

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER

Présenté par : LAIB Brahim

Master 2

Maintenance Industrielle

**Prédiction de la rugosité de surface et des efforts de coupe lors de
tournage en utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR)
et les réseaux de neurones artificiels (ANN)**

Sous la direction de : Dr BOUCHRIT S + Pr. YALLESE .M.A

2016/2015

REMERCIEMENTS



Je remercie en premier Dieu le tout-puissant.

Merci à l'université de 08 Mai 1945 Guelma de m'avoir accueilli durant mes études universitaires, en particulier ma formation MASTER.

Je remercie le laboratoire LMS de l'université de Guelma, d'avoir mis à ma disposition les moyens qui ont permis la réalisation de ce travail.

Je remercie mon encadreur le Professeur **YALLESE Mohamed Athman** et docteur **BOUCHIRIT Sebti** pour m'avoir encadré et fait confiance durant la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier, particulièrement, **ALLAL Mohamed** pour son aide et assistance.

Enfin, je remercie tout le personnel technique et administratif du département de Génie Mécanique de l'université de Guelma. Je remercie tous ceux qui ont de loin ou de près ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'examiner les différents paramètres intervenants lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable (X2CrNi18-9) tels que, les efforts de coupe, la rugosité de surface, puissance de coupe et débit de copeau. L'usinage est réalisé avec un outil en carbure métallique (GC 2015) PVD suivant un plan d'expérience de 27 essais.

La première partie du travail concerne la modélisation des paramètres technologiques d'usinage (R_a , F_z , P_c , MRR) en utilisant l'analyse de variance (ANOVA) aussi que la méthodologie de surface de raiponce (RSM). Cette partie est suivie par une optimisation des conductions de coupe. La deuxième partie de ce travail est focalisée sur la modélisation en utilisant l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN). Cette partie est suivie par une comparaison entre les deux méthodes de modélisation (RSM et ANN).

Mots clés : l'acier inoxydable (X2CrNi18-9), tournage, optimisation, modélisation, plan d'expérience, carbure métallique, ANOVA, RSM, ANN, conditions de coupe.

Sommair

SOMMAIR

	Introduction générale	01
	<i>Chapitre I</i>	
I.1	Introduction	03
I.2	Généralité sur la coupe des métaux	04
I.2.1	Introduction	04
I.2.2	Définition de l'usinabilité	04
I.2.3	Critères d'usinabilité	05
I.2.4	Principe de la coupe des métaux	05
I.2.5	Les mécanismes de formation du copeau	06
I.2.6	Les paramètres de coupe	07
I.3	Usinage des Aciers inoxydables	08
I.3.1	Définition	08
I.3.2	Types d'aciers inoxydables	09
I.3.3	Rôle des éléments d'addition	09
I.3.4	Influence des propriétés physiques	10
I.3.5	Nuances des aciers inoxydables	12
I.3.6	Choix des outils	13
I.3.7	différent type les aciers inoxydables	13
I.3.8	Le copeau avec arête rapportée	14
I.4	Matériaux pour outils de coupe	14
I.4.1	Introduction	14
I.4.2	Classification des matériaux des outils de coupe	15
I.5	Rugosité des surfaces	19
I.5.1	Généralités sur les états de surface	19
I.5.2	Définition de Rugosité	19
I.5.3	Paramètres caractéristiques des états de surface	20
I.5.4	Technologie de mesure	21
I.5.5	Caractéristiques de la surface	21
I.5.6	Défauts de rugosité	21
I.6	Les efforts de la coupe	22
I.6.1	Définition et intérêt de leur mesure	22
I.6.2	Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe	23
I.7	Usure des outils de coupe	25

Sommair

I.7.1	Définition	25
I.7.2	Usure visible sur l'outil	26
I.8	Travaux de recherches concernant l'usinage des aciers inoxydables	28
I.9	Position du problème	32

Chapitre II

II.1	Introduction	33
II.2	Matériels utilisés	33
II.2.1	Machine-outil	33
II.2.2	Matériau utilisé	34
II.2.3	Plaquette de coupe	35
II.2.4	Porte-plaquette	37
II.2.5	Appareillages de mesure utilisés	38
II.2.5.1	Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	38
II.2.5.2	Mesure des efforts	38
II.2.5.3	Autres équipements utilisés	41
II.3	Planification des expériences	41
II.4	Conditions de coupe	45
II.5	conclusion	45

Chapitre III

III.1	Introduction	46
III.2	Modélisation de la méthodologie des surfaces de réponse (MSR)	46
III.3	Teste de validité des modèles	48
III.4	Résultats des expériences	49
III.5	Analyse de la variance ANOVA	50
III.5.1	ANOVA de la rugosité (Ra)	50
III.5.1.1	Modèle mathématique et le coefficient de détermination	50
III.5.1.2	Test de concordance entre les valeurs expérimentale et prédits	50
III.5.1.3	Diagrammes de surface 3D de (Ra) et graphiques des contour	51
III.5.2	ANOVA l'effort de coupe tangentiel (Fc)	53
III.5.2.1	Modèle mathématique et le coefficient de détermination	53
III.5.2.2	Test de concordance entre les valeurs expérimentales et prédites	53
III.5.2.3	Diagrammes de surface 3D de (Fc) et graphiques des contour	54
III.5.3	ANOVA pour la puissances de coupe (Pc)	56
III.5.3.1	Modèle mathématique et le coefficient de détermination	56
III.5.3.2	Test de concordance entre les valeurs expérimentales et prédites	56
III.5.3.3	Diagrammes de surface 3D et graphiques des contour	57
III.5.4	ANOVA du débit de coupeau (MRR)	59

Sommair

III.5.4.1	Modèle mathématique et le coefficient de détermination	59
III.5.4.2	Test de concordance entre les valeurs expérimentales et prédites	60
III.5.4.3	Diagrammes de surface 3D et graphiques des contour	60
III.6	Optimisation des conditions de coupe	62
III.6.1	Rugosité de surface (R_a , minimisée)	62
III.6.1.1	La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	64
III.6.2	débit de copeau (MRR, maximisé)	64
III.6.2.1	La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	66
III.6.3	Rugosité de surface (R_a , minimisé), et débit de copeau (MRR, maximisé)	66
III.6.3.1	La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	68
III.7	Conclusion	68
<i>Chapitre IV</i>		
IV.1	Introduction	69
IV.2	Les composants d'un ANN	69
IV.3	L'apprentissage	71
IV.4	Le perceptron	72
IV.5	La rétropropagation	73
IV.6	Le taux d'apprentissage adaptatif	73
IV.7	Modélisation de la rugosité de surface (R_a) et de l'effort de coupe (F_c) basée sur les réseaux de neurones	74
IV.7.1	Modélisation de la rugosité de surface (R_a)	74
IV.7.1.1	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	76
IV.7.2	Modélisation de l'effort de coupe (F_c)	77
IV.7.2.1	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	79
IV.8	Comparaison entre les modèles ANN et RMS	80
IV.9	Conclusion	81
	Conclusion générale	83

1918

January

1	Jan 1	1918
2	Jan 2	1918
3	Jan 3	1918
4	Jan 4	1918
5	Jan 5	1918
6	Jan 6	1918
7	Jan 7	1918
8	Jan 8	1918
9	Jan 9	1918
10	Jan 10	1918
11	Jan 11	1918
12	Jan 12	1918
13	Jan 13	1918
14	Jan 14	1918
15	Jan 15	1918
16	Jan 16	1918
17	Jan 17	1918
18	Jan 18	1918
19	Jan 19	1918
20	Jan 20	1918
21	Jan 21	1918
22	Jan 22	1918
23	Jan 23	1918
24	Jan 24	1918
25	Jan 25	1918
26	Jan 26	1918
27	Jan 27	1918
28	Jan 28	1918
29	Jan 29	1918
30	Jan 30	1918
31	Jan 31	1918

February

1	Feb 1	1918
2	Feb 2	1918
3	Feb 3	1918
4	Feb 4	1918
5	Feb 5	1918
6	Feb 6	1918
7	Feb 7	1918
8	Feb 8	1918
9	Feb 9	1918
10	Feb 10	1918
11	Feb 11	1918
12	Feb 12	1918
13	Feb 13	1918
14	Feb 14	1918
15	Feb 15	1918
16	Feb 16	1918
17	Feb 17	1918
18	Feb 18	1918
19	Feb 19	1918
20	Feb 20	1918
21	Feb 21	1918
22	Feb 22	1918
23	Feb 23	1918
24	Feb 24	1918
25	Feb 25	1918
26	Feb 26	1918
27	Feb 27	1918
28	Feb 28	1918

Introduction générale

Introduction générale

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les différents domaines à cause de leur résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle très important dans l'industrie aéronautique les pièces médicales et dans l'agroalimentaire. Parmi les types de ces aciers il y a les martensitiques, les ferritiques et les austénitiques. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques distinguées telles que la haute ductilité, le taux d'écrouissage élevé et le coefficient de frottement élevé.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 et Le devise en deux parties. La première concerne la modélisation des paramètre technologique d'usinage (la rugosité, l'effort de coupe, puissance de coupe, et le débit de copeau produit) en utilisant la méthodologie de surface de réponse. Cette partie et suivie par une optimisation des condition de coupe. La deuxième partie une autre méthode de modélisation en utilisant l'approche ANN.

Le présent mémoire de Master 2 est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux. Dans ce chapitre, nous présentons les points suivants : matériaux de coupe, usure, rugosité, effort de coupe et aussi les travaux de recherche sur l'usinage des aciers inoxydables.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les équipements utilisés et les conditions expérimentales pour mener cette recherche. Les dispositifs de mesure aussi que les couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une étude statistique basé sur l'analyse de la variance (ANOVA) des résultats trouvés afin de déterminer les modèles mathématiques des différents paramètre étudiés. Ces modèles ont permis d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les paramètres étudiés (rugosité, effort de coupe, débit de copeau, puissance de coupe). Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RMS), nous avons utilisé un logiciels de statistique appelé «**Design Expert 8**».

Introduction générale

Dans le quatrième chapitre, nous utilisons l'approche ANN (réseaux de neurones artificiels) pour modéliser la rugosité de la surface et l'effort de coupe tangentiel en fonction de différents paramètres de régime de coupe. Dans un premier temps, nous appliquons l'ANN pour modéliser la rugosité de la surface usinée lors de l'usinage de l'acier X2CrNi18-9 pour le même plan de 27 essais. Dans un deuxième temps nous avons fait une comparaison entre les modèles trouvés par RSM et ANN pour vérifier l'efficacité et la robustesse chaque méthode des ANN, nous avons fait une comparaison entre cette dernière et la méthode de la surface de réponse.

En dernier lieu, nous avons élaboré une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

Chapitre I

*Étude bibliographique Usinage des
aciers inoxydables*

I.1.Introduction

L'interaction de l'outil de coupe avec la pièce, dans le but de l'enlèvement de la matière est appelée « usinage ». L'usinage est effectué par la machine, l'outil de coupe et le système de fixation. Un usinage plus rapide et plus efficace est très souhaitable et peut mener à l'épargne du temps et de l'argent. L'efficacité du procédé de l'enlèvement de la matière dépend de nombreux facteurs parmi eux est l'outil de coupe, vitesses de coupe, la géométrie de l'outil, le matériau à usiner et le fluide de coupe qui est employé dans le processus.

Pour atteindre une productivité exceptionnelle et des coûts de production réduits, les fabricants ont proposé une large gamme des outils revêtus recommandée pour l'usinage des aciers inoxydables, ces outils de coupe sont plus répandus par rapport aux autres non revêtus à cause de leur longue durée de vie et leurs performances considérables. Dans les opérations du tournage continu, la température de la plaquette rapportée atteint 700°C et plus. On a formé une idée que ces problèmes pourraient être allégés dans une certaine mesure en diminuant la génération de la chaleur, ce qui peut-être obtenu en abaissant le frottement et en maintenant la résistante à l'usure stable.

Ce chapitre est subdivisé en deux sections principales. La première concerne des définitions de quelques phénomènes intervenants dans le processus de coupe et aussi présente les différentes familles des aciers inoxydables. La seconde est réservée aux différents travaux de recherche sur l'usinage des aciers inoxydables.

I.2.Généralité sur la coupe des métaux

I.2.1.Introduction

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 sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage....) 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.2.2.Définition de l'usinabilité

L'usinabilité peut être définie comme l'aptitude d'un matériau à subir une mise en forme par enlèvement de matière. Les techniques d'usinage sont nombreuses, la plupart pouvant être appliquées aux aciers inoxydables. Nous les diviserons 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)

Nous limiterons la suite de l'exposé à ces méthodes d'usinage, qui resteront pour longtemps encore le moyen privilégié d'usinage des aciers inoxydables. L'enlèvement de 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.).

I.2.3. Critères d'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'objectif 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 des aciers inoxydables sont

- ✓ 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 tenue des cotes
- ✓ la productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités [2].

I.2.4. Principe de la coupe des métaux

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante (**fig.I.1**).

- Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine outil.



Figure.I.1. Configuration de la coupe [A01].

Un examen plus approfondi du mécanisme de la coupe nous conduit à observer qu'il procède grâce à trois mouvements principaux perpendiculaires entre eux (**fig.I.2**).

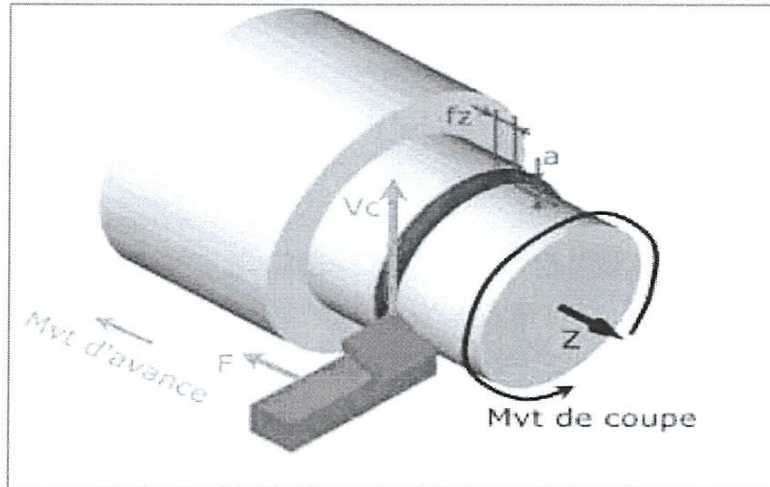


Figure.I.2.Les mouvements de coupe[A02].

- ❖ **Mouvement de coupe « MC »** : C'est un mouvement qui participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de travail.
- ❖ **Mouvement d'avance « Ma »** : C'est le mouvement qui a pour but de décaler latéralement une quantité a ; dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.
- ❖ **Mouvement de pénétration « Mp »** : C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe[3].

I.2.5. Les mécanismes de formation du copeau

La formation du copeau pendant l'usinage se fait par cisaillement de la matière dans une petite zone très proche de l'arête de coupe. En modélisation, cette zone est souvent ramenée à un plan, appelé plan de cisaillement faisant un angle ϕ avec la direction de coupe. Trois zones principales de sollicitations sévères peuvent être distinguées lors de l'usinage, (figure I.3) la zone de cisaillement primaire (**Z1**), la zone de cisaillement secondaire (**Z2**) et la zone de cisaillement tertiaire (**Z3**)[4].

- ✓ a_p : profondeur de passe
- ✓ t_u : épaisseur du copeau non déformé (avance)
- ✓ t_c : épaisseur du copeau
- ✓ V_c : vitesse de coupe
- ✓ D_{av} : direction d'avance
- ✓ r_e : rayon de l'arête
- ✓ Z1 : zone de cisaillement primaire
- ✓ Z2 : zone de cisaillement secondaire
- ✓ Z3 : zone morte
- ✓ V_c : vitesse de coupe

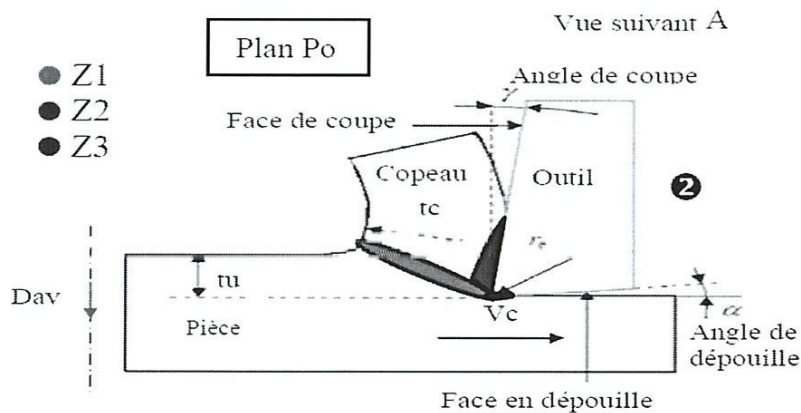


Figure.I.3. Formation du copeau en coupe orthogonale[A03].

I.2.6. Les paramètres de coupe

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, notamment :

- Le type de machine (tournage, fraisage, perçage)
- La puissance de la machine
- La matière usinée (acier, aluminium)
- La matière de l'outil (ARS, carbure)
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage)

L'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions pour cela, il faut déterminer certains paramètres spécifiques(fig.I.4).

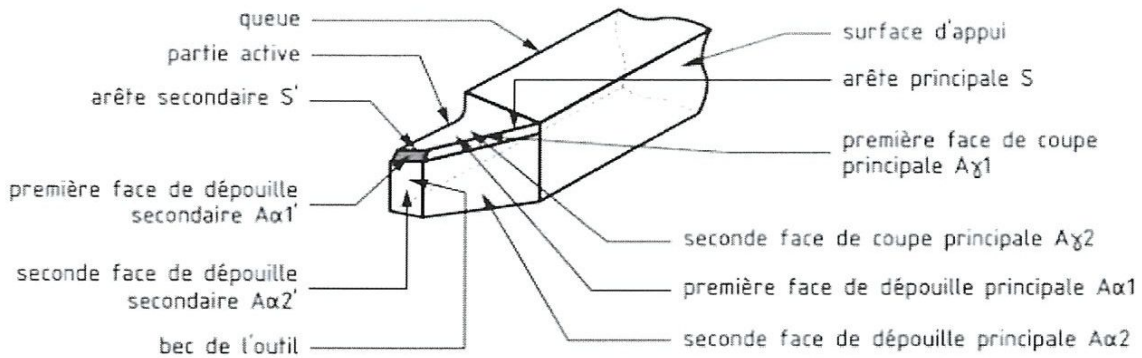


Figure.I.4. Paramètres de coupe en tournage [A04].

- La vitesse de coupe : V_c
- La vitesse d'avance : V_f
- ✓ a_p : profondeur de coupe
- ✓ f : avance
- ✓ h : épaisseur de coupe
- ✓ b : largeur de coupe

I.3. Usinage des Aciers inoxydables

Parmi les nombreuses techniques de mise en œuvre des aciers inoxydables l'usinage concerne principalement les produits longs (barres).

Les autres opérations d'usinage (perçage, fraisage, taraudage) sur les produits plats ne peuvent être négligées. Dans ce cas, elles précèdent souvent un assemblage à l'aide de moyens mécaniques: vis, boulons, rivets.

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] [6].

I.3.1. Définition

Un acier inoxydable est un acier fortement allié dont la teneur en chrome doit être supérieure à 10% ce qui lui assure une résistance aux agents oxydants (résistance à la corrosion) [5].

I.3.2. Types d'aciers inoxydables

Les aciers inoxydables peuvent être classés en trois grandes familles:

- *Les austénitiques* sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre ou du laiton, et aussi de leurs bonnes caractéristiques mécaniques élevées. Les teneurs en éléments d'addition tournent autour de 0.02 à 0.06% de carbone.
- *Les ferritiques* ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 30%), particulièrement intéressants en présence de soufre.
- *Les martensitiques* sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13% de chrome avec au moins 0.08% de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel [5].

I.3.3. Rôle des éléments d'addition

- C'est au **chrome** et à lui seul que l'on doit la résistance des aciers inoxydables aux agents oxydants [A06].
- Le **nickel** favorise la formation des structures homogènes de type austénitique, intéressantes pour éviter la corrosion mais à éviter soigneusement dans le domaine du frottement gamma gène.
- Le **molybdène** et le **cuivre** améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation.
- Le **tungstène** améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.
- Le **titane** doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure.

I.3.4. Influence des propriétés physiques

Les propriétés physiques qui jouent un rôle important lors de l'usinage des aciers inoxydables sont la conductivité thermique, les coefficients de frottement et de dilatation.

a) Effet de la conductivité thermique

Nous pouvons retenir que les sources de chaleur lors de la formation du copeau sont localisées dans les zones de cisaillement primaire et cisaillement secondaire (**Fig.I.5**), Une conductivité thermique élevée évite un échauffement trop important dans la zone de coupe grâce à une bonne évacuation de la chaleur produite à l'interface outil-copeau dans toute l'épaisseur du copeau.

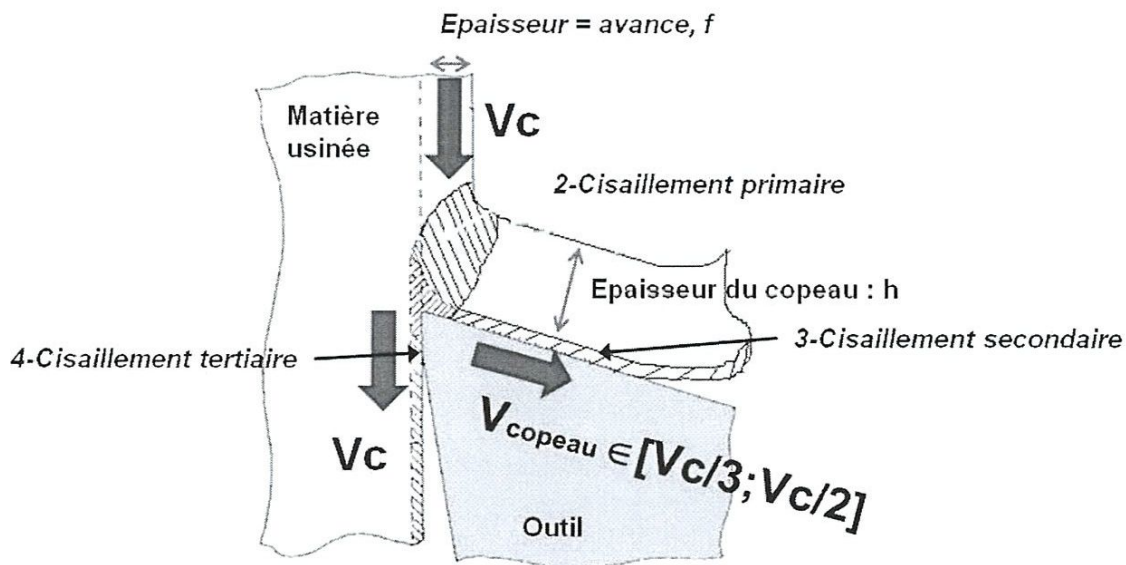


Figure.I.5. Les Zones de sollicitations en coupe orthogonale[7]

Il s'avère que les aciers inoxydables présentent des conductivités thermiques beaucoup plus faibles que les aciers peu alliés (1.5 à 3 fois plus faibles). Les austénitiques sont de loin les plus défavorisés (**fig.I.6**), même si une augmentation de la température diminue leur handicap. Les martensitiques sont les moins pénalisés, mais leur conductivité reste tout de même environ 1.5 fois plus faibles que les aciers peu alliés. Cette mauvaise conductivité a alors pour conséquences:

- Des températures à l'interface outil-copeau élevées et des efforts de coupe importants.
- Une tendance à des conditions de déformation de type adiabatique aux vitesses de coupe élevées, d'où une instabilité plastique.
- Une usure des outils par fatigue thermique et par diffusion plus importante.

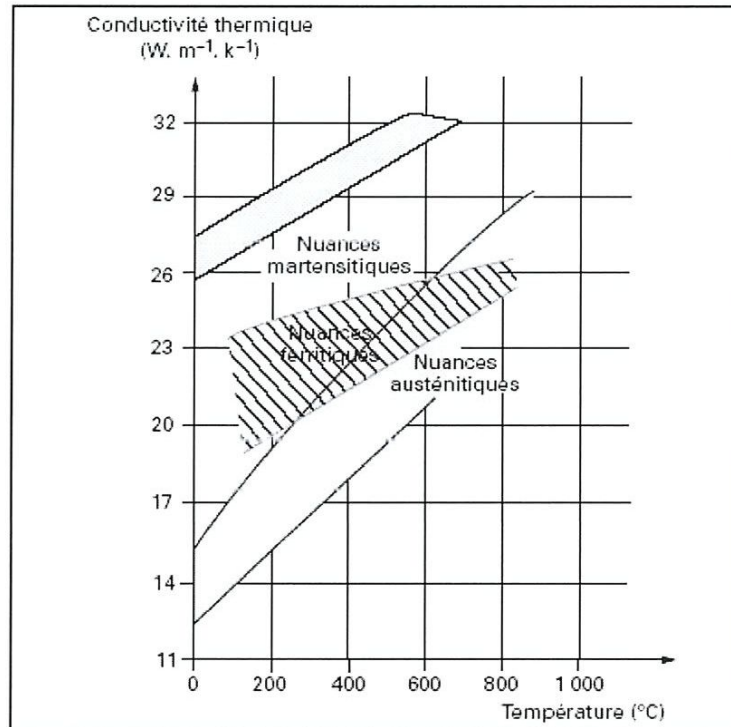


Figure.I.6. Conductivité thermique des aciers inoxydables [5]

b) Rôle du coefficient de dilatation

Les coefficients de dilatation élevés ont une influence directe sur la tenue des cotes et sur les déformations des pièces usinées. Ceci est tout particulièrement vrai pour les austénitiques pour lesquels le cumul de températures de coupe élevées et de forts coefficients de dilatation peut poser des problèmes lorsqu'une grande précision d'usinage est exigée.

c) Influence du coefficient de frottement

Les aciers inoxydables austénitiques ont des coefficients de frottement élevés, ce qui a pour conséquence une usure rapide des outils ainsi que des risques de collage qui vont conduire à des dégradations d'outil de type adhésion.

En conséquence, les aciers inoxydables, et tout particulièrement les austénitiques, ont des propriétés physiques qui les pénalisent lors de l'usinage. Ceci rend l'usinage des aciers inoxydables très particulier et conduit à des solutions bien spécifiques, que ce soit dans l'amélioration des matériaux ou dans le choix des outils [5].

I.3.5. Nuances des aciers inoxydables

Du point de vue de l'usinage les aciers inoxydables peuvent être classés en deux catégories [6]:

- **Les aciers ferritiques** et surtout martensitiques s'usinent pratiquement de la même manière que les aciers de construction classiques de même dureté, il est cependant conseillé de réduire légèrement les vitesses de coupe.
- **Les aciers austénitiques** se distinguent des aciers de construction ordinaire par leur faible limite d'élasticité, leur allongement important avant rupture et leur forte aptitude à l'érouissage, ce qui oblige à modifier les conditions d'usinage dans des proportions parfois très importantes. D'une manière générale il faut utiliser des machines fixer très énergiquement les pièces que l'on veut travailler. On privilégiera les fortes profondeurs de passe à des vitesses relativement faibles. Pour améliorer l'usinage des aciers inoxydables, les sidérurgistes ont développé deux méthodes. La première consiste à resulfurer des nuances ($0.15 \leq S \leq 0.35$) %. La deuxième prévoit l'inclusion des oxydes durs tels que: Al_2O_3 , SiO_2 ...ou des oxydes malléables à haute température tels que: $SiO_2-CaO-Al_2O_3$. La synergie de leurs effets permet des gains de productivité de 45% [6].

I.3.6. Choix des outils

Le choix des outils pour l'usinage des aciers inoxydables est primordial. La productivité est directement liée à celui-ci. Les principales familles d'outils sont [6]:

- les outils en acier rapide.
- les outils en carbure brasé.
- les plaquettes en carbure revêtu ou non revêtu.
- les cermets.
- les céramiques.

I.3.7. différents types des aciers inoxydables

Tableau.I.1. différents types des aciers inoxydables

			<u>Taux de carbone</u>	<u>Taux de Chrome</u>	<u>Dureté HRC</u>
X40Cr13	ou	AISI 420	0,40 %	13%	54
X45CrMoV15			0,45 %	15%	57-59
X55CrMo14	ou	440A	0,55 %	14%	56
X90CrMoV18	ou	440B	0,90 %	18%	56-57
X105CrMo17	ou	440C	1,05 %	17%	58-59
8Cr13MoV			0,80 %	13%	58-60
		AN58	0,45 %	13,5%	58-59
		AUS6	0,60 %	14%	54-56
		AUS8	0,75 %	14%	56-57
		12C27	0,60 %	13,50%	57
		ATS34	1,05 %	14%	58-60
		VG-1	1,00 %	14%	58-60
		VG-10	1,00 %	15%	60-62
		VG-14	1,00 %	15%	60-62
		154CM	1,10 %	14%	60
		3G	1,40 %	15%	62

I.3.8. Le copeau avec arête rapportée

L'un des phénomènes les plus particuliers lors de la formation du copeau est la création d'arêtes rapportées (fig.I.7)

Un fragment de matériau de la pièce à usiner se fixe dans la zone de l'arête de coupe où les vitesses de glissement sont nulles et forme à l'extrémité de celle-ci un petit tranchant, dont la géométrie évolue continuellement, qui supplée la fonction préliminaire de l'arête de coupe. Ce phénomène d'arête rapportée modifie considérablement la géométrie de l'outil, de sorte que tout le processus est influencé par des formes d'élaboration sans cesse différentes[8].

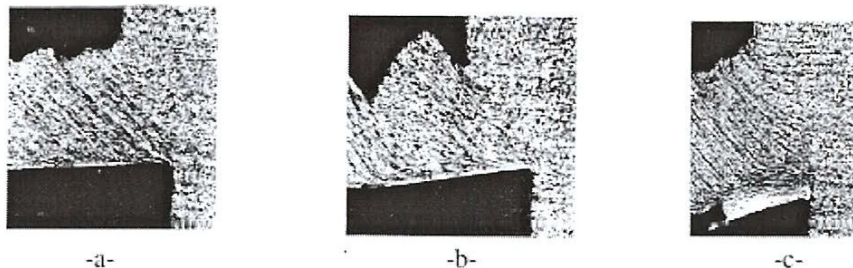


Figure.I.7. Essai de quick-stop[8].

a- copeau continu ($V_c = 150$ m/min)

b- copeau discontinu ($V_c = 65$ m/min)

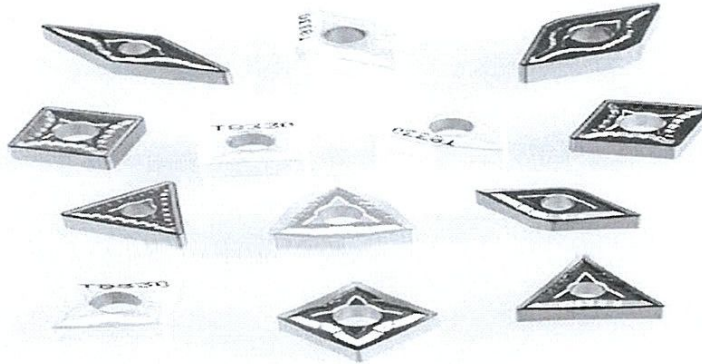
c- formation d'une arête rapportée ($V_c = 10$ m/min)

I.4. Matériaux pour outils de coupe

I.4.1. Introduction

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu.

Dans le courant du XXe siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) (Fig.I.8) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces [9].



Figuro.I.8.Matériaux de coupe[Λ05].

I.4.2.Classification des matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure (fig.I.9). Ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de propriétés spécifiques. De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes :

- Dureté : résistance à l'usure en dépouille et à la déformation
- Ténacité : résistance à la rupture
- Neutralité chimique : absence de réaction chimique avec la matière à usiner
- Stabilité chimique : résistance à l'oxydation et à la diffusion
- Résistance aux variations thermiques brusques [10].

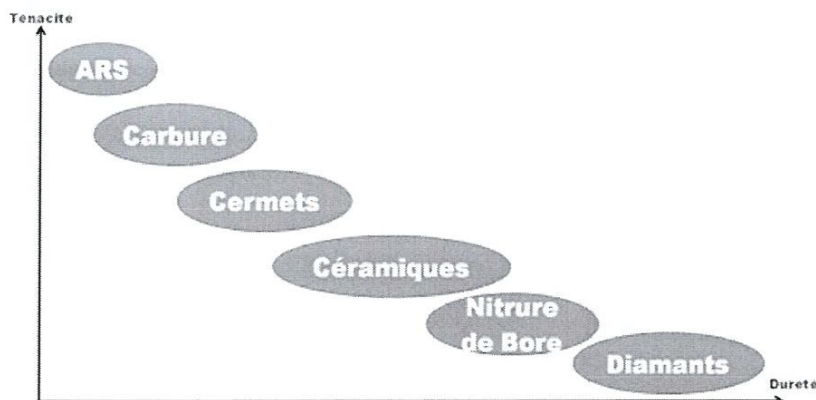


Figure.I.9. Classification Matériaux de coupe [A06].

✓ **ARS**

Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forets, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible.

Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arête de coupe.

Fabrication : par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres

Composition : 0,7 % de Carbone minimum 4 % de Chrome environ.

Tungstène, Molybdène, Vanadium.

Cobalt pour les plus durs.

Dureté : de 63 à 66 Hrc.

✓ **Carbures**

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

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

Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement.

Composition : Noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°).

Ou en carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou molybdène (3500°).

Liant : cobalt : le plus courant ou nickel.

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

✓ Cermets

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitride de Titane ou de nitrure de Titane.

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

✓ Céramiques

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium (fig.I.10).

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil).

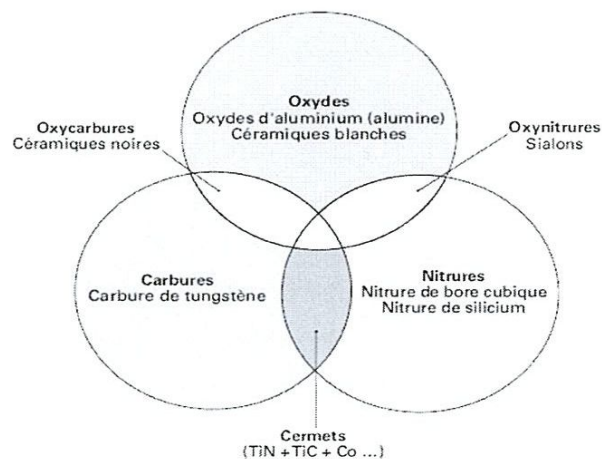


Figure.I.10. Céramiques[8].

✓ Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température(**fig.I.11**). Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures...

Son utilisation requiert

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



Figure.I.11.Plaquette Céramiques[A07].

✓ Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules.

Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassement). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650 ° se transforme en un vulgaire morceau de graphit On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux.

Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à base température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissable [11].

I.5. Rugosité des surfaces

I.5.1. Généralités sur les états de surface

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

I.5.2. Définitions Rugosité

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'**indice de rugosité** est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [12].

➤ **Surface géométrique**

Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

➤ **Surface spécifiée**

Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

➤ **Surface mesurée**

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

➤ Surface réelle

Surface obtenue au cours de la fabrication (fig.I.12).

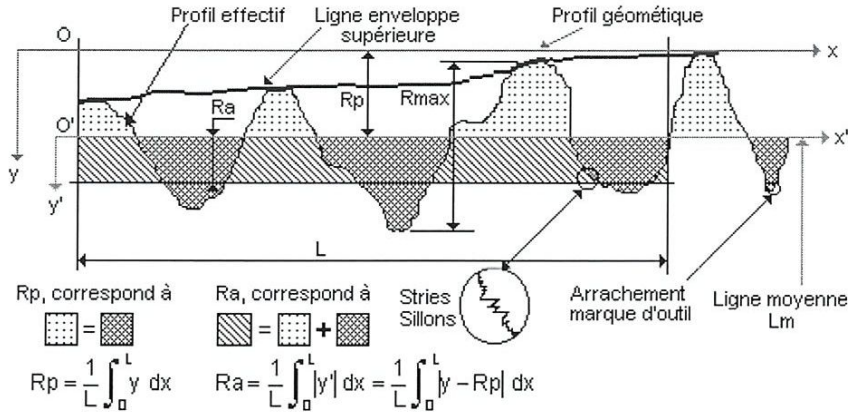


Figure.12. Caractéristiques du profil [A06].

- ❖ **L** : Longueur de base du profil moyen
- ❖ **R_p**: Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée *y* de tous les points du profil sur la longueur de base *L*.
- ❖ **R_a** : Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée *y'* (entre chaque point de la courbe et l'axe *Ox'*).

I.5.3. Paramètres caractéristiques des états de surface

- ❖ **Rugosité moyenne arithmétique R_a**: Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité *R* mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| \, dx \text{ (I.eq.1)}$$

- ❖ **Rugosité moyenne profondeurs R_Z**: Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones

d'évaluations successives *L_e* $R_a = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4}) \text{ (I.eq.2)}$

- ❖ **Hauteur maximale des pics R_p** : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation $L_m R_p = R_{p3}$ (I.eq.3)

I.5.4. Technologie de mesure

La mesure des états de surface peut être réalisée avec un microscope d'état de surface. Cette technologie de mesure présente l'avantage de permettre l'obtention d'un modèle numérique de la surface réelle sans contact. La mesure est réalisée sur un échantillon de surface. Ainsi, la mesure prend en compte la forme et la direction des stries.

I.5.5. Caractéristiques de la surface

La nouvelle norme ISO 25178 définit l'analyse en 3D de l'état de surface, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface[13].




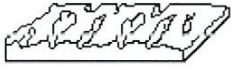
I.5.6. Défauts de rugosité

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces

L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que :

- le frottement de roulement,
- la résistance au matage,
- l'étanchéité,
- la résistance à l'écoulement des fluides,
- la facilité d'accrochage des revêtements,
- la résistance aux efforts alternés (fatigeme).

Tableau.I.2.déférent type de Défauts de rugosité

	<i>Types de défauts</i>	<i>Désignation</i>	<i>Causes</i>
<i>Macrographiques</i>		défauts de forme et de position	Pendant l'usinage et après l'usinage etc.
		Ondulation périodique	Fraisage : pas de l'ondulation = avance par tour de fraise, vibrations, pièce et outil, etc.
<i>Macrographiques</i>		strie - sillon, rugosité périodique	Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil : lubrification, vibrations.
		arrachement, fentes, marques d'outil, piqûres, etc.	Qualité de l'affûtage de l'outil. Hétérogénéité du matériau usiné.

I.6. Les efforts de la coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire: l'effort double environ quand la vitesse d'avance double)[14].

I.6.1. Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (fig.I.13).

- ❖ F_v : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.
- ❖ F_a : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.
- ❖ F_r : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.

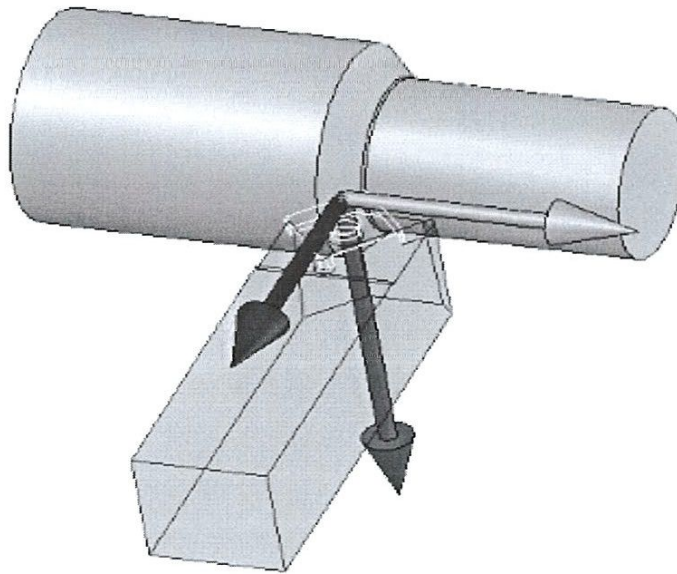


Figure.I.13. Les composantes de l'effort de coupe [8]

I.6.2. Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe

a) Les propriétés mécaniques du matériau à usiner

La valeur de réaction F_v , F_a , F_r est proportionnelle à la charge rupture à la traction R_t et à la dureté HB du métal à usiner.

b) Influence de la profondeur de passe et l'avance

Avec l'augmentation de ces deux facteurs, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus à la formation du copeau et la

valeur des composantes F_v , F_a et F_r nécessaire pour assurer la coupe est plus importante. En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance.

c) **Influence de la vitesse de coupe :**

On peut distinguer 03 zones (fig.I.14)

- ✓ **Zone A :** diminution de F avec les vitesses basses due à une diminution de frottement copeau - outil.
- ✓ **Zone B :** l'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation des frottements et par suite de l'effort tangentiel de coupe et diminution.
- ✓ **Zone C :** La V_C augmente arête rapportée diminue. L'effort tangentiel de coupe F diminue et se stabilise vers 200m/min.

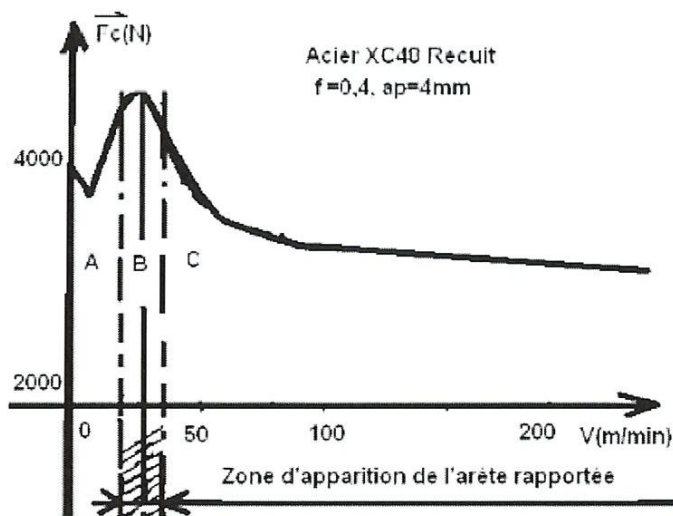


Figure.I.14. Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe [A08].

d) Influence de l'angle d'attaque:

Lorsque est négatif l'effort tangentiel de coupe est important au fur et à mesure que augmente, l'effort de coupe diminue et prend une valeur stable à partir de 30°.

e) Influence de l'angle de direction principale:

Avec une avance inchangée, le copeau devient plus fin au fur et à mesure que l'angle diminue. Ceci conduit à une augmentation de l'effort de coupe, la réduction de l'angle de position est limitée par les dégradations croissantes de la stabilité (forte augmentation des efforts d'avances et de pénétration tendance au broutage) .

f) Influence de matériau de coupe:

Les matériaux de coupe revêtus, en particulier ceux avec des revêtements TiN ou Ti (C,N), accusent un frottement moindre et des efforts de coupe plus faible que les matériaux de coupe non revêtus. Les faces d'attaque superfinies (rectifiées, rodées, polies) et dotées d'une arête de coupe dure et tranchante, réduisent les efforts de coupe .

I.7. Usure des outils de coupe**I.7.1.Définition**

L'usure de l'outil est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes. Il s'ensuit une usure de l'outil qui peut être d'origine thermomécanique ou chimique.

Cette usure dépend des paramètres de l'usinage, mais aussi de:

- la géométrie de la plaquette: angle de coupe, présence de brise copeau ;
- revêtement et de son comportement mécanique et thermique.

Il en résulte une usure apparente schématisée par la figure(**fig.I.15**).

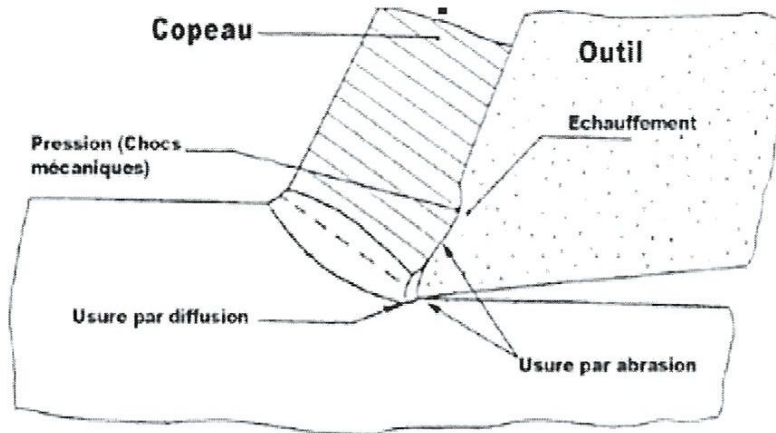


Figure.I.15.Représentation des différentes zones de l'usure de l'outil durant la phase de la formation de copeau [7]

I.7.2. Usure visible sur l'outil

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils.

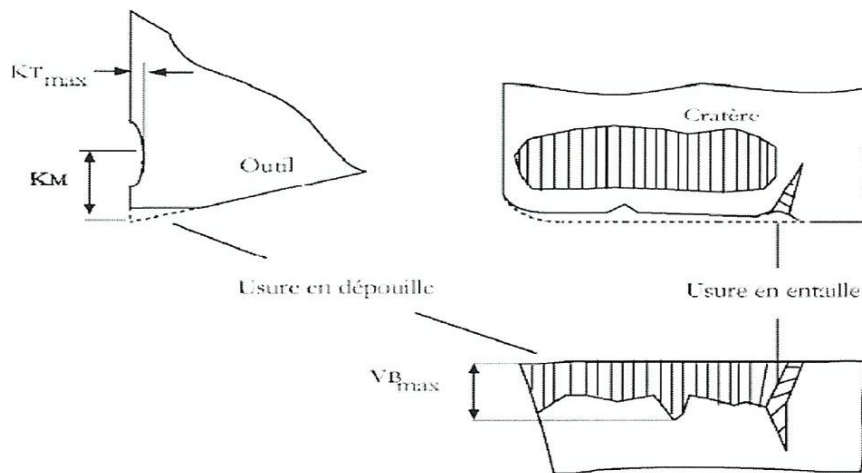


Figure.I.16. Manifestation et mesures des usures [7].

Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables (Fig.I.17).

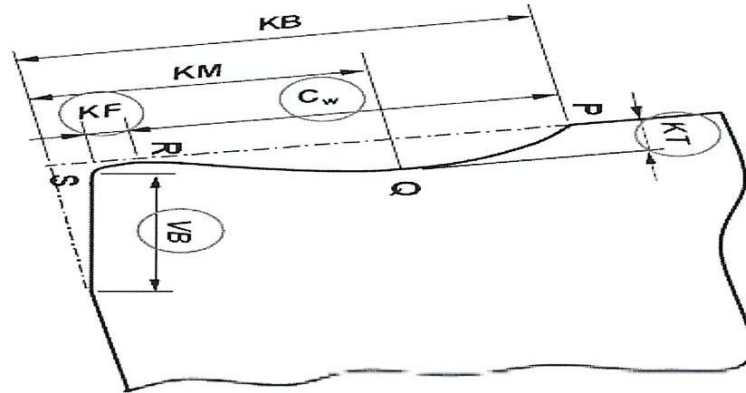


Figure.I.17. Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil [15].

- KM: Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil.
- KT: Profondeur du cratère.
- KB: Largeur du cratère.
- γ_c : Angle de cratérisation.
- VB: Hauteur de l'usure en dépouille.
- VN: Profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale.
- VBC: Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée.
- SV: Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée.

I.8. Travaux de recherches concernant l'usinage des aciers inoxydables

Cette partie récapitule la recherche dans la littérature existante reliée à l'usinage des aciers inoxydables. L'objectif est de faire une étude à partir de ces articles publiés et de comprendre les travaux accomplis concernant l'usinage de ces aciers jusqu'à nos jours. Dans cette recherche on a trouvé que beaucoup d'auteurs ont étudié l'influence de la matière à usiner, le rôle du revêtement et les paramètres de coupe optimaux, l'usure de l'outil, l'influence de revêtements, l'influence de différents types de substrats et l'effet de l'usinage à sec sur l'usinabilité de ces aciers. Plusieurs articles ont été publiés dans ces domaines. Parmi eux on cite :

Le travail de recherche élaboré par **berkanist et al [16]** concerne l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en termes de l'évolution de l'effort de coupe, la consommation d'énergie (puissance de coupe, l'effort de coupe spécifique et la rugosité de surface. Les auteurs ont utilisé un carbure métallique avec un triple revêtement [Ti(C, N)/Al₂O₃/TiN] avec le procédé CVD, ils ont opté pour un plan de taguchi de 16 essais en variant les conditions de coupe (V_c , f et a_p) suivant quatre niveaux. L'usinage est réalisé à sec afin d'obtenir des modèles mathématiques empiriques caractérisant les paramètres technologiques d'usinage (F_c , P_c , K_c et R_a) en fonction des conditions telles que la vitesse de coupe, vitesse d'avance et la profondeur de coupe en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). Les résultats ont révélé que l'avance par tour est le facteur le plus prépondérant qui affecte la rugosité de surface (71,04% de). Toutefois, la profondeur de coupe affecte considérablement la force de coupe et la puissance de coupe par (60,74% et 67,11%), respectivement. D'autres parts, l'effort de coupe spécifique a été trouvé affecté de manière significative par la vitesse de coupe avec une contribution de 41.43%. Le modèle quadratique de RSM associé à la technique de l'optimisation (désirabilité approche) de la réponse a été utilisée pour trouver des valeurs optimales de paramètres d'usinage ($V_c=104,54$ m/min, $f=0,08$ mm/tr et $a_p=0,295$ mm).

Dans une étude de **F. Kara et al [17]** ont effectué une modélisation prédictive pour les forces de coupe générées au cours du tournage orthogonale de l'acier inoxydable AISI 316L. Les auteurs ont utilisé les réseaux de neurones artificiels (ANN) et l'analyse de régression multiple pour la modélisation. Les paramètres d'entrée du modèle ANN étaient la vitesse de coupe, l'avance et le type de revêtement. Dans le modèle, les outils de coupe en carbure de tungstène non revêtu et avec deux revêtements différents (TiCN + Al₂O₃ + TiN et l'Al₂O₃), ont été employés. Les

prédictions ANN les plus proches des efforts de coupe expérimentaux ont été obtenues pour l'effort principale de coupe (F_c) et l'effort d'avance (F_a) par les architectures 3-7-1 et 3-6-1, avec une seule couche cachée, respectivement. Une très bonne performance du réseau de neurones, en termes d'accord avec les données expérimentales, a été atteinte. Avec le modèle développé, les efforts de coupe pourraient être prédits avec précision en fonction de la vitesse de coupe, l'avance et le type de revêtement. Les résultats de prédiction ont montré que l'ANN a été supérieure à la méthode de régression multiple en termes de capacité de prédiction.

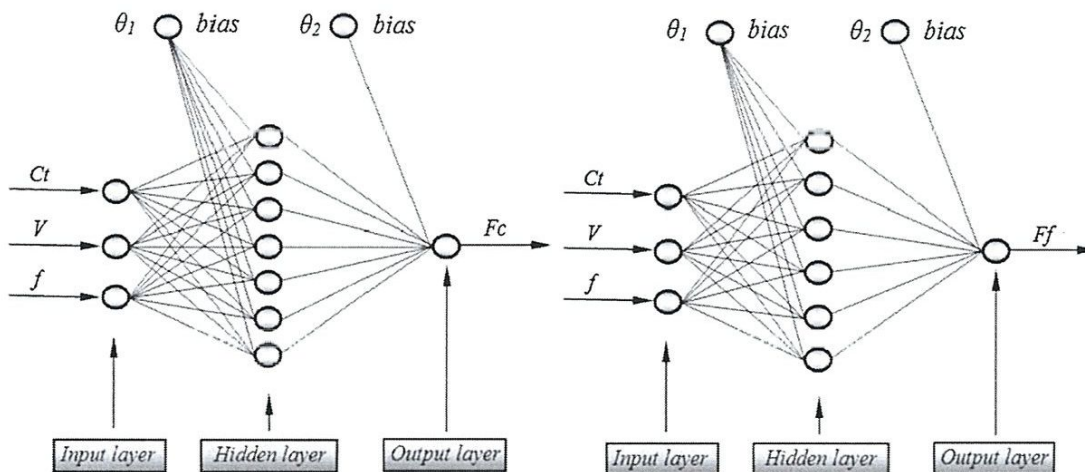


Figure.I.18.couche cachée ANN architectures simples créés pour les efforts de coupe

L'étude réalisée par Shreemoy Kumar Nayak et al [18] vise à étudier l'influence de différents paramètres d'usinage telles que la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de coupe (a_p) sur les différents paramètres technologiques lors du tournage à sec de l'acier inoxydable austénitique AISI 304. Pour les essais les auteurs ont utilisé un outil en carbure cémenté de qualité ISO P30 non revêtu. Un plan d'expériences de 27 (L27) essais a été adopté avec les paramètres d'usinage suivantes: $V_c = 25, 35, 45$ m / min, $f = 0.1, 0.15, 0.2$ mm / tr. et $a_p = 1, 1.25, 1.5$ mm. Trois caractéristiques importantes de l'usinage tels que, le taux d'enlèvement de matière (MRR), l'effort de coupe (F_c) et la rugosité de surface (R_a) ont été mesurés. Afin de faire une optimisation simultanément des paramètres d'usinage les auteurs ont utilisé une analyse par la relation de grey. La combinaison paramétrique recommandée basée sur les critères de performance étudiés (c.-à-d-MRR, F_c et R_a) ont été trouvés pour $V_c = 45$ m / min, $f =$

0.1mm / tr, $ap = 1.25$ mm. Un test de confirmation a également été effectué pour justifier l'analyse et une amélioration de 88,78% a été observée lors de l'utilisation de la relation de grey.

T.R. Lin [19] a étudié le comportement des revêtement de coupe lors de perçage de l'aciers inoxydable SUS304 on utilisant l'usinage à avance variable pour améliorer la durée de vie de l'outil et diminuer la hauteur de bavure pendant le débouchage de la matière. Il a utilisé quatre types de revêtement tels que (TiC, TiCN, CrN et TiAlN). Les forets qui ont un revêtement [TiN] et [TiCN] donnent des meilleurs résultats par rapport aux autres revêtements (**fig.I.19**). Il a montré aussi que la détérioration de l'outil ainsi que la dégradation de la surface usinée sont dues clairement au copeau sous forme d'un ruban long.

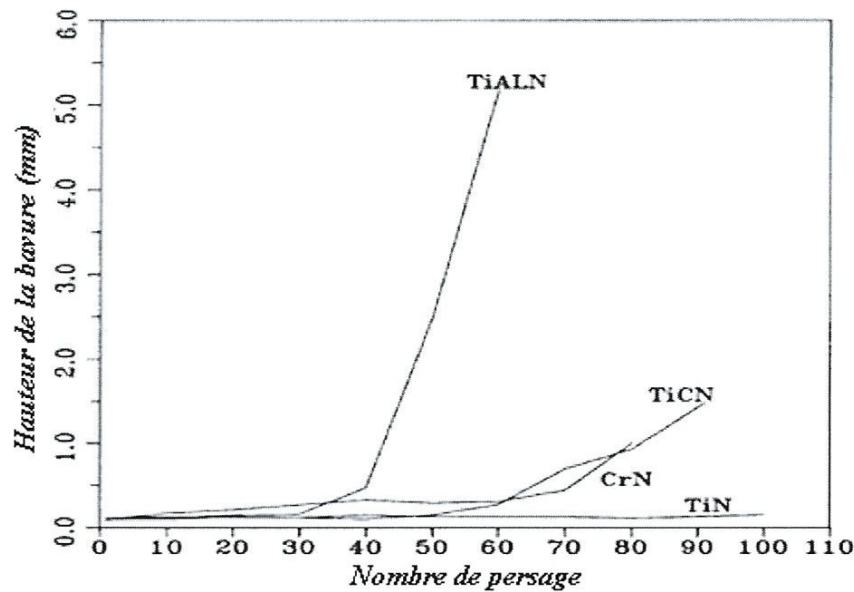


Figure.I.19. Hauteur de bavure en fonction de nombre de perçages usinés [19]

Neo K.S. et al. [20], ont étudié la performance d'un outil en CBN pour l'usinage de l'acier inoxydable (X38Cr13), cet acier est de la famille martensitique, il est largement utilisé pour la fabrication des matrices et des moules de précision. Les performances en termes de rugosité de surface et d'usure de l'outil en PCBN et en CBN conventionnel dans différentes conditions d'usinage étaient étudiées et leurs résultats étaient comparés. Sur la base des résultats expérimentaux, le PCBN s'est avéré plus performant en terme de résistance à l'usure comparé à l'outil en CBN conventionnel. Il peut également réaliser un bon état de surface dont la rugosité Ra est inférieure à 30nm, et par conséquent il semble être un outil prometteur pour la coupe des matériaux réservés pour la fabrication des matrices et des moules. Les auteurs ont conclu que, pour atteindre une bonne qualité de surface sur STAVAX (X38Cr13), la vitesse de coupe élevée est exigée pour les outils en CBN et en PCBN, ce dernier peut réaliser un meilleur état de surface. Il ont constaté aussi qu'à la gamme élevée de la vitesse de coupe, l'outil en PCBN peut mieux résister à l'usure.

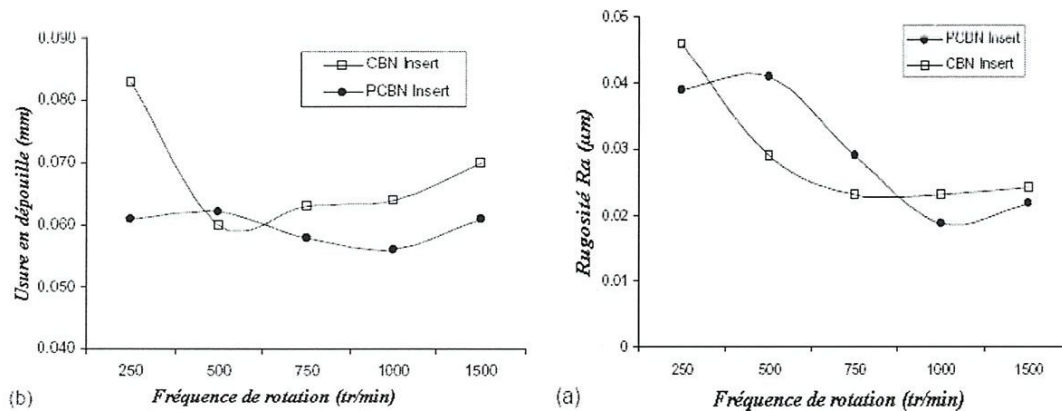


Figure I.20. Evolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction de la fréquence de rotation [17]

I.9. Position du problème

En ce basant sur l'étude bibliographique, nous pouvons conclure que les aciers inoxydables sont classés parmi les aciers difficiles à usiner et spécialement les aciers inoxydables austénitiques. Ces aciers se caractérisent par une ductilité élevée ce qui favorise l'apparition de l'arête pour certaine sur l'outil et aussi les micro-copeaux sur la pièce. Ainsi, un coefficient de frottement élevé qui accélère l'usure de l'outil.

Notre travail consiste en premier lieu à étudier l'influence des différents paramètres de coupe à savoir (V_c, f et a_p) sur la rugosité de surface des aciers inoxydables, l'effort de coupe et la consommation d'énergie (puissance de coupe, l'effort de coupe spécifique) en utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR) et les réseaux de neurones artificiels (ANN) ensuite de faire un approche multi objectif afin de déterminer les paramètres optimaux qui donne une qualité .

Chapitre II

procédure et équipement d'expérience

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 plate forme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université de 08 Mai 1945.

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, La puissance sur la broche égale à 6.6KW **figure (II.1)**. Les fréquences de rotation disponibles sur le tour entre (22.5 à 2000) tr/min.

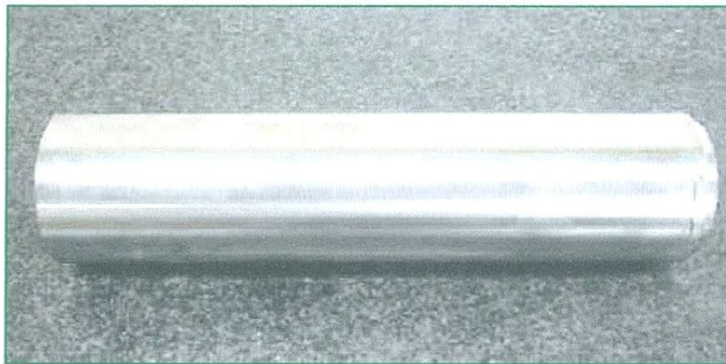


Figure.II.1. tour parallèle modèle SN40

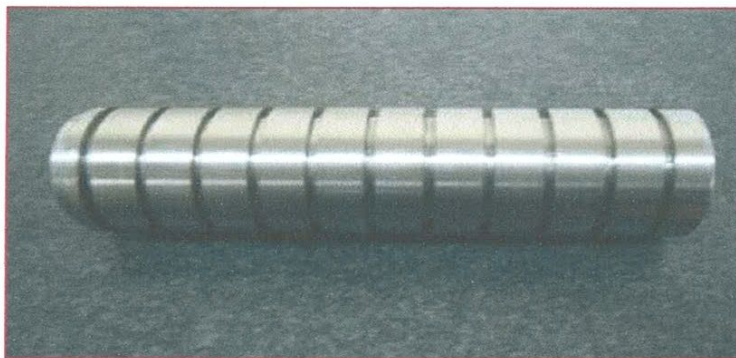
II.2.2. Matériau utilisé

C'est un acier inoxydable austénitique fortement allié, sa nuance est (X2CrNi18-9) Cet acier offre une bonne combinaison de résistance à la corrosion et d'aptitude au formage et à la fabrication, ainsi qu'une résistance à l'usure avec une très bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contraintes.

Les aciers inoxydables austénitiques sont utilisés dans d'innombrables domaines: vie quotidienne (coutellerie, outils de couture et ustensiles de cuisine), industrie mécanique (instruments de mesure), agroalimentaire (malaxeurs), chimie, transports, médecine et chirurgie, etc.



a) Eprouvette utilisée pour les essais de longue durée



b) Eprouvette utilisée pour les essais de courte durée

Figure.II.2. Eprouvettes pour différents essais

Pour les essais de longue durée (évolution de l'usure de l'outil et la rugosité en fonction du temps) on a utilisé des éprouvettes de diamètre $\Phi=100\text{mm}$ et de longueur $L=400\text{mm}$ **figure (II.2-a)**, et pour les essais de courte durée (efforts de coupe et rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe : V_c , f et ap) on a utilisé des éprouvettes qui ont les mêmes dimensions avec des paliers de 20mm de longueur **figure (II.2-b)**.

La composition chimique de l'acier **X2 Cr Ni 18-9** est représentée dans le tableau **(II.1)**.

Tableau.II.1. Composition chimique de l'acier (X2 Cr Ni 18-9)

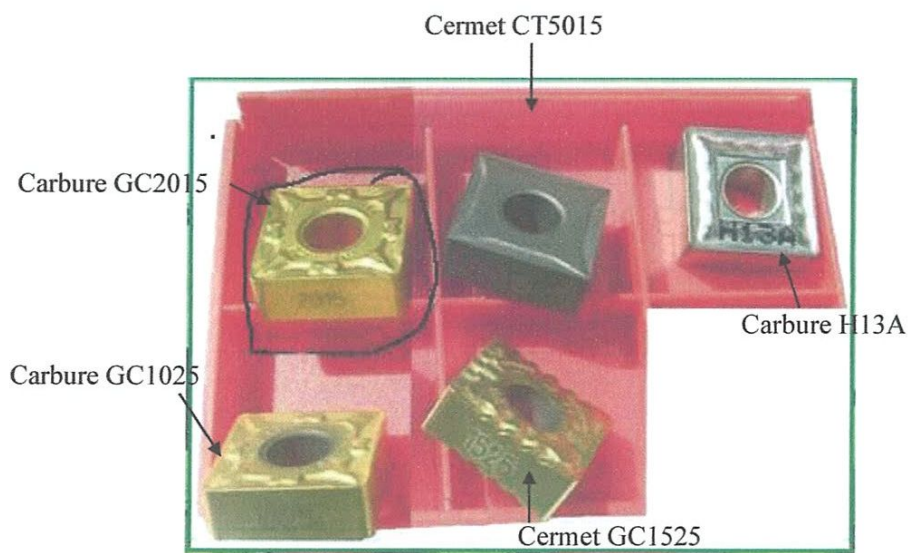
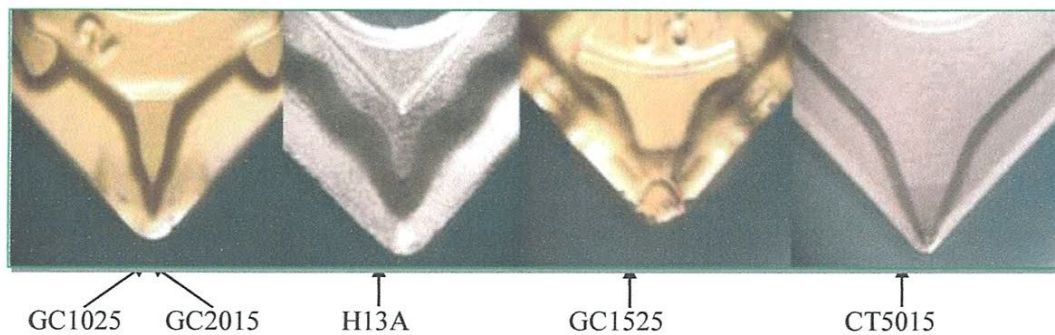
élément	Pourcentage (%)
Carbone	0.02
Manganèse	1.44
Silicium	0.33
Phosphore	0.02
Soufre	0.016
Cuivre	0.727
Aluminium	0.012
Titane	0.005
Niobium	0.013
Nickel	7.69
Chrome	16.91
Molybdène	0.402
Vanadium	0.112
Étain	0.014
Tungstène	0.066
Fer	72.10

II.2.3. Plaquette de coupe

Les plaquettes sont amovibles de forme carrée **figure (II.3)**, à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau **(II.2)** chaque plaquette à un brise-copeau différent comme le montre la **figure (II.4)**.

Tableau.II.2. Informations relatives aux plaquettes de coupe

Matériaux de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
Carbure revêtu	GC 1025	PVD	TiAlN	SNMG 12-04-08-PF
	GC 2015	CVD	Ti(C,N)/Al ₂ O ₃ /TiN	SNMG 12-04-08-MF
Carbure non revêtu	H13A	----	----	SNMG 12-04-08-QF
Cermet revêtu	GC 1525	PVD	TiC/TiN	SNMG 12-04-08-MF
Cermet non revêtu	CT 5015	----	----	SNMG 12-04-08-QF

**Figure.II.3.** Photos des plaquettes de coupe utilisées**Figure.II.4.** Brise copeau pour chaque nuance

Carbure 1025 : c'est une nuance à grain très fin, avec le tout nouveau revêtement PVD de TiAlN tenace et résistant à l'usure. Présente les qualités requises pour des arêtes de coupe vives et une sécurité élevée contre le martelage des copeaux. Pour tolérance serrées et excellent état de surface en finition des aciers inoxydables.

Carbure 2015 : triple revêtement sur un substrat tenace enrichi en cobalt. Excellente adhérence du revêtement au substrat, une bonne résistance à l'usure surtout l'usure par diffusion et à la déformation plastique aux températures élevées, un coefficient du frottement réduit, donc elle empêche la formation de l'arête rapportée.

Carbure H13A : nuance carbure non revêtu avec bonne résistance à l'usure par abrasion et bonne ténacité. Bon choix pour opération de la semi-finition à l'ébauche d'aciers réfractaires et d'alliages de titane.

Cermet 5015 : nuance de carbure à base de titane (ccrmet), non revêtu. L'emploi de titane au lieu de tungstène comme base de particules dures de traduit par une plus grande stabilité chimique, et une bonne résistance à l'usure en dépouille, en cratère et en entaille. Nuance dure, dont la bonne résistance à la déformation plastique et la grande stabilité chimique convienne bien pour les matières collantes.

Cermet 1525 : nuance cermet à revêtement PVD pour la finition et la semi-finition. Substrat du même type que CT5015 avec tous ses avantages mais plus tenace. Le revêtement de TiC/TiN dur et résistant à l'usure confère d'excellentes propriétés dans une plage étendue de vitesse de coupe. Le plus tenace des cermets, pour une haute sécurité du processus.

II.2.4. Porte-plaquette

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte outil sur lesquels on fixe les plaquettes mécaniquement par trou central.



Figure.II.5. le porte plaquette

La géométrie du porte outil est donnée dans le tableau (II.4), Ce porte-plaquette permet de travailler avec la géométrie suivante :

Tableau.II.3. Caractéristique géométrique du porte outil

Porte outil	Section (mm ²)	χ°	α°	γ°	λ°
PSBNR2525K12	25*25	75°	6°	6°	-6°

II.2.5. Appareillages de mesure utilisés

II.2.5.1. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (Ra), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo), la plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40 μ m) pour Ra, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce figure (II.6).

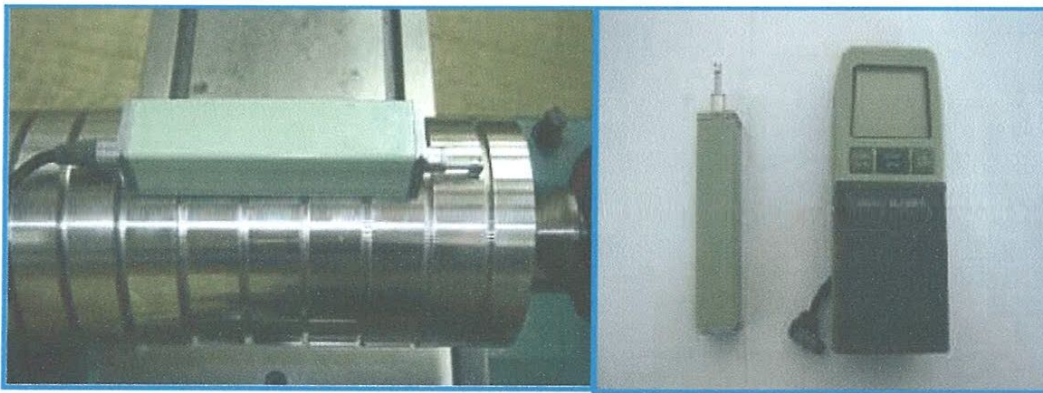


Figure.II.6. mesure de la rugosité sans démontage de la pièce

II.2.5.2. Mesure des efforts

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257 B), 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 cite: la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel (DYNOWARE).

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est animé du mouvement d'avance. 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. La plateforme

représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz **figure (II.7)**.

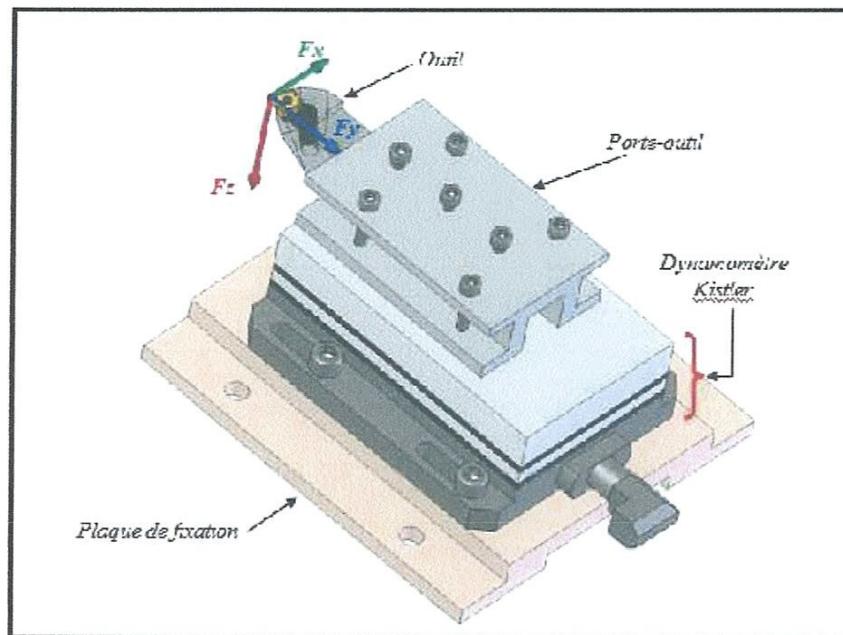


Figure.II.7. Montage du dynamomètre sur la table de la machine

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties par les capteurs piézo-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 exprimé en trois composantes (**figure.II.8, figure.II.9**).

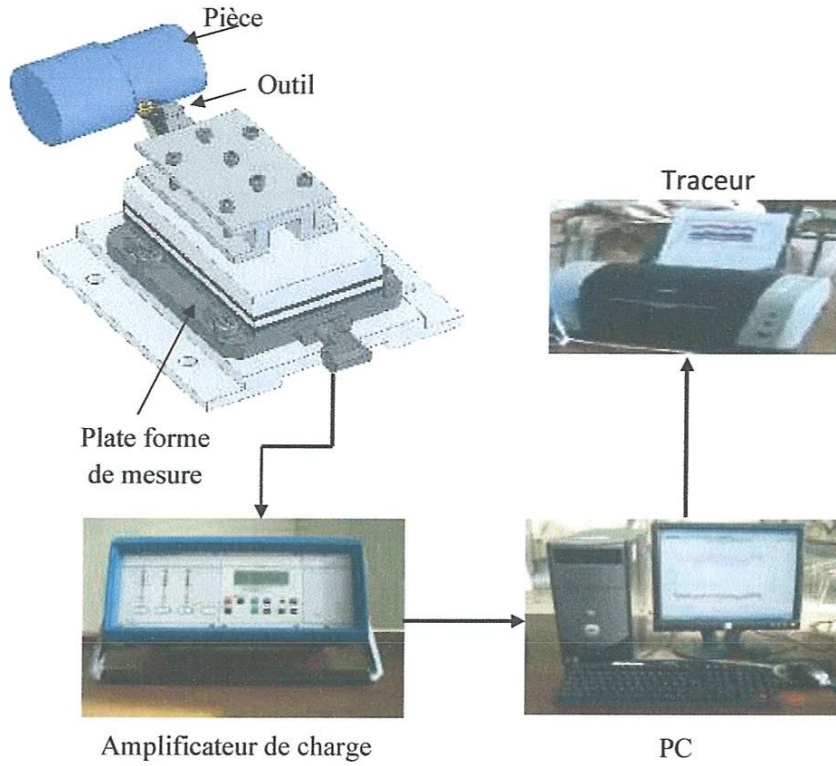


Figure.II.8. Chaîne de mesure des efforts de coupe

La figure (II.9) présente un exemple d'acquisition qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (*Effort axiale*: F_x , *Effort radial*: F_y et *Effort tangentiel*: F_z).

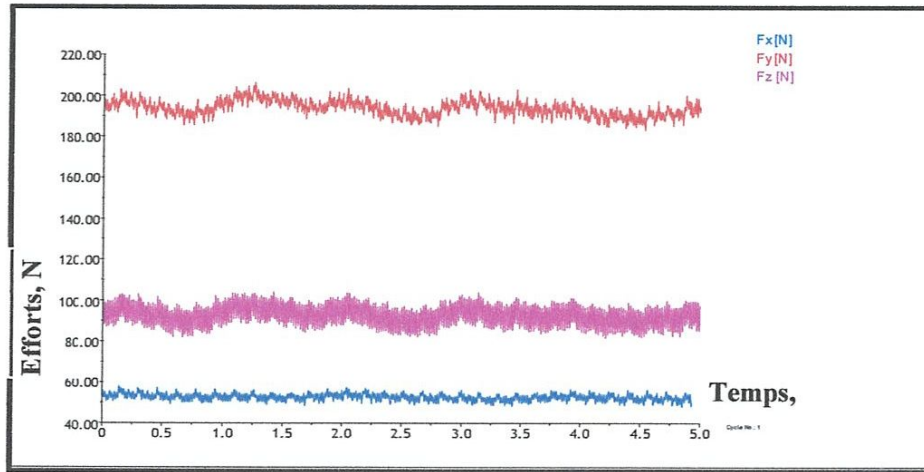


Figure.II.9. Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »

Essai 5 : $V_c = 80\text{m/min}$, $f = 0.14\text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.2\text{ mm}$

II.2.5.3. Autres équipements utilisé

- un appareil photo numérique pour prendre les photos.
- un pied à coulisse pour mesurer les dimensions de la pièce.

II.3. Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f , T_u), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ , r_ϵ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité,... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

✓ 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 , T_u) sur les inverses fonctions d'optimisation (Usure, rugosité et efforts de coupe), Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule Suivante:

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

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 sont 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.5.

Tableau.II.4. Matrice de planification pour un plan 3^3 [21]

N° d'essai	Facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap(mm)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

L'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

L'utilisation des plans d'expériences, et en particulier les tables orthogonales de Taguchi, a permis la détermination de l'influence des effets simultanés et de l'interaction des paramètres opératoires sur l'usure, les efforts de coupe et la rugosité.

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats.

Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats [21].

Dans cette recherche, la table orthogonale standard $L_{27}(3^3)$ de Taguchi est adoptée comme plan expérimental tableau (II.5). Les niveaux de paramètre ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (**Sandvik Company**). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau (II.6). La table orthogonale standard $L_{27}(3^3)$ de Taguchi a 27 lignes correspondant au nombre d'essais et 13 colonnes à trois niveaux. Les facteurs et leurs interactions sont assignés aux colonnes. En effet, la première colonne de la table a été assignée à la vitesse de coupe (V_c), la seconde à l'avance (f) et profondeur de passe (ap).

Tableau.II.5. Plan d'expériences (table orthogonale de Taguchi (L27 (3³)) [22]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
03	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
04	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
05	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
06	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
07	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
08	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
09	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

II.4. Conditions de coupe

Les essais de chariotage sont effectués sur un acier traité de nuance Z210Cr12, La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées dans le tableau.II.6 :

Tableau.II.6. les paramètres de coupe et paramètre de sortie

Les paramètres	Valeurs
Vc (m/min)	90; 180 ; 350
f (mm/tr)	0.08; 0.16; 0.24
ap (mm)	0.3 ; 0.6 ; 0.9

II.5. conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les équipements nécessaires pour la réalisation des essais et la composition chimique des éprouvettes. Les caractéristiques du matériau de coupe, les appareils de mesure et la planification des expériences ont été désignés.

Chapitre III

*Modélisation MSR et optimisation des
condition de coupe*

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 coupe (a_p) et les réponses étudiées (Rugosité arithmétique R_a , Efforts de coupe (F_c), la puissance de coupe (P_c) et débit de coupeau MRR. Les résultats ont été traités statistiquement afin de proposer un régime de coupe optimal. Pour atteindre ces objectifs, on a fait appelle à la méthodologie de surface de réponse (MSR). 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 un logiciel de statistique appelé «**Design Expert 8**».

III.2. Modélisation de la méthodologie des surfaces de réponse (MSR)

La méthodologie des surfaces de réponse (MSR) appliquée dans cette étude est une technique statistique empirique utilisée pour l'analyse de régression multiple des données quantitatives obtenues à partir des expériences statistiquement conçues en résolvant les équations multi variables simultanément. La représentation graphique de ces équations s'appelle surfaces de réponse, elle permet de décrire l'effet individuel et cumulatif des variables d'essai sur la réponse et de déterminer l'interaction mutuelle entre les variables d'essai et leur effet sur la réponse [23, 24].

La méthodologie de surface de réponse est une procédure visant a déterminé une relation entre les paramètres indépendant du processus d'entrée et les données de sortie (réponse du procédé). Cette procédure comprend six étapes [25] et qui sont citées ci-dessous :

1. définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées,
2. adopter un plan de conception expérimentale,
3. effectuer une analyse de régression avec le modèle quadratique de (MSR),
4. effectuer une analyse statistique de la variance (ANOVA) des variables d'entrées indépendantes afin de trouver les paramètres les plus significatifs qui affectent la réponse,
5. déterminer la situation du modèle quadratique de (MSR) et enfin,
6. Optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédites.

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. Dans la présente étude, la relation entre les paramètres d'entrées (conditions de coupe) à savoir la vitesse de coupe (Vc), la vitesse d'avance (f) et la profondeur de coupe (ap) et les paramètres de sorties (Efforts de coupe (Fc), Rugosité (Ra), puissance de coupe (Pc) et le débit du copeau (MRR), sont donnés par l'équation notée ci-dessous [26]:

$$Y = f(Vc, f, ap) + e_{ij} \quad \text{(III.eq.1)}$$

Où :

$Y =$ paramètres de sortie (Efforts de coupe, Rugosité arithmétique, ...)

On peut ainsi écrire le modèle mathématique du second ordre, basé sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante [25]:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 a_{ij} X_i X_j \quad \text{(III.eq.2)}$$

- Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;

Les variables codées X_i , $i = 1, 2, 3$ sont obtenues à partir des équations de transformation suivantes [25]:

$$X_1 = \frac{Vc - Vc_0}{\Delta Vc} \quad \text{(III.eq.3)}$$

$$X_2 = \frac{f - f_0}{\Delta f} \quad \text{(III.eq.4)}$$

$$X_3 = \frac{ap - ap_0}{\Delta ap} \quad \text{(III.eq.5)}$$

Où X_1, X_2 et X_3 sont les valeurs codées des paramètres Vc, f et ap respectivement. Vc_0, f_0 et ap_0 au niveau zéro. $\Delta Vc, \Delta f$ et Δap sont les valeurs de Vc, f , et ap , respectivement.

• a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

III.3. Teste de validité des modèles

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (*ANOVA*) : est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de coupe. Comme les facteurs sont en général exprimés dans des unités différentes, leurs effets ne soient comparables que s'ils sont codés.
- Coefficients d'ajustement des modèles : Le coefficient de détermination R^2 est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression. Le coefficient R^2 peut s'interpréter comme le quotient des variances expliquée par la variance des réponses mesurées, d'où R^2 varie entre 0 et 1. Une valeur de R^2 proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (eq.6) [24].

$$R^2 = 1 - \frac{SSErreur}{SStotal} \quad \text{(III.eq.6)}$$

- Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles utiles pour vérifier les hypothèses des modèles et peuvent être affichés pour tous les plans et ils sont déterminées par l'évaluation de l'équation (eq.7) [24].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad \text{(III.eq.7)}$$

Où :

y_{ij} : l'observation correspondante des valeurs non ajustées.

\hat{y}_{ij} : l'observation des valeurs ajustées.

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles

- Test de normalité d'Anderson Darling : le test d'Anderson Darling est utilisé pour tester si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Ce test est une alternative au test de chi carré ou de Kolmogorov-Smirnov.

Les valeurs critiques dépendent des distributions (normale, log-normale, exponentielle...). Les valeurs de P sont souvent utilisées dans les tests d'hypothèses dans lesquels on peut ou non rejeter une hypothèse nulle. La valeur de P représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la valeur de P est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une

valeur limite de 0.05 est utilisée. Autrement dit, rejetez l'hypothèse nulle si la valeur de P est inférieure à 0.05.

III.4. Résultats des expériences

Les valeurs des paramètres de réponse considérés sont présentées dans le tableau (III.1). Ces résultats sont obtenus suivant le plan d'expérience de taguchi à 27 essais avec 3 facteurs et 3 niveaux (L_{27}).

Tableau.III.1 Résultats expérimentaux des critères de rugosité (Ra), et l'effort de coupe (F_c), puissances de coupe (P_c), et débit du copeau (MRR).

N° Test	Les valeurs d'entrée			Les valeurs de sorties			
	V_c m/min	f mm/tr	ap mm	Ra μm	F_c N	P_c W	MRR cm ³ /min
1	90	0.08	0.3	0.82	92.31	138.47	2.16
2	90	0.08	0.6	0.62	131.56	197.34	4.32
3	90	0.08	0.9	0.79	208.50	312.75	6.48
4	90	0.16	0.3	1.60	140.60	195.00	1.44
5	90	0.16	0.6	1.99	214.00	321.00	8.64
6	90	0.16	0.9	1.20	266.49	549.74	12.96
7	90	0.24	0.3	3.63	195.69	293.54	6.48
8	90	0.24	0.6	3.13	330.22	495.33	12.96
9	90	0.24	0.9	2.39	538.58	807.87	19.44
10	180	0.08	0.3	0.66	74.50	223.50	5.28
11	180	0.08	0.6	1.00	147.89	443.67	10.56
12	180	0.08	0.9	0.55	217.04	651.12	15.84
13	180	0.16	0.3	1.24	128.37	385.11	10.56
14	180	0.16	0.6	1.84	217.31	651.93	21.12
15	180	0.16	0.9	1.61	323.18	973.54	31.68
16	180	0.24	0.3	3.32	190.84	572.52	15.84
17	180	0.24	0.6	3.19	346.24	1038.2	31.68
18	180	0.24	0.9	3.36	497.38	1492.4	47.52
19	350	0.08	0.3	0.51	90.35	527.04	8.4
20	350	0.08	0.6	0.53	127.91	746.14	16.8
21	350	0.08	0.9	1.36	177.13	1033.6	25.2
22	350	0.16	0.3	1.81	120.68	703.97	16.8
23	350	0.16	0.6	1.59	170.30	993.42	33.6
24	350	0.16	0.9	1.58	300.32	1751.7	50.4
25	350	0.24	0.3	3.60	159.04	927.73	25.2
26	350	0.24	0.6	3.19	300.03	1750.8	50.4
27	350	0.24	0.9	3.58	429.37	2504.6	75.6

III.5. Analyse de la variance ANOVA

III.5.1. ANOVA de la rugosité (Ra)

Le tableau (III.2) qui concerne l'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité (Ra) montre que l'avance par tour (f) est le facteur qui la plus grande influence avec une contribution de 89.69% suivie par l'interaction (f * f) avec une valeur de 3.02%, l'analyse indique que l'effet de la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (ap) sur la rugosité Ra sont faibles.

Tableau.III.2. Analyse de la variance ANOVA(Ra)

Source	Sum of squares	dF	Mean Square	F-value	P-value	Cont. %	Remark
Model	30.08	9	3.34	41.66	< 0.0001		Signifiant
Vc	0.13	1	0.13	1.56	0.2282	0.413	Insignifiant
f	28.20	1	28.20	351.48	< 0.0001	89.69	Signifiant
ap	8.225 ^{e-003}	1	8.225 ^{e-003}	0.10	0.7527	0.026	Insignifiant
Vc * f	0.082	1	0.082	1.02	0.3269	0.260	Insignifiant
Vc * ap	0.33	1	0.33	4.14	0.0579	1.049	Insignifiant
f * ap	0.31	1	0.31	3.87	0.0657	0.986	Insignifiant
Vc ²	4.249 ^{e-008}	1	4.249 ^{e-008}	5.297 ^{e-007}	0.9994	1.35 ^{e-07}	Insignifiant
f ²	0.95	1	0.95	11.80	0.0032	3.021	Signifiant
ap ²	4.09 ^{e-003}	1	4.09 ^{e-003}	0.051	0.8240	0.013	Insignifiant
Error	1.36	17	0.080			4.32	
Total	31.44	26				100	

III.5.1.1. Modèle mathématique et le coefficient de détermination

L'équation (III.8) exprime le modèle de la rugosité arithmétique (Ra) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Ra = +0.691 - 3.125^{e-003} * Vc - 1.795 * f + 0.424 * ap + 7.813^{e-003} * Vc * f + 4.198^{e-003} * Vc * ap - 6.70 * f * ap - 5.586^{e-009} * Vc^2 + 62.065 * f^2 - 0.290 * ap^2 \quad (III.eq.8)$$

Où : Le coefficient de détermination : $R^2 = 95.66\%$

III.5.1.2. Test de concordance entre les valeurs expérimentale et prédits

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.

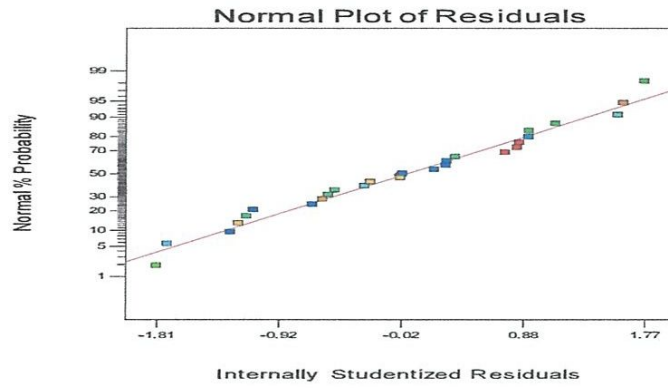
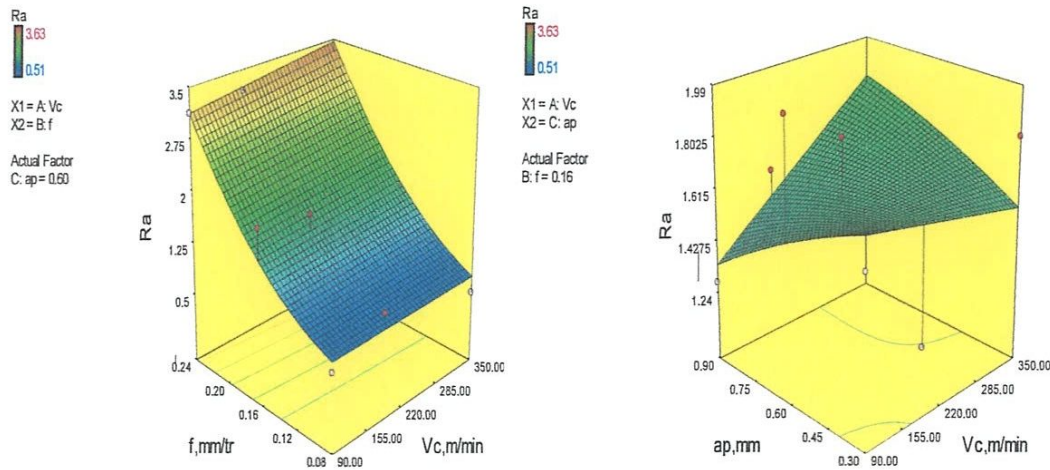


Figure.III.1.Valeurs prédit en fonction des valeur expérimentales pour le critère de rugosité (Ra)

III.5.1.3. Diagrammes de surface 3D de (Ra) et graphiques des contour

La figure (III.2) permet d'évaluer l'influence simultanée de (Vc ; f), (Vc ; ap),(f ; ap) sur le critère de rugosité de surface (Ra). La figure indique que la pente de l'avance (f) est la plus importante par contre la pente de la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (Vc) sont faibles. La meilleure rugosité de la surface usinée est obtenue avec la plus petite avance par tour (f).

La figure (III.3) représente les graphes de contour permettant de visualiser la projection de la surface de réponse, ces graphes permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



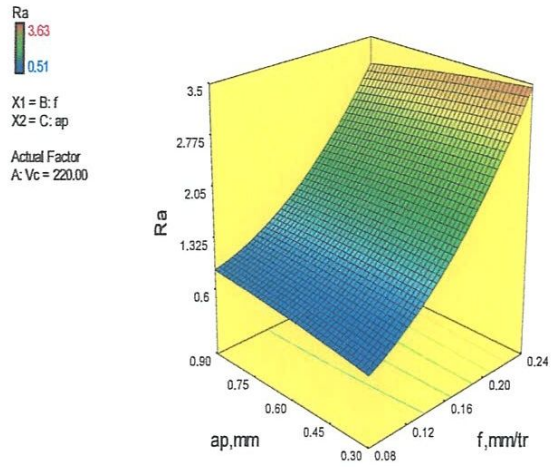


Figure.III.2. Diagrammes de surface 3D de (Ra) en fonction de (Vc, f et ap)

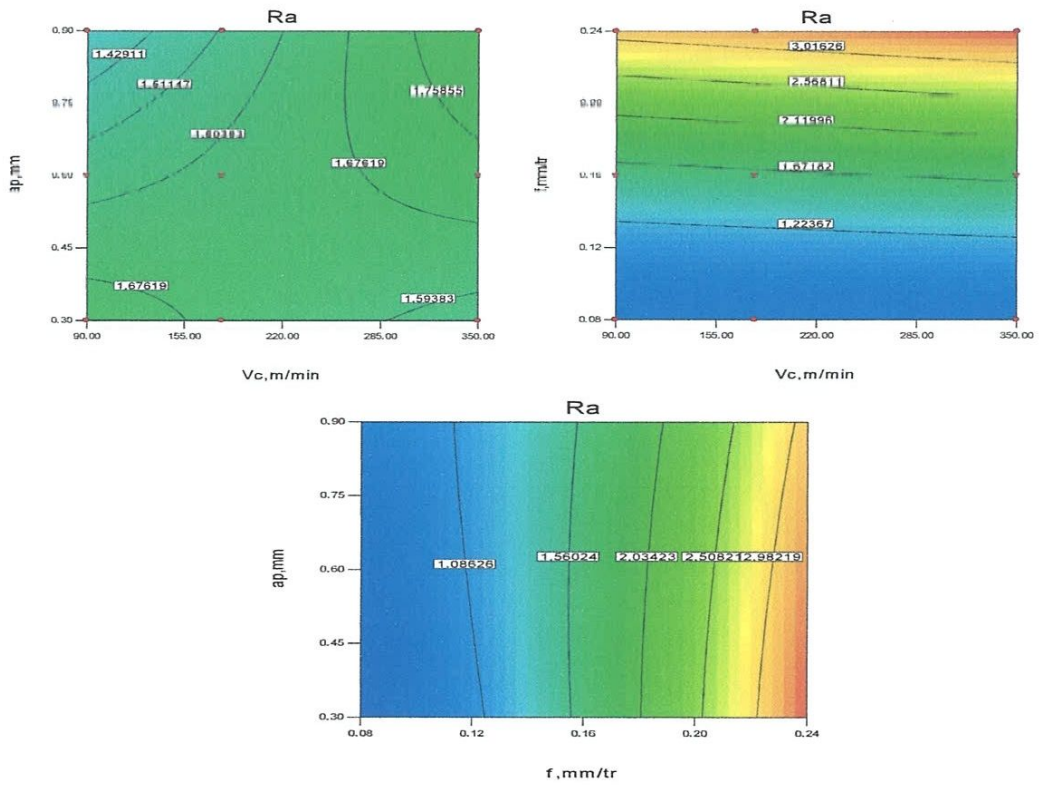


Figure.III.3. contour de la rugosité (Ra) en fonction de (Vc, f,ap)

III.5.2. ANOVA l'effort de coupe tangentiel (Fc)

Les résultats de l'ANOVA de l'effort de coupe (Fc) sont présentés dans le tableau (III.4) l'analyse des résultats montre que le profondeur de passe (ap), est le facteur qui à la plus grande influence avec une valeur de contribution à 45.46% suivie par l'avance (f) avec une contribution de 39.03%, et la vitesse de coupe avec une valeur de contribution de 1.32% en dernier lieu. l'interaction (f * ap) a une contribution de 6.79%.

Tableau.III.3. Analyse de la variance ANOVA de l'effet (Fc)

Source	Sum of squares	dF	Mean Square	F-value	P-value	Cont. %	Remark
Model	4.017 ^{e+005}	9	446302.68	285.46	< 0.0001		Signifiant
Vc	6153.84	1	6153.84	39.36	< 0.0001	1.521	Signifiant
f	1.579 ^{e+005}	1	1.579 ^{e+005}	1009.57	< 0.0001	39.03	Signifiant
ap	1.879 ^{e+005}	1	1.879 ^{e+005}	1201.76	< 0.0001	46.45	Signifiant
Vc × f	1715.52	1	1715.52	10.97	0.0041	0.424	Signifiant
Vc × ap	2182.85	1	2182.85	13.96	0.0016	0.539	Signifiant
f × ap	27480.26	1	27480.26	175.75	< 0.0001	6.793	Signifiant
Vc ²	194.22	1	194.22	1.24	0.2806	0.048	InSignifiat
f ²	1757.64	1	1757.64	11.24	0.0038	0.434	Signifiant
ap ²	1364.54	1	1364.54	8.73	0.0089	0.337	Signifiant
Error	2658.04	17	156.36			0.657	
Total	4.045 ^{e+005}	26				100	

III.5.2.1. Modèle mathématique et 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) sont jugés représentatifs des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est proche de l'unité.

$$F_c = +65.56 + 0.40 * V_c - 623.61 * f - 102.02 * ap - 1.13 * V_c * f - 0.34 * V_c * ap + 1993.92 * f * ap - 3.77^{e-004} * V_c^2 + 2674.30 * f^2 + 167.56 * ap^2 \quad \text{(III.eq.9)}$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2 = 99.34 \%$

III.5.2.2. Test de concordance entre les valeurs expérimentales et prédites

La figure (III.4) 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.

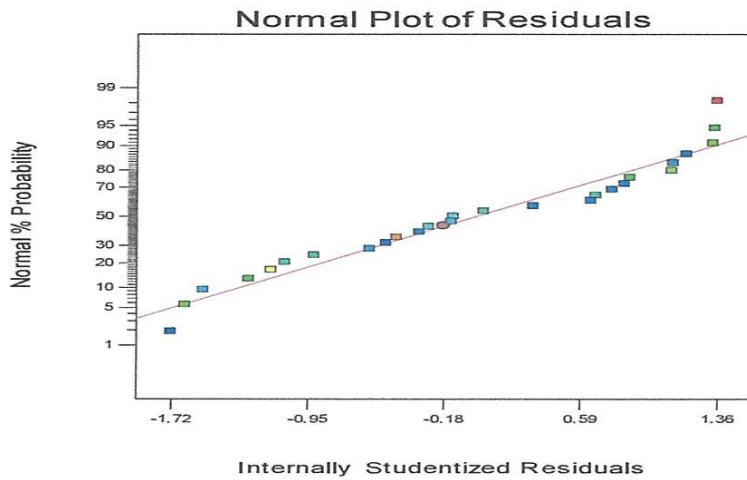
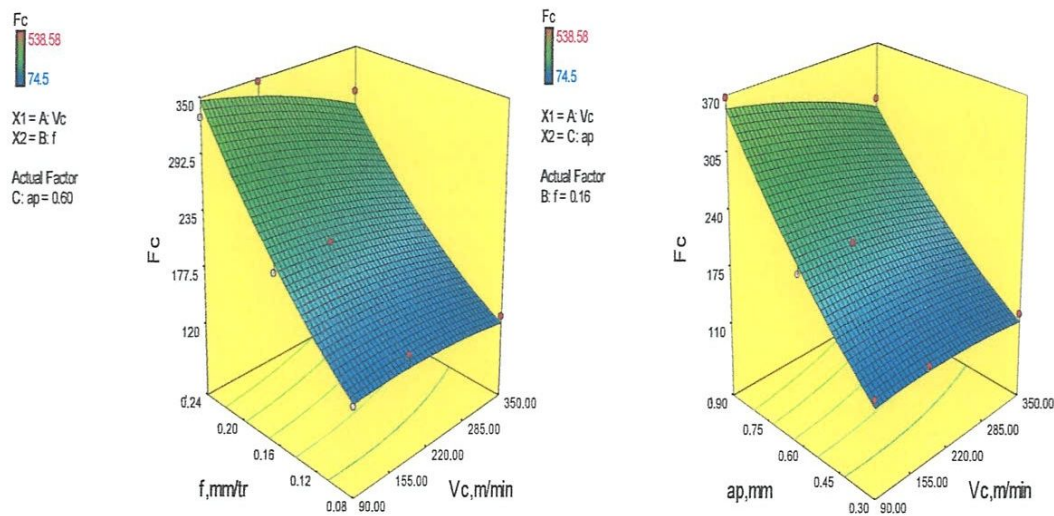


Figure.III.4. Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour le (Fc)

III.5.2.3. Diagrammes de surface 3D de (Fc) et graphiques des contour

La figure (III.5) présente la réponse de la composante tangentielle de l'effort de coupe (Fc) en (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation. La figure montre que la pente de profondeur de passe (ap) est supérieure aux autres facteurs ce que implique que ce facteur a l'influence la plus significative suivi par l'avance (f), et la vitesse de coupe (Vc).

La figure (III.6) Permet de visualiser la projection de la surface de réponse, ces graphes permettant aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



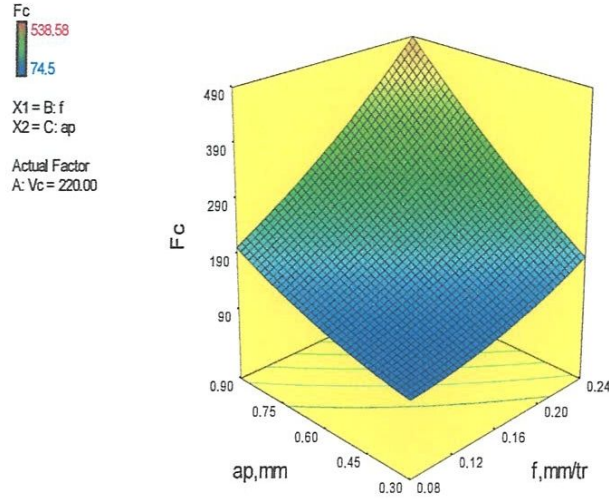


Figure.III.5. Diagrammes de surface 3D de (Fc) en fonction de (Vc, f et ap)

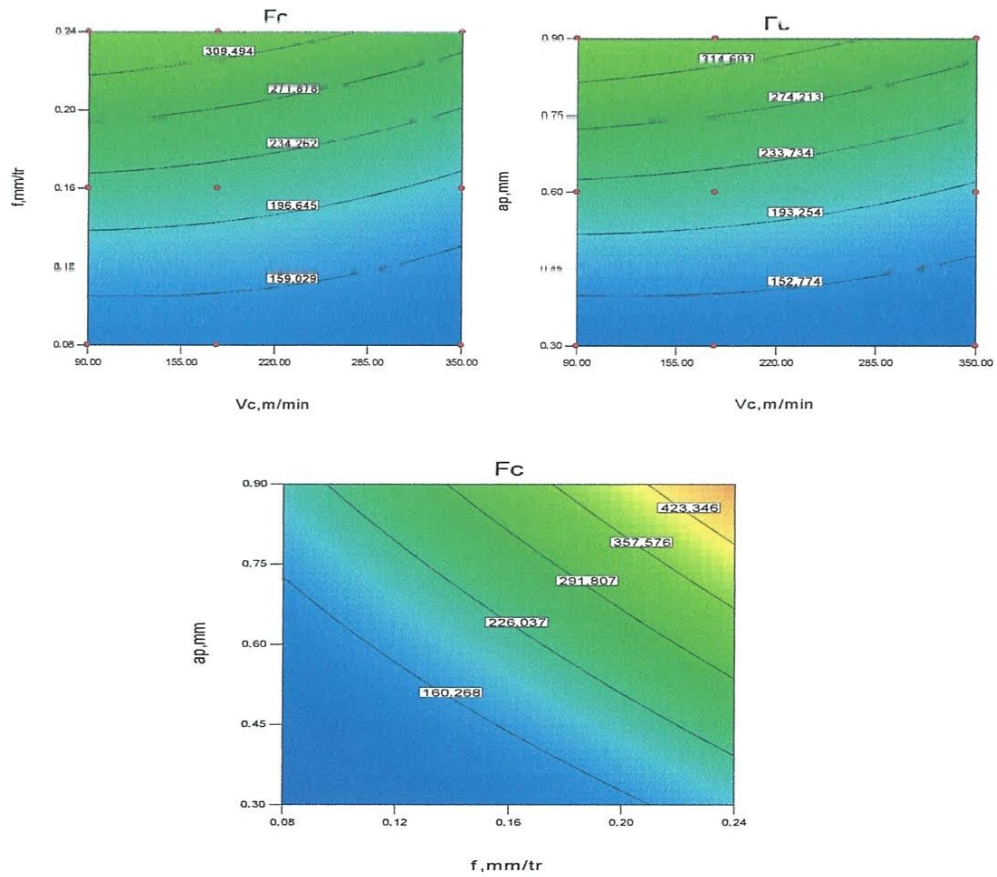


Figure.III.6. contour de l'effort de coupe (Fc) en fonction de (Vc, f, ap)

III.5.3. ANOVA pour la puissances de coupe (Pc)

Le tableau (III.4) présente l'analyse de la variance ANOVA du critère la puissances de coupe (Pc). La puissances de coupe influencée par l'avance (f), la vitesse de coupe (Vc), et la profondeur de passe (ap) et les interactions (Vc×ap),(Vc×f), (f×ap). d'après les résultats de l'ANOVA on constate que la vitesse (Vc), est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 39.32% suivie par la profondeur de passe (ap) avec une valeur de Signifiant 27.50%, en fin l'avance (f), avec 23.18 %. les interactions (Vc×ap),(Vc×f), (f×ap) out de contribution de (3.75% , 4.41% , 3.67%), respectivment.

Tableau.III.4. Analyse de la variance ANOVA pour (Pc)

Source	Sum of squares	dF	Mean Square	F-value	P-value	Cont. %	Remark
Model	8.096e+006	9	8.995e+005	125.81	< 0.0001		Signifiant
Vc	3.231e+006	1	3.231e+006	451.94	< 0.0001	39.32	Signifiant
f	1.905e+006	1	1.905e+006	266.49	< 0.0001	23.18	Signifiant
ap	2.260e+006	1	2.260e+006	316.15	< 0.0001	27.50	Signifiant
Vc × f	3.084e+003	1	3.084e+003	43.14	< 0.0001	3.75	Signifiant
Vc× ap	3.628e+005	1	3.628e+005	50.74	< 0.0001	4.415	Signifiant
f × ap	3.017e+005	1	3.017e+005	42.20	< 0.0001	3.671	Signifiant
Vc ²	16712.25	1	16712.25	2.34	0.1447	0.203	InSignifiant
f ²	22367.5	1	22367.5	3.13	0.0949	0.272	Insignifiant
ap ²	11015.88	1	11015.88	1.54	0.2314	0.134	Insignifiant
Error	1.215e+005	17	7149.60			1.47	
Total	8.217e+006	26				100	

III.5.3.1. Modèle mathématique et le coefficient de détermination

Le modèle quadratique représentant la variation de la puissance de coupe (Pc) en fonction des éléments du régime de coupe est donné par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 Pc = & +688.837 - 0.261 * Vc - 6258.322 * f - 1403.893 * ap + 15.178 * Vc * f \\
 & + 4.389 * Vc * ap + 6606.805 * f * ap - 3.503e^{-003} * Vc^2 + 9540.104 * f^2 \\
 & + 476.09259 * ap^2
 \end{aligned}
 \tag{III.eq.10}$$

Où :

Le coefficient de détermination: $R^2 = 98.52\%$

III.5.3.2. Test de concordance entre les valeurs expérimentales et prédites

La figure (III.7) montre qu'en générale il y a une bonne concordance entre les valeurs des résultats prévus par le modèles quadratiques et ceux obtenus par calcul en fonction des mesures expérimentales de l'effort de coupe (Fc).

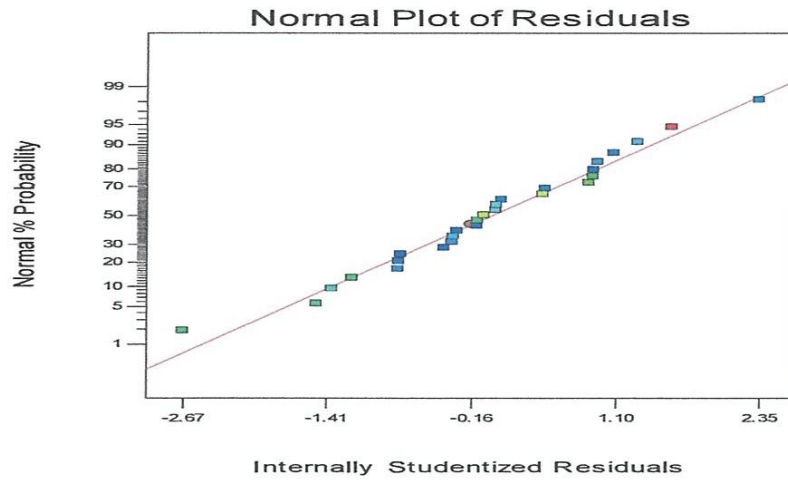
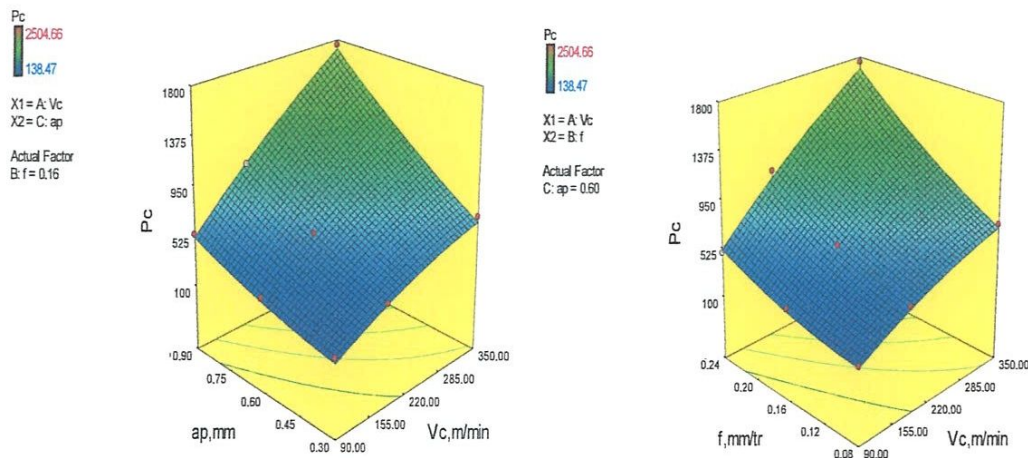


Figure.III.7. valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales (P_c)

III.5.3.3. Diagrammes de surface 3D et graphique de contour

La figure (III.8) permet d'évaluer les diagrammes d'influence des (V_c ; f), (V_c ; a_p) et (f ; a_p) sur la puissance de coupe (P_c). La figure montre que la pente de la vitesse de coupe (V_c) est importante, donc ce facteur (V_c) possède l'effet le plus significatif sur la (P_c) cela est validé par résultant de tableau (III.4).

La figure (III.9) présente les graphes de contour qui permettent de visualiser la projection de la surface de réponse, ces graphes permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



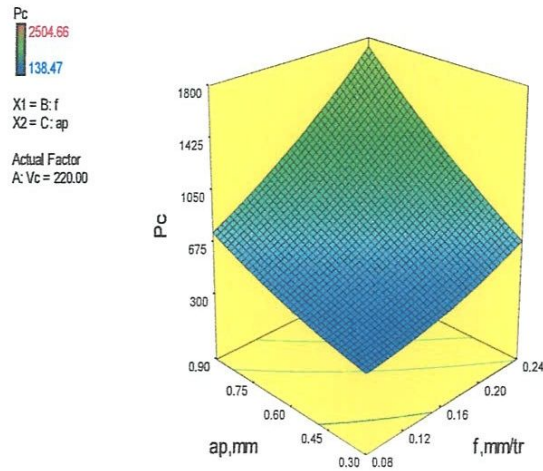


Figure.III.8. Diagrammes de surface 3D de (Pc) en fonction de (Vc, f et ap)

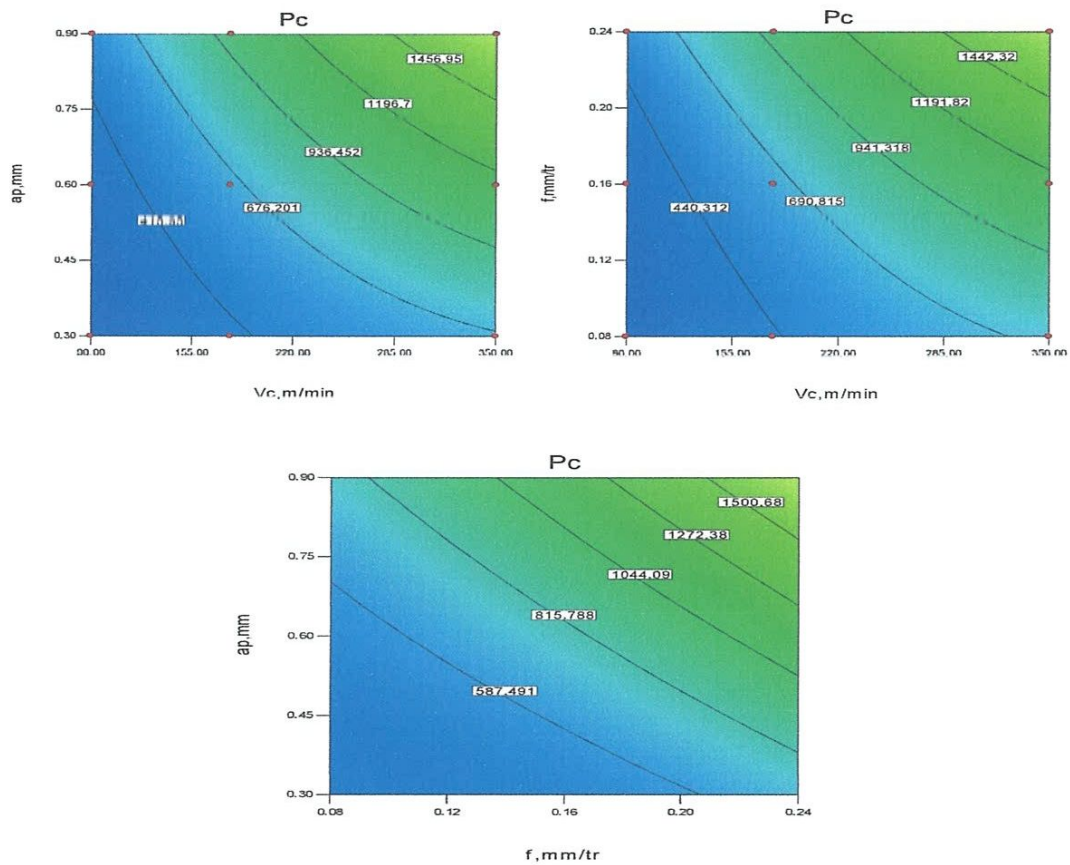


Figure.III.9. contour de la puissance de coupe (Pc) en fonction de (Vc, f, ap)

III.5.4. ANOVA du débit de coupeau (MRR)

Les résultats de l'ANOVA du débit de coupeau (MRR) sont présentés dans le tableau (III.5), Cette analyse montre que la vitesse de coupe (V_c), est le facteur qui a la plus grande influence avec une valeur de contribution à 32.34% suivie par l'avance (f) avec une contribution de 25.56% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap), avec une contribution de 25.56% aussi.

Les interaction ($V_c * f$), ($V_c * ap$) et ($f * ap$) ont aussi une influence sur le débit de coupeau (MRR).

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

Sourc e	Sum of squares	dF	Mean Square	F-value	P-value	Cont. %	Remark
Model	8058.45	9	895.38	142.97	< 0.0001		Signifiant
V_c	2803.51	1	2803.51	447.66	< 0.0001	32.34	Signifiant
F	2216.13	1	2216.13	353.87	< 0.0001	25.56	Signifiant
ap	2216.13	1	2216.13	353.87	< 0.0001	25,56	Signifiant
$V_c \times f$	452.96	1	452.96	72.33	< 0.0001	5.22	Signifiant
$V_c \times ap$	452.96	1	452.96	72.33	< 0.0001	5.22	Signifiant
$f \times ap$	334.54	1	334.54	53.42	< 0.0001	3.85	Signifiant
V_c^2	85.77	1	85.77	13.70	0.0018	0.98	signifiant
f^2	0.00	1	0.00	0.00	1.0000	0	Insignifiant
ap^2	0.00	1	0.00	0.00	1.0000	0	Insignifiant
Error	106.46	17	6.26			1.22	
Total	8668.46	26				100	

III.5.4.1. Modèle mathématique et le coefficient de détermination

L'équation (III.13) exprime le modèle de la volume de coupeau (MRR) avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$MRR = +9.440 + 0.020 * V_c - 120.206 * f - 32.055 * ap + 0.581 * V_c * f + 0.155 * V_c * ap + 220.00 * f * ap - 2.509^{e-004} * V_c^2 . \quad (III.eq.11)$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2=98.70\%$

III.5.4.2. Test de la concordance entre les résultats prédit et expérimentaux

Cette figure (III.10) 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.

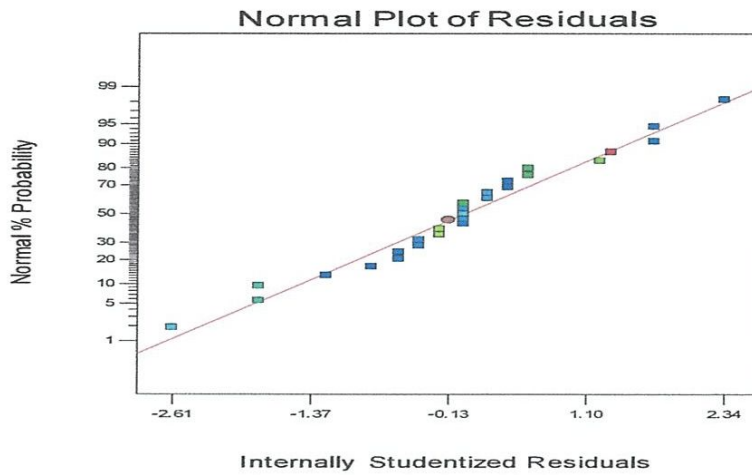
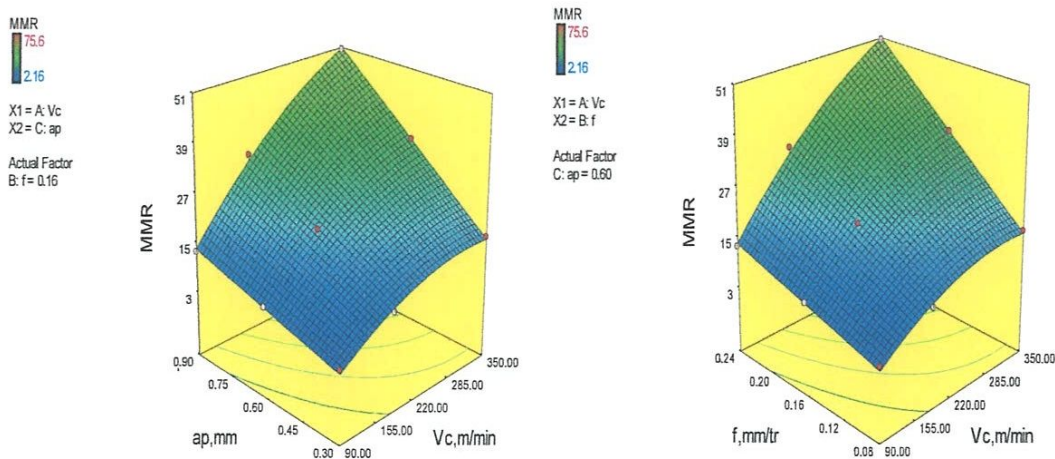


Figure.III.10. Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour le débit du copeau (MRR)

III.8.5. Diagrammes de surface 3D et graphique de contour

La figure (III.11) présente la réponse du débit de copeau (MRR) en (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation. La figure montre que la pente la vitesse de coupe (vc) est supérieure aux autres facteurs ce que implique que ce facteur a l'influence la plus significative suivi par l'avance (Vc) et la profondeur de passe (ap) .

La figure (III.12) Permet de visualiser la projection de la surface de réponse, les graphes permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



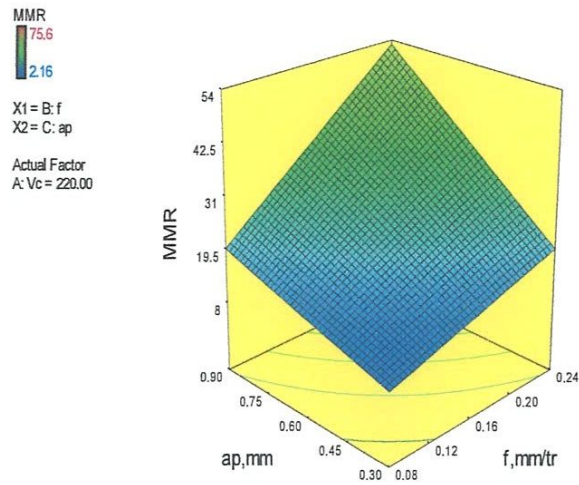


Figure.III.11. Diagrammes de surface 3D de (MRR) en fonction de (Vc, f et ap)

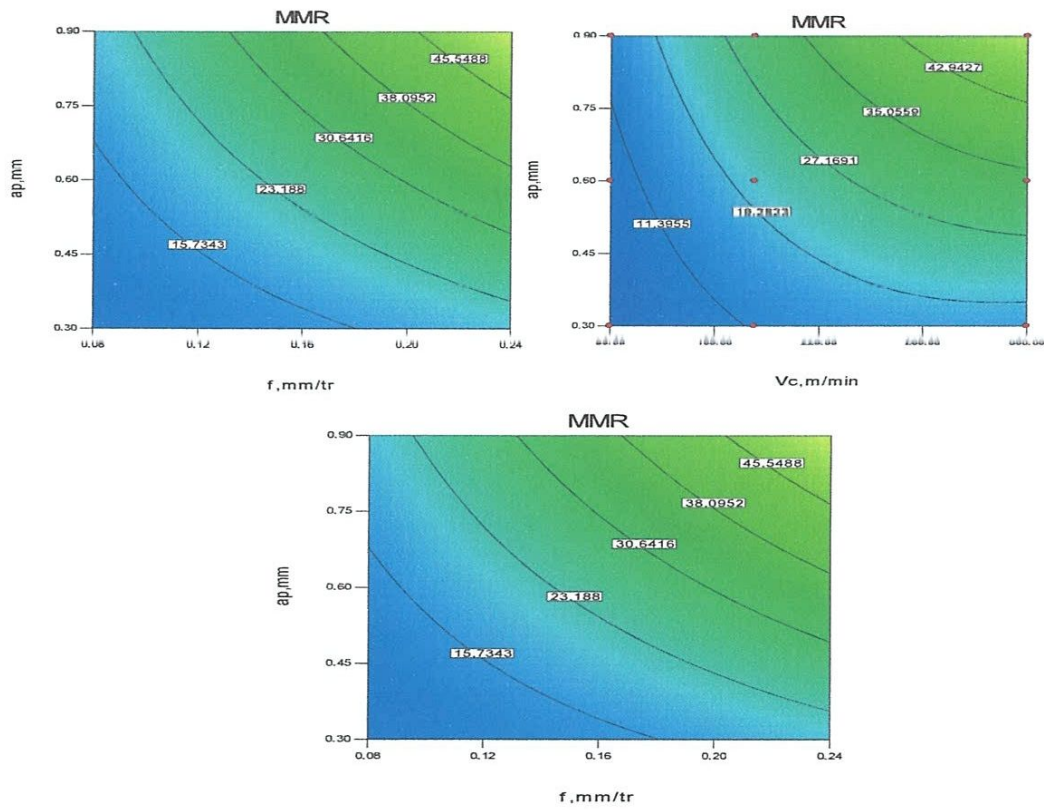


Figure.III.12. Contour de (MRR) en fonction de (Vc, f,ap)

III.6. 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_c)
- 2- Bon état de surface (R_a , rugosité minimale)
- 3- Faible puissance de coupe (P_c)
- 4- débit de copeau maximal (MRR, Productivité maximale)

Il ya 3 Cas d'optimisation des conditions de coupe .

Cas 1: Rugosité minimale, **Cas 2:** débit de copeau maximal, **Cas 3:** combiné,

III.6.1. Rugosité de surface (R_a , minimisée)

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, obtenues en utilisant le logiciel (**Design-Expert**), sont présentées dans le tableau (III.6) et la figure (III.13).

Ces résultats montrent que pour l'obtention de la valeurs (**minimale**) du critères de la rugosité (R_a), seulement le régime de coupe adopté correspond à une vitesse de coupe (V_c) de 347.45 m/min, une avance par tour de 0.08mm/tr et une valeur de 0.33 mm pour le profondeur de passe, la rugosité minimale est de $R_a = 0.500117$.

Dans ce cas , la puissance P_c , l'effort F_c et le débit MRR ne sont pas considérés.

Tableau.III.6. Résultats des valeurs optimales de la rugosité (R_a , min).

Number Desirability	V_c	f	a_p	R_a	Desirability	
1	<u>347.45</u>	<u>0.08</u>	<u>0.33</u>	<u>0.500117</u>	<u>1.000</u>	Selected
2	330.89	0.08	0.32	0.505034	1.000	
3	338.19	0.08	0.31	0.486078	1.000	
4	339.58	0.08	0.31	0.505239	1.000	
5	324.71	0.08	0.31	0.497643	1.000	
6	343.46	0.08	0.34	0.503462	1.000	
7	314.44	0.08	0.31	0.50523	1.000	
8	328.87	0.08	0.31	0.501663	1.000	
9	329.86	0.08	0.30	0.494614	1.000	
10	301.82	0.08	0.30	0.511014	1.000	
11	284.50	0.08	0.30	0.532049	0.993	
12	350.00	0.09	0.30	0.548748	0.988	
13	261.94	0.08	0.30	0.560114	0.984	
14	257.84	0.08	0.30	0.56522	0.982	

La figure (III.13) présente le résultat du régime de coupe optimal pour une désirabilité égale à 1.000

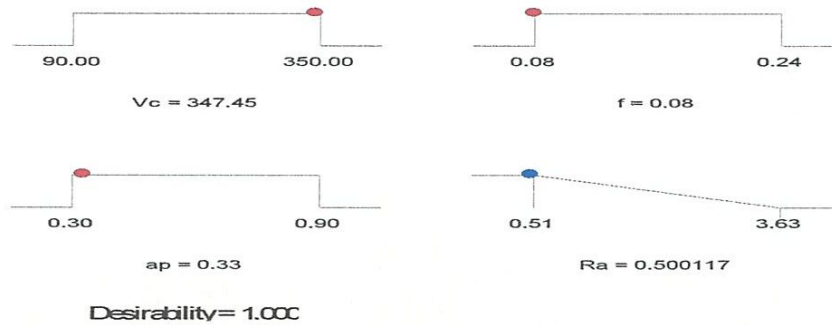


Figure.III.13. Résultat optimales pour (Ra, min)

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (1.000), figure (III.14).

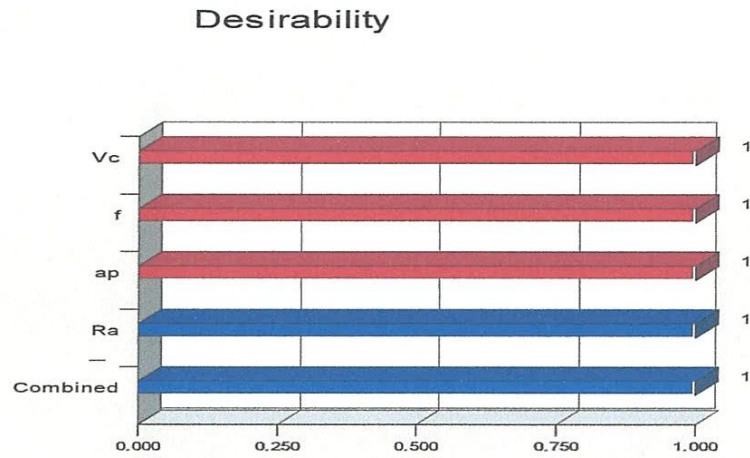


Figure.III.14. Valeurs de la désirabilités de (Ra, min) seulement.

III.6.1.1. La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (III.15), présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p).

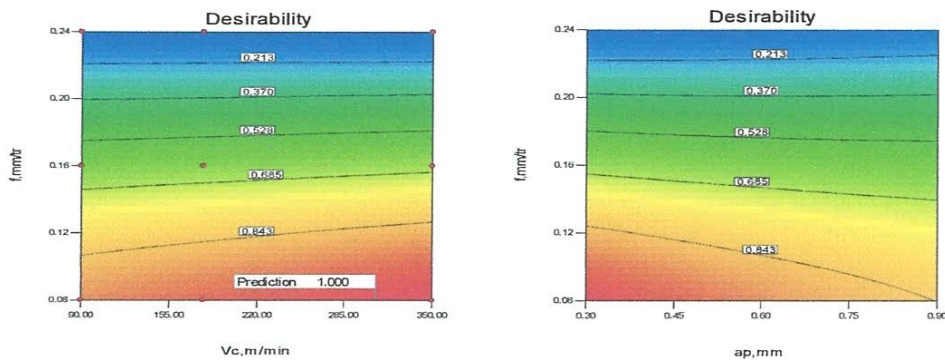


Figure.III.15. Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe de (R_a , min)

III.6.2. débit de copeau (MRR, maximisé)

Les valeurs des conditions de coupe optimales, sont présentées dans le tableau (III.7) et la figure (III.16).

Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs (**maximales**) débit de copeau (**MRR**), le régime de coupe à adopter correspond à une vitesse de coupe (V_c) de 350.00 m/min, une avance par tour de 0.24mm/tr et une valeur de 0.90 mm, pour le profondeur de passe avec une désirabilité de 0.969, ou remarque que las condition de coupe sont à leurs valeurs maximales.

Dons ce deuxième cas, la Rugosité, la puissance et l'effort de coupe ne sont pas considérés.

Tableau.III.7. Résultats des valeurs optimales du débit (MRR, maxi).

Number Desirability	V_c	f	a_p	MRR	Desirability	
1	350.00	0.24	0.90	73.3387	0.969	Selected
2	348.34	0.24	0.90	73.1325	0.966	
3	350.00	0.24	0.90	73.0268	0.965	
4	350.00	0.24	0.90	72.9249	0.964	
5	345.68	0.24	0.90	72.7987	0.962	
6	349.99	0.24	0.89	72.7842	0.962	
7	344.10	0.24	0.90	72.6002	0.959	
8	350.00	0.24	0.89	72.5603	0.959	
9	341.49	0.24	0.90	72.2667	0.955	
10	350.00	0.24	0.90	71.9793	0.951	
11	350.00	0.23	0.90	71.0883	0.939	
12	330.86	0.24	0.90	70.8443	0.935	
13	350.00	0.24	0.85	69.5244	0.917	
14	345.80	0.21	0.90	64.1317	0.844	

La figure (III.16) présente le résultat du régime de coupe optimal pour une désirabilité égale à 0.969 pour le débit (MRR).

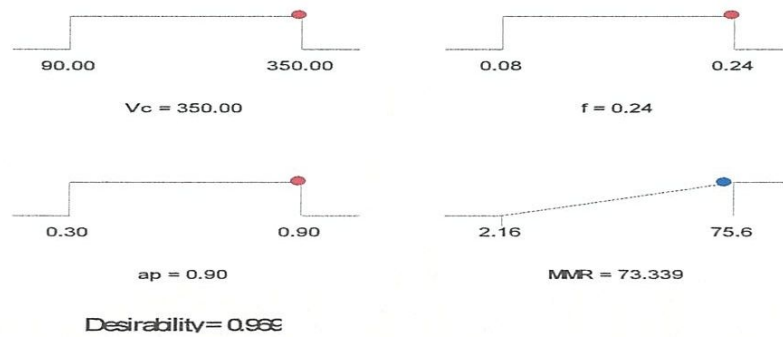


Figure.III.16. Résultat optimales pour le (MRR, maxi)

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.969), figure (III.17).

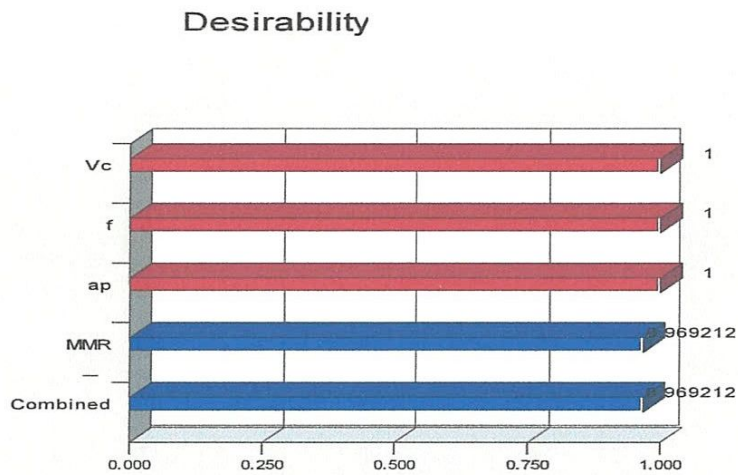


Figure.III.17. Valeurs des désirabilités de (MRR, maxi)

III.6.2.1. La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (III.18), présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p).

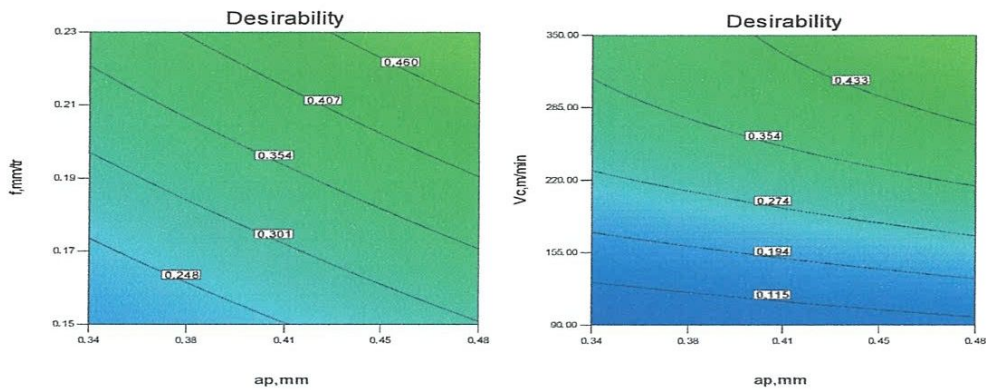


Figure.III.18. Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe de (MRR, max)

III.6.3. Rugosité de surface (R_a , minimisé), et débit de copeau (MRR, maximisé)

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, sont présentées dans le tableau (III.8) et la figure (III.19).

Ces résultats montrent que pour obtenir une rugosité minimale (R_a), et un débit de copeau maximal (MRR), (optimisation multi objectif), il faut adopter le régime donné par le tableau (III.8) qui est $V_c = 350\text{m/min}$, $f = 0.14\text{mm/tr}$, $a_p = 0.90\text{mm}$, avec une désirabilité de 0.62.

Tableau.III.8. Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés (R_a , min et MRR, max)

Number Desirability	V_c	f	A_p	R_a	MMR	Desirability	
1	350.00	0.14	0.90	1.6213	46.3455	0.622	Selected
2	350.00	0.14	0.90	1.63027	46.5421	0.622	
3	350.00	0.15	0.90	1.65459	47.0688	0.622	
4	347.17	0.14	0.90	1.61162	46.0488	0.622	
5	346.00	0.15	0.90	1.68114	47.4977	0.621	
6	350.00	0.14	0.90	1.53094	44.1134	0.620	
7	339.55	0.14	0.90	1.52763	43.9302	0.619	
8	335.63	0.14	0.90	1.5713	44.7838	0.619	
9	326.15	0.14	0.90	1.56889	44.3659	0.616	
10	336.48	0.16	0.90	1.81094	49.6587	0.614	
11	350.00	0.12	0.90	1.31452	38.5487	0.606	
12	294.49	0.12	0.90	1.30065	36.8199	0.594	

La figure (III.19) présente le résultat du régime de coupe optimal pour une désirabilité égale à 0.62

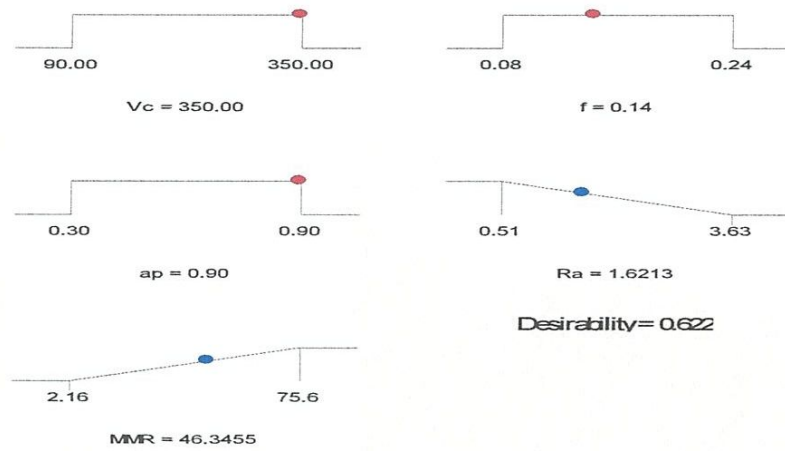


Figure.III.19. Résultat optimales pour une optimisation combinée.

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.622), figure (III.20). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation (Ra , minimisé, MRR , maximisé).

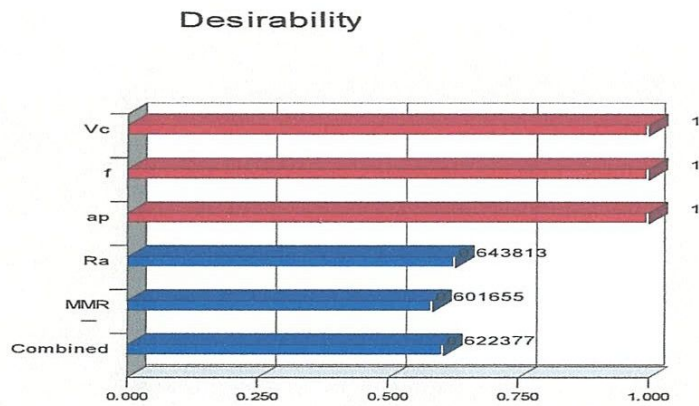


Figure.III.20. Valeur de la désirabilité pour une optimisation combinée.

III.6.3.1. La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (III.21), présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p).

L'analyse des résultats de cette figure montre qui avec la combinaison des paramètres de coupe (V_c et a_p), (V_c et f), on peut avoir facilement ce la valeur de la désirabilité.

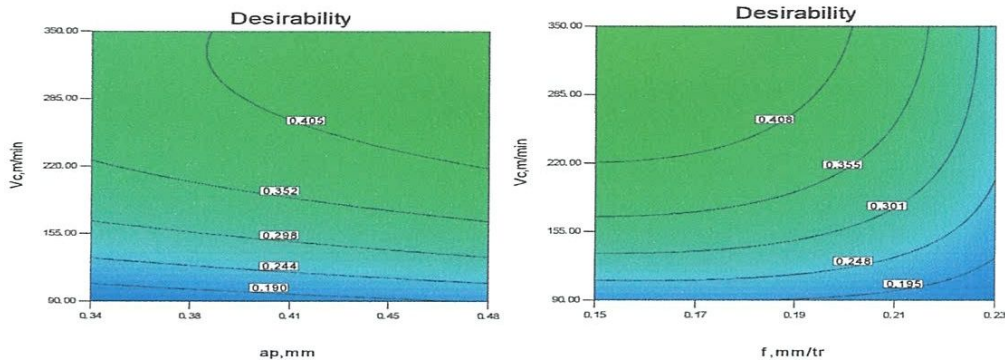


Figure.III.21. Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe de (R_a , min et MRR , max)

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie de surface de réponse (MSR) en tournage de l'acier inoxydable (X2CrNi18-9) avec le carbure revêtu (GC2015) a permis d'obtenir des modèles mathématiques pour la rugosité (R_a), les efforts de coupe (F_c), le débit de copeau (MRR), et la puissance de coupe (P_c). Les valeurs optimales des condition d'usinage ont été étudiées et déterminées en utilisant la la fonction de désirabilité.

L'optimisation en été réalisée suivant trois cas :

- rugosité minimale
- Productivité maximale
- combinée (multi - objective)

Chapitre IV

*Modélisation L'ANN et comparaison
entre ANN et RMS*

IV.1. Introduction

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspiré du fonctionnement de vrais neurones (humains ou animal). Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistique, si bien qu'ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de générer de vastes espaces fonctionnels souples et partiellement structurés, et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel [27].

IV.2. Les composants d'un ANN

Un réseau de neurones artificiels est composé d'un ensemble des neurones. Un neurone artificiel est une unité de calcul qui reçoit un certain nombre d'entrées en provenance directe de l'environnement ou de neurones amont. Lorsque l'information est issue d'un neurone, on lui associe un poids W (abréviation de weight, poids en anglais) qui représente la capacité du neurone amont à exciter ou inhiber le neurone aval. Chaque neurone est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. Ils sont arrangés par couche et sont connectés avec ceux de la couche suivante. Pour résumer, chaque neurone calcule une sortie unique en se basant sur les informations qui lui sont données. La figure (IV.1) montre la composition d'un neurone artificiel.

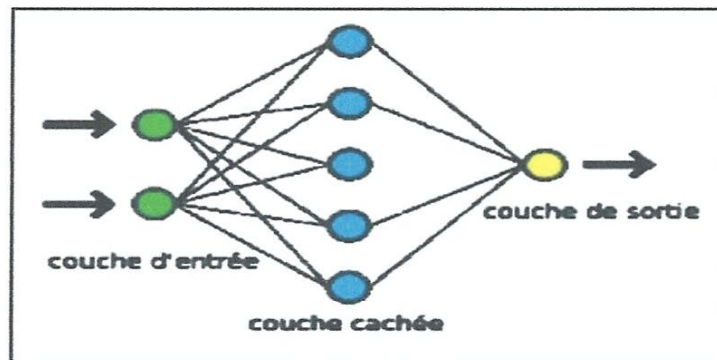


Figure.IV.1. Composition d'un neurone artificiel

Un neurone artificiel est donc composé de: figure (IV.2)

- Un ensemble de **valeurs d'entrée** $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ discrètes $\{0, 1\}$ ou réelles $[-1, 1]$.
- Un ensemble de **poids réels** $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ entre les neurones.
- Une fonction de sommation Σ qui calcule la **somme pondérée** (sous-entendu pondérée par les poids) des entrées :

$$(X_1 \times W_1) + (X_2 \times W_2) + \dots + (X_n \times W_n) \quad (\text{IV.eq.1})$$

- Un biais b associé au neurone.
- Une fonction d'activation f qui calcule l'activité / l'état du neurone à partir de cette somme : $f(x)$
- et enfin une sortie Y .

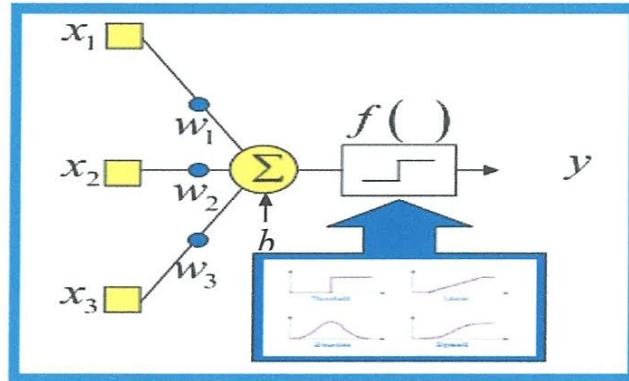


Figure.IV.2. Arrangement logique d'un neurone [28]

Pour le neurone suivant :

$$X = [x_L, x_2, \dots, x_R]^T \text{ et } W = [w_{L,L}, w_{L,2}, \dots, w_{L,R}]$$

$$w_{1,1} x_1 + w_{1,2} x_2 + \dots + w_{1,j} x_R + b = \mathbf{Wx} + \mathbf{b} \quad (\text{IV.eq.2})$$

La sortie Y est alors de la forme :

$$Y = f(\mathbf{Wx} + b) \quad (\text{IV.eq.3})$$

Le neurone en tant qu'unité élémentaire agit de la façon suivante :

- **1^{ère} phase** : Le neurone fait le calcul de la somme pondérée des entrées (en fonction de la force des connexions). apprentissage ayant été réalisé auparavant, le poids des connexions est ici déjà déterminé et fixe.
- **2^{ème} phase** : À partir de la valeur obtenue, une fonction d'activation ou de transfert va calculer la valeur de l'état du neurone. Le neurone compare la somme pondérée des entrées à une valeur de seuil et fournit alors une réponse en sortie.

Une couche de neurones peut être représentée par le schéma et la relation de la figure (IV.3) ci-dessous :

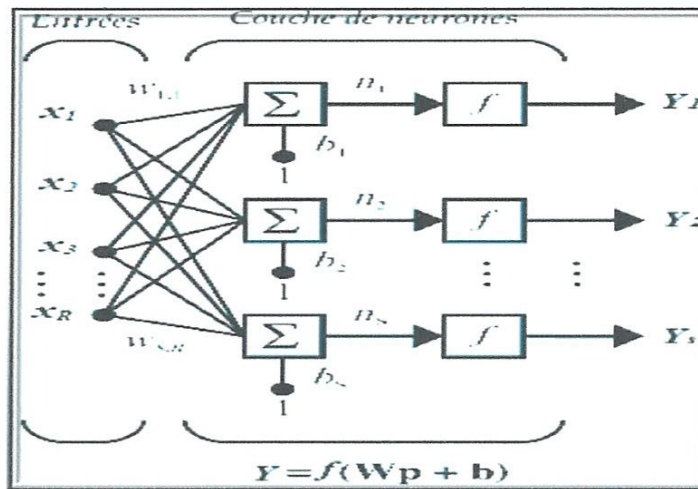


Figure.IV.3. Schéma d'une couche de neurones [29]

Les fonctions de transfert (fonction d'activation) déterminent la valeur de l'état du neurone qui sera transmise aux neurones avants. Il existe de nombreuses fonctions de transfert possibles [31], les plus utilisées sont présentées sur la figure (IV.4). Elles peuvent prendre une infinité de valeurs comprises dans l'intervalle [-1 ; +1].

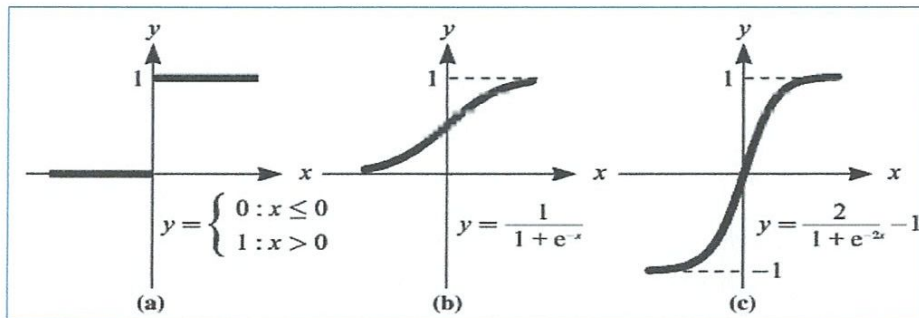


Figure.IV.3. Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones (a) : fonction seuil, (b) tangente sigmoïde, (c) tangente hyperbolique [30].

IV.3. apprentissage

L'apprentissage est la propriété la plus intéressante des réseaux neurone, elle est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées durant l'apprentissage sont les poids des connexions W_i . C'est cette modification qui permet d'accorder la réponse du réseau aux exemples qu'on lui soumet (par exemple reconnaître une croix). Il adapte la force de ses connexions soit en comparant le résultat qu'il a calculé et la réponse qu'on attend de lui (**apprentissage supervisé**), soit en

détectant les régularités statistiques des entrées (**apprentissage non-supervisé**). A l'issu de l'apprentissage, les poids sont fixés : c'est alors la phase d'utilisation (le réseau sait reconnaître une croix même si elle est bruitée ou détériorée). La méthode la plus utilisée lors de l'apprentissage est la **rétropropagation** : on entre des valeurs dans les cellules d'entrée et en fonction de l'erreur obtenue en sortie (le delta), on corrige les poids accordés aux pondérations. C'est un cycle qui est répété jusqu'à ce que la courbe d'erreurs du réseau ne soit croissante.

IV.4. Le perceptron

Un réseau de neurones monocouche, aussi appelé perceptron, est caractérisé de la manière suivante [31].

- Il possède n informations en entrée.
- Il est composé de p neurones, que l'on représente généralement alignés verticalement. Chacun peut en théorie avoir une fonction d'activation différente.
- Chacun des p neurones est connecté aux n informations d'entrée.

Le réseau de neurones possède ainsi n informations en entrée et p sorties, chaque neurone renvoyant sa sortie figure (VI.5).

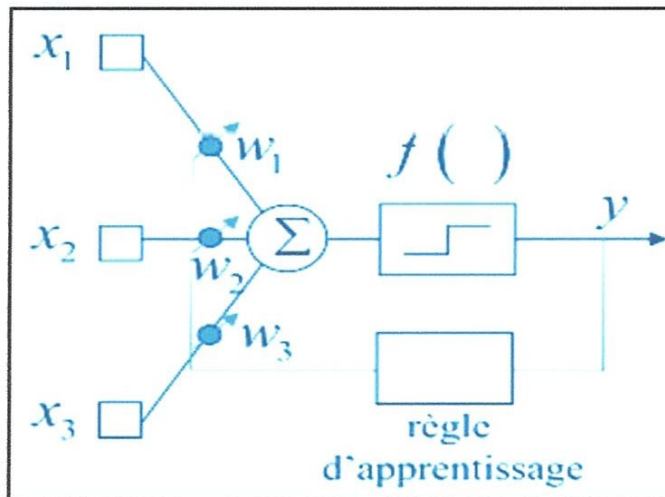


Figure.IV.5. Schéma de principe du perceptron simple [28]

On notera :

- $\mathbf{X} = (x_i)_{i=1 \dots n}$, les n informations d'entrée ;
- \mathbf{W}_{ij} : pour $i=1 \dots n$ et $j=1 \dots p$, le poids reliant l'information x_i et le neurone j puis f_j l'activation du j -ème neurone.
- b_j : le **coefficient de biais**, également appelé **seuil**, du j -ème neurone.
- \mathbf{in}_j : la donnée d'entrée (somme pondérée) du j -ème neurone.

On a donc l'équation suivante :

$$\ll \text{le } j\text{-ème neurone} \gg = g(\mathbf{in}_j) = g\left(\sum_{i=1}^n w_{ij} \times x_i\right) = \left(\sum_{i=1}^n w_{ij} \times x_i - b\right) \quad \text{(IV.eq.4)}$$

IV.5. La rétropropagation

La rétropropagation consiste à rétropropager l'erreur commise par un neurone à ses synapses et aux neurones qui y sont reliés. Pour les réseaux de neurones, on utilise habituellement la rétropropagation du gradient de l'erreur (ou back propagation en anglais) [30], qui consiste à corriger les erreurs selon l'importance des éléments qui ont justement participé à la réalisation de ces erreurs : les poids synaptiques qui contribuent à engendrer une erreur importante se verront modifiés de manière plus significative que les poids qui ont engendré une erreur marginale.

Pour comprendre cette méthode d'apprentissage, il faut définir l'erreur quadratique E . Si l'on est en présence de N exemples, alors pour $1 \leq k \leq N$, notons (\mathbf{X}_k, Y_k) le couple exemple - sortie attendue, où $\mathbf{X}_k = (x_i)_{i=1 \dots n}$ est le vecteur dont les coordonnées sont les n informations d'entrée de l'exemple et Y_k est la sortie attendue. Enfin, on note S_k la sortie obtenue pour le k -ème exemple avec les poids actuels. Alors, l'erreur quadratique est définie comme suit.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (Y_k - S_k)^2 \quad \text{(IV.eq.5)}$$

IV.6. Le taux d'apprentissage adaptatif

Le taux d'apprentissage dans les réseaux de neurones est un paramètre de contrôle de certains algorithmes d'apprentissage, contrôlant la vitesse à laquelle les pondérations sont ajustées.

IV.7. Modélisation de la rugosité de surface (Ra) et de l'effort de coupe (Fc)

basée sur les réseaux de neurones

Tableau.IV.1. Résultats expérimentaux pour (Ra et Fc)

N° Test	Les valeurs d'entrées			Les valeurs de sorties	
	Vc, m/min	f, mm/tr	Ap, mm	Ra, μm	Fc, N
1	90	0.08	0.3	0.82	92.31
2	90	0.08	0.6	0.62	131.56
3	90	0.08	0.9	0.79	208.50
4	90	0.16	0.3	1.60	130.60
5	90	0.16	0.6	1.99	214.00
6	90	0.16	0.9	1.28	366.49
7	90	0.24	0.3	3.63	195.69
8	90	0.24	0.6	3.13	330.22
9	90	0.24	0.9	2.39	538.58
10	180	0.08	0.3	0.66	74.50
11	180	0.08	0.6	1.00	147.89
12	180	0.08	0.9	0.55	217.04
13	180	0.16	0.3	1.24	128.37
14	180	0.16	0.6	1.84	217.31
15	180	0.16	0.9	1.61	325.18
16	180	0.24	0.3	3.32	190.84
17	180	0.24	0.6	3.19	346.24
18	180	0.24	0.9	3.36	497.38
19	350	0.08	0.3	0.51	90.35
20	350	0.08	0.6	0.53	127.91
21	350	0.08	0.9	1.36	177.13
22	350	0.16	0.3	1.81	130.68
23	350	0.16	0.6	1.59	170.30
24	350	0.16	0.9	1.58	300.32
25	350	0.24	0.3	3.60	159.04
26	350	0.24	0.6	3.19	300.03
27	350	0.24	0.9	3.58	429.37

IV.7.1. Modélisation de la rugosité de surface (Ra)

L'architecture adéquate pour modéliser la rugosité de surface (Ra) est (3-6-1), (figure IV.6), c.-à-d. (03) nœuds d'entrées (paramètres de coupe), (06) nœuds pour la couche cachée et (01) nœud pour la sortie (rugosité de surface). Le tableau (IV.2) présente les erreurs pour les (09) tests, le choix de la structure optimale est basé sur la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le RMSE le plus petit correspond à la structure optimale.

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

Ent Cach Sort	Training		Validation	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²
3-5-1	0.118	0.988	0.016	0.999
3-6-1	0.090	0.992	0.000046	1
3-7-1	0.162	0.972	0.0037	0.999
3-8-1	0.118	0.989	0.0074	0.999
3-9-1	0.099	0.992	0.0046	0.999
3-10-1	0.074	0.994	0.0080	0.999
3-11-1	0.083	0.994	0.0072	0.999
3-12-1	0.185	0.972	0.0050	0.999
3-13-1	0.177	0.970	0.0010	0.999
3-14-1	0.163	0.977	0.0071	0.999

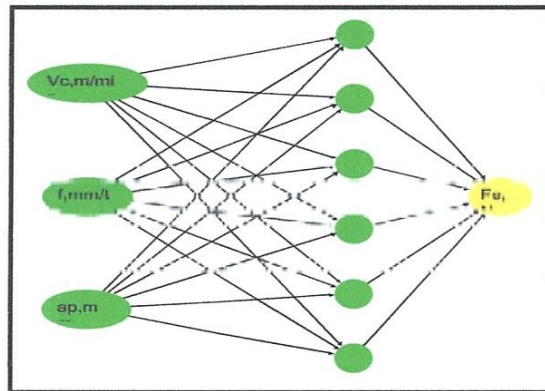


Figure.IV.6. Structure ANN pour Ra (3-6-1)

L'équation (IV.7) présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour la rugosité de surface Ra . H_1 à H_6 présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 6 neurones) de la couche cachée.

$$H1 = \tanh(0.5*(23.945e-4*Vc + 48.487*f + 80.822e-2*ap - 10.451)).$$

$$H2 = \tanh(0.5*(25.245e-2*Vc - 39.633*f + -8.061*ap + 7.893)).$$

$$H3 = \tanh(0.5*(-21.801e-3*Vc + 5.708*f + 7.255*ap + 2.118)). \quad (\text{IV.eq.6})$$

$$H4 = \tanh(0.5*(64.672e-4*Vc + 6.505*f + -1.336*ap + -2.551)).$$

$$H5 = \tanh(0.5*(29.279e-3*Vc + 26.600*f + -10.162*ap + -5.143)).$$

$$H6 = \tanh(0.5*(40.e-4*Vc + -29.467*f + -7.513*ap + 9.298)).$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de la rugosité de surface Ra .

$$Ra = 0.646*H1 - 0.813*H2 + 1.034*H3 + 4.170*H4 - 0.602*H5 + 0.699*H6 + 3.126. \quad (\text{IV.eq.7})$$

Où :

Le coefficient de détermination $R^2=99.6 \%$

Le tableau (IV.3), présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) :

Tableau.IV.3. (R^2) et RMSE du modèle de la rugosité de surface (R_a)

Apprentissage		Validation	
Ra	Mesures	Ra	Mesures
R^2	0,992	R^2	1,00
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,090	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,000046
Somme fréquences	22	Somme fréquences	5

La figure (IV.7), présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de la rugosité de surface R_a s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de la rugosité de surface est adéquat. Les coefficients de corrélations ($R^2 = 0,992$) pour l'apprentissage et ($R^2 = 1,00$) pour la validation présentent 99.2% et 100% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

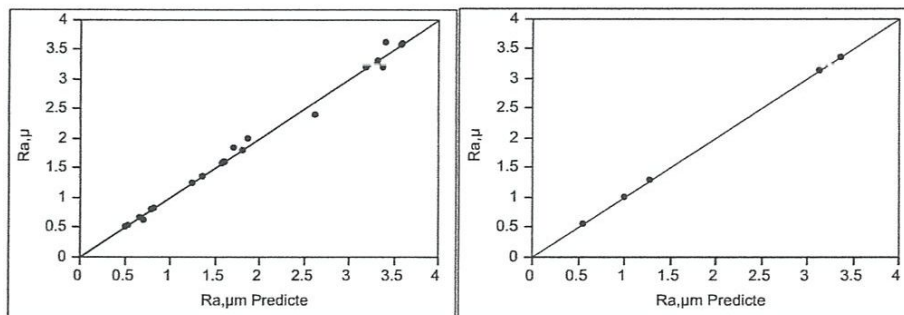


Figure.IV.7. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (R_a)

IV.7.1.1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de la rugosité de surface (R_a) et celles estimées par le modèle mathématique obtenu par la méthode des réseaux de neurones, est présentée graphiquement sur les figures (IV.8). L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

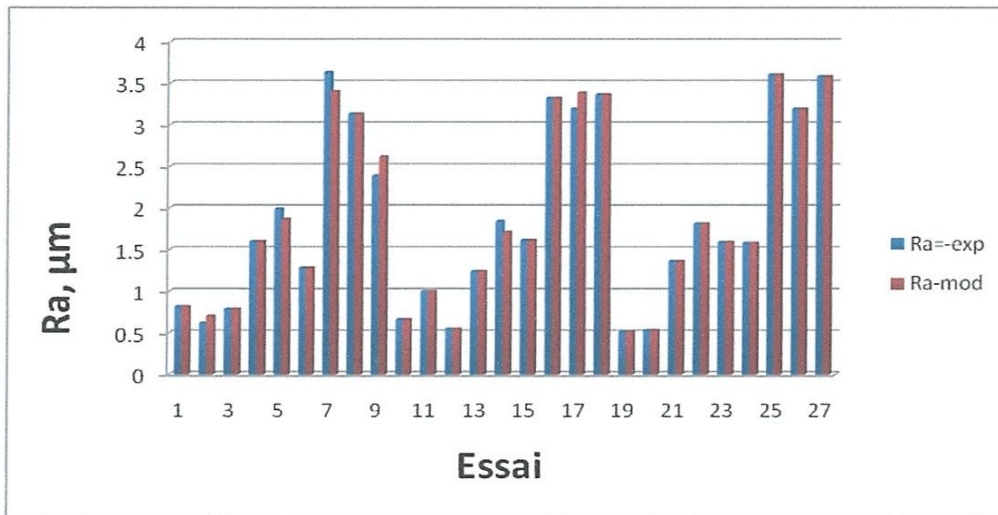


Figure.IV.8. Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de la rugosité (Ra)

III.7.2. Modélisation de l'effort de coupe (F_c)

La figure (IV.9), expose l'architecture adéquate pour modéliser l'effort de coupe (F_c), la structure choisie est (3-6-1), figure (IV.9) c.-à-d. (03) nœuds d'entrées (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), (06) nœuds pour la couche cachée et (01) nœud pour la sortie (effort de coupe). Le tableau (IV.4), présente les erreurs pour les (09) tests, la structure optimale a été choisie basé sur le plus petit RMSE.

Tableau.IV.4. Performance des structures ANN du modèle de (F_c)

Ent_Cach_Sort	Training		Validation	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²
3-5-1	5.251	0.996	0.120	0.999
3-6-1	6.315	0.996	0.00000001	1
3-7-1	7.015	0.995	0.330	0.999
3-8-1	3.813	0.999	0.472	0.999
3-9-1	6.088	0.997	0.394	0.999
3-10-1	7.583	0.996	0.144	0.999
3-11-1	5.365	0.997	0.053	0.999
3-12-1	7.463	0.995	0.062	0.999
3-13-1	6.720	0.996	0.096	0.999
3-14-1	3.469	0.998	0.257	0.999

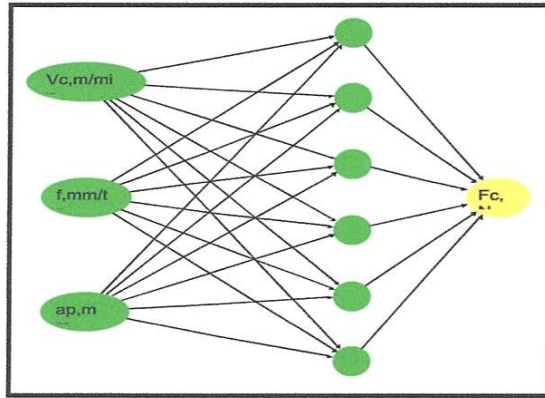


Figure.IV.9. Structure ANN pour (Fc) (3-6-1)

L'équation (IV.9) présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour l'effort de coupe (Fc). H_1 à H_6 présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 6 neurones) de la couche cachée.

$$H1 = \tanh(0.5*(79.586e-3*Vc + 12.246*f - 51.691e-2*ap - 18.319)).$$

$$H2 = \tanh(0.5*(56.356e-4*Vc - 17.682*f - 13.296*ap + 6.331)).$$

$$H3 = \tanh(0.5*(-48.032e-3*Vc + 14.254*f + 2.593*ap + 2.043)).$$

$$H4 = \tanh(0.5*(20.310e-4*Vc + 23.953*f + 7.222*ap - 11.053)).$$

$$H5 = \tanh(0.5*(13.227e-3*Vc - 64.343*f + 16.862*ap - 3.235)). \tag{IV.eq.8}$$

$$H6 = \tanh(0.5*(25.6-3*Vc + 15.510*f + 5.403*ap - 8.527)).$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de l'effort de coupe (Fc).

$$Fc = -31.9*H1 - 23.7*H2 + 34.18*H3 + 165.75*H4 - 10.8*H5 + 64.12*H6 + 290.34. \tag{IV.eq.9}$$

Où : Le coefficient de détermination $R^2=100 \%$

Les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) sont présentés dans le tableau (IV.5):

Tableau.IV.5. R^2 et RMSE du modèle de l'effort de coupe (Fc)

Apprentissage		Validation	
Fc	Mesures	Fc	Mesures
R^2	0,996	R^2	1
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	6.315	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	$1.23e-9$
Somme fréquences	22	Somme fréquences	5

La figure (IV.10) présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation) pour l'effort de coupe (F_c). Les valeurs de l'effort de coupe s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique est adéquat. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0.996$ pour l'apprentissage et ($R^2 = 1$) pour la validation présentent 99.6% et 100% de variation de la réponse expliquée par le modèle.

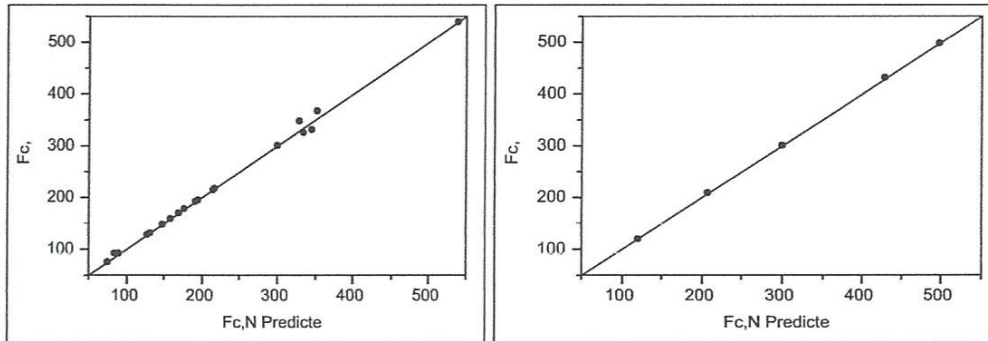


Figure.IV.10. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (F_c)

IV.7.2.1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'effort de coupe (F_c), et celles estimées par le modèle mathématique obtenu par la méthode des réseaux de neurones, est présentée graphiquement sur la figure (IV.11). L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

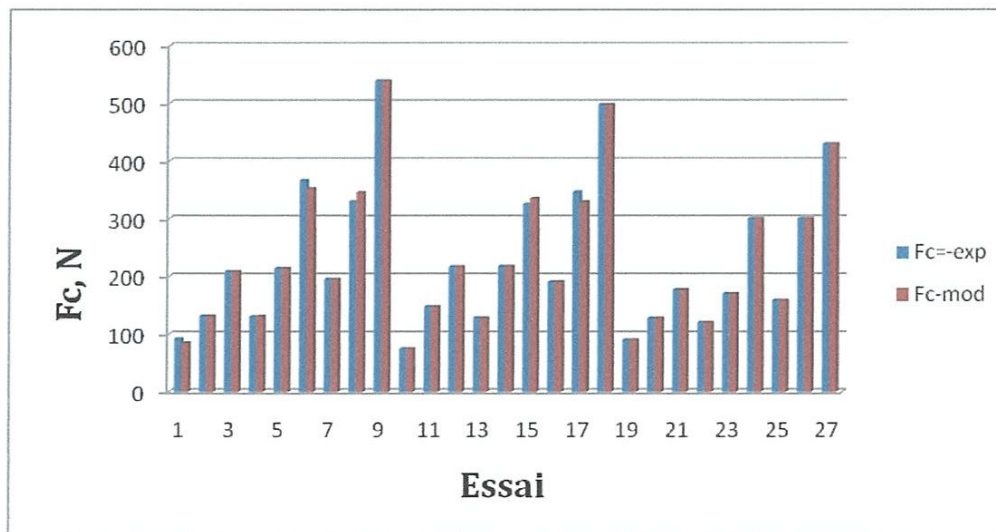


Figure.IV.11. Comparaison des valeurs expérimentales et estimées de l'effort de coupe

IV.8. Comparaison entre les modèles ANN et RMS

Le tableau (IV.5) expose les coefficients de détermination des deux méthodes utilisées pour la modélisation de F_c et R_a 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 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.12 et IV.13) 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 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.5. Coefficients de corrélation pour RSM et ANN

	Coefficient de détermination %	
	<i>RSM</i>	<i>ANN</i>
effort (F_c)	99.34	99.6
Rugosité (R_a)	95.66	99.2

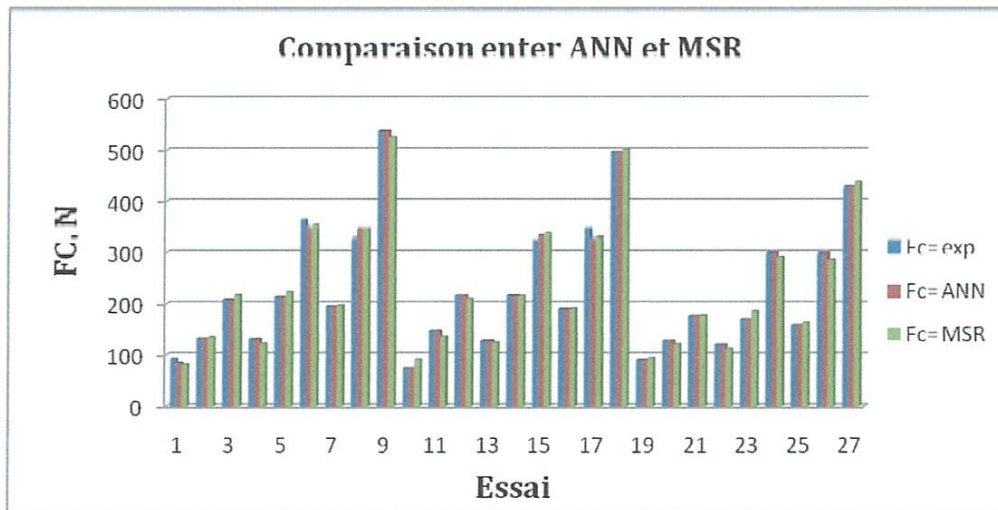


Figure.IV.12. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par RSM et ANN pour l'effort de coupe (F_c)

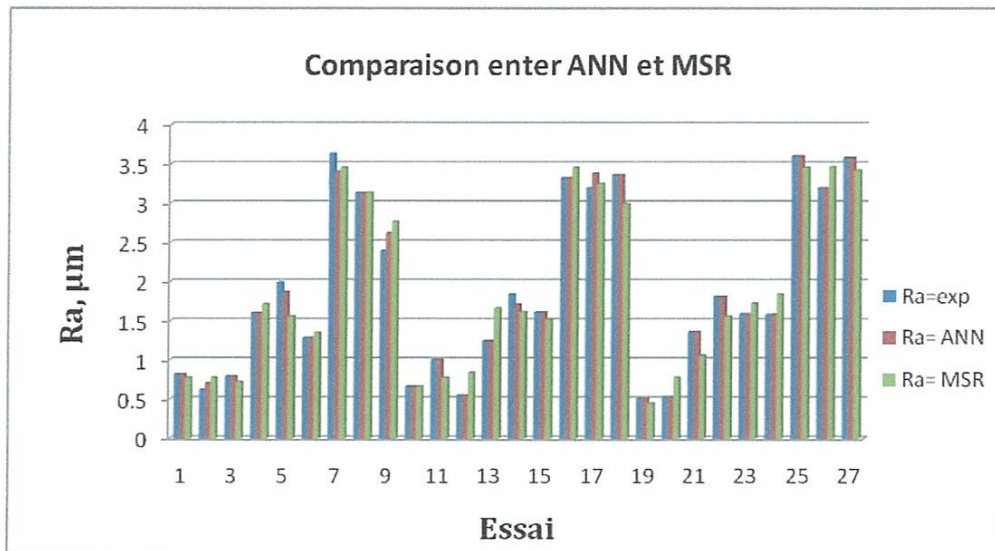


Figure.IV.13. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par RSM et ANN pour la rugosité (Ra)

IV.9. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a utilisé la méthode de réseau de neurones artificiels pour modéliser l'effort de coupe et la rugosité de la surface usinée pour un plan complet L27. 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 conduit à conclure que la méthode ANN est plus robuste et plus fiable par rapport à la méthodologie de la surface de réponse.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude du comportement du Carbure métallique (GC2015) avec le revêtement CVD lors du tournage à sec de l'acier inoxydable (X2CrNi18-9), nous a permis d'une de mettre en évidence l'impact des paramètres de coupe l'avance par tour (f), vitesse de coupe (V_c) et profondeur de passe (a_p), sur les efforts de coupe (F_c), les puissance de coupe (P_c), et le débit de copeau (MRR), la rugosité des surfaces usinées (R_a). Le traitement des résultats à été fait par l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de la surface de réponse (RSM) et le réseau de neurones artificiels (ANN). Les valeurs optimales des paramètres d'usinage ont été étudiées et calculées. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- ❖ L'analyse des paramètres d'usinage permet d'étudier l'influence de chacun des paramètres de coupe sur l'amélioration des paramètres de sortie du processus de coupe, tels que le critère de rugosité, débit de copeau et les l'effors de coupe, la puissance de coupe.
- ❖ Cette étude montre que l'avance par tour (f) a une influence statistique significative sur la rugosité de surface avec une contribution de 89.69%, et les termes quadratiques aussi (f^2 avec 3.02%). L'analyse indique que l'effet de la vitesse de coupe (V_c) sur la rugosité R_a est faible.
- ❖ les analyse des résultats montre que l'effort de coupe (F_c) est influencé par la profondeur de passe (a_p), avec une contribution de (45.46%) suivie par l'avance (f) avec (39.03%) et la vitesse de coupe avec (1.32%) L'interaction ($f * a_p$) a une contribution de 6.79%.
- ❖ La puissance de coupe augmente par l'augmentation des différents paramètres de coupe (V_c , a_p et f) avec une influence significative sur (39.32%), (27.5%) et (23.18%) respectivement.
- ❖ le débit de copeau est influencé par la vitesse de coupe de (32.34%) et l'avance par tour (25.56%) et la profondeur de passe (25.56%). L'augmentation de ces paramètres permet d'augmenter le débit de copeau.
- ❖ Les modèles proposés permettent d'obtenir des approximations des différents paramètres de sortie étudiés qui sont en bonne concordance avec les valeurs obtenues expérimentalement.

Conclusion générale

- ❖ L'optimisation des paramètres de coupe par l'application du logiciel **Design-expert** a permis l'obtention d'une combinaison optimale des paramètres de coupe ($V_c=350\text{m/min}$, $f=0.14\text{mm/tr}$ et $a_p=0.9\text{mm}$). Ce régime de coupe permet, dans notre cas d'étude, un débit de copeaux maximal et une rugosité de surface minimale.
- ❖ L'utilisation des réseaux de neurones artificiels a permis de modéliser la rugosité de surface et de l'effort de coupe avec des coefficients de détermination proche de 1.
- ❖ La comparaison entre les deux méthodes (RSM et ANN) a permis de conclure que la méthode ANN est plus robuste et plus précise par rapport à la méthode de surface de réponse.

Références Bibliographiques

- [1] Tarek BRAHAM BOUCHNAK : étude de comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique, thèse de doctorat, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, (2010) pp : 11
- [2] TROMBERT **Christian**; Usinabilité des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur M726-2.
- [3] Fabrication Mécanique, chapitre.PDF <http://www.umc.edu.dz>
- [4] M. Tchadja KAGNAYA ; contribution à l'identification des mécanismes d'usure d'un wc-6%co en usinage et par une approche tribologique et thermique , thèse de doctorat , École doctorale n°.432 Sciences des Métiers de l'Ingénieur, (2009) pp : 16
- [5] TROMBERT **C.**; Usinabilité des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur M726.
- [6] CUNAT **P.**; Aciers inoxydables "Mise en œuvre", Techniques de l'ingénieur M4542.
- [7] **Sebhi Amar**, Présentée à l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision Pour l'obtention du diplôme de, univ sétif, 2013.
- [8] **BELHADI Salim**, étude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie, univ Annaba, 2009.
- [01] **François BAGUR**, *Matériaux pour outils de coupe*, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7 080.
- [A02] <http://quoy25.pagesperso-orange.fr/USINAGE/principes/principes.htm>
- [A03] <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/24626/ch02.html>
- [A04] http://analyse-fabrication.univ-lille1.fr/co/chapitre_2_2_2_1.html
- [A05] <http://www.machine-outil.com/actualites/t346/a6232-usiner-safetypramet.html>
- [A06] <http://www.directindustry.fr/prod/walter/product-5602-1479553.html>
- [A07] **Berkani Sofiane**, étude Statistical analysis of AISI304 austenitic stainless steel machining using Ti (C, N)/Al₂O₃/TiN CVD coated carbide tool. univ Guelma (2015).
- [A08] http://www.memoireonline.com/07/09/2326/m_Etude-des-efforts-de-coupe-et-de-la-rugosite-lors-de-lusinage-du-PE80-2.html

- [9] François BAGUR , Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'ingénieur, BM7 080 – 1
- [10] SandvikCoromant
http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H..PDF
- [11] Fabrication mécanique, licence et technologie et mécanique, Université de la Réunion <http://tice2.univ-reunion.fr>
- [12] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [13] Archive multilingue, Actionnées par WorldLingo
http://www.multilingualarchive.com/ma/frwiki/fr/État_de_surface#Rugosit.C3.A9
- [14] Etude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80
<http://www.memoireonline.com>
- [15] **CARSTEN S.**; Tool Wear Prediction and Verification in Orthogonal Cutting, Institute of Machine Tools and Production Science University of Karlsruhe (2003), pp. 22.
- [16] **Berkani, Sofiane**, et al. "Statistical analysis of AISI304 austenitic stainless steel machining using Ti (C, N)/Al₂O₃/TiN CVD coated carbide tool." *International Journal of Industrial Engineering Computations* 6.4 (2015): 539-552.
- [17] Kara, F., K. Aslantas, and A. Çiçek. "ANN and multiple regression method-based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel." *Neural Computing and Applications* 26.1 (2015): 237-250.
- [18] Nayak, Shreemoy Kumar, et al. "Multi-objective optimization of machining parameters during dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using grey relational analysis." *Procedia Materials Science* 6 (2014): 701-708.
- [19] **Lin T.R., Shyu R.F.**, Improvement of tool life and exit burr using variable feeds when drilling stainless steel with coated drills, *Advanced Manufacturing Technology*, (2000) 16 pp. 308-313.
- [20] **Neo K.S., Rahman M., Li X.P., Khoo H.H., Sawa M., Maeda Y.**, Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel, *Journal of Material Processing Technology*, 140 (2003) pp. 326–331.
- [21] M.A. Yallese, Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Thèse de doctorat, (2005).

- [22] G. Taguchi, S. Konishi, Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graph, tools for quality engineering. American supplier institute, pp. 35-38, (1987).
- [23] **Ciftci I.** Machining of austenitic stainless steels using CVD multilayer coated cemented carbide tools, Tribology International 39, pp. 565–569 (2006).
- [24] **Senthil k, Raja D, Sornakumar T.** The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, 173, pp. 151–156(2006).
- [25] **Bruni C, Forcellese A, Gabrielli F, Simoncini M.** Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420b, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, pp. 1547–1554(2006).
- [26] **Noordin M.Y, kurniawan D, sharif S.** Hard turning of stainless steel using wiper coated carbide tool, Int. J. Precision Technology, vol. 1, no. 1, (2007).
- [27] http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_neurones_artificiels/01/04/2015.
- [28] **Patrice W.** Réseaux de neurones artificiels : architectures et applications, Université de Haute Alsace Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes) Avril (2009).
- [29] **Math Works.** Inc, matlabR 2007a, (2007)
- [30] **Davim JP.** Machining of hard materials. Springer, vorlaglondon limited. ISBN 987-1-84996-449-4 (2011).
- [31] <http://alp.developpez.com/tutoriels/intelligence-artificielle/reseaux-de-neurones> 30/03/2015.

Nomenclatures

V_c	Vitesse de coupe [m/min].
f	Avance par tour [mm/tr].
a_p	Profondeur de passe [mm].
F_c	Effort de coupe tangentiel [N].
MRR	Volume de copeau enlevé (Débit de copeau) [cm ³ /min]
P_c	Puissance de coupe [kW]
K_c	Effort spécifique (Pression de coupe) [MPa] ou [N/mm ²]
HB	Dureté Brinell
HRC	Dureté Rockwell
R_a	Rugosité moyenne arithmétique [μ m].
r_ϵ	Rayon de bec de l'outil [mm].
χ_r	Angle de direction principal [°].
α	Angle de dépouille principal [°].
β	Angle de tranchant [°].
γ	angle d'attaque [°].
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [°].
R^2	Coefficient de détermination
A	Section du copeau [mm ²]