.963	
12	627.999	0.08	1.32	0.444	0.963	
13	627.998	0.08	1.521	0.444	0.963	
14	627.999	0.08	1.547	0.444	0.963	
15	628	0.081	1.436	0.445	0.962	
16	625.89	0.08	1.41	0.445	0.962	

**Figure III.9** Régime de coupe optimale pour Ra minimale

La figure (III.10) présente le tracé des valeurs de la désirabilité correspondantes au tableau précédent pour que la rugosité soit minimale. La première choisie est : 0.96368. Dans ce cas la rugosité est considérée comme le facteur dominant par rapport aux autres paramètres (P_c , F_z et MRR).

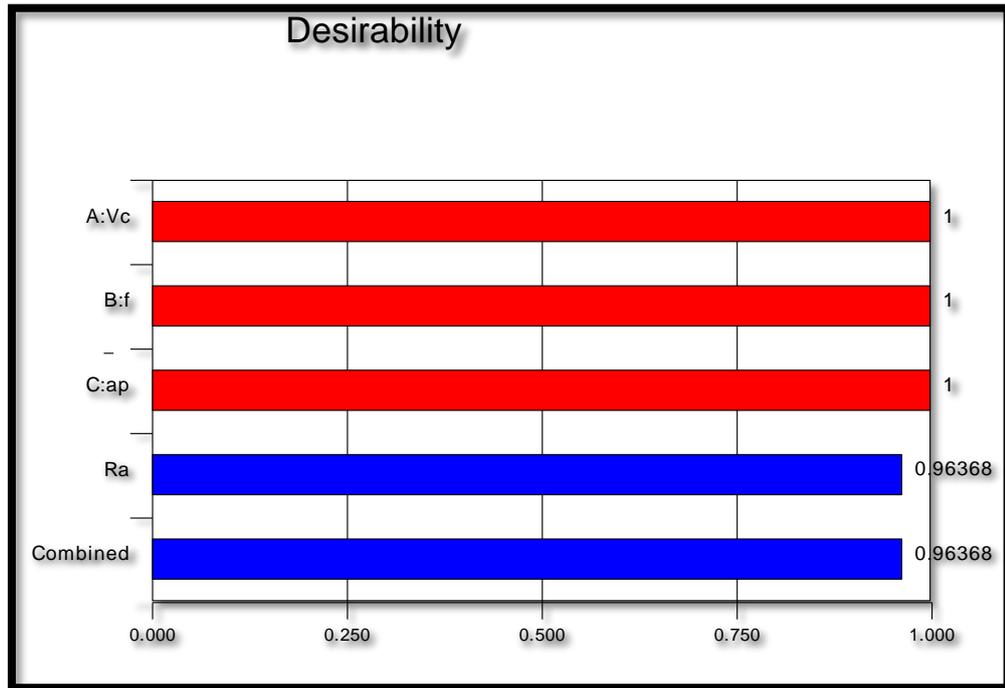


Figure III.10 Valeurs des desirabilités pour une Ra minimale

❖ La variation de la desirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (III.11), présente la variation de la desirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p), cette figure permet de déterminer la valeur de la desirabilité en fonction des conditions de coupe.

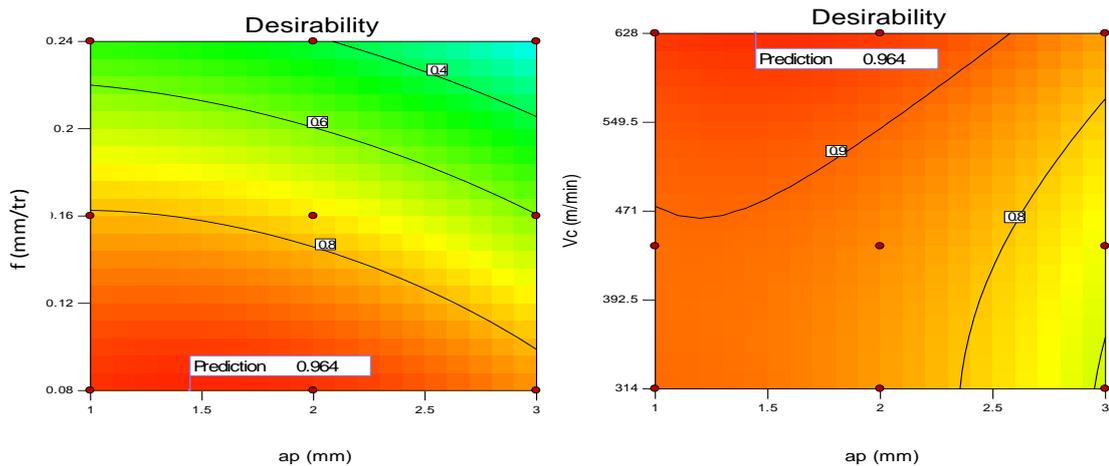


Figure III.11 Variation de la desirabilité en fonction des conditions de coupe

❖ **but économique (production maximale)**

Les valeurs des paramètres de coupe optimaux, sont présentées dans le tableau (III.7) et la figure (III.12).

Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs maximales de volume de copeau (**MMR**), tout en gardant les autres paramètres technologiques (R_a , F_z et P_c) sans intérêt, le régime de coupe à adopter correspond à une vitesse de coupe (V_c) de 628 m/min, une avance par tour de (f) 0.24 mm/tr et une valeur de (a_p) 3 mm.

Tableau III.7 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.

Nombre	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	MMR (mm ³ /min)	Désirabilité	
<u>1</u>	<u>628</u>	<u>0.24</u>	<u>3</u>	<u>438773.33</u>	<u>0.969</u>	<u>Selecte</u>
2	626.353	0.24	3	437718.63	0.966	
3	627.989	0.239	3	437479.46	0.966	
4	623.257	0.24	3	435737.73	0.962	
5	627.999	0.24	2.977	435629.18	0.961	
6	627.999	0.238	3	435186.75	0.96	
7	620.969	0.24	3	434272.2	0.958	
8	627.998	0.24	2.959	433181.53	0.956	
9	627.001	0.237	3	432968.66	0.955	
10	618.777	0.24	3	432870.19	0.955	
11	628	0.239	2.962	431918.54	0.953	
12	628	0.235	3	430543.69	0.949	
13	627.999	0.24	2.932	429392.54	0.947	
14	628	0.237	2.969	429123.25	0.946	
15	612.916	0.24	3	429119.08	0.946	
16	628	0.234	3	428496.96	0.945	

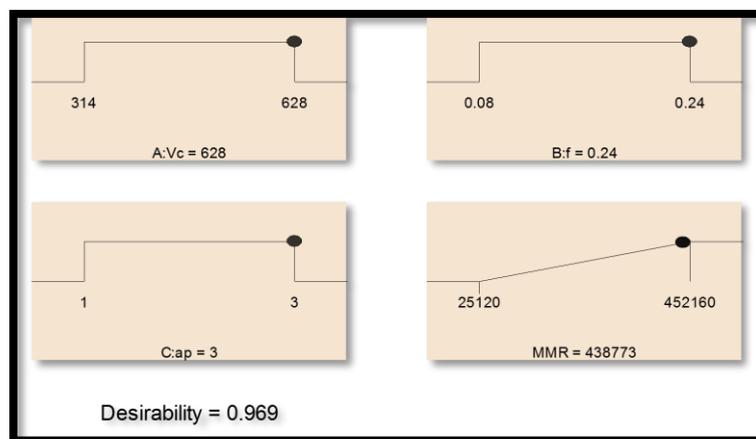


Figure III.12 Régime de coupe optimale pour une production maximale

❖ Valeurs de la désirabilité

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale 0.9686, présenté sur la figure (III.13). Le volume du coupeau est considéré seul sans les autres paramètres (R_a , F_z et P_c).

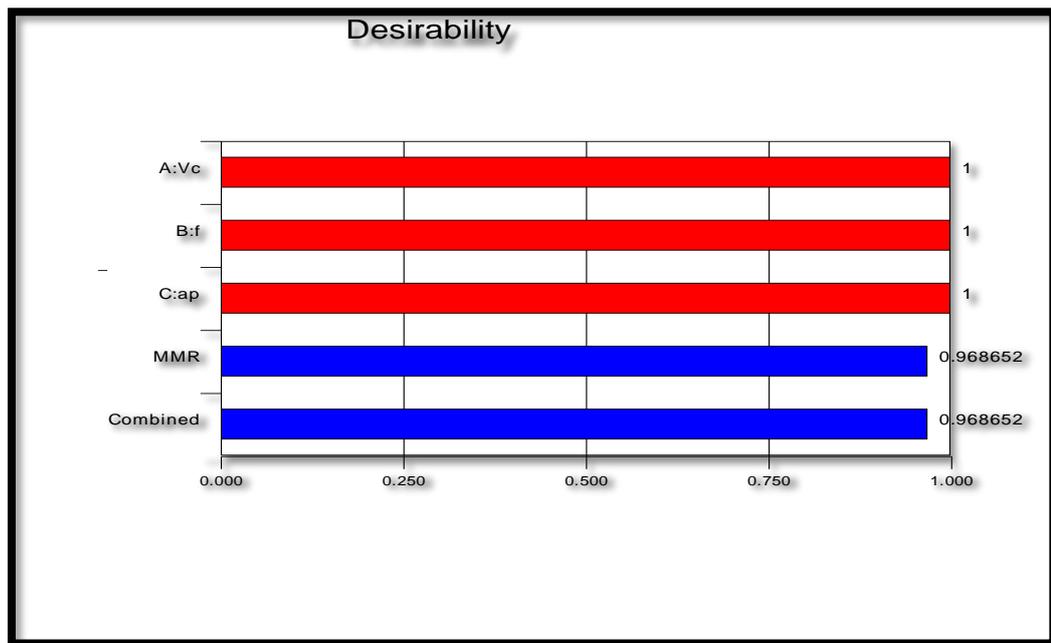


Figure III.13 Valeurs de la désirabilité

❖ Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

Sur la figure (III.14), on a représenté la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe (V_c ; f) et (f ; a_p).

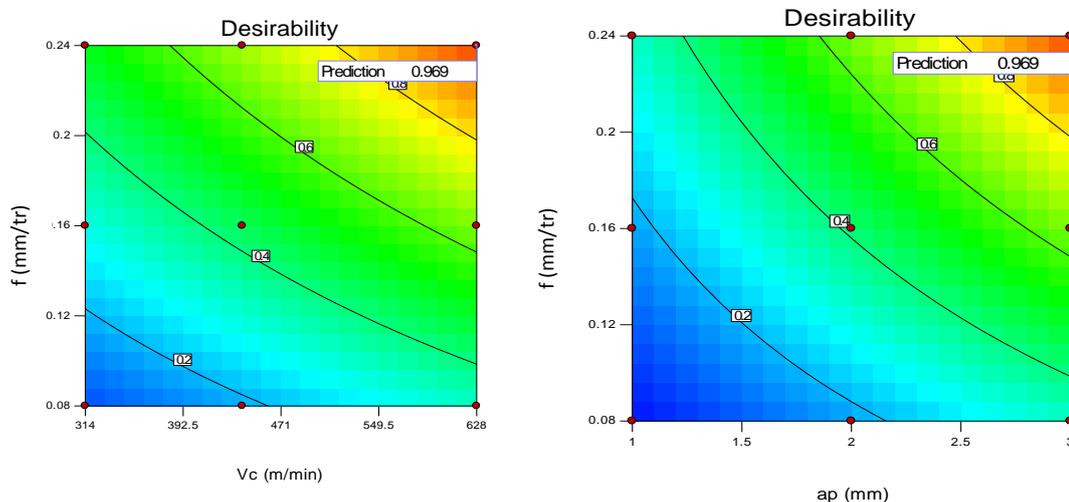


Figure III.14 Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

III.5.2. Optimisation Multi-objective (but combiné, technologique-économique)

❖ Optimisation du régime de coupe pour une rugosité R_a mini et une MRR max

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, sont présentées dans le tableau (III.8) et la figure (III.15).

Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs minimales de la rugosité (R_a) et d'un volume de copeau MMR maximal à la fois, le régime de coupe à adopter doit correspondre à une vitesse de coupe (V_c) de 628 m/min, une avance par tour de (f) 0.157 mm/tr et une valeur de profondeur de passe (a_p) de 3mm.

Tableau III.8 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.

Nombre	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	MMR (mm^3/min)	Désirabilité	
1	628	0.157	3	1.796	296885.64	0.625	Selecte
2	628	0.157	3	1.785	295667.58	0.625	
3	627.999	0.159	3	1.818	299385.14	0.625	
4	628	0.156	3	1.774	294416.2	0.625	
5	627.999	0.16	3	1.833	301075.58	0.625	
6	627.999	0.158	2.984	1.793	296371.21	0.625	
7	627.997	0.156	2.986	1.758	292344.71	0.625	
8	627.999	0.162	3	1.862	304420.1	0.625	
9	627.999	0.153	3	1.731	289416.82	0.624	
10	628	0.16	2.968	1.808	297844.8	0.624	
11	628	0.158	2.959	1.773	293842.08	0.624	
12	628	0.164	2.97	1.871	304964.82	0.624	
13	627.999	0.163	2.946	1.833	300288.52	0.624	
14	628	0.161	2.924	1.79	296913.46	0.624	
15	626.659	0.158	3	1.806	296913.63	0.624	
16	626	0.16	3	1.839	300791.38	0.624	

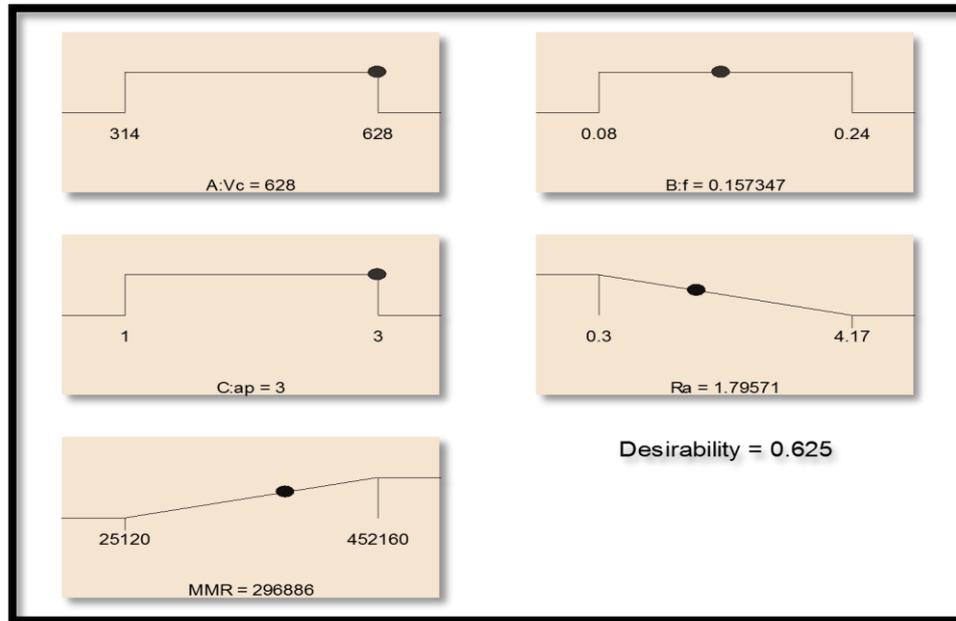


Figure III.15 Régime de coupe optimal pour une rugosité minimale et un MRR maximale

❖ Valeurs des désirabilités des paramètres technologiques

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale 0.6248, de la figure (III.16). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres d'optimisation (Ra minimale ; MRR maximum et Fz et Pc sans considération).

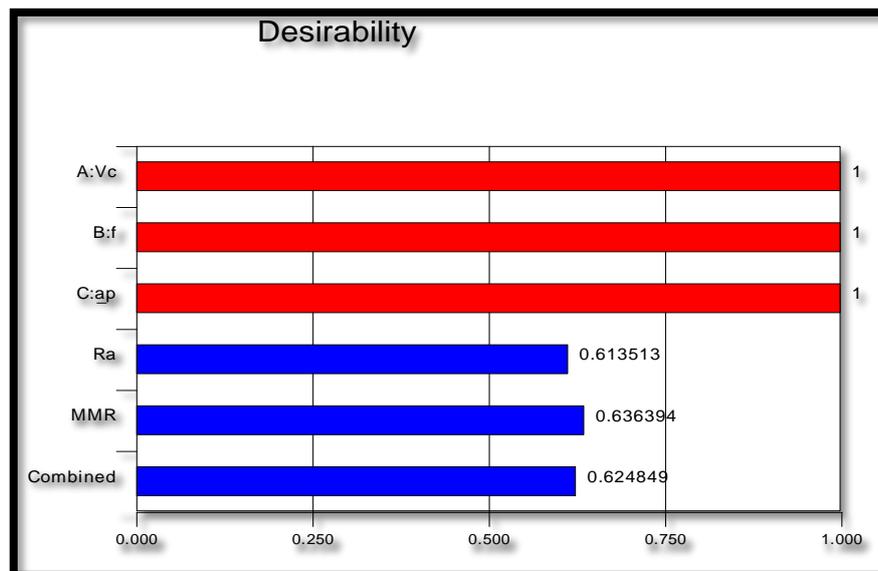


Figure III.16 Valeurs de la désirabilité combinée

❖ Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (III.17), présente la variation de la désirabilité combinée en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe ($V_c \cdot f$, $a_p \cdot f$).

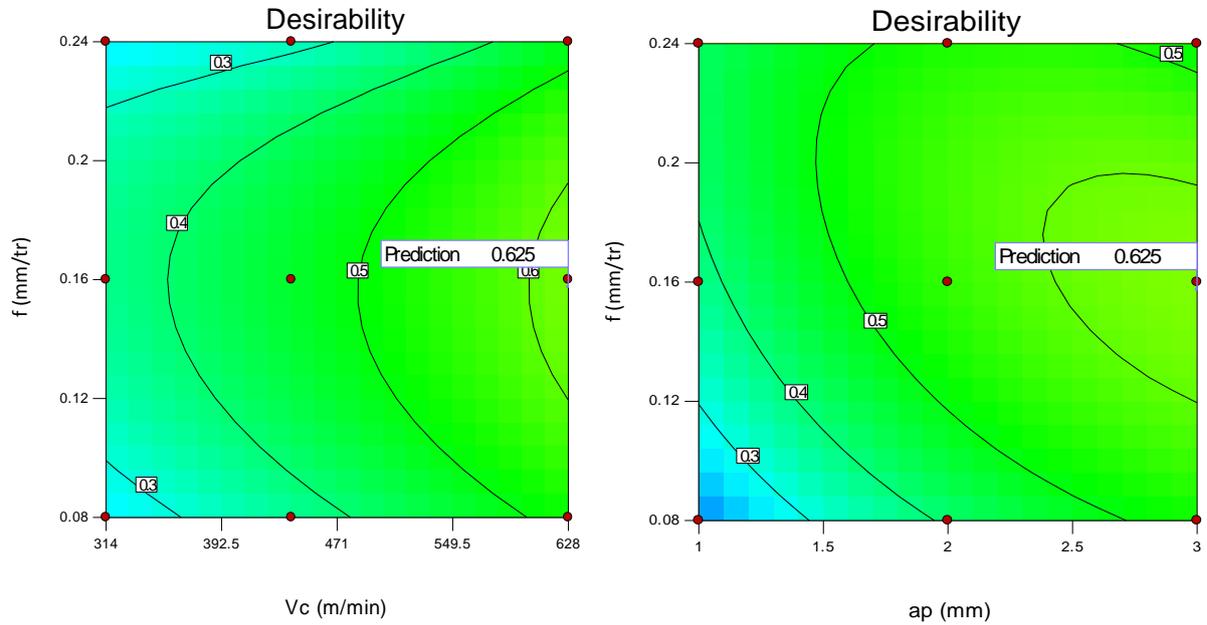


Figure III.17 Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

III.6. Conclusion

L'étude de l'usinage du POM-C en tournage selon un plan d'expérience de 27 essais nous a permis de déterminer des modèles mathématiques de la rugosité (R_a , l'effort F_z), la puissance de coupe et le débit de copeau (MRR). Cette modélisation nous a permis de proposer un régime optimale des conditions de coupe pour 3 cas de situation :

- ✓ Qualité maximale.
- ✓ Productivité maximale.
- ✓ Qualité et productivité ensemble (Combinées).

CHAPITRE III

III.1. Introduction	42
III.2. Analyse de variance (ANOVA).....	42
III.3. Analyse de régression	43
III.4. Modélisation des différents critères, Ra, Fz, Pc et MRR, en fonction de Vc, f et ap	45
III.4.1.La Rugosité (Ra).....	46
III.4.1.1.Modèle mathématique et le coefficient de détermination R2	46
III.4.1.2.Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	47
III.4.1.3.Diagrammes de surface en 3D.....	47
III.4.2.Effort de coupe tangentiel (Fz).....	48
III.4.2.1Modèle mathématique est le coefficient de détermination	49
III.4.2.2.Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	49
III.4.2.3.Diagrammes de surface 3D.....	50
III.4.3.Puissance de coupe (Pc)	51
III.4.3.1.Modèle mathématique est le coefficient de détermination	52
III.4.3.2.Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	52
III.4.3.3.Diagrammes de surface 3D.....	53
III.4.4.Volume de copeau (MRR).....	53
III.4.4.1.Modèle mathématique et le coefficient de détermination.....	54
III.4.4.2.Teste de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux	54
III.4.4.3.Diagrammes de surface 3D.....	55
III.5. Optimisation des conditions de coupe	56
III.5.1.Optimisation Mono-objective.....	56
III.5.2.Optimisation Multi-objective (but combiné, technologique-économique).....	61
III.6. Conclusion.....	64

Tableau III.1 Résultats expérimentaux de la Rugosité arithmétique R_a , Efforts de coupe (F_z), puissance de coupe (P_c) et volume de coupe MRR	45
Tableau III.2 Analyse de la variance ANOVA pour R_a	46
Tableau III.3 Analyse de la variance ANOVA F_z	49
Tableau III.4 Analyse de la variance ANOVA P_c	51
Tableau III.5 Analyse de la variance ANOVA (MRR).....	54
Tableau III.6 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.	57
Tableau III.7 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.	59
Tableau III.8 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.	61
Figure III. 1 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour le critère de la rugosité(R_a).....	47
Figure III.2 Diagrammes de surface 3D de (R_a) en fonction de (V_c , f et a_p).....	48
Figure III.3. Valeurs prévues en fonction des expérimentales pour le l'effort tangentiel (F_z).....	50
Figure III.4 Diagrammes de surface 3D de (F_z) en fonction de (V_c , f et a_p).....	51
Figure III.5 Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour la puissance de coupe (P_c).	52
Figure III.6 Diagrammes de surface 3D de (P_c) en fonction de (V_c , f et a_p).....	53
Figure III.7 Valeurs prévues en fonction des expérimentales pour le critère de (MRR).....	55
Figure III.8 Diagrammes de surface 3D de (MRR) en fonction de (V_c , f et a_p).....	56
Figure III.9 Régime de coupe optimale pour R_a minimale	57
Figure III.10 Les valeurs des désirabilités pour une R_a minimale	58
Figure III.11 Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	58
Figure III.12 Régime de coupe optimale pour une production maximale	59
Figure III.13 Valeurs de la désirabilité.....	60
Figure III.14 Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	60
Figure III.15 Régime de coupe optimal pour une rugosité minimale et un MRR maximale	62
Figure III.16 Valeurs de la désirabilité combinée	62
Figure III.17 Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	63

IV.1. Introduction

Aujourd'hui, on retrouve les réseaux de neurones solidement implantés dans diverses industries, dans les milieux financiers pour la prédiction des fluctuations de marché, dans le domaine bancaire pour la détection de fraudes sur les cartes de crédit et le calcul de cotes de crédit, en aéronautique pour la programmation de pilotes automatiques ; etc.

L'avantage fondamental des réseaux de neurones par rapport aux modèles statistiques traditionnels réside dans le fait qu'ils permettent d'automatiser la découverte des dépendances les plus importantes du point de vue de la prédiction du processus [22].

Ce chapitre est subdivisé en deux parties ; La première partie consiste à l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (ANN) pour aboutir aux modèles qui traduisent l'influence de la vitesse de coupe, l'avance et le profondeur de passe sur les différents phénomènes étudiés tels que (Ra et Fz) et en même temps connaître l'efficacité de cette méthode .

La seconde partie traite la comparaison entre les deux méthodes de modélisation, la méthodologie de surface de réponse et les ANN.

IV.2. Réseau de neurones artificiels

Un réseau de neurones artificiels (figure VI-1) est un outil d'analyse statistique permettant de construire un modèle de comportement à partir de données qui sont des exemples de ce comportement.

Un réseau de neurones est constitué d'un graphe pondéré orienté dont les nœuds symbolisent les neurones, ces neurones possèdent une fonction d'activation qui permet d'influencer les autres neurones du réseau.

Les connexions entre les neurones, que l'on nomme liens synaptiques, propagent l'activité des neurones avec une pondération caractéristique de la connexion, on appelle poids synaptique la pondération des liens synaptiques [22].

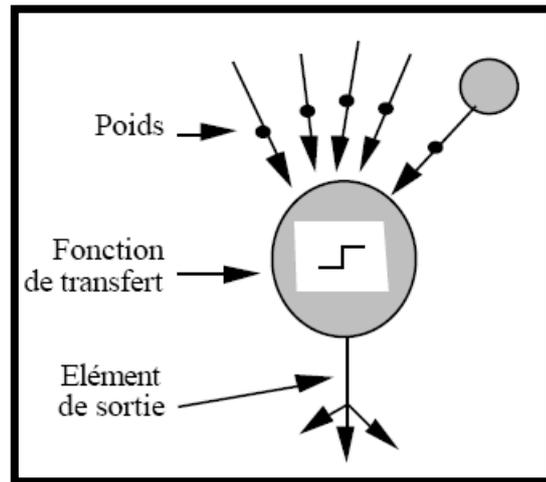


Figure IV.1 Réseau de neurones artificiels

IV.2.1. Calcul de la valeur prédite

Le calcul de la valeur prédite par un réseau de neurones se compose de quelques étapes simples : Premièrement, on calcule une série de combinaisons linéaires des variables explicatives :

$$v_i = \alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \quad \text{IV. 1}$$

Où x_j est la $j^{\text{ème}}$ de n variables explicatives et $\alpha_{i,0}$ et α_{ij} sont les coefficients de la $i^{\text{ème}}$ combinaison linéaire. Le résultat de la combinaison linéaire, v_i , représente une projection dans une direction de l'espace des variables explicatives. Chacune de ces projections combine de l'information provenant potentiellement de plusieurs variables.

La seconde étape consiste à appliquer une transformation non linéaire à chacune des combinaisons linéaires afin d'obtenir les valeurs de ce que l'on appelle les unités cachées ou neurones qui forment ensemble la couche cachée. Typiquement, on utilise la tangente hyperbolique pour effectuer la transformation non-linéaire :

$$h_i = \tanh(v_i) = \frac{e^{v_i} - e^{-v_i}}{e^{v_i} + e^{-v_i}} \quad \text{IV. 2}$$

Où h_i est la $i^{\text{ème}}$ unité cachée. L'utilisation d'une telle fonction de transfert avec une expansion infinie dans ses termes joue un rôle fondamental dans la capacité d'un réseau de neurones de capter les dépendances de haut niveau entre les variables explicatives.

Finalement, les unités cachées sont recombinaées linéairement afin de calculer la valeur prédite par le réseau de neurones :

$$\vec{p}(x) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i h_i \quad \text{IV. 3}$$

où $\vec{p}(x)$ est la valeur prédite par le réseau de neurones, n_h est le nombre d'unités cachées du réseau et β_0 et β_i sont les coefficients de la combinaison linéaire. Les n variables explicatives sont représentées sous forme vectorielle par \vec{x} . On peut résumer les étapes du calcul en une seule équation : [22]

$$\vec{p}(x) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i \tanh \left(\alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \right) \quad \text{IV. 4}$$

Donc, la visualisation de la structure d'un réseau de neurones est illustrée dans la Figure IV-2.

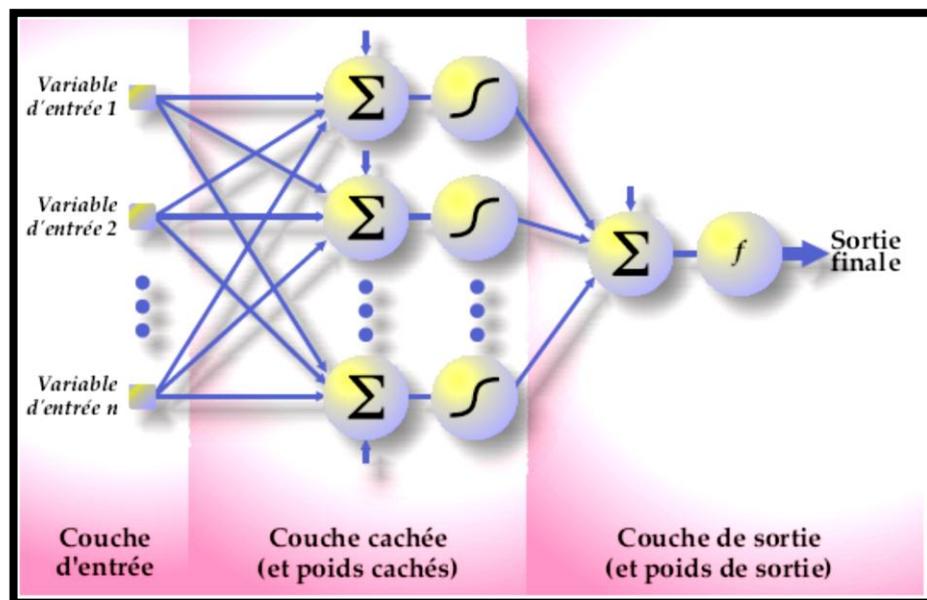


Figure IV.2 Topologie d'un réseau de neurones

IV.2.2. Les neurones formels

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie" [23].

Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de programme. On a pris l'habitude de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la figure (IV-3).

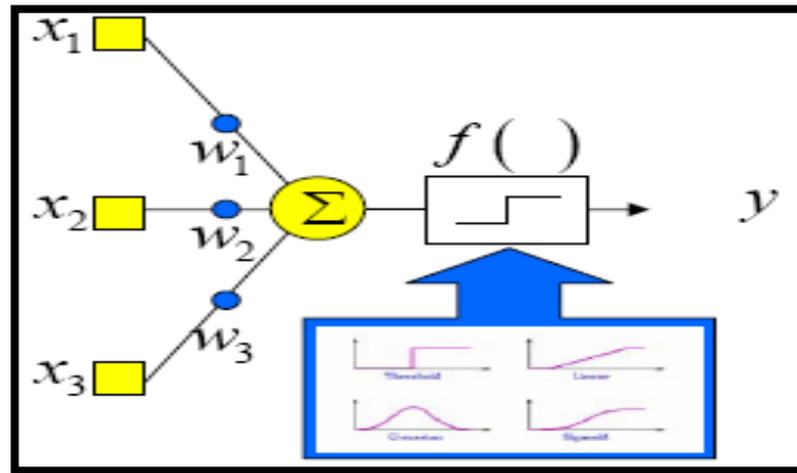


Figure IV.3 Représentation d'un neurone formel [23].

IV.2.3. Différentes fonctions de transfert

Les différents types de neurones se distinguent donc par la nature de leur fonction de transfert f (figure IV.4). Les principaux types des fonctions de transfert sont :

- seuil $f(x) = 1_{[0, +\infty[}(x)$,
- linéaire f est la fonction identité,
- sigmoïde $f(x) = 1 / (1 + e^x)$,
- tangente hyperbolique (sigmoïde) $f(x) = (2 / (1 + e^{-2x})) - 1$,

Les modèles linéaires et sigmoïdaux sont bien adaptés aux algorithmes d'apprentissage impliquant une rétro-propagation du gradient car leur fonction d'activation est différentiable, ce sont les plus utilisés [24].

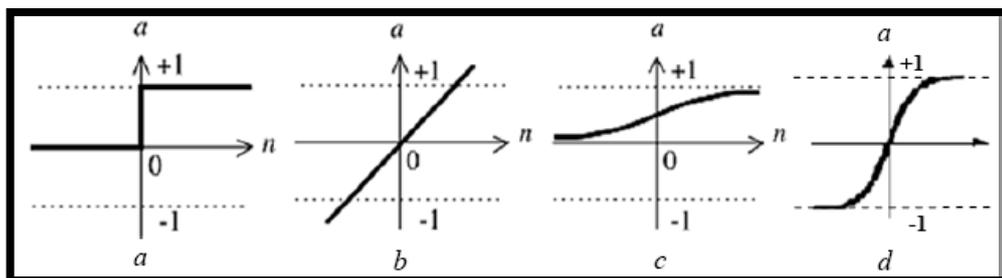


Figure IV.4 Différentes fonction de transfert de réseau de neurones [24].

IV.2.4. Perceptron simple

Le perceptron simple est le réseau le plus simple qui existe puisqu'il se compose d'un seul neurone. On peut, par exemple, utiliser un tel réseau pour une tâche de classification d'un seul caractère. Pour classifier les 26 caractères de l'alphabet, on devrait alors combiner 26 perceptrons

simples. Parce que nous considérons un seul neurone à la fois, nous n'utiliserons pas d'index pour le neurone de sortie [25].

IV.2.5. Perceptron multicouches

Les perceptrons multicouches sont organisés en couche de neurones. Les couches situées entre les nœuds d'entrée et les nœuds de sortie sont appelées « couches cachées ». Les perceptrons multicouches sont plus flexibles que les perceptrons simples et peuvent résoudre des problèmes qui ne sont pas linéairement séparables. La règle d'apprentissage la plus importante pour ces réseaux est l'algorithme de rétro-propagation [25].

IV.2.6. Algorithme de rétro-propagation

L'algorithme de rétro-propagation est une descente de gradient appliquée à des perceptrons multicouches. Le but reste donc le même : minimiser la fonction d'erreur [25].

IV.2.7. Apprentissage

Une fois que les poids et les biais du réseau sont aléatoirement initialisés, le réseau est prêt pour l'apprentissage. Ce processus exige un ensemble de données approprié au réseau qui sont les entrées P et les cibles C de sorties. Pendant l'apprentissage les poids et les biais du réseau sont itérativement ajustés pour minimiser la fonction de performance (figure IV.5). En général, la fonction de performance utilisée dans l'apprentissage des modèles à réseau de neurone est la moyenne des carrés des erreurs entre les valeurs cibles et les valeurs obtenues par le réseau.

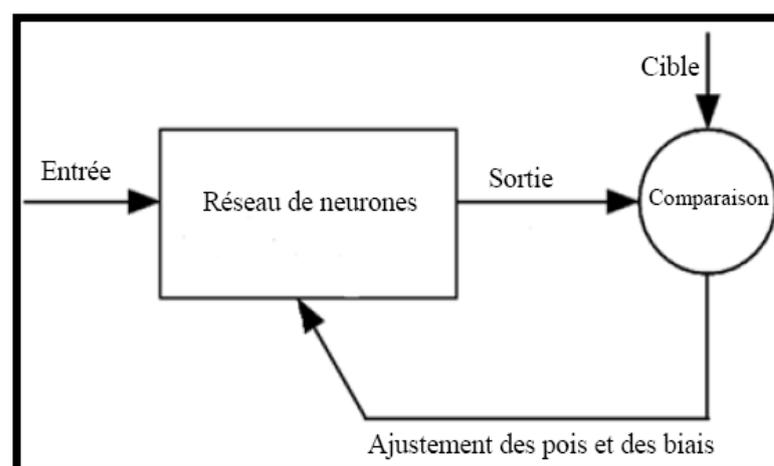


Figure IV.5 Processus d'apprentissage du réseau de neurones

IV.3. Modélisation de la rugosité de surface R_a et de l'effort de coupe tangentiel F_z

Le tableau IV.1 expose les résultats de la rugosité de surface et de l'effort de coupe tangentiel ainsi que les paramètres d'entrées. Ce plan de 27 essais va servir à la modélisation en utilisant l'approche par réseaux de neurones artificielle (RNA) appelé en anglais Artificiel Neuron Network (ANN).

Tableau IV.1 Résultats expérimentaux pour R_a et F_z

N°	Paramètres d'usinage			Les paramètres de réponse	
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	R_a (μm)	F_z (N)
1	314	0.08	1	0,67	22,98
2	314	0.08	2	1,22	34,99
3	314	0.08	3	1,61	22,38
4	314	0.16	1	1,04	14,15
5	314	0.16	2	1,3	41,63
6	314	0.16	3	2,31	52,45
7	314	0.24	1	2,58	9,67
8	314	0.24	2	2,47	86,92
9	314	0.24	3	4,17	88,5
10	440	0.08	1	0,56	19,7
11	440	0.08	2	1,13	29,12
12	440	0.08	3	0,68	19,92
13	440	0.16	1	1,3	20,17
14	440	0.16	2	1,69	45,93
15	440	0.16	3	2,79	41,16
16	440	0.24	1	2,69	16,25
17	440	0.24	2	2,51	70,39
18	440	0.24	3	3,57	82,09
19	628	0.08	1	0,3	10,99
20	628	0.08	2	1,19	18,46
21	628	0.08	3	0,54	7,09
22	628	0.16	1	0,72	14,98
23	628	0.16	2	1,2	43,36
24	628	0.16	3	2,06	39,93
25	628	0.24	1	2,41	10,14
26	628	0.24	2	2,27	66,6
27	628	0.24	3	3,42	75,07

IV.3.1. Modélisation de la rugosité de surface Ra par ANN

Pour la modélisation par la méthode ANN de la rugosité de surface Ra lors de l'usinage du polymère POM-C. Les résultats expérimentaux sont présentés dans le tableau IV.2.

Le plan expérimental est composé de 27 essais, dont 22 essais sont employés pour l'apprentissage du réseau et 5 essais sont choisis arbitrairement pour tester la validité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones est fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant.

Plusieurs structures de réseau ont été testées, nous se limitons à présenter seulement la structure qui a donné les meilleurs résultats qui est 3-7-1 (tableau IV.2 et figure IV.6). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds qui correspond au nombre de paramètres de coupe, une couche cachée à 7 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire.

Le logiciel de calcul **JMP 11** est utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau et l'enregistrement de différents résultats obtenus de l'ANN tels que le modèle mathématique et les coefficients de corrélation.

Tableau IV.2 Performance des structures ANN du modèle de Ra

Ent – Cach- Sort	Apprentissage		Validation	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE
3-7-1	<u>0.9464</u>	<u>0.2401</u>	<u>0.9994</u>	<u>0.02</u>
3-8-1	0.9644	0.1962	0.9051	0.2542
3-9-1	0.9999	0.005	0.9260	0.3213
3-10-1	0.9859	0.1116	0.9928	0.0996
3-11-1	0.989	0.1087	0.8452	0.3247
3-12-1	0.9999	0.0009	0.9198	0.3345
3-13-1	0.9811	0.1291	0.5813	0.7645
3-14-1	0.9863	0.1099	-0.2015	1.2959
3-15-1	0.9964	0.0562	0.9235	0.3267
3-16-1	0.8913	0.3429	0.9906	0.0797

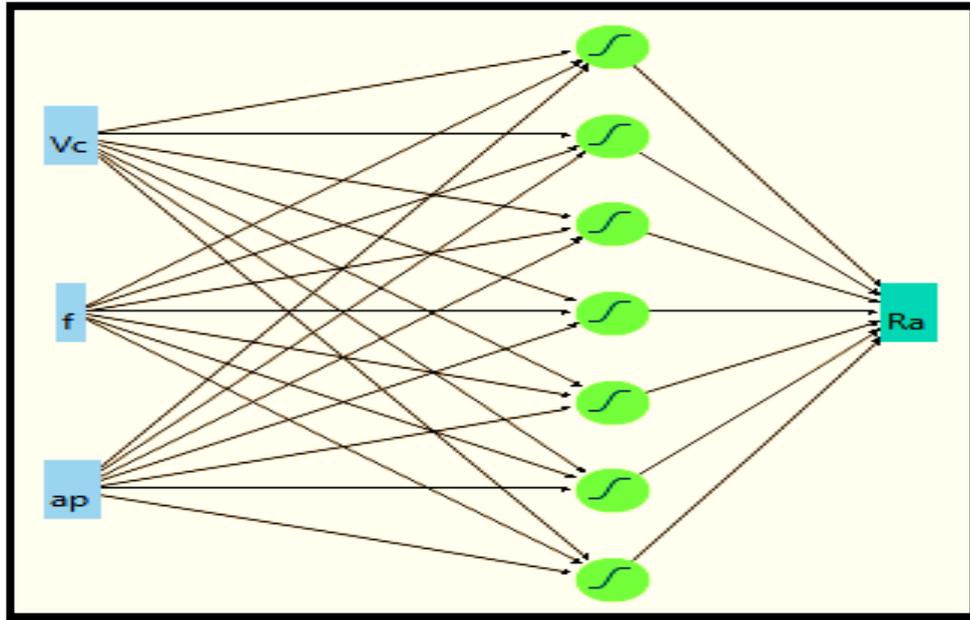


Figure IV.6 Architecture neuronale choisie pour Ra

Les valeurs des poids et des biais du modèle neuronal de la rugosité (Ra) sont les suivant :

Pour la couche cachée

$$H1 = \tanh(0.5 * (-0.0014 * Vc + 19.5437 * f + 1.0500 * ap - 5.9124));$$

$$H2 = \tanh(0.5 * (-0.0153 * Vc + 24.0463 * f - 3.1772 * ap + 11.2189));$$

$$H3 = \tanh(0.5 * (-0.0068 * Vc - 31.7062 * f - 3.9476 * ap + 16.1338));$$

$$H4 = \tanh(0.5 * (-0.0051 * Vc + 1.7151 * f - 1.3838 * ap + 4.3753));$$

$$H5 = \tanh(0.5 * (0.0073 * Vc + 56.4349 * f + 0.9586 * ap - 15.8893));$$

$$H6 = \tanh(0.5 * (-0.0232 * Vc + 31.3227 * f - 1.3520 * ap + 10.1885));$$

$$H7 = \tanh(0.5 * (-0.0042 * Vc - 45.9778 * f - 0.9634 * ap + 12.1945));$$

IV. 5

Pour la couche de sortie :

$$Ra = 0.6640 * H1 - 0.7372 * H2 + 0.8491 * H3 - 0.7221 * H4 - 1.4253 * H5 + 0.7986 * H6 - 2.54977 * H7 + 2.0033$$

IV. 6

Où :

Le coefficient de détermination $R^2 = 97.29\%$.

Le modèle proposé donne un coefficient de corrélation de 94.64 % pour l'apprentissage et pour la validation le R^2 est de 99.94 % (tableau IV.3).

Tableau IV.3 Valeurs statistiques de l'analyse ANN de Ra

	Apprentissage	Validation
R carré	0,9464	0,9994
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,2401	0,0200
Nombre d'essais	22	5

Dans la figure (IV.7) on a présenté une comparaison entre les résultats expérimentaux et celles prédites à l'aide du modèle trouvé par la modélisation ANN. En analysant cette figure, nous pouvons remarquer que les points d'intersection entre les valeurs expérimentales et estimées sont très proche à la ligne moyenne (à une pente de 45 degré) ce qui prouve l'efficacité du modèle soit pour les valeur destinées à l'apprentissage ou celles destinées pour la validation du modèle.

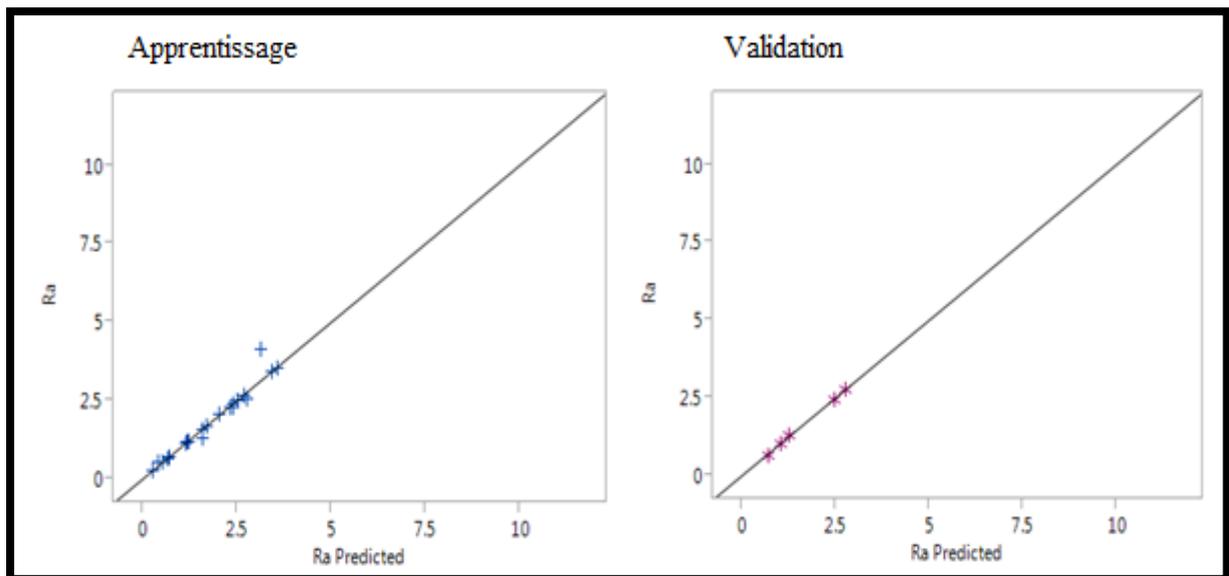


Figure IV.7 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Ra

L'évolution de la rugosité en fonction des différentes conditions de coupe est illustrée dans la figure (IV.8). Cette dernière est tracée à partir du modèle et on peut conclure que la rugosité (Ra) augmente avec l'augmentation des deux paramètres de coupe (f , a_p), et prend des petites valeurs avec l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c).

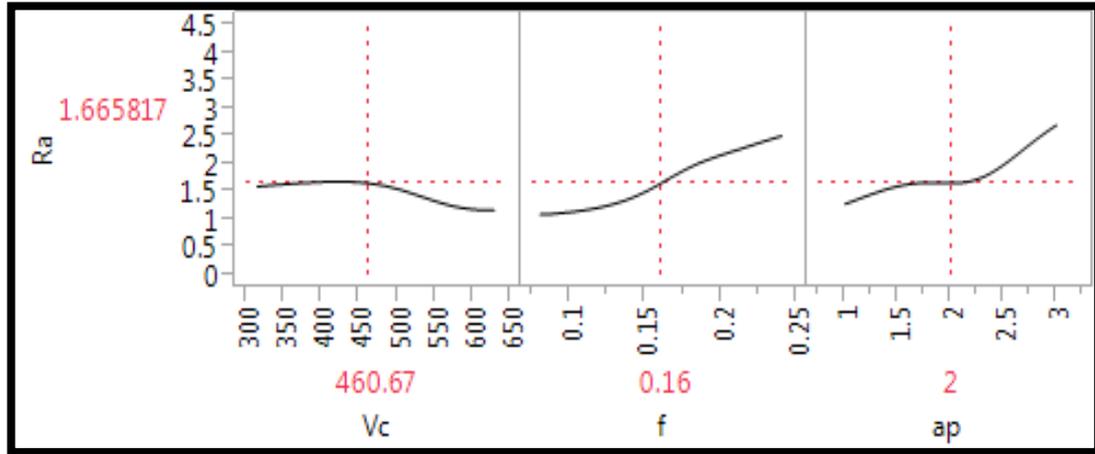


Figure IV.8 Evolution de Ra en fonction des paramètres de coupe

IV.3.1.1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites Ra

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de la rugosité (Ra), est présentée graphiquement sur la figure (IV.9). L'analyse de cette figure nous permet de dire que les valeurs estimées par ANN sont presque complètement confondues avec les résultats expérimentaux, sauf pour quelques essais.

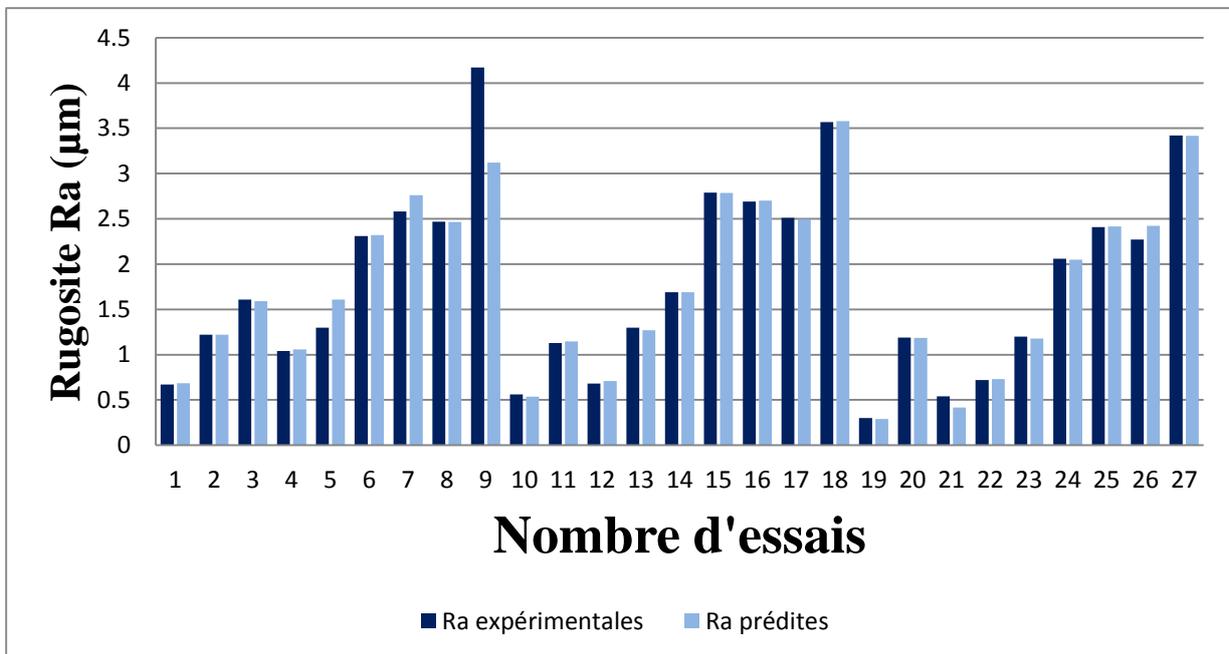


Figure IV.9 Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de Ra

IV.3.2. Modélisation de l'effort de coupe tangentielle F_z par ANN

Les mêmes étapes sont réalisées pour analyser l'évolution de l'effort de coupe tangentielle (F_z) en fonction de (V_c , f et a_p) pendant l'usinage de polymère POM-C par la méthode de réseaux de neurones artificiels.

Les conditions de coupe utilisées et les résultats expérimentaux sont présentés dans le tableau (IV.4). L'architecture choisie pour l'analyse ANN est illustrée dans la figure (IV.10).

Tableau IV.4 Performance des structures ANN du modèle de F_z

Ent – Cach- Sort	Apprentissage		Validation	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE
3-7-01	0.9803	3.6209	1	3.855e-10
3-8-01	0.9896	2.5915	0.9963	1.4236
3-9-01	0.9798	3.6234	0.9997	0.3789
3-10-01	0.9931	2.1117	0.9695	4.1149
3-11-01	0.9998	0.2869	0.9998	0.3627
3-12-01	0.9664	4.6669	0.9946	1.7284
3-13-01	0.9657	4.7218	0.9891	2.4614
3-14-01	0.9681	4.5512	0.9993	0.6016
3-15-01	0.8145	10.9805	0.9935	1.9003
3-16-01	0.5862	16.4016	0.9971	1.2669

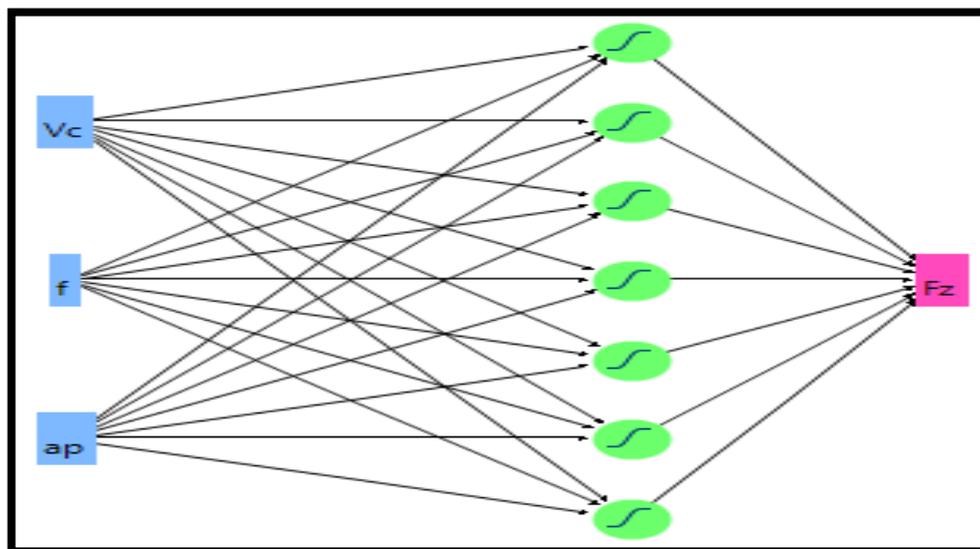


Figure IV.10 Architecture choisie pour l'effort tangentielle F_z

Les valeurs des poids et des biais du modèle neuronal de l'efforts tangeniel (F_z) sont les suivant :

$$\begin{aligned}
 H1 &= \tanh(.5*(0.0006*V_c + -11.7481*f + 1.4929*ap + 1.1213)); \\
 H2 &= \tanh(.5*(-0.0147*V_c + 8.4132*f + -0.3640*ap + 6.5017)); \\
 H3 &= \tanh(.5*(-0.0279*V_c + 42.3032*f + 2.4317*ap + -0.4152)); \\
 H4 &= \tanh(.5*(-0.0086*V_c + 58.9844*f + -2.5376*ap + -0.0306)); \\
 H5 &= \tanh(.5*(0.0017*V_c + -15.0143*f + 0.0078*ap + 5.1553)); \\
 H6 &= \tanh(.5*(0.0005*V_c + 18.5188*f + -0.4125*ap + -2.9456)); \\
 H7 &= \tanh(.5*(0.0004*V_c + 1.1126*f + -0.3214*ap + 0.2648));
 \end{aligned}
 \tag{IV.7}$$

Pour la couche de sortie :

$$\begin{aligned}
 F_z &= 126.5419*H1 + 16.5034*H2 - 6.8416*H3 - 6.4844*H4 - 100.8435*H5 + 59.9123*H6 \\
 &\quad + 41.5666*H7 + 44.7858
 \end{aligned}
 \tag{IV.8}$$

Où, le coefficient de détermination $R^2=99.01\%$.

Les coefficients de corrélation pour le modèle proposé est de (98.03 et 100) % respectivement pour l'apprentissage et la validation.

Tableau IV.5 Valeurs statistiques de l'analyse ANN de F_z

	Apprentissage	Validation
R carré	0.9803	1
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	3.6290	3.855×10^{-10}
Nombre d'essais	22	5

Le tracé qui présente la comparaison entre les valeurs expérimentales et celles estimés est présenté dans la figure (IV.11). En analysant cette dernière on peut remarquer que tous les points sont très proches à la ligne moyenne, ce qui confirme l'efficacité du modèle et la robustesse de l'approche par ANN.

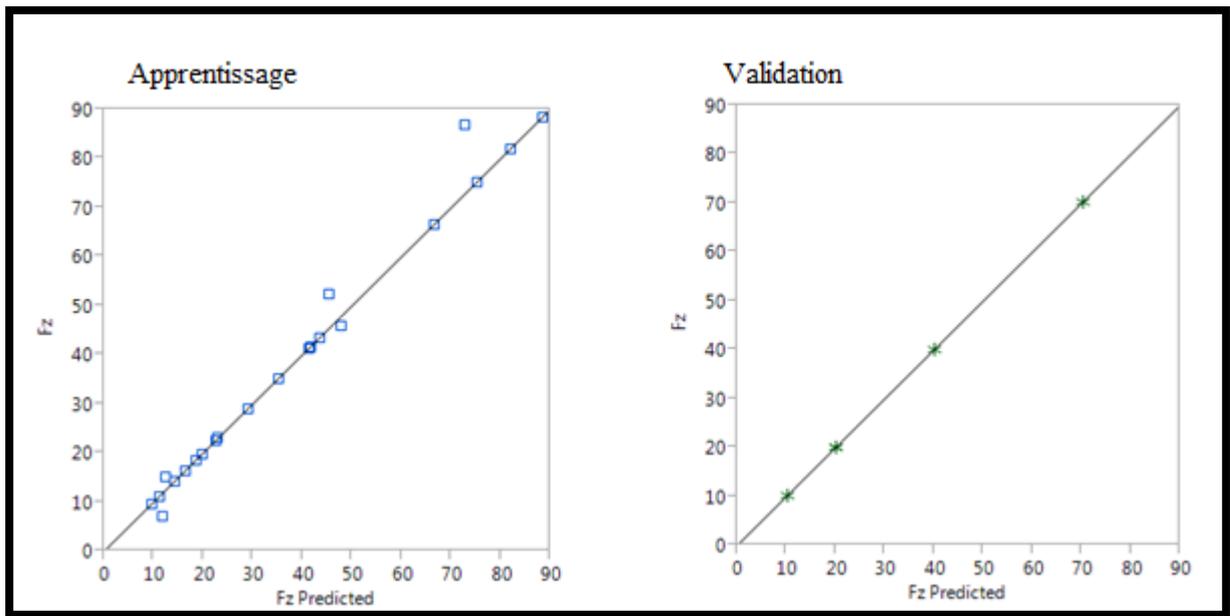


Figure IV.11 Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour la l'effort tangentiel (F_z)

La figure (IV.12) illustre les courbes de l'évolution de l'effort de la coupe tangentielle en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) à partir du modèle proposé (équation IV.6).

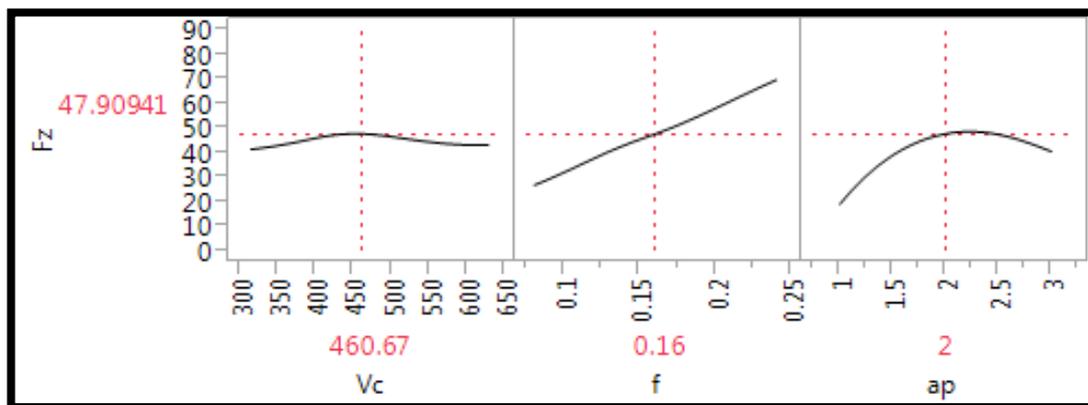


Figure IV.12 Evolution de l'effort tangentiel en fonction des paramètres de coupe

IV.3.2.1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites F_z

La comparaison entre les valeurs expérimentales de l'effort de coupe tangentielle (F_z), et prédite par le modèle mathématique obtenu de la méthode ANN, est présentée dans la figure (IV.13). L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

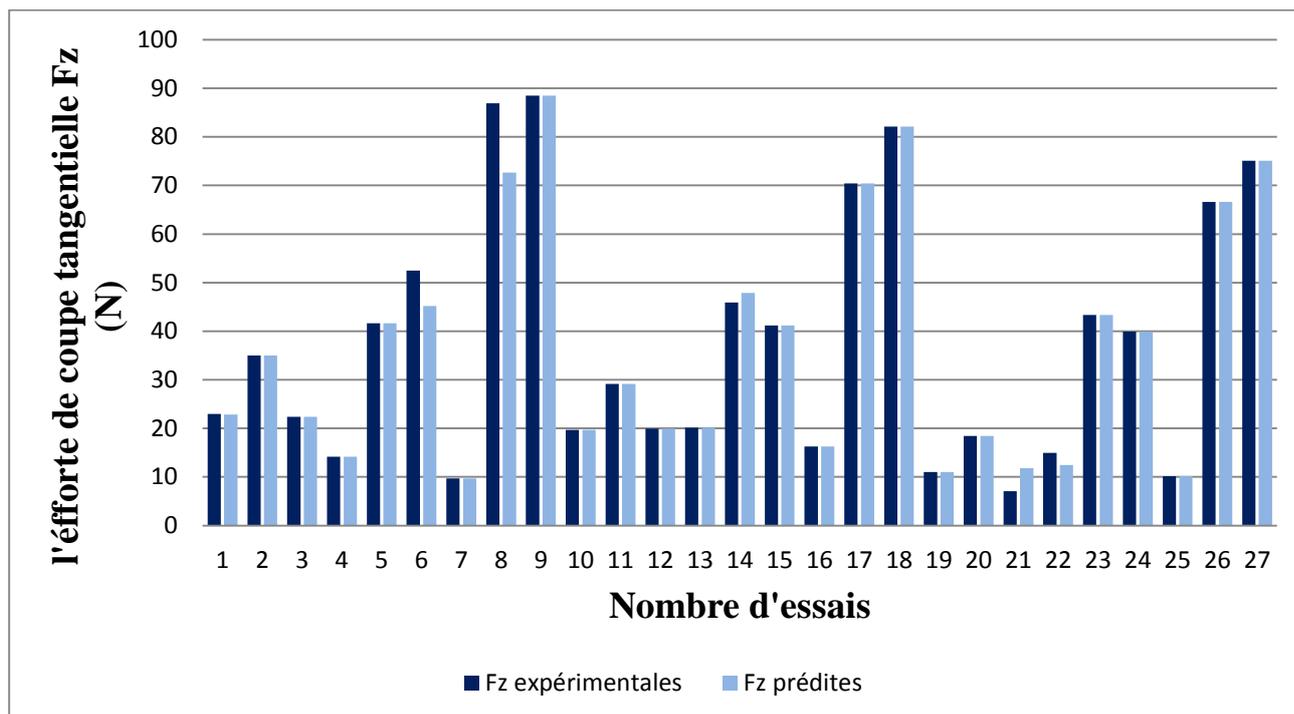


Figure IV.13 Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de l'effort tangentiel F_z

IV.4. Comparaison entre les modèles ANN et RMS

Le tableau VI-6 expose les coefficients de détermination des deux méthodes utilisées pour la modélisation de R_a et F_z qui sont la méthode de la surface de réponse et les réseaux de neurones artificiels.

L'analyse des valeurs de ce tableau montre que les R^2 de la méthode ANN sont plus grands que ceux de la méthode RSM ce qui prouve la robustesse et la fiabilité de la méthode ANN.

Pour mieux visionner ça, on a tracé des courbes de comparaison (figure IV.14 et IV.15) des valeurs expérimentales et estimées par RSM et ANN.

L'analyse de ces figures nous permet de dire que les valeurs estimées par ANN sont presque complètement confondues avec les résultats expérimentaux, contrairement aux valeurs estimées par RSM où il y a des valeurs qui sont éloignées aux valeurs expérimentales.

Tableau IV.6 Coefficients de corrélation pour RSM et ANN

	Coefficient de détermination R^2 %	
	RSM	ANN
Rugosité R_a (μm)	90.25	97.29
Effort tangentiel F_z (N)	95.95	99.01

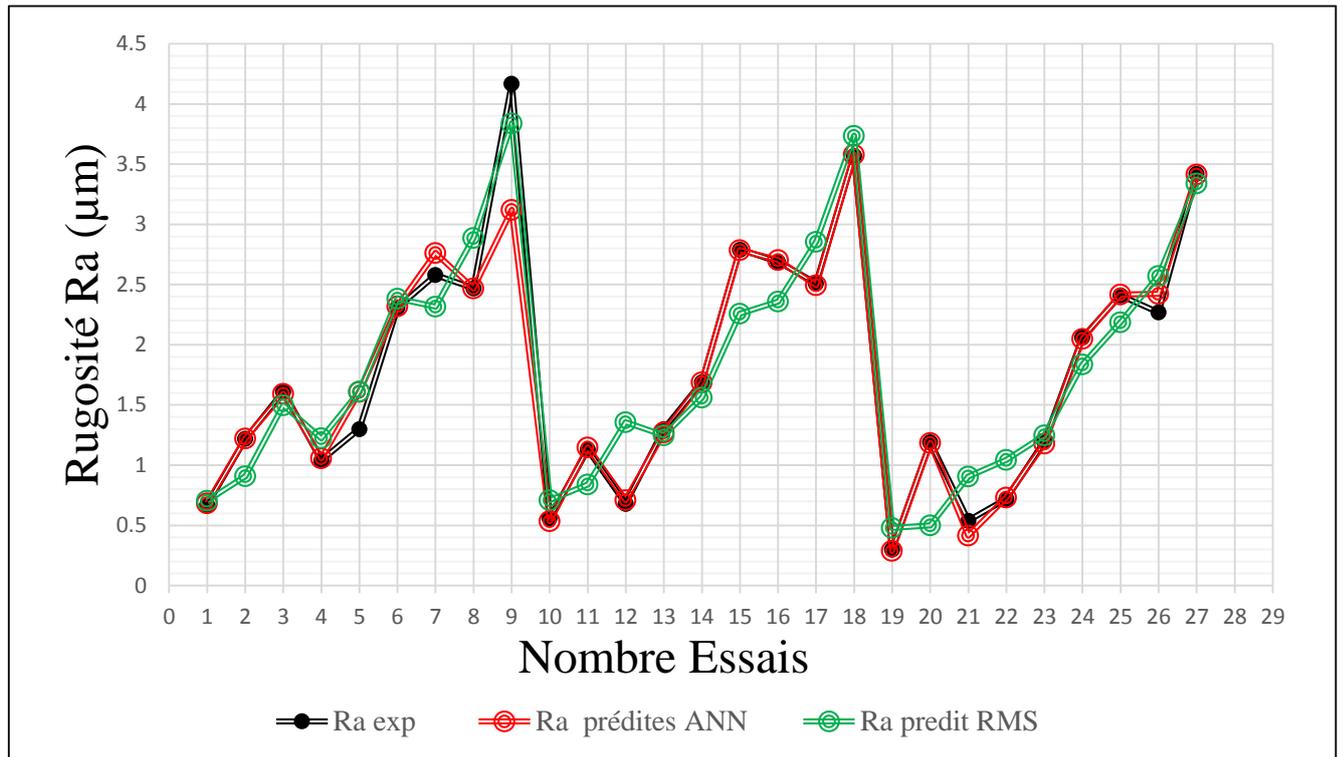


Figure IV.14 Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par RSM et ANN pour Ra

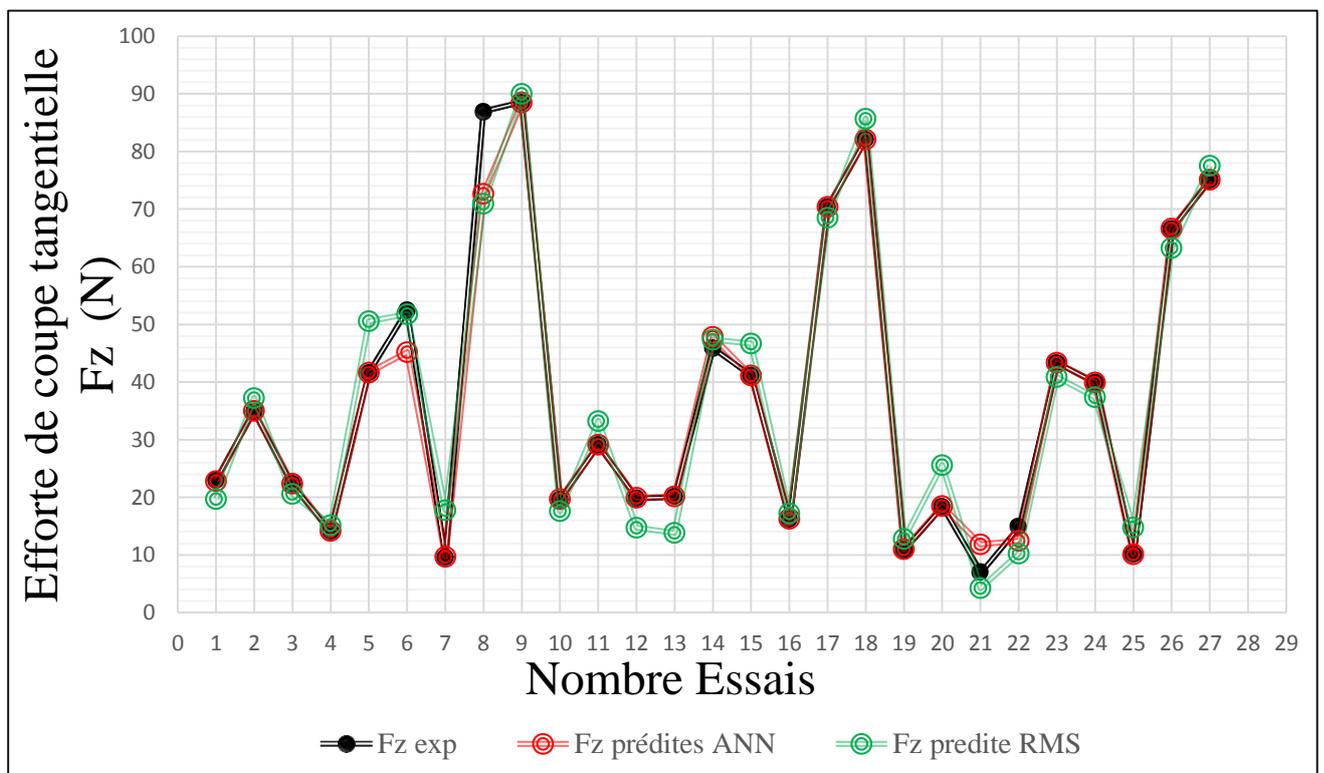


Figure IV.15 Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par RSM et ANN pour Fz

IV.5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a utilisé la méthode de réseaux de neurones artificiels pour modéliser la rugosité de la surface usinée (R_a) et l'effort de coupe tangentiel (F_z) pour un plan complet L_{27} lors de l'usinage du POM-C.

On a conclu que cette méthode donne un coefficient de corrélation très proche à (1). La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par RSM et ANN nous a conduits à conclure que la méthode ANN est plus robuste et plus fiable par rapport à la méthodologie de la surface de réponse.

Conclusion générale

L'étude du comportement des polymères POM-C lors du tournage à sec avec un outil en Carbure KC 726 M (ISO P20-PVD), nous a permis de mettre en évidence l'impact des paramètres de coupe est la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), et profondeur de passe (a_p), sur la rugosité des surfaces usinées (R_a), les efforts de coupe tangentiel (F_z), le puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR), par suite nous avons fait une modélisation de ces paramètres en utilisant l'RMS et l'ANN.

Le traitement des résultats a été fait par l'analyse de variance (ANOVA), la méthodologie de la surface de réponse (RSM) et le réseau de neurones artificiels (ANN), les valeurs optimales des paramètres d'usinage ont été déterminés.

L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- ✓ L'analyse de variance ANOVA a montré que l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p) ont des influences significatives sur la rugosité de surface (R_a) avec des contributions de 67.61% et 15.67%, respectivement.
- ✓ Les analyse des résultats montre que l'avance par tour (f) est le facteur le plus influent sur (F_z) avec une contribution de 33.36%, suivie par la profondeur de passe (a_p) avec une contribution de 26.60%, suivie par l'interaction entre l'avance par tour et la profondeur de passe ($f * a_p$) avec une contribution 22.34%, et le terme (a_p^2) avec une contribution de 10.24%.
- ✓ La puissance de coupe (P_c) augmente avec l'augmentation des différents paramètres de coupe (V_c , a_p et f), d'après les résultats de l'ANOVA on constate que l'avance par tours (f) est le facteur qui a la plus grande influence avec une contribution de 31.32 %, suivi par la profondeur de passe (a_p) avec une valeur de 17.52%, en dernier lieu l'interaction ($f * a_p$) avec une valeur de contribution de 18.96 % et (a_p^2) avec une contribution de 10.78%.
- ✓ Le débit de copeau est influencé en premier lieu par l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p), les valeurs de leurs contributions sont similaires est égale à 36.08 % ; suivi par la vitesse de coupe (V_c) avec une valeur de contribution égale à 16.14 %, tandis que toutes les interactions ont des influences insignifiantes sur le volume de copeau (MRR).
- ✓ Les tracés des graphes en 3-D des différentes combinaisons des paramètres technologiques nous a permis de bien visualiser la sensibilité de nos modèles aux changements des paramètres technologiques.
- ✓ L'optimisation des paramètres de coupe par l'application du logiciel **Design-expert 9** a permis d'obtenir les valeurs du régime optimal ($V_c= 628$ m/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=1.443$ mm) qui minimise le critère de rugosité (R_a), c-à-d, dans le cas d'une exigence technologique.

- ✓ Dans le cas d'une exigence productive, c-à-d, pour maximiser le volume de copeau (MMR), tout en gardant les autres paramètres technologiques (R_a , F_z et P_c) sans intérêt, le régime de coupe optimisé correspond ($V_c = 628$ m/min, $f = 0.24$ mm/tr, $a_p = 3$ mm).
- ✓ Pour l'obtention des valeurs minimales de la rugosité (R_a) et un volume de copeau (MMR) maximal au même temps, c-à-d, pour une exigence techno-economique (Multi-objectifs), le régime de coupe à adopter doit correspondre à ($V_c = 628$ m/min, $f = 0.157$ mm/tr, $a_p = 3$ mm).
- ✓ La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles (RSM) et (ANN) montre clairement que les modèles issus de la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents ($R^2_{(R_a)} = 97.29\%$ et $R^2_{(F_z)} = 99.01\%$) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2_{(R_a)} = 90.25\%$ et $R^2_{(F_z)} = 95.95\%$) et pour cela on peut dire que le modèle (ANN) est jugé plus robuste par rapport au modèle (RSM)

Résumé

L'objectif de ce travail est d'examiner les différents paramètres intervenants lors de l'usinage de polymère POM-C tels que, la rugosité de surface, les efforts de coupe, le débit de copeau et la puissance de coupe. L'usinage est réalisé avec un outil en carbure KC 726 M (ISO P20-PVD) suivant un plan d'expérience complet de 27 essais. La première partie de ce mémoire concerne la modélisation des paramètres technologiques d'usinage (R_a , F_z , P_c , MRR) en utilisant l'analyse de variance (ANOVA) pour savoir la contribution de chaque facteur, aussi l'emploi de la méthodologie de surface de réponse (MSR) nous a permis de tracer les graphiques en 3-D, cette partie est suivie par une optimisation par la fonction desirabilité des conductions de coupe pour tirer le régime optimal. La deuxième partie de ce mémoire est réservée à une modélisation par l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN), cette partie est suivie par une comparaison entre les deux modèles issus des deux méthodes (RSM et ANN) en terme des coefficients de détermination, les résultats ont montré que la modélisation par (ANN) semble plus intéressante et donne des résultats acceptables.

Mots-clés: *tournage, rugosité de surface, effort de coupe, ANOVA, RSM, ANN, Optimisation.*

Références bibliographiques

- [1] : S. BERKANI; Etude du comportement des matériaux de coupe lors du tournage d'un acier inoxydable, département mécanique, université Guelma, 2009, P1 O.
- [2] Tarek BRAHAM BOUCHNAK : étude de comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique, thèse de doctorat, Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, (2010) pp : 11.
- [3] : MATECHPLAST; Usinage des thermoplastiques standards, (<http://www.usinage-plastique.com/thermoplastiques-usuels.html>), le 13/02/2013.
- [4] : C. TROMBERT; Usinabilité des aciers inoxydables, techniques de l'Ingénieur, Ref: M726.
- [5] : P. CUNAT; Aciers inoxydables "Mise en œuvre", Techniques de l'ingénieur, Ref: M4S42.
- [6] : A. DESSARTHE ; Usinage des polymères, technique de l'ingénieur, Ref BM 7 426.
- [7] : livre/printemps des sciences (sciences en vies) du 22 au 28 mars 2010.
- [8] : J. AUBRY; Les matières plastiques, l'horloge de bureau, technologie Semme édition, 2011, PPI-49.
- [9] : J.M. HAUDIN; Matériaux pour l'ingénieur, 2006, PP46-69.
- [10] : GUIDE DE CONCEPTION, Utilisation marine de pièces en thermoplastique, 1997, PP6-7.
- [11] : MANUEL COMPLET GARANT, Ref: II 09S0DE, P78. (<http://fr.scribd.com/doc/2?251260/Manuel-Complet-Garant>), le ISI 11120 12.
- [12] : A. SEYNI, Propriétés physico-chimiques, université de Toulouse, 2008, PP 13-26.
- [13] : J.F. AGASSANT, J.M. Haudin; Mise en forme des polymères thermoplastiques, 1991, P93.

Références bibliographiques

- [14] : Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Silva, L. R., Abrao, A. M., & Davim, J. P. (2009). Machinability study in microturning of PA66 GF30 polyamide with a PCD tool. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(12), 1290-1296.
- [15]: Haghi, M., Farshbaf Zinati, R., & Razfar, M. R. (2013). Experimental and modeling study of the turning process of PA 6/nano calcium carbonate composite. *Journal of Composites*, 2013.
- [16]: Madić, M., Marinković, V., & Radovanović, M. (2012). Mathematical modeling and optimization of surface roughness in turning of polyamide based on artificial neural network. *Mechanics*, 18(5), 574-581.
- [17]: Aykut, Ş. (2011). Surface roughness prediction in machining castamide material using ANN. *Acta Polytechnica Hungarica*, 8(2), 21-32.
- [18]: Asiltürk, I., & ÇUnkaş, M. (2011). Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5826-5832.
- [19] : Valeurs indicatives-Informations et conseils d'usinage page 163. (<http://www.rnichaud-chaily.fr>)
- [20] Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G.L. Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coated carbide tool. *Measurement*, 45, pp.1872–1884 (2012).
- [21] Süleyman N, Süleyman Y, Erol T. Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology, *Measurement*, 44, pp. 580–587 (2011).
- [22] S.BERKANI Comportement des carbures métalliques lors de l'usinage des aciers inoxydables : Application aux austénitiques et martensitiques, thèse de doctorant a Université 08 Mai 1945 – Guelma 2015
- [23] G. Dreyfus (1998). Les réseaux de neurones. *Mécanique industrielle et matériaux*, n°51.
- [24] A. Dipanda. Cours réseaux de neurones.
- [25] W. Gerstner, B. L. Beaulieu, S. Souksavanh et J. L. Beuchat (2006). Réseaux de neurone artificiels, une introduction à l'apprentissage automatique. *Laboratory of computational neuroscience*.