

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



Mémoire de fin d'étude

Présenté par : MERAH Salah

Master

Option : Maintenance Industrielle

=====

*Modélisation des paramètres technologique d'usinage
lors du fraisage de face en utilisant les méthodes RMS et
ANN*

=====

Sous la direction de : Pr. yallesc.M.A

Dr. Bouchrite.S

Année universitaire 2016/2017

DEDICACE

J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents et ma femme en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

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

© *A mes parents.*

© *Mon encadreur Pr. Yaltese.M.A*

Dr. Bouchrte.S



© *A Mon frère, et Ma sœur, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

© *A toute ma famille merah et selloui*

© *A tous mes Amis sans exception.*

© *A tout le groupe M.I ainsi que les étudiants de Guelma*

Merah Salah



Remerciement

A la fin de ce projet nous tenons à remercier

*Le bon Dieu qui nous a donné la patience, le courage d'achever ce travail
malgré toutes les difficultés.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur : Pr. Yaltese.M.A
Qui aux géré avec compétence, et efficacité le déroulement*

De notre travail et qui nous a bien orienté,

Pour son aide précieuse et ses conseils

Judicieux,

Nous tenons également à remercier

Toutes les personnes qui ont contribué à notre formation

*Toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin tout long
de ce travail.*

Merah Salah

Sommaire

Chapitre I : Etude bibliographique.....	09
I-1-Introduction	10
I-2-Définition de l'usinabilité.....	10
I-3-Usinabilité des matériaux	11
I-3-1 Aciers.....	11
I-3-1-1 Aciers doux < 550 Mpa	11
I-3-1-2 Aciers de construction et aciers au carbone < 850 Mpa.....	11
I-3-2 Aciers inoxydables	12
I-3-2-1 Les aciers inoxydables ferritiques de décolletage	12
I-3-2-2 Aciers austénitiques	12
I-3-3 Fonte	12
I-3-3-1 Fonte grise (fonte à graphite lamellaire).....	12
I-4-1 Définition.....	13
I-4-2 Mode de fraisage	14
I-4-3 Types de fraiseuse (Ancienne classification)	14
I-4-3-1 Fraiseuse horizontale	14
I-4-3-2 Fraiseuse verticale	15
I-4-3-3 Fraiseuse universelle.....	15
I-4-4 Les procédés de fraisage.....	15
I-4-4-1 Le fraisage en bout	15
I-4-4-2 Le fraisage en roulant	16

I-4-5 Les paramètres de coupe.....	16
I-4-5-1 La vitesse de coupe.....	16
I-4-5-2 vitesse d'avance « <i>V_f</i> »	17
I-4-5-3 La profondeur de passe (<i>ap</i>)	17
I-4-5-4 L'épaisseur de copeaux maximale (<i>hex</i>) en [mm]	17
I-4-5-6 La profondeur de coupe axiale (<i>ap</i>) en [mm]	18
I-4-5-7 La largeur de coupe radiale (<i>ae</i>) en [mm].....	18
I-4-5-8 Le débit copeaux (<i>Q</i>) en [mm ³ /min]	18
I-4-6 fraisages en opposition et en avalant	18
I-4 6-1 fraisages en opposition.....	18
I-4 6-2 fraisages en avalant	19
I-4-7 Quelques types de fraises et utilisations	20
I-5- Matériaux de coupe	21
I-5-1 Sélections des matériaux de coupe	21
I-5-2 Définitions des principaux types de matériaux pour outils de coupe	22
I-5-2-1 Aciers rapides	22
I-5-2-2 Carbures métalliques	22
I-5-2-3 Carbures micro-grain	23
I-5-2-4 Aciers et carbures revêtus	23
I-5-2-5 Cermets	23
I-5-2-6 Céramiques	24
I-5-2-7 Nitrure de bore cubique (<i>CBN</i>).....	24
I-5-2-8 Diamant polycristallin (<i>DP ou PCD</i>)	25

I-6- Effort de coupe lors du fraisage	25
I-6-1 Définition et intérêt de leur mesure	25
I-7-Rugosité de surface	26
I-7-1 Généralités sur les états de surface	26
I-7-1-1 Ra: rugosité moyenne du profil	27
I-7-1-2 Rz: hauteur de profil maximum.....	28
I-7-1-3 Rt: hauteur de profil total.....	28
I-7-1-4 Fraisage /surfaçage axial (effet de la forme des plaquettes).....	29
Fig -I-20 : Fraisage /surfaçage radial	29
I-7-1-5 Fraisage /surfaçage radial	29
I-8- Usure des outils	30
I-8-1 Types et cause d'usures.....	31
I-8-1-1 Usure en dépouille	32
I-8-1-2 Usure en cratère	32
I-8-1-3 Déformation plastique	32
I-8-1-4 Écaillage	32
I-8-1-5 Usure en entaille	33
I-8-1-6 Usure en peigne	33
I-9-Formation de copeaux	33
I-9-1 Mode de formation de copeaux	33
I-9-2 Épaisseur maximum des copeaux	34
I-9-3 L'amincissement des copeaux autorise une augmentation de l'avance.....	34
I-9-4 Plaquettes à arêtes rectilignes	35

Fig- I-25 : Plaquettes à arêtes rectilignes.....	35
I-9-5 Fraises à plaquettes rondes ou à grand rayon	35
I-10-Travaux de recherche en Fraisage	36
I-11 Conclusion	49
Chapitre II : Moyens utilisés et programme d'expérience.....	50
II-1-INTRODUCTION:	51
II-2-MOYENS UTILISEES:	51
II-2-1/ Machine-outil:.....	51
II-2-2- Matériau usiné:.....	52
II-2-3- Outil de coupe:.....	56
II-3- EQUIPEMENTS DE MESURE UTILISÉS :	58
II-3-1-Rugosimètre:.....	58
II-3-2- Microscope pour la mesure de l'usure:.....	58
II-3-3-Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe:.....	59
II-4- Planification des expériences:.....	60
II-4-1- Introduction:.....	60
II-4-2- Méthode multifactorielle:.....	61
Chapitre III: modélisation du processus de fraisage en utilisant (RMS).....	63
III-1 Introduction.....	64
III-2 Résultats expérimentaux	64
III-3 Analyse des résultats de la rugosité (<i>Ra</i>).....	65
III-3-1 Analyse de la variance (ANOVA) pour (<i>Ra</i>)	65
III-3-2 Graphes des effets moyens et des interactions	66

III-3-3	Equation de régression pour le critère de rugosité (Ra)	69
III-3-4	Diagrammes de surfaces 3D et Graphiques de Contour	69
III-3-5	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	73
III-4	Analyse des résultats de l'effort de coupe (F_c)	73
III-4-1	Analyse de la variance (ANOVA) pour (F_c).....	73
III-4-2	Graphes des effets moyens et des interactions	74
III-4-3	Equation de régression pour l'effort de coupe (F_c).....	77
III-4-4	Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour	77
III-4-5	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	78
III-5	Analyse des résultats de la pression spécifique de coupe (K_s).....	81
III-5-1	Analyse de la variance (ANOVA) pour (K_s).....	81
III-5-2	Graphes des effets moyens et des interactions	82
III-5-3	Equation de régression pour le critère (K_s)	85
III-5-4	Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour	85
III-5-5	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	89
III--6	Analyse des résultats de la puissance de coupe (P_c).....	89
III-6-1	Analyse de la variance (ANOVA) pour (P_c).....	89
III-6-2	Graphes des effets moyens et des interactions	90
III-6-3	Equation de régression pour la puissance de coupe (P_c).....	93
III-6-4	Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour	93
III-6-5	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	97
III-7	Analyse des résultats de volume de copeau enlevé (VCE).....	97
III-7-1	Analyse de la variance (ANOVA) pour le volume de copeau enlevé (VCE).....	97

III-7-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	98
III-7-3 Equation de régression pour le volume du copeau enlevé (<i>VCE</i>)	101
III-7-4 Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour	101
III-7-5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	105
III-8 Conclusion.....	105
Chapitre IV: Application de l'approche des réseaux de neurones artificiels (<i>ANN</i>).....	107
IV.1 Modélisation par la méthode des réseaux de neurone artificiels (<i>ANN</i>)	108
IV.1.1 Introduction	108
IV.1.2 Les composants d'un (<i>ANN</i>)	108
IV.1.3 Réseau de neurones artificiel	108
IV.1.4 L'apprentissage.....	111
IV.1.5 Le perceptron	111
IV.1.6 La rétro-propagation	112
IV.1.7 Le taux d'apprentissage adaptatif	112
IV.2 Modélisation de la rugosité de surface (<i>Ra</i>) par un réseau de neurones artificiel (<i>ANN</i>).....	112
IV.3 Modélisation de l'effort de coupe (<i>Fc</i>) par un réseau de neurones artificiel (<i>ANN</i>)	116
IV.4 Modélisation de la pression spécifique de coupe (<i>Ks</i>) par un réseau de neurones artificiel (<i>ANN</i>).....	119
IV.5 Modélisation de la puissance de coupe (<i>Pc</i>) par un réseau de neurones artificiel (<i>ANN</i>).....	121
IV.6 Modélisation du volume du copeau enlevé (<i>VCE</i>) par un réseau de neurones artificiel (<i>ANN</i>)	124

IV.7 Comparaison entre les modèles (<i>ANN</i>) et (<i>RMS</i>).....	126
VI.8. Conclusion.....	133
Conclusion générale.....	136
Références bibliographiques.....	138

LISTE DES FIGURES

	Page
Chapitre I:	09
Fig-I-1: Vue en coupe d'une plaquette en carbure cémenté usinant un acier. Température en degrés Celsius.....	11
Fig-I-2 : Fraiseuse à commande numérique.....	14
Fig- I-3 : Fraiseuse horizontale.....	15
Fig- I-4 : Fraiseuse verticale	15
Fig- I-5 : Fraiseuse universelle	15
Fig- I-6 : fraisage en bout.....	16
Fig- I-7 : fraisage en roulant	16
Fig- I-8 : Les paramètres de coupe	16
Fig- I-9 : Valeur de la profondeur ap maxi autorisée	17
Fig- I-10 : fraisage en opposition	18
Fig- I-11 : fraisage en avalant	19
Fig- I-12 Quelques types de fraises et utilisations.....	21
Fig- I-13 : Composantes de l'effort de coup	26
Fig- I-14 : mesure de rugosité.....	27
Fig- I-15 : critères de rugosité.....	27
Figure-16 : Ra: rugosité moyenne du profil	28
Fig- I-17: Rz: hauteur de profil maximum	28

Fig- I-18 : Rt: hauteur de profil total du profil R.....	29
Fig- I-19: Fraisage/surfaçage axial	29
Fig -I-20 : Fraisage /surfaçage radial.....	29
Fig- I-21 : Courbe (θ° , T[min]),.....	30
Fig- I-22 : Courbe (θ° , T[min]).....	31
Fig- I-23 : Influence de la lubrification	31
Fig- I-24 : formation de copeaux	34
Fig- I-25 : Plaquettes à arêtes rectilignes	35
Fig- I-26 : Fraises à plaquettes rondes ou à grand rayon	36
Fig. 1: Modèle de structure réseau avec une seule couche cachée	38
Fig. 2. Modèle de structure réseau avec deux couches cachées.	39
Fig.3. La partie de moule fraisée et le processus de fraisage.	40
Fig. 4. Les pièces obtenues par usinage. (a) Produit en matière plastique; (b) pièce moulée sous pression.....	40
Fig. 5. Illustration du processus de fraisage fin.....	41
Fig. 6. Illustration haut et Bas du Procédés de fraisage.....	41
Fig. 7: Architecture de réseaux neuronaux sélectionnée	45
Fig .8: Fixation de la plaque en acier inox AISI 304 à l'aide de pinces dans le centre d'usinage	47
Fig .09: Le graphique de réponse pour chaque niveau de paramètres d'usinage.....	49
Chapitre II:.....	50
Fig. II-1: Fraiseuse universelle almo.....	51
Fig II-2 : Tableau des fréquences de rotation.....	52
Fig. II-3 : Tableau des vitesses.....	52

Fig.II-4 : Eprouvette pour les essais de l'effort de coupe.....	53
Fig.II-5 : Eprouvette pour les essais d'usure.....	53
Fig. II-6 : Eprouvette pour les essais de la rugosité.....	53
Fig. II-7 : Fraise à surfacer.....	56
Fig. II-8: fraise à surfacer Coromill 245.....	56
Fig. II-9: Plaquettes de coupe utilisées.....	57
Fig. II-10: Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.....	57
Fig. II-11: Rugosimètre Surfctest Rj201.....	58
Fig. II-12 : Microscope Optique: a) Pour les photos de l'arrête rapportée de la plaquette.....	59
Fig. II-13 : Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	60
Chapitre III:.....	63
Fig. III-1 Graphique des effets principaux pour (Ra).....	67
Fig. III-2 Diagramme d'interaction pour (Ra).....	68
Fig. III-3 Diagrammes (3D) de la rugosité de surface (Ra) en fonction de V_c ; f_z ; a_p	71
Fig. III-4 Graphique de Contour de (Ra) en fonction de V_c ; f_z ; a_p	72
Fig. III-5 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (Ra).....	73
Fig. III-6 Graphique des effets principaux pour (Fc).....	75
Fig. III-7 Diagramme d'interaction pour (Fc).....	76
Fig-III-8 Diagrammes de surfaces de (Fc) en fonction de (V_c , f_z , a_p).....	79
Fig. III-9 Graphique de Contour de (Fc) en fonction de V_c ; f_z ; a_p	80
Fig. III-10 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (Fc).....	81
Fig. III-11 Graphique des effets principaux pour (Ks).....	84
Fig. III-12 Diagramme d'interaction pour (Ks).....	85
Fig. III-13 Diagrammes de surfaces de (Ks) en fonction de (V_c , f_z , a_p).....	87
Fig. III-14 Graphique de Contour de (Ks) en fonction de V_c ; f_z ; a_p	88

Fig. III-15 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (K_s).....	89
Fig. III-16 Graphique des effets principaux pour la puissance de coupe (P_c).....	92
Fig. III-17 Diagramme d'interaction pour la puissance de coupe (P_c).....	93
Fig-III-18 Diagrammes de surfaces du (P_c) en fonction de (V_c , f_z , ap).....	95
Fig. III-19 Graphique de Contour de (P_c) en fonction de V_c ; f_z ; ap	96
Fig. III-20 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la puissance de coupe (P_c).....	97
Fig. III-21- Graphique des effets principaux pour le volume du copeau enlevé (VCE).....	100
Fig. III-22 Diagramme d'interaction pour le volume du copeau enlevé (VCE).....	101
Fig-III-23 Diagrammes de surfaces du volume du copeau enlevé (VCE) en fonction de (V_c , f_z , ap).....	103
Fig. III-24 Graphique de Contour de (VCE) en fonction de V_c ; f_z ; ap	104
Fig. III-25 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites le volume du copeau enlevé (VCE).....	105
Chapitre IV:.....	107
Figure IV.1 Un neurone artificiel.....	108
Figure IV.2 Arrangement logique d'un neurone.....	109
Figure IV.3 Schéma d'une couche de neurones.....	110
Figure IV.4 Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones (a) : fonction seuil, (b) tangente sigmoïde, (c) tangente hyperbolique.....	111
Figure IV.5 Schéma de principe du perceptron simple.....	112
Figure IV.6 Structure du réseau de neurone du modèle de la rugosité de surface....	113
Figure IV.7 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (Ra).....	116
Figure IV.8 Graphique de profileur de prévision pour (Ra).....	116
Figure IV.9 Structure ANN pour (F_c).....	117
Figure IV.10 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (F_c).....	119
Figure IV.11 Graphique de profileur de prévision pour (F_c).....	119

Figure IV.12 Structure (ANN) pour (Ks).....	120
Figure IV.13 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (Ks).....	121
Figure IV.14 Graphique de profileur de prévision pour (Ks).....	122
Figure IV.15 Structure ANN pour (Pc).....	122
Figure IV.16 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (Pc).....	124
Figure IV.17 Graphique de profileur de prévision pour (Pc).....	124
Figure IV.18 Structure ANN pour (VCE).....	125
Figure IV.19 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (VCE).....	127
Figure IV.20 Graphique de profileur de prévision pour (VCE).....	127
Figure IV.21: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra).....	132
Figure IV.22 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour l'effort de coupe (Fc).....	132
Figure IV.23 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la pression spécifique de Coupe (Ks).....	133
Figure IV.24 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la puissance de Coupe (Pc).....	133
Figure IV.25 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour le volume de copeau enlevé (VCE).....	134

Nomenclature

ap	Profondeur de passe [mm]
fz	Avance par dent [mm/dent]
Fx	Effort axial [N]
Fz	Effort radial [N]
Fy	Effort tangentiel [N]
HB	Dureté Brinel
Lc	Longueur de coupe [mm]
n	Fréquence de rotation [tr/min]
R ²	Coefficient de détermination
Ra	Rugosité arithmétique moyenne [μm]
Ry	Rugosité totale [μm]
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]
S	Section du copeau [mm^2]
hex	l'épaisseur maximum de copeau [mm]
Q	le débit de copeau [mm^3/min]
Vc	Vitesse de coupe [m/min]
Vf	Vitesse d'avance [mm/min]
Zn	Nombre de dent de la fraise
K _r	Angle de direction principale [degré]
α	Angle d'attaque [degré]
ic	diamètre de la plaquette [mm]
ANOVA	Analyse de variance
RMS	Méthodologie de surface de réponse
VCE	volume du copeau enlevé [mm^3/min]

INTRODUCTION

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, la fabrication des 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 ténacité, le taux d'écaillage élevé et le coefficient de frottement élevé.

[D'autres parts, afin d'en assurer une qualité satisfaisant des produits finis, une consommation minimale d'énergie et une productivité élevée durant le processus de coupe, une attention particulière doit être portée sur la modélisation des paramètres technologiques et aussi l'optimisation des conditions de coupe permettant d'améliorer la qualité et la productivité en utilisant les méthodes statistiques pour la modélisation et l'optimisation du processus d'usinage]. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche du mémoire de Master.

Présent mémoire de Master est structuré comme suit :

Le premier chapitre de la thèse est consacré à la l'étude bibliographique sur l'usinabilité des matériaux et les critères de son évaluation, les principales définitions sur le fraisage, la rugosité de surface, les efforts de coupe, l'usure des outils, les aciers inoxydables et le choix des matériaux de coupe. La dernière partie de la bibliographie traite une autre partie très importante (état de l'art), ayant pour but de présenter une synthèse sur les résultats des travaux de recherche (publications) relatifs à l'usinage en fraisage des aciers inoxydable ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation du processus de coupe en fraisage et tournage.

Dans le second chapitre, nous présentons les équipements nécessaires à la réalisation des essais (Fraiseuse, matériau de la pièce et de la fraise) et la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi 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 chapitre III, nous exposons les résultats expérimentaux des essais réalisés pour un plan de Taguchi (L27) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse RSM et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f_z , et ap) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Pour cela nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «Design-Expert» pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse. Ensuite, nous avons présenté une étude sur l'usure des plaquettes de coupe utilisées ainsi que la détermination des tenues et la relation entre l'usure et la rugosité de surface de l'acier inoxydable étudié.

Au chapitre IV, nous présentons une deuxième méthode de modélisation qui concerne les réseaux de neurones artificiels (ANN). Cette dernière est appliquée pour la modélisation non linéaire du processus de coupe, et dans notre cas c'est le fraisage. L'étude est réalisée pour modéliser les paramètres technologiques d'usinage (P_c , K_c , F_c , R_a et VCE) en fonction de différents paramètres de régime de coupe (V_c , f_z et ap) pour un plan de 27 essais. La fin du chapitre est réservée à une comparaison entre la modélisation par la méthode de la surface de réponse RMS et la modélisation par ANN et cela dans le but de vérifier l'efficacité et la robustesse des deux méthodes.

En dernier lieu, le mémoire de Master se termine par une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

Chapitre I

Etude bibliographique

I-1-Introduction

Le principal but pour toutes les entreprises de fabrication mécanique, est d'arriver à réaliser le maximum de gain possible. Ce dernier ne peut être obtenu qu'en améliorant et maximisant la production. L'augmentation de la production à son tour ne peut avoir lieu qu'avec un développement technologique sans cesse d'une part des machines-outils, d'autre part des matériaux de coupe ayant des caractéristiques élevées en termes de : dureté, résistance mécanique, résistance à l'usure, conductivité thermique, géométrie appropriée de la partie active de l'outil de coupe. Ce but peut être réalisé en poussant plus les études sur les matériaux usinés vis-à-vis des moyens utilisés. Pour stabiliser au mieux les différents paramètres de coupe.

I-2-Définition de l'usinabilité

Pour déterminer l'usinabilité d'une matière, il faut généralement identifier trois paramètres principaux.

- Classe de la matière du point de vue métallurgique et mécanique.
- Géométrie de l'arête de coupe à utiliser, niveau micro et macro.
- Matériau de coupe (nuance) et ses composants corrects, notamment carbure cémenté revêtu, céramique, CBN ou PCD, etc.

Les choix ci-dessus ont une grande influence sur l'usinabilité de la matière. Les autres facteurs importants sont les conditions de coupe, les forces de coupe, les traitements thermiques que la matière a reçus, la présence d'une croûte superficielle, la présence d'inclusions métalliques, l'attachement des outils, les conditions générales d'usinage, etc. L'usinabilité n'a pas de définition formelle basée sur les nuances ou sur des chiffres. Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe et la formation des copeaux qui la caractérise. Dans ce sens, un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier inoxydable austénitique. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers inoxydables. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée

de vie d'outil correcte. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables. figure (I-1) [1].

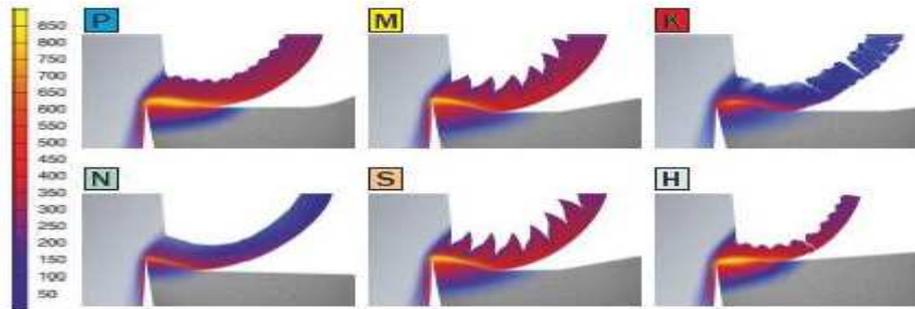


Fig-I-1: Vue en coupe d'une plaquette en carbure cémenté usinant un acier. Température en degrés Celsius.

I-3-Usinabilité des matériaux

I-3-1Aciers

I-3-1-1 Aciers doux < 550 Mpa

Incluant les aciers au carbone resulfurés et au phosphore contenant moins de 0,65% de manganèse, 0,60% de silicium et 0,60% de cuivre. Les aciers magnétiques et les aciers au plomb sont également inclus.

- Utilisation : appareils magnétiques et électriques ainsi que de nombreuses autres applications.
- Excellente usinabilité.

I-3-1-2 Aciers de construction et aciers au carbone < 850 Mpa

- Utilisation : bâtiment, ponts, arbres machines, axes, vis, écrous, bielles, engrenages, éléments de structure, maillons de chaîne, pièces cémentées et pièces obtenues par déformation à froid.
- Bonne usinabilité.

I-3-2 Aciers inoxydables

I-3-2-1 Les aciers inoxydables ferritiques de décolletage

Ont une structure ferritique, avec parfois des carbures de chrome dans la matrice. Ne contiennent pas de nickel, peu de carbone, et ne sont pas durcissables.

- Utilisation : électronique, échappement automobile, matériel de manutention, réservoirs d'eau chaude.
- Mauvaise usinabilité.

I-3-2-2 Aciers austénitiques

Procurent une grande résistance à la corrosion. Aciers inoxydables les plus utilisés.

- Utilisation : électronique, industrie pharmaceutique, chimique, industrie alimentaire, bâtiment.
- Usinabilité difficile comparée aux aciers inoxydables ferritiques et martensitiques. Possèdent une grande résistance aux hautes températures, écrouissables, demandent des machines-outils robustes. De faibles vitesses de coupe et de grandes avances sont recommandées.

I-3-3 Fonte

I-3-3-1 Fonte grise (fonte à graphite lamellaire)

Fonte de base à faible coût.

- Utilisation : tambours de freins, blocs-cylindres, corps de vanne, bâtis de machines.
- Excellente usinabilité.

I-3-3-2 Fonte ductile [2]

Présente la résistance la plus élevée, en concurrence avec les aciers de construction dans les applications automobiles.

- Utilisation : arbres à cames, vilebrequin, etc.
- Excellente usinabilité.

I-4- Le fraisage

I-4-1 Définition

Le fraisage désigne un procédé d'usinage par enlèvement de matière. Il se caractérise par le recours à une machine-outil : la fraiseuse. L'outil classiquement utilisé est la fraise.

En fraisage, l'enlèvement de matière (sous forme de copeaux) résulte de la combinaison de deux mouvements : rotation de l'outil de coupe d'une part, et avance de la pièce à usiner d'autre part.

La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques et permet également, si la machine est équipée de Commande Numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes.

Les fraiseuses actuelles sont fréquemment automatisées (fraiseuses à commande numérique et centres d'usinage). La programmation de commande numérique de ces machines nécessite le recours à des interfaces logicielles, pour une part embarquées sur la machine elle-même (Directeur de Cde Numérique), et pour une autre part, extérieure à la machine (PC + logiciels Fabrication assistée par ordinateur 2D et 3D) . Dans l'industrie, les ouvriers fraiseurs qualifiés effectuent fréquemment des travaux de tournage complémentaires figure (I-2) [3].

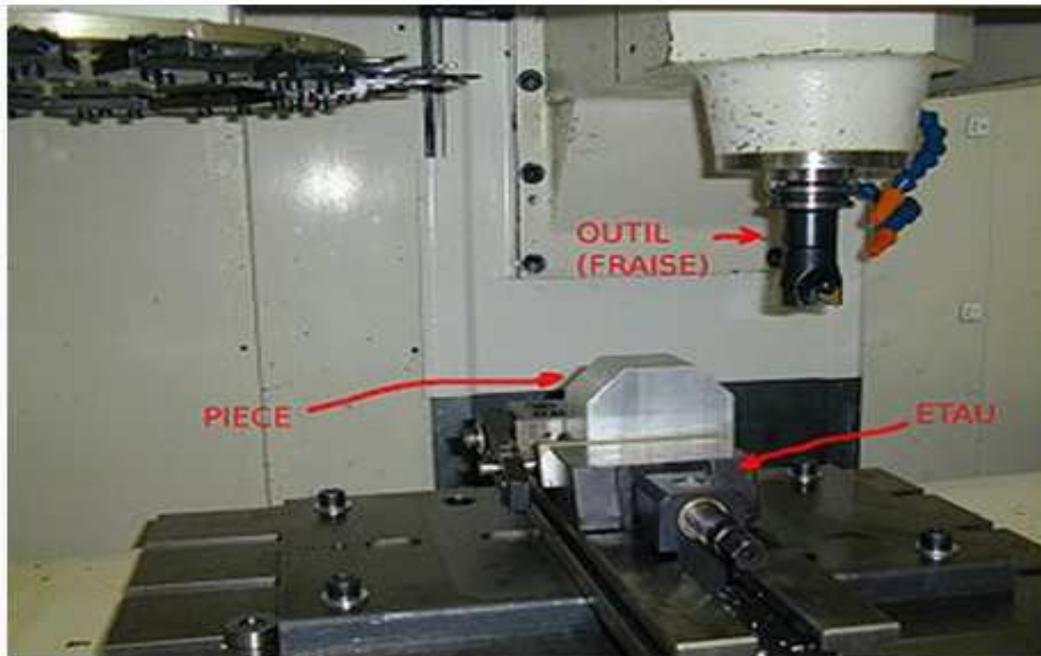


Fig-I-2 : Fraiseuse à commande numérique [3].

I-4-2 Mode de fraisage

Les principales méthodes de fraisage pratiquées sont :

- le fraisage de profil (dit « de forme »).
- le fraisage en bout (dit « d'enveloppe » ou « surfacage »).
- le fraisage combiné (en bout et de profil).
- le tréfilage [4].

I-4-3 Types de fraiseuse (Ancienne classification)

Avant l'avènement de la commande numérique, les fraiseuses étaient classées de la façon suivante.

I-4-3-1 Fraiseuse horizontale l'axe de la broche est parallèle à la table. Cette solution permet aux copeaux de tomber et donc de ne pas rester sur la pièce. De cette manière, on n'usine pas les copeaux, et la qualité de la



pièce est meilleure. Mais ce type de montage était surtout destiné à installer des fraises 3 tailles ou fraises disques dans le but de réaliser des rainurages de profilés plats figure (I-3).

Fig- I-3 : Fraiseuse horizontale



I-4-3-2 Fraiseuse verticale l'axe de la broche est perpendiculaire (En géométrie plane, on dit que deux droites sont perpendiculaires quand elles se coupent en formant un angle droit....) à la table figure (I-4).

Fig- I-4 : Fraiseuse verticale

I-4-3-3 Fraiseuse universelle l'axe de la broche est réglable

- tête bi-rotative, avec 2 coulisses circulaires (perpendiculaires l'une par rapport à l'autre)
- tête oblique, avec 2 coulisses circulaires (inclinée à 45°)
- tête articulée figure (I-5) [5].



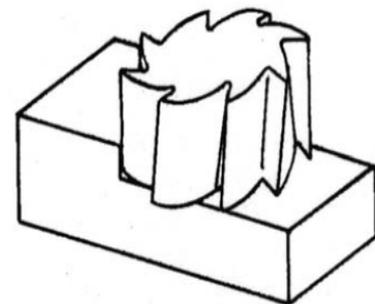
Fig- I-5 : Fraiseuse universelle

I-4-4 Les procédés de fraisage

I-4-4-1 Le fraisage en bout

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale. Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure figure (I-6).

Fig- I-6 : fraisage en bout



I-4-4-2 Le fraisage en roulant

L'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre. La charge de la machine en est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les à-coups provoqués par cette façon de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, on utilisera une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration enregistrée s'explique ainsi: la denture est chargée et déchargée progressivement figure (I-7).

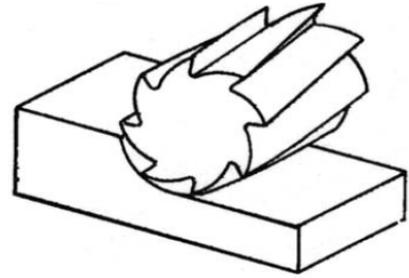


Fig- I-7 : fraisage en roulant

I-4-5 Les paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont des éléments constants ou variables, qui dépendent les uns des autres afin d'obtenir le meilleur compromis possible pour un usinage figure (I-8).

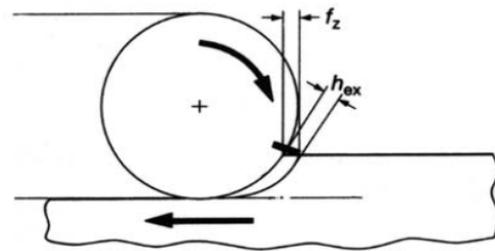
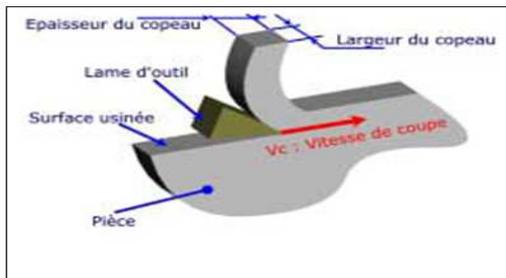


Fig- I-8 : Les paramètres de coupe [6]

I-4-5-1 La vitesse de coupe

En matière de fraisage, on mesure la vitesse de coupe par le chemin parcouru par un point placé sur le diamètre de coupe extérieur de la fraise, en mètres par minute.

Pour déterminer la vitesse de coupe optimale, il faudra également tenir compte de l'épaisseur maximale du copeau (h_{ex}) qui est en relation directe avec l'avance par dent (f_z).

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot \varnothing} \quad (\text{I-1})$$

V = vitesse de coupe (m/min)

$\pi = 3,14$

\varnothing = diamètre de la fraise (mm)

n = nombre de tours/min

I-4-5-2 vitesse d'avance « Vf »

Elle est exprimée en mm/min. Elle découle de la formule suivante:

$$V_f = f_z \cdot Z_n \cdot n \quad (\text{I-2})$$

V_f = mm/min

f_z = avance en mm/dent (selon tablelle)

Z_n = nombre de dents de la fraise

n = fréquence de rotation de la fraise en tr/min

I-4-5-3 La profondeur de passe (a_p)

Elle est quelquefois suggérée dans les tabelles des fabricants d'outils de coupe et elle dépend du type d'état de surface que l'on veut obtenir (ébauche, finition). Pour ce qui concerne les fraises équipées de plaquettes en métal dur rapportées, cette profondeur est limitée en fonction de la forme et de la taille de la plaquette Cette valeur maximale est indiquée dans les tableaux des fournisseurs figure (I-9).

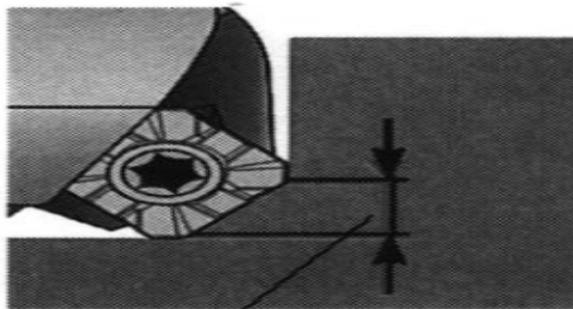


Fig- I-9 : Valeur de la profondeur a_p maxi autorisée

I-4-5-4 L'épaisseur de copeaux maximale (hex) en [mm] est le facteur limitant le plus important d'un outil pour une opération. L'arête de coupe d'une fraise est conçue et testée, ainsi que des valeurs minimales et maximales.

I-4-5-6 La profondeur de coupe axiale (a_p) en [mm] correspond à la quantité de métal que l'outil enlève sur la face de la pièce. Elle correspond à la distance à laquelle l'outil est réglé en dessous de la surface non usinée.

I-4-5-7 La largeur de coupe radiale (a_e) en [mm] est la largeur sur laquelle le diamètre de la fraise est engagé en coupe. Il s'agit de la largeur de la surface usinée ou, si le diamètre d'outil est plus petit que la largeur couverte par l'outil.

I-4-5-8 Le débit copeaux (Q) en [mm³/min] est le volume de métal par unité de temps et peut être déterminé à l'aide de la profondeur de coupe, de la largeur de coupe et de l'avance.

$$Q = a_e \cdot a_p \cdot V_f \quad (\text{I-3})$$

I-4-6 fraisages en opposition et en avalant

L'action de fraisage peut se faire soit en opposition soit en avalant.

I-4 6-1 fraisages en opposition

Le mouvement d'avance de la pièce à fraiser est opposé au sens de rotation de la fraise. Cette dernière attaque le copeau au point d'épaisseur minimal. Dans ce cas, les dents glissent sur la surface usinée avant rotation de la fraise. Cette façon de faire provoque un grand frottement d'où une usure plus rapide des tranchants de la fraise.

De plus, l'effort de coupe en fraisage horizontal tend à soulever la pièce à usiner. Les copeaux peuvent également être entraînés par la fraise et se coincer entre la pièce et les arêtes de coupe, endommageant la pièce et la fraise figure (I-10) [6].



Fig- I-10 : fraisage en opposition [7]

❖ *Avantages*

- L'engagement de la dent n'est pas fonction des caractéristiques de surface de la pièce usinée.
- Les souillures ou écailles de la surface n'affectent pas la durée de vie de l'outil.
- Le procédé de coupe est adouci, d'autant plus que les dents de la fraise sont affûtées [7].

❖ *Inconvénient*

- L'outil a tendance à trembler.
- La pièce usinée a tendance à être décalée vers le haut, ce qui implique d'importants blocages.
- Usure plus rapide de l'outil qu'en fraisant en avalant.
- Les copeaux tombent devant la fraise – évacuation difficile.
- La force ascendante a tendance à relever la pièce usinée.
- Plus de puissance est requise à cause d'une friction accrue.
- La surface de finition n'est pas bonne à cause de l'évacuation des copeaux [7].

I-4 6-2 fraisages en avalant

Le sens de rotation de la fraise et celui du déplacement de la pièce à fraiser vont dans la même direction. Les tranchants de la fraise attaquent le copeau au point d'épaisseur maximal. Cette façon de faire, en fraisage horizontal, plaque la pièce sur la table de la fraiseuse et donne des surfaces finies de bonne qualité. Ce principe nécessite l'utilisation d'une machine robuste disposant d'une table équipée d'un système de translation avec rattrapage de jeu, ce qui est le cas sur les machines modernes. Ainsi on évite que la pièce soit "tirée" dans la fraise figure (I-11) [6].



Fig- I-11 : fraisage en avalant [7]

❖ **Avantage**

- Les forces de coupe vers le bas permettent de maintenir la pièce usinée en place, particulièrement pour les parties peu épaisses.
- Evacuation plus facile des copeaux – Les copeaux sont évacués derrière la fraise.
- Moins d'usure – diminution de 50% de la durée de vie de l'outil.
- Finition de surface améliorée – Les copeaux sont moins emmenés par la dent.
- Moins de puissance requise – on peut utiliser une fraise avec un angle de coupe élevé.
- Le fraisage en avalant exerce une force sur la pièce à usiner [7].

❖ **Inconvenient**

- Lors de l'engagement des dents dans la pièce usinée les forces ont un impact important, c'est pourquoi cette opération doit avoir un montage rigide, et tout jeu doit être éliminé.
- Le fraisage en avalant ne convient pas à l'usinage de pièces ayant un mauvais état de surface, telles que les pièces de forge et moulées. En effet les écailles sur la matière causent une usure excessive et abîment les dents, réduisant ainsi la durée de vie [7].

I-4-7 Quelques types de fraises et utilisations [6]

Exécution courte (DIN 844K)



Fraise cylindrique d'ébauche, 2 tailles, queue cylindrique lisse



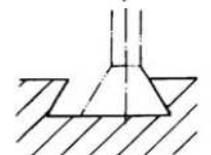
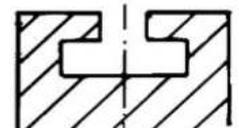
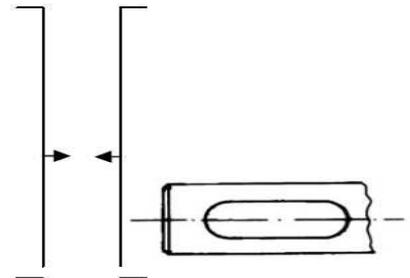
Fraise pour rainure à T, 3 tailles, denture alternée



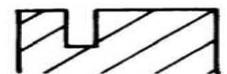
Fraise conique à cône renversé, 1 taille, Fraise



Fraise à rainurer 3 tailles, à denture alternée

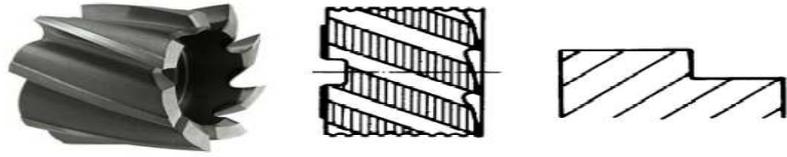


Usinage de coulisse «queue d'aigle»



Utilisée pour l'usinage de rainures de faible largeur

Fraise cylindrique en bout, 2
 Tailles, avec rainure
 Transversale pour tenons ou
 entrée longitudinale pour
 clavette



Certains modèles sont équipés 'arêtes
 avec un profil pour un usinage de
 semi-finition ou d'ébauche.

Fig- I-12 Quelques types de fraises et utilisations

I-5- Matériaux de coupe

I-5-1 Sélections des matériaux de coupe

La très grande diversité des matériaux de coupe offerts actuellement oblige à opérer des choix. L'importance du couple outil/ matière a été démontrée par de nombreuses études récentes. En règle générale, l'usineur a peu de possibilités d'agir sur la matière de la pièce usinée. C'est donc sur l'outil, et par conséquent sur le matériau de coupe, que devra porter toute son attention. Avant de décider des conditions de coupe, l'usineur devra vérifier l'aptitude (ou la qualification) du matériau de coupe à usiner la matière de la pièce. Pour cette première étape, l'aide du fabricant d'outils est généralement indispensable et utile. En effet, la plupart des matériaux de coupe sont vendus sous des dénominations commerciales. La connaissance exacte du matériau de coupe (y compris des revêtements s'il y a lieu) est donc parfois délicate à obtenir. Une fois l'étape de qualification et d'aptitude assurée, il faut valider techniquement le matériau de coupe, c'est-à-dire à lui associer des valeurs numériques (vitesse de coupe et avance généralement) de fonctionnement. Ces valeurs numériques sont également liées au type d'outil sur lequel est monté le matériau de coupe. Ces deux étapes sont entièrement prises en compte par le couple outil/matière. La norme NF E 66-520 donne la méthodologie d'essais à réaliser pour aboutir au bon fonctionnement de l'outil. Les normes type NF E 66-505 (essais normalisés qui permettent de classer les matériaux de coupe dans des conditions de fonctionnement bien définies) ont montré leurs limites et ne sont plus utilisées dans l'industrie. Les petites et moyennes entreprises ne sont pas équipées pour réaliser des essais d'usinage. Quant aux grandes entreprises, la tendance actuelle est de réduire très fortement (voire supprimer) les services destinés aux méthodes usinage. Les usineurs doivent donc avoir accès directement à des informations techniques fiables

concernant le domaine d'emploi des matériaux de coupe. La diversité des références commerciales des fabricants d'outils est telle que cette tâche est pratiquement impossible à réaliser sans l'aide de logiciels. Cette même méthode COM sert également à caractériser l'usinabilité de la matière usinée [8].

I-5-2 Définitions des principaux types de matériaux pour outils de coupe

I-5-2-1 Aciers rapides

Ce sont des aciers fortement alliés qui contiennent plus de 0,7 % de carbone et des éléments d'addition susceptibles de former des carbures.

- Dans tous les cas environ 4 % de chrome (C).
- Du tungstène (W), du molybdène (D), du vanadium (V), en proportions variables.
- Eventuellement du cobalt (K) qui a pour rôle d'augmenter la dureté à chaud.

Ils ont la propriété de pouvoir acquérir, après trempe, une dureté très élevée, et de la conserver jusqu'à une température de l'ordre de 600 °C.

Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de ces alliages, la norme NFA 35-590 en retient 16, parmi lesquelles des aciers sur carburés et des aciers au cobalt.

I-5-2-2 Carbures métalliques

Ils sont fabriqués selon la technique de métallurgie des poudres par frittage.

Ils sont constitués :

- De substances dures 60 à 95 % du carbure qui donnent la dureté et donc la résistance à l'usure. Elles se composent de carbure de tungstène (WC) phase (γ), de carbure de titane (TiC), de carbure tantale (TaC) et de carbure de niobium (NbC) (phase γ).
- De substances liantes qui donnent la ténacité au carbure. La plus employée est le cobalt (Co) car il dissout facilement les différents carbures (phase β).

On obtient différentes nuances de carbures en faisant varier le pourcentage des substances dures et liantes. Ces nuances présentent des tenues plus ou moins importantes à l'usure (selon la dureté) et aux chocs (selon la ténacité) en fonction de l'utilisation prévue.

La résistance à la chaleur et la conductivité thermique dépendent.

- ✓ De la taille des grains WC.
- ✓ Du % de Co.
- ✓ Du contenu de la phase γ .

I-5-2-3 Carbures micro-grain

Ils sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène (0,2 à 1 μm), lié par du cobalt (6 à 13 %). Ils ont une ténacité plus élevée pour une dureté constante et de ce fait peuvent entrer dans le domaine des applications de matériaux tels que l'acier rapide. Cette nuance permet des arêtes beaucoup plus fines par suite, l'obtention d'angles de coupe très positifs.

I-5-2-4 Aciers et carbures revêtus

Les aciers rapides et les carbures existent de plus en plus sous forme revêtus. Ce revêtement en couches de quelques microns (1 à 20 μm) est constitué, selon les applications :

- De nitrure de titane (TiN), d'une dureté d'environ 2 000 HV (jaune d'or).
- De carbure de titane (TiC), d'une dureté d'environ 3 900 HV (gris).
- De carbonitrure de titane (Ti) (C1N), d'une dureté de 3 000 HV (gris).
- D'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), d'une dureté d'environ 2 400 (noir).

Ces revêtements améliorent très nettement les possibilités des outils, en particulier la durée de vie, grâce à une réduction importante du frottement copeau/ outil et pièce/outil.

Les résultats sont surtout spectaculaires sur les aciers rapides (certains fabricants de fraises annoncent une augmentation de la durée de vie de 500 %).

I-5-2-5 Cermets

Il s'agit de matériaux à base de titane avec un liant de nickel, de cobalt ou des deux à la fois. Ils ont une très bonne résistance à l'usure et une excellente stabilité chimique. Ils

sont surtout réservés aux opérations de finition. Ils donnent de bons résultats en tournage de finition pour les aciers, en particulier pour les aciers inoxydables. Ils peuvent être revêtus (PVD) de TiN et Ti (C1N) [9].

I-5-2-6 Céramiques

Les céramiques se présentent sous formes de plaquettes frittées, il existe deux grandes familles de céramiques :

- Les céramiques à base d'alumine sous deux aspects : les céramiques pures de couleur blanche composées d'oxyde d'aluminium et d'autres oxydes métalliques ; les céramiques mixtes de couleur grise composée d'oxydes d'aluminium et de carbures métalliques.
- Les céramiques à base de nitrure de silicium : ce sont des matériaux nouveaux, les plus connus étant les sialons. Elles sont de couleur noire, composée de nitrure de silicium et d'oxydes métalliques.

En pratique, les céramiques sont prévues pour supporter des vitesses de coupe élevées à des températures importantes. Elles résistent bien à l'usure mais mal aux chocs. Elles sont souvent utilisées sur des machines puissantes pour l'usinage des métaux ferreux. Elles ne conviennent pas pour les alliages légers et pour les alliages de titane (problèmes chimiques). Elles peuvent être revêtues de TiN et Al₂O₃.

I-5-2-7 Nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est un des matériaux de coupe des plus durs (dureté supérieure aux céramiques et aux carbures). Il s'agit de particules de nitrure de bore cubique et une matière liante céramique. Il se présente généralement sous la forme d'une pointe qui est brasée sur un support de carbure.

Il peut également être fritté sur chaque pointe du support carbure, ce qui améliore la sécurité. Les plaquettes peuvent être revêtues (PVD) de TiN, ce qui facilite la détection

de l'usure. Une nuance additionnée de nitrure de titane, très dure, est principalement utilisée en finition pour les aciers trempés, les aciers trempés, les aciers cémentés et pour les fontes trempées. Une nuance de CBN pure, très résistante à l'usure, mais aussi très tenace est recommandée pour les aciers et les fontes trempées dans des conditions difficiles.

I-5-2-8 Diamant polycristallin (DP ou PCD)

Le diamant polycristallin est composé de cristaux à grains fins de diamètres compris entre 5 et 30 μm . Les plaquettes de coupe sont découpées par électroérosion dans un disque de diamant polycristallin. Il est recommandé pour la finition et la semi-finition des métaux non ferreux (aluminium, cuivre, plomb) et pour les matières non métalliques telles que le graphite et les composites.

I-6- Effort de coupe lors du fraisage

I-6-1 Définition et intérêt de leur mesure [9]

Le fraisage donne naissance 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 figure (I-13).

F_v (ou F_y): composante dans le sens de rotation de la fraise appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. Elle a la plus grande valeur absolue.

F_a (ou F_x): composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance, ou effort axial.

F_r (ou F_z): composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres (suivant l'axe de la fraise), appelée effort de refoulement ou effort radial.

F : La résultante de coupe - peu utilisée en pratique - représente la diagonale d'un parallépipède. Elle est égale à la somme vectorielle des trois composantes ou à :

$$F = \sqrt{F_v^2 + F_a^2 + F_r^2} \quad (\text{I-4})$$

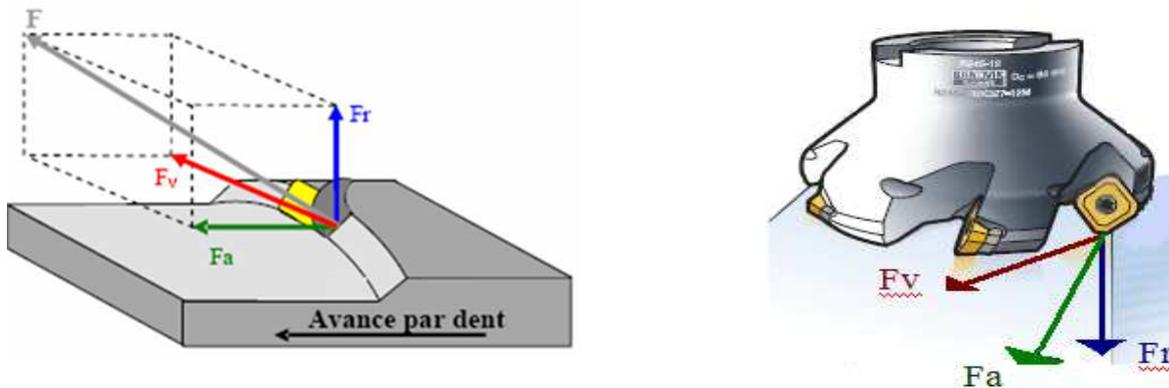


Fig- I-13 : Composantes de l'effort de coupe [11].

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand, on veut connaître le rendement mécanique d'une machine outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil et donc d'avoir les renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions de l'apparitions des vibrations auto excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur le matériau coupé [10].

I-7-Rugosité de surface

I-7-1 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 figures (I-14 + I-15).



Fig- I-14 : mesure de rugosité

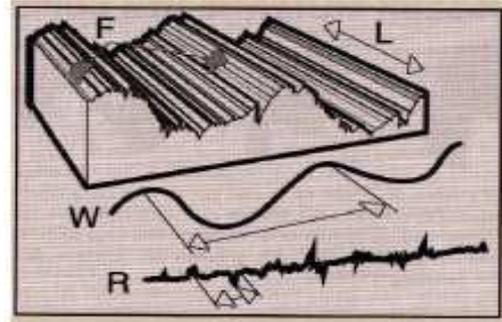


Fig- I-15 : critères de rugosité

Cette structure est définie par les critères suivants :

- *La rugosité R*: exprime les plus petites irrégularités, c'est à dire le fin réseau d'écart micro géométriques mesurés sur la plus petite longueur d'échantillonnage.
- *L'ondulation W*: est constituée d'irrégularités de plus grande dimensions au niveau suivant de la longueur d'évaluation sur la surface de la pièce.
- *La direction des traces d'usinage L*: définit l'orientation du profil superficiel. Elle indique la direction dominante générée par la méthode d'usinage

Il existe un grand nombre de paramètres pour la définition de la rugosité, certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres.

I-7-1-1 Ra: rugosité moyenne du profil

- Valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite, dans la longueur d'évaluation, indifféremment de la direction verticale figure (I-16).
 - ✓ Impossible de savoir si les écarts sont des creux ou des bosses
 - ✓ Pas d'altération pas des écarts isolés, donc risque de manquer un sommet
 - ✓ Valeur de Ra typiques entre $0.02\mu\text{m}$ et $3.5\mu\text{m}$.

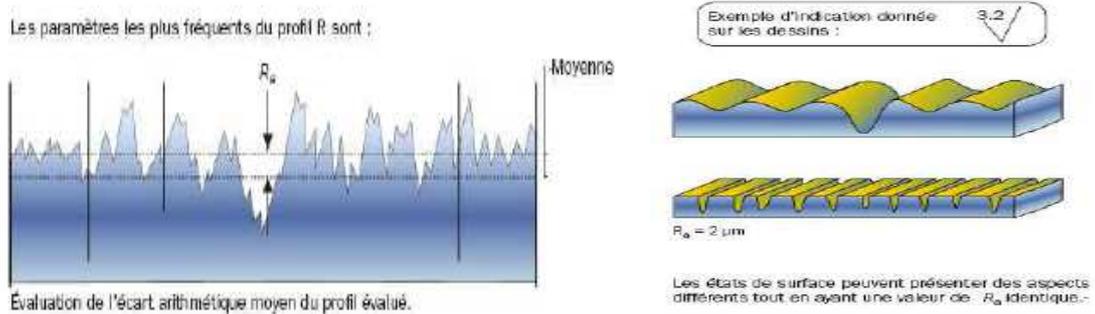


Figure-16 : Ra: rugosité moyenne du profil

I-7-1-2 Rz: hauteur de profil maximum

C'est la moyenne des différentes hauteurs de profil entre la hauteur de crête la plus élevée et la profondeur de creux la plus importante sur des longueurs de référence comprises dans la longueur d'évaluation figure (I-17).

- Il y a couramment 5 longueurs de référence.
- La valeur affichant la plus grande déviation dans la longueur de référence = Rmax ou Rzmax.

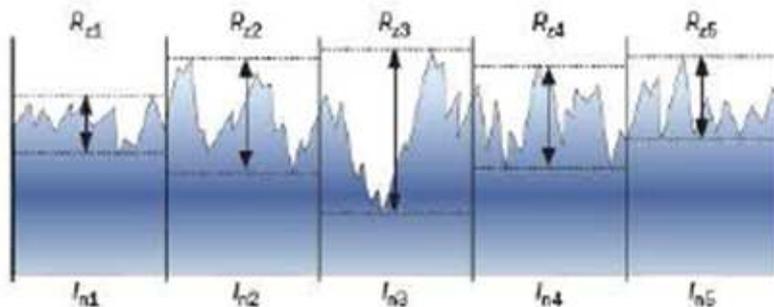


Fig- I-17: Rz: hauteur de profil maximum

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5} \quad (I-5)$$

I-7-1-3 Rt: hauteur de profil total

C'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation figure (I-18)

- Une seule valeur Rt, non combiné à un Rz ou Ra est l'une des exigences les plus strictes.

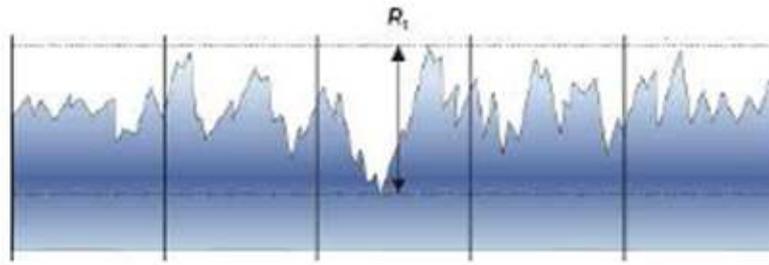


Fig- I-18 : Rt: hauteur de profil total du profil R

I-7-1-4 Fraisage /surfaçage axial (effet de la forme des plaquettes)

- L'état de surface dépend de la forme des arêtes de coupe des plaquettes.
- Les arêtes à rayon génèrent des crêtes dont la taille dépend du rayon lui-même et de l'avance.
- Les plaquettes avec un biseau plan (bs) peuvent générer des surfaces Planes figure (I-19).

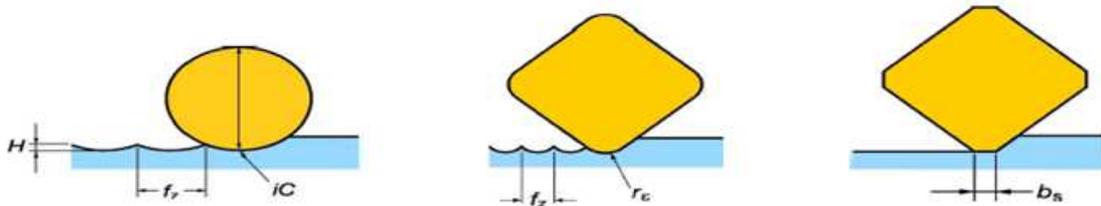


Fig- I-19: Fraisage/surfaçage axial

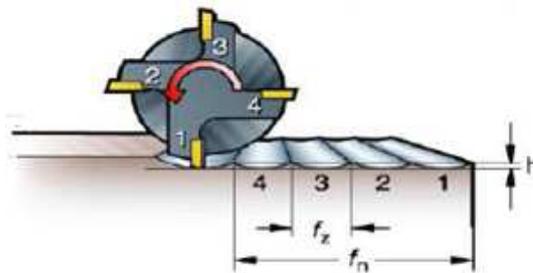


Fig -I-20 : Fraisage /surfaçage radial

$$h = \frac{1}{2} (IC - \sqrt{IC^2 - f_z^2}) \quad (I-6)$$

I-7-1-5 Fraisage /surfaçage radial [12]

C'est le côté de l'outil qui génère le profil figure (I-20).

- Chaque dent produit une crête :
 - ✓ La largeur est déterminée par l'avance à la dent f_z.

- ✓ La profondeur est déterminée par la relation entre le diamètre de la fraise (D_c) et f_z .
- La taille théorique des crêtes générées est minimale, par exemple:
 - ✓ D_c 10mm.
 - ✓ f_z 0.1 mm.
 - ✓ z_n 4.
- ✓ $h = 0.0003$ mm.

$$h = \frac{1}{2} \left(D_c - \sqrt{D_c^2 - f_z^2} \right) \quad (\text{I-7})$$

I-8- Usure des outils

L'usure des outils de coupe est un des phénomènes physico-chimiques les plus complexes. Il influe sur la géométrie de l'outil ainsi que sur la qualité de la pièce. Elle est due par son apparition aux causes suivantes figure (I-21):

- Frottements outil-copeau, outil-pièce et pièce-copeau (usure abrasive).
- Déformations plastiques de la matière de la partie active de l'outil.
- Echauffement important dû à la coupe.
- L'émiettement de l'outil (arrachement de petites particules métal).

L'usure peut être sous plusieurs formes:

- L'usure abrasive est particulière à tous les outils, elle est la cause principale de l'emoussage de l'outil.
- L'usure due aux déformations plastiques de la matière de l'outil est surtout pour les outils en aciers à faible teneur en éléments d'alliages (acier rapide).

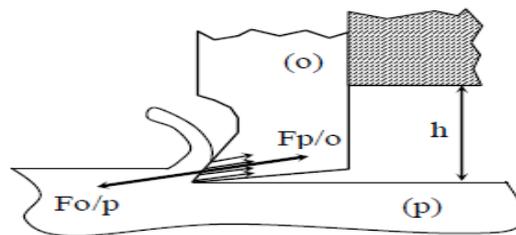


Fig- I-21 : Courbe (θ° , T[min]),

L'usure provoquée par une haute température de coupe se manifeste plus fortement dans les aciers au carbone et les aciers rapides, par suite de leurs résistances à chaud relativement faible. L'usure est d'autant plus rapide que la température de la partie active est plus élevée comme le montre la figure (I-22).

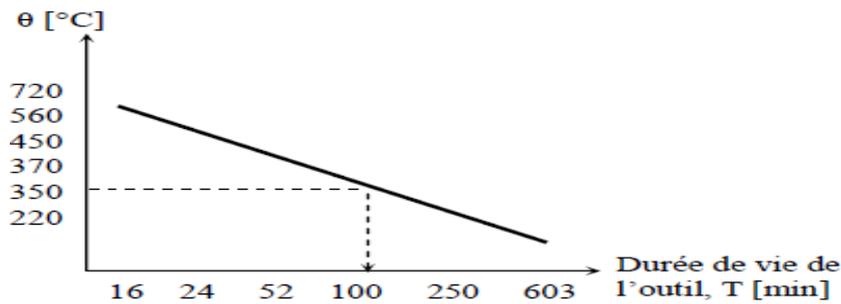


Fig- I-22 : Courbe (θ° , T[min])

Une autre série d'expériences d'usinage dont l'objectif consistait à déterminer la vitesse « V_c » en fonction du temps « T » pour un usinage à sec et un autre avec lubrification, donne les résultats suivants figure (I-23).

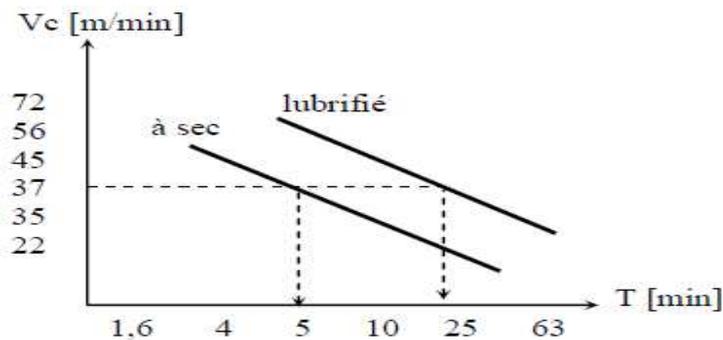


Fig- I-23 : Influence de la lubrification

Ce que l'on constate sur la figure, qu'avec une lubrification bien adoptée au travail à réaliser permet d'augmenter considérablement la durée de vie de l'outil, d'où une diminution de l'usure.

Les outils en carbures métalliques s'usent généralement à cause de l'émiettement c'est à dire l'arrachement de petites particules du métal de l'outil, tandis qu'ils restent fortement résistant à l'usure par frottement [13].

I-8-1 Types et cause d'usures [14]

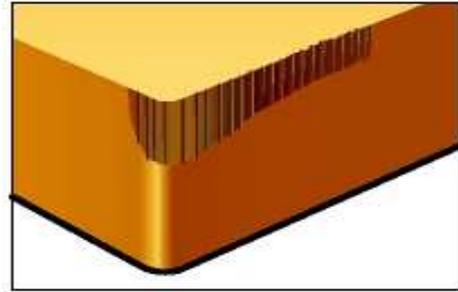
En fonction des conditions de coupe, l'usure peut se produire suivant la surface de dépouille, suivant la surface d'attaque ou suivant les deux surfaces en même temps [14].

I-8-1-1 Usure en dépouille

❖ *Cause*

Usure rapide provoquant un mauvais état de surface ou des cotes hors tolérances.

- Vitesse de coupe trop élevée.
- Résistance à l'usure insuffisante.
- Avance, f_z , trop faible.

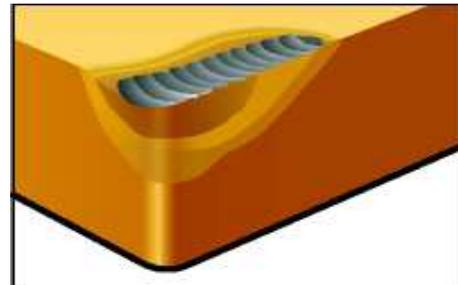


I-8-1-2 Usure en cratère

❖ *Cause*

Usure excessive qui affaiblit l'arête de coupe. La dégradation, voire la rupture de l'arête entraîne de mauvais états de surface.

- Usure par diffusion due à des températures de coupe trop élevées sur la face de dégagement de la plaquette.

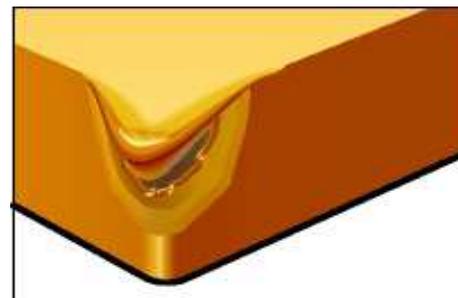


I-8-1-3 Déformation plastique

❖ *Cause*

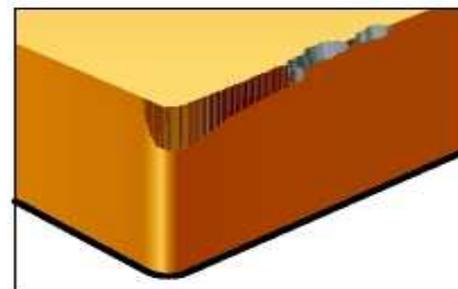
Déformation plastique de l'arête, dépression ou renflement latéral entraînant un mauvais contrôle copeaux, un mauvais état de surface, voire la rupture de la plaquette.

- Température et pression de coupe trop élevées.



I-8-1-4 Écaillage

❖ *Cause*



La partie de l'arête qui n'est pas engagée subit un écaillage dû au martèlement des copeaux. La face supérieure et le support de la plaquette peuvent être endommagés, ce qui génère de mauvais états de surface et une usure en dépouille excessive.

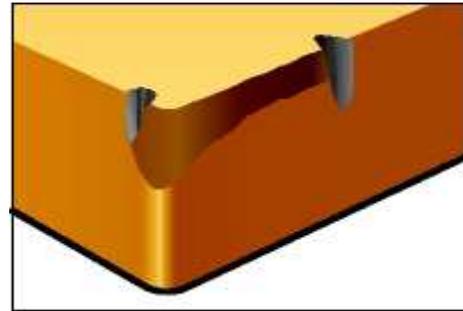
- Les copeaux sont déviés en direction de l'arête de coupe.

I-8-1-5 Usure en entaille

❖ *Cause*

Usure en entaille entraînant un état de surface médiocre et un risque de rupture de l'arête.

- Matières sujettes à l'écrouissage en coupe.
- Croûte.



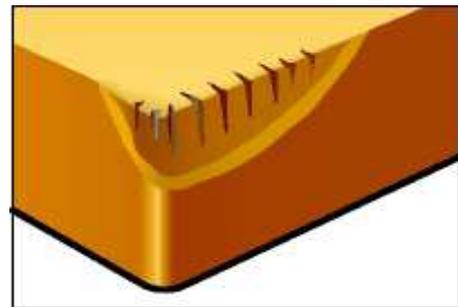
I-8-1-6 Usure en peigne

❖ *Cause*

Petites fissures perpendiculaires à l'arête de coupe provoquant un écaillage et une dégradation de l'état de surface.

L'usure en peigne est due aux fluctuations thermiques causées par :

- Coupe intermittente.
- Adduction irrégulière de liquide de coupe.



I-9-Formation de copeaux

I-9-1 Mode de formation de copeaux

Le contrôle de la formation des copeaux est particulièrement critique en fraisage. Pour parvenir aux performances correctes, prolonger la durée de vie de l'outil et obtenir de bons résultats, il est nécessaire de déterminer les valeurs d'épaisseur des copeaux.

C'est le trajet parcouru par l'outil qui donne naissance au copeau, qui se forme entre l'entrée de la fraise dans la matière et sa sortie de celle-ci. Les copeaux sont plus longs en fraisage conventionnel qu'en fraisage en avalant, ce qui est donc également un facteur à

prendre en considération lors du choix de la méthode appropriée. La forme des copeaux varie avec la méthode de fraisage et le positionnement de la fraise figure (I-24) [15].



Fig- I-24 : formation de copeaux

I-9-2 Épaisseur maximum des copeaux [15]

L'épaisseur maximum des copeaux est le paramètre le plus important pour obtenir un procès de fraisage productif et fiable. Pour que la coupe soit efficace, elle doit être adaptée à la fraise utilisée.

Si les copeaux sont fins et la valeur de hex trop faible, les performances sont mauvaises et la productivité est basse. La durée de vie d'outil peut être réduite et la formation des copeaux mauvaise.

Si l'épaisseur des copeaux est trop importante, la surcharge sur l'arête de coupe peut provoquer sa rupture.

I-9-3 L'amincissement des copeaux autorise une augmentation de l'avance

L'avance à la dent peut être augmentée dans les trois situations suivantes en raison de l'effet d'amincissement des copeaux :

- Fraise à arêtes rectilignes avec angle d'attaque inférieur à 90° .
- Fraise à plaquettes rondes, ou avec grands rayons de bec, et faible profondeur de coupe ap .
- Contournage avec faible engagement radial, ae/De .

I-9-4 Plaquettes à arêtes rectilignes

Avec les plaquettes à arêtes rectilignes, l'épaisseur des copeaux, h_{ex} , est égale à f_z si l'angle d'attaque est de 90 degrés. La réduction de l'angle d'attaque, κ_r , permet d'augmenter f_z figure (I-25).

$$h_{ex} = f_z \times \sin \kappa_r \quad (\text{I-8})$$

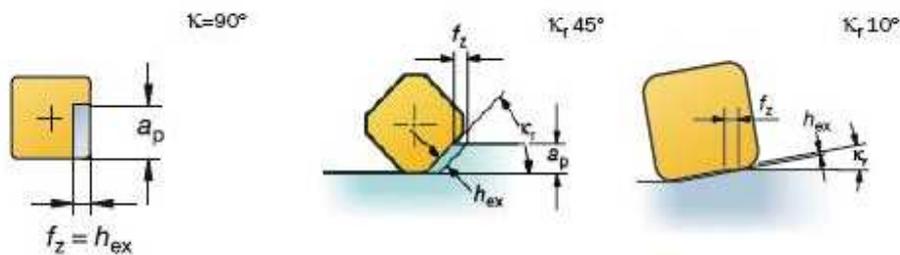


Fig- I-25 : Plaquettes à arêtes rectilignes [16]

I-9-5 Fraises à plaquettes rondes ou à grand rayon [16]

- Avec les fraises à plaquettes rondes ou les fraises à bout sphérique on obtient les meilleures performances avec un angle d'attaque, κ_r , inférieur à 60° si la profondeur de coupe est faible. Celle-ci ne doit pas dépasser 25 % du diamètre des plaquettes, iC .
- Pour les profondeurs de coupe plus importantes, il est préférable d'utiliser des plaquettes carrées avec un κ_r de 45°
- nstant.
- Avec les plaquettes rondes, l'épaisseur des copeaux, h_{ex} , est variable. Elle dépend de l'angle d'attaque. Il est possible d'augmenter considérablement l'avance, lorsque le ratio a_p/iC est faible, pour augmenter l'épaisseur des copeaux et obtenir l'épaisseur désirée.
- L'épaisseur maximum des copeaux est plus élevée avec les plaquettes rondes qu'avec des arêtes rectilignes en raison de leur plus grande robustesse et de la longueur des arêtes de coupe plus importante figure (I-26).

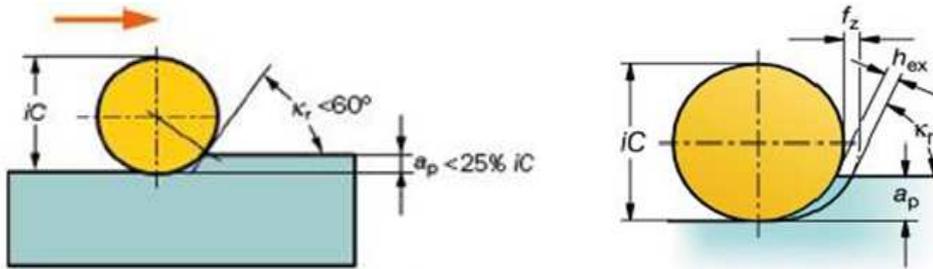


Fig- I-26 : Fraises à plaquettes rondes ou à grand rayon [18].

$$f_z = \frac{h_{ex} \times iC}{2 \times \sqrt{a_p \times iC - a_p^2}} \quad (\text{I-9})$$

$$\cos K_r = \frac{(0.5 iC - a_p)}{0.5 iC} \quad (\text{I-10})$$

I-10-Travaux de recherche en Fraisage

- Azlan Mohd Zain et al [09]** présente le modèle ANN pour prédire la mesure de la performance de la rugosité de surface dans le processus d'usinage en considérant le réseau de neurones artificiels (ANN) comme technique essentielle pour la rugosité de surface. Une révision de plusieurs études antérieures associées à la question de la modélisation est réalisée afin d'évaluer la façon capable ANN est comme une technique pour modéliser le problème. D'après les études menées par du chercheur précédent, les capacités et les limites de la technique ANN pour prédire la rugosité de surface sont mis en évidence. L'utilisation de la modélisation à base d'ANN est également discuté afin de montrer les éléments de base nécessaires pour prédire la rugosité de surface dans le processus de fraisage. Afin d'étudier la façon dont la technique capable ANN est à estimer la valeur de prédiction pour la rugosité de la surface, une expérience réelle d'usinage est faite référence dans cette étude. Dans l'expérience, les 24 échantillons de données concernées par l'opération de fraisage qui sont collectées reposent sur huit échantillons de données d'une analyse factorielle DOE 2k complète à deux niveaux, quatre échantillons de données centrale, et 12 échantillons de données

axiales. Tous les échantillons de données sont testés en temps réel à l'aide d'un usinage non revêtu, revêtu TiAlN et SN_{TR} revêtue d'outils de coupe en alliage de titane (Ti-6Al-4V). La boîte à outils Matlab ANN est utilisée à des fins de modélisation avec des justifications. Anticipatrice rétro propagation est sélectionnée comme algorithme avec `traingdx`, `learnngdx`, MSE, `logsig` que les fonctions de formation, d'apprentissage, de performance et de transfert, respectivement. Avec trois nœuds dans la couche d'entrée et d'un nœud dans la couche de sortie, huit réseaux sont développés en utilisant des nombres différents de nœuds dans la couche cachée, qui sont 3-1-1, 3-3-1, 3-6-1, 3-7-1, 3-1-1-1, 3-3-3-1, 3-6-6-1 et 3-7-7-1 structures. On a constaté que la structure 3-1-1 réseau de l'outil de coupe revêtu SN_{TR} a donné le meilleur modèle RNA pour prédire la valeur de rugosité de surface. Cette étude conclut que le modèle de rugosité de surface dans le procédé de broyage pourrait être amélioré en modifiant le nombre de couches et les nœuds dans les couches cachées de la structure du réseau ANN, en particulier pour prédire la valeur de la mesure de la performance de la rugosité de surface. À la suite de la prédiction, la combinaison des conditions de coupe recommandée pour obtenir la meilleure valeur de rugosité de surface est une vitesse élevée avec une vitesse d'alimentation faible et un angle de coupe radial.

No.	Data source	Setting values of process parameters			R_a value (μm)		
		V (m/min)	F (mm/tooth)	γ ($^\circ$)	Uncoated	TiAlN coated	SN_{TR} coated
1	DOE 2^k	130	0.03	7	0.365	0.32	0.284
2		160	0.03	7	0.256	0.266	0.196
3		130	0.07	7	0.498	0.606	0.668
4		160	0.07	7	0.464	0.476	0.624
5		130	0.03	13	0.428	0.26	0.28
6		160	0.03	13	0.252	0.232	0.19
7		130	0.07	13	0.561	0.412	0.612
8		160	0.07	13	0.512	0.392	0.576
9	Centre	144.22	0.046	9.5	0.464	0.324	0.329
10		144.22	0.046	9.5	0.444	0.38	0.416
11		144.22	0.046	9.5	0.448	0.46	0.352
12		144.22	0.046	9.5	0.424	0.304	0.4
13	Axial	124.53	0.046	9.5	0.328	0.36	0.344
14		124.53	0.046	9.5	0.324	0.308	0.32
15		167.03	0.046	9.5	0.236	0.34	0.272
16		167.03	0.046	9.5	0.24	0.356	0.288
17		144.22	0.025	9.5	0.252	0.308	0.23
18		144.22	0.025	9.5	0.262	0.328	0.234
19		144.22	0.083	9.5	0.584	0.656	0.64
20		144.22	0.083	9.5	0.656	0.584	0.696
21		144.22	0.046	6.2	0.304	0.3	0.361
22		144.22	0.046	6.2	0.288	0.316	0.36
23		144.22	0.046	14.8	0.316	0.324	0.368
24		144.22	0.046	14.8	0.348	0.396	0.36

Tableau .1: Valeurs Ra pour des expériences d'usinage réelles [6]

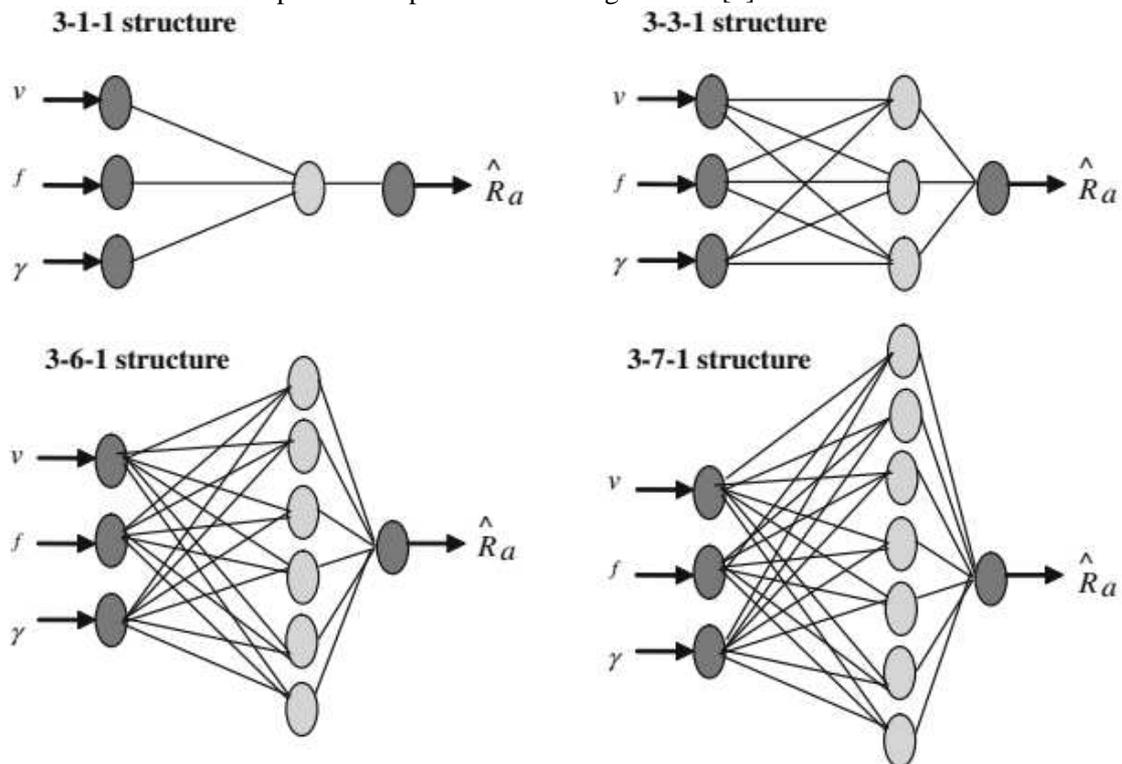


Fig. 1: Modèle de structure réseau avec une seule couche cachée [26]

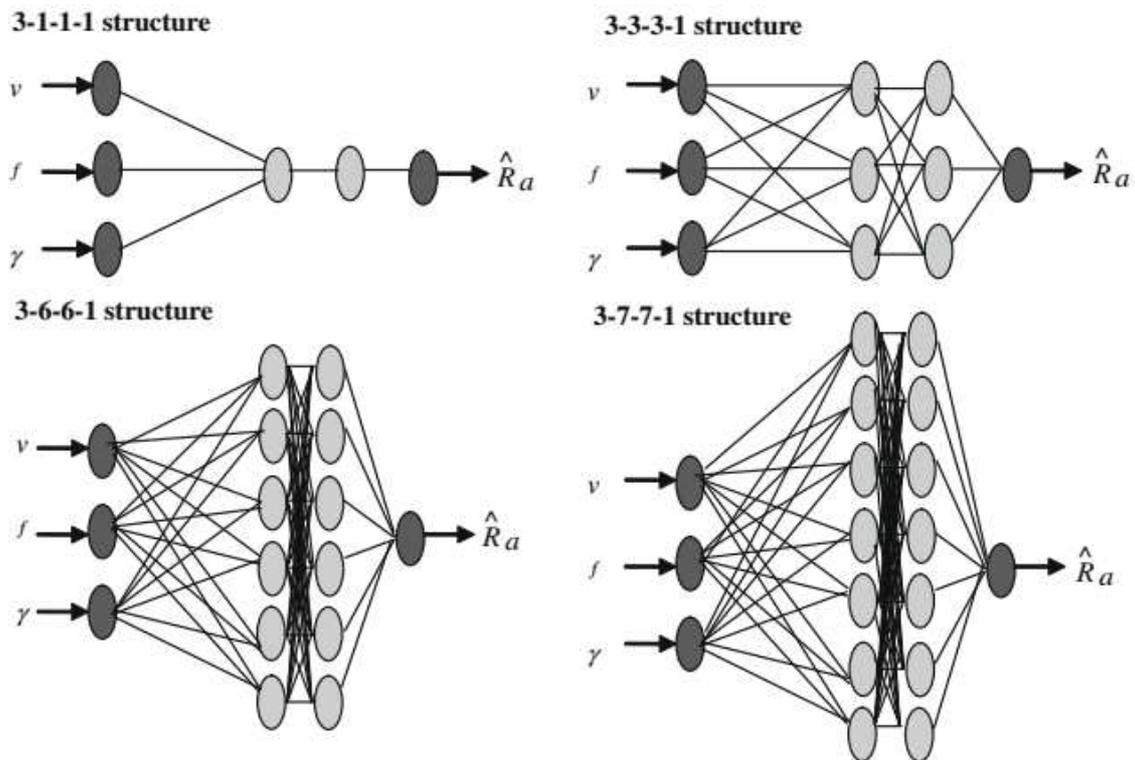


Fig. 2. Modèle de structure réseau avec deux couches cachées.[26]

- Tuncay Erzurumlu et Hasan Oktem [10]** ont étudié le rapport Dans cette étude, le modèle de surface de réponse (RS) et un réseau neuronal artificiel (ANN) sont développés pour prédire l'erreur de rugosité de surface sur les surfaces de moule. Dans le développement de modèles prédictifs, paramètres de coupe d'alimentation, vitesse de coupe, profondeur axiale-radiale de coupe et d'usinage sont considérés comme des variables de modèle. A cet effet, ils effectue. un certain nombre d'expériences d'usinage basées sur la conception factorielle à trois niveaux de la méthode expérimentale pour recueillir des valeurs de rugosité de surface. Un modèle efficace de RS de quatrième ordre est développé en utilisant des mesures expérimentales dans la cavité du moule. Un réseau neuronal d'alimentation basé sur la rétro propagation est une architecture multicouche constituée d'une ou plusieurs couches cachées (2 couches 42 neurones) placées entre les couches d'entrée (couche 1 5 neurones) et de sortie (couche 1 neurone). Le modèle de surface de réponse et un réseau neuronal artificiel sont comparés à des problèmes de fabrication tels que le coût de calcul, les forces de coupe, la durée de vie de l'outil, la précision dimensionnelle, etc.

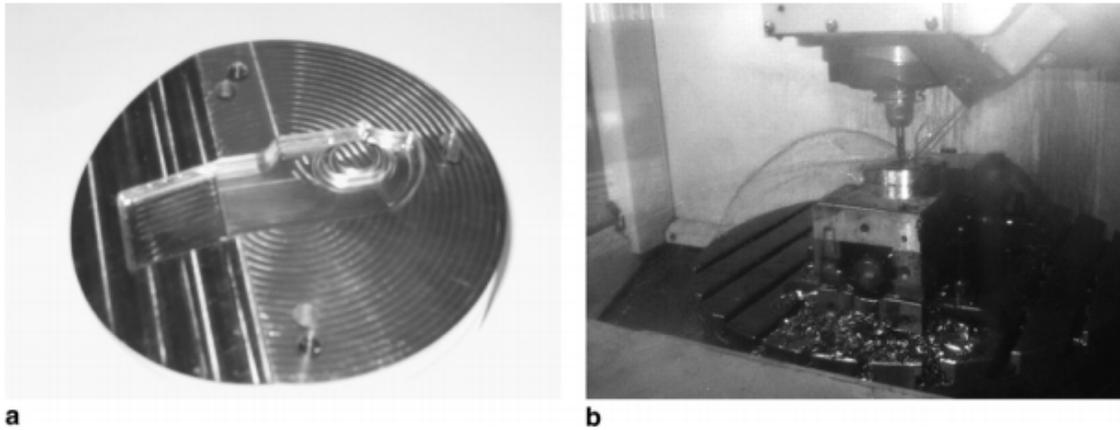


Fig.3. La partie de moule fraisée et le processus de fraisage. [5]

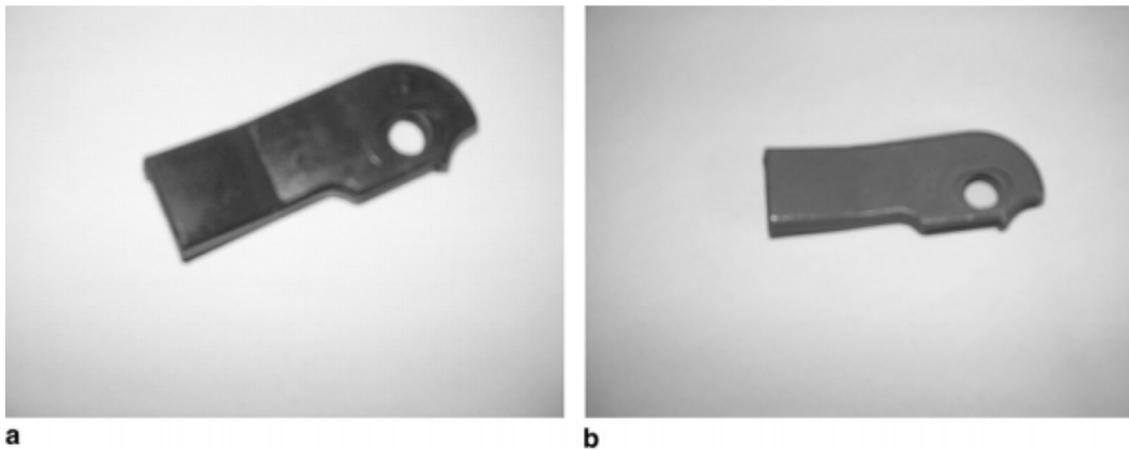


Fig. 4. Les pièces obtenues par usinage. (a) Produit en matière plastique; (b) pièce moulée sous pression. [5]

Set number	Surface roughness (μm)		
	Experimental measurements	RS model	ANN model
1	0.591	0.589	0.593
2	0.629	0.627	0.625
3	0.781	0.775	0.777
4	0.899	0.895	0.896
5	0.978	0.996	0.988
6	1.674	1.706	1.697
7	1.856	1.895	1.884
Maximum error (%)		2.05	1.48

Tableau 2: Comparaison de la RNA avec le modèle RS pour une faible rugosité de surface

- **Azlan Mohd Zain et al []**, ils ont trouvé La rugosité de surface est l'une des mesures de performance les plus courantes dans le processus d'usinage et un paramètre efficace pour représenter la qualité de la surface usinée. La minimisation de la mesure de la performance d'usinage telle que la rugosité de surface (R_a) doit être formulée dans le modèle mathématique standard. Pour prédire la valeur minimale de R_a , le processus de modélisation est pris dans cette étude. Le modèle développé traite de données expérimentales réelles de la R_a dans le processus d'usinage de fin de fraisage. Deux approches de modélisation, la régression et le Réseau Neural Artificiel (ANN), sont appliquées pour prédire la valeur R_a minimum. Les résultats montrent que la régression et les modèles RNA ont réduit la valeur R_a minimale des données expérimentales réelles d'environ 1,57% et 1,05%, respectivement.

A.M. Zain et al. // Modélisation mathématique appliquée 36 (2012) 1477-1492

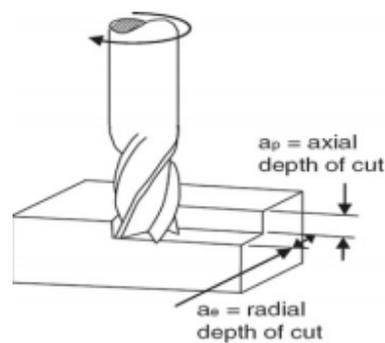


Fig. 5. Illustration du processus de fraisage fin. [5]

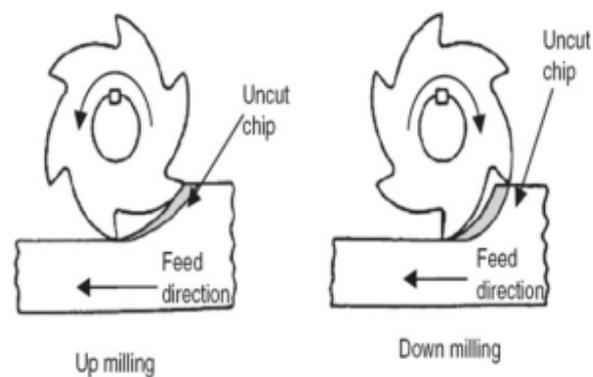


Fig. 6. Illustration haut et Bas du Procédés de fraisage [5]

No.	Data source	Setting values of experimental cutting conditions			Experimental R_a value (μm)		
		v (m/min)	f (mm/tooth)	γ ($^\circ$)	$R_{a_uncoated}$	R_{a_TiAlN}	R_{a_SNTR}
1	DOE 2 ^k	130	0.03	7	0.365	0.32	0.284
2		160	0.03	7	0.256	0.266	0.196
3		130	0.07	7	0.498	0.606	0.668
4		160	0.07	7	0.464	0.476	0.624
5		130	0.03	13	0.428	0.260	0.280
6		160	0.03	13	0.252	0.232	0.190
7		130	0.07	13	0.561	0.412	0.612
8		160	0.07	13	0.512	0.392	0.576
9	Center	144.22	0.046	9.5	0.464	0.324	0.329
10		144.22	0.046	9.5	0.444	0.380	0.416
11		144.22	0.046	9.5	0.448	0.460	0.352
12		144.22	0.046	9.5	0.424	0.304	0.400
13	Axial	124.53	0.046	9.5	0.328	0.360	0.344
14		124.53	0.046	9.5	0.324	0.308	0.320
15		167.03	0.046	9.5	0.236	0.340	0.272
16		167.03	0.046	9.5	0.240	0.356	0.288
17		144.22	0.025	9.5	0.252	0.308	0.230
18		144.22	0.025	9.5	0.262	0.328	0.234
19		144.22	0.083	9.5	0.584	0.656	0.640
20		144.22	0.083	9.5	0.656	0.584	0.696
21		144.22	0.046	6.2	0.304	0.300	0.361
22		144.22	0.046	6.2	0.288	0.316	0.360
23		144.22	0.046	14.8	0.316	0.324	0.368
24		144.22	0.046	14.8	0.348	0.396	0.360
R_a (minimum)					0.236	0.232	0.190

Tableau .3: Valeurs expérimentales de Ra pour le fraisage final [25]

Variable	Mean	N	Std. deviation	Std. error mean	Correlation	Sig.
EXP_SN _{TR}	0.38950	16	0.20067	5.0168E-02	0.869	0.000
ANN_SN _{TR}	0.38150	16	0.18568	4.6420E-02		

Tableau .4: Statistiques et corrélations (données expérimentales vs formation ANN de structure 3-7-7-1).[26]

Approach	Reduction of R_a (%)	
Modeling	Experimental vs. regression	1.57
	Experimental vs. ANN	1.05
Optimization	Experimental vs. GA	27
	Experimental vs. SA	27

Tableau .5: Pourcentage de réduction de la rugosité de surface minimale.[24]

- **Kuldip Singh al [11]**, Cet article présente une approche pour déterminer les paramètres d'usinage optimal menant à une rugosité de surface minimale en intégrant les réseaux de

neurones Artificiels (ANN) et l'algorithme génétique (GA). Pour vérifier la capacité de l'approche ANN-GA pour la prédiction et l'optimisation de la rugosité de la surface, une série d'expérience de 27 essais en tournage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V a été réalisée dans cette étude. La boîte à outils MATLAB a été utilisée pour déterminer le modèle de réseau neuronal. Les résultats prédits en utilisant ANN indiquent une bonne concordance entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales. En outre, GA est intégré au modèle de réseau neuronal pour déterminer les paramètres optimaux d'usinage conduisant à une rugosité de surface minimale. L'analyse de cette étude prouve que l'approche ANN-GA est capable de prédire les paramètres d'usinage optimaux

S. No	v (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)	Ra (μ m)
1*	80	0.06	0.50	0.3390
2	80	0.06	0.75	0.3114
3	80	0.06	1.00	0.2975
4	80	0.13	0.50	0.7532
5	80	0.13	0.75	0.7318
6	80	0.13	1.00	0.7213
7	80	0.21	0.50	1.5103
8	80	0.21	0.75	1.4932
9	80	0.21	1.00	1.4764
10	180	0.06	0.50	0.4302
11	180	0.06	0.75	0.4105
12	180	0.06	1.00	0.4074
13*	180	0.13	0.50	0.7611
14	180	0.13	0.75	0.7542
15	180	0.13	1.00	0.7435
16	180	0.21	0.50	1.5076
17*	180	0.21	0.75	1.4956
18	180	0.21	1.00	1.4892
19	280	0.06	0.50	0.5037
20	280	0.06	0.75	0.4965
21	280	0.06	1.00	0.4852
22*	280	0.13	0.50	0.8967
23	280	0.13	0.75	0.8873
24	280	0.13	1.00	0.8017
25	280	0.21	0.50	1.6846
26	280	0.21	0.75	1.6754
27	280	0.21	1.00	1.6687

Tableau .6: Ensemble de données expérimentales [12]

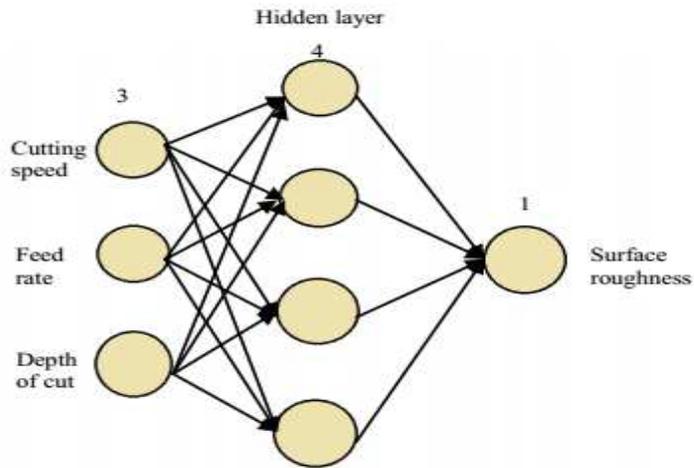


Fig. 7: Architecture de réseaux neuronaux sélectionnée [26]

S. no.	Experimental Ra	Predicted surface roughness		Absolute prediction error (%)	
		RSM (Literature model)	ANN (Proposed model)	RSM (Literature model)	ANN (Proposed model)
1	0.3390	0.3573	0.3403	5.40	0.38
2	0.3114	0.3434	0.3194	10.29	2.55
3	0.2975	0.3257	0.3083	9.48	3.64
4	0.7532	0.6923	0.7546	8.08	0.19
5	0.7318	0.6796	0.7265	7.13	0.72
6	0.7213	0.6630	0.6886	8.08	4.53
7	1.5103	1.4996	1.4820	0.71	1.88
8	1.4932	1.4882	1.4815	0.34	0.78
9	1.4764	1.4729	1.4832	0.24	0.46
10	0.4302	0.3988	0.4560	7.30	5.99
11	0.4105	0.3831	0.4356	6.68	6.13
12	0.4074	0.3635	0.4061	10.77	0.33
13	0.7611	0.7347	0.7634	3.47	0.31
14	0.7542	0.7201	0.7559	4.52	0.22
15	0.7435	0.7017	0.7453	5.62	0.24
16	1.5076	1.5430	1.5084	2.35	0.06
17	1.4956	1.5297	1.4961	2.28	0.03
18	1.4892	1.5126	1.4894	1.57	0.01
19	0.5037	0.5220	0.5100	3.63	1.25
20	0.4965	0.5044	0.4971	1.59	0.13
21	0.4852	0.4830	0.4861	0.45	0.19
22	0.8967	0.8588	1.0383	4.23	15.79
23	0.8873	0.8423	0.8875	5.07	0.03
24	0.8017	0.8221	0.8023	2.54	0.08
25	1.6846	1.6680	1.6768	0.98	0.46
26	1.6754	1.6529	1.6672	1.34	0.49
27	1.6687	1.6339	1.6432	2.08	1.53

Table .7: Comparaison des résultats de la prévision de RSM et de l'ANN proposé [27]

Predictive model	Mean absolute percentage error
RSM model (by Ramesh et al)	4.30
ANN model (present paper)	1.79

Tableau .8: Comparaison de l'erreur absolue moyenne (MAPE) [27]

- **N. Naresh al** [12] indique que dans le monde actuel, l'acier inoxydable AISI 304 est utilisé dans près de la moitié de la production et de la consommation mondiales À des fins industrielles. Les aciers austénitiques sont durs Matériaux à usiner en raison de leur résistance élevée, Ductilité et faible conductivité thermique.

Les auteurs rapportent une étude expérimentale sur la performance Caractéristiques de l'acier inoxydable AISI 304 usiné en Fraisage par CNC. la surface

Dans le procédé de fraisage, rugosité (SR) et le taux d'élimination des (MRR) sont les caractéristiques de performance les plus importantes, sont influencés par de nombreux facteurs comme la vitesse de coupe, Le taux d'alimentation et la profondeur de coupe. Le choix de ces paramètres Niveaux optimal joue un rôle essentiel dans l'obtention de la rugosité de surface et le MRR maximum. Les auteurs présentent une optimisation multi-objective du processus de fraisage en Utilisant la méthode de Grey-Taguchi dans l'usinage d'acier inoxydable AISI 304. Les expériences sont réalisée sur la matrice orthogonale L27 de Taguchi par vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de coupe à trois les niveaux. L'analyse relationnelle de Grey est utilisée pour obtenir la relation entre les paramètres d'usinage et les caractéristiques de performance.



Fig .8: Fixation de la plaque en acier inox AISI 304 à l'aide de pinces dans le centre d'usinage [5]

Exp. No.	S/N ratio		Normalised values of S/N ratios		Grey relational coefficient of		Grey relational grade
	SR	MRR	SR	MRR	SR	MRR	
1	9.8970	41.5836	0.0600	0.0707	0.3472	0.3498	0.3485
2	10.4576	43.5218	0.0000	0.4412	0.3333	0.4722	0.4027
3	9.3704	44.0824	0.1163	0.5484	0.3613	0.5254	0.4433
4	8.1787	42.9226	0.2438	0.3267	0.3980	0.4261	0.4120
5	7.5350	44.3497	0.3127	0.5995	0.4211	0.5552	0.4881
6	9.8970	45.1055	0.0600	0.7440	0.3472	0.6614	0.5043
7	5.0362	41.2140	0.5800	0.0000	0.5435	0.3333	0.4384
8	6.5580	43.5218	0.4172	0.4412	0.4618	0.4722	0.4670
9	6.7448	44.6090	0.3972	0.6491	0.4534	0.5876	0.5205
10	8.4043	42.9226	0.2197	0.3267	0.3905	0.4261	0.4083
11	7.1309	45.1055	0.3559	0.7440	0.4370	0.6614	0.5492
12	6.7448	46.0206	0.3972	0.9190	0.4534	0.8606	0.6570
13	4.8825	44.0824	0.5964	0.5484	0.5533	0.5254	0.5393
14	4.4370	45.1055	0.6441	0.7440	0.5842	0.6614	0.6228
15	5.6799	46.0206	0.5111	0.9190	0.5056	0.8606	0.6831
16	3.8764	43.2274	0.7041	0.3849	0.6282	0.4484	0.5383
17	5.0362	43.8066	0.5800	0.4957	0.5435	0.4978	0.5206
18	4.8825	44.6090	0.5964	0.6491	0.5533	0.5876	0.5704
19	6.1961	44.0824	0.4559	0.5484	0.4789	0.5254	0.5021
20	4.7314	44.3497	0.6126	0.5995	0.5634	0.5552	0.5593
21	4.2934	46.0206	0.6595	0.9190	0.5949	0.8606	0.7277
22	3.0980	42.9226	0.7873	0.3267	0.7015	0.4261	0.5638
23	2.6154	44.6090	0.8390	0.6491	0.7564	0.5876	0.6720
24	4.5830	46.4444	0.6285	1.0000	0.5737	1.0000	0.7868
25	1.1103	42.6067	1.0000	0.2663	1.0000	0.4053	0.7026
26	2.7335	45.1055	0.8263	0.7440	0.7422	0.6614	0.7018
27	2.4988	46.0206	0.8514	0.9190	0.7709	0.8606	0.8157

Tableau .9: Ratios S / N et coefficient de réponses relationnelles de Grey et grade relationnel Grey [22]

Factors	Level-1	Level-2	Level-3
A	0.4472	0.5654	0.6702
B	0.5109	0.5858	0.5861
C	0.4948	0.5537	0.6343

Tableau .10: Tableau de réponses (moyenne) pour le grade relationnel Grey global.

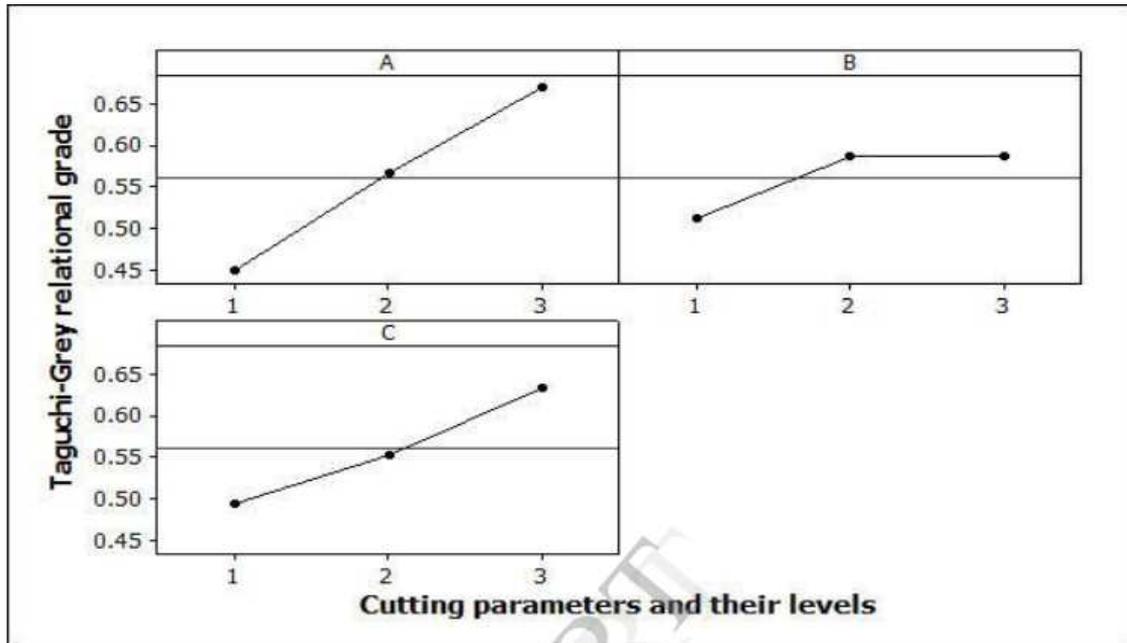


Fig .09: Le graphique de réponse pour chaque niveau de paramètres d'usinage [22]

Factors	DOF	Sum of squares	Mean square	F value	% Contribution
A	2	0.2240	0.1120	46.66	56.90
B	2	0.0338	0.0169	7.04	8.58
C	2	0.0883	0.0441	18.37	22.43
Error	20	0.0476	0.0024	-	12.09
Total	26	0.3937	-	-	100

Tableau .12: Résultats de l'ANOVA [22]

I-11 Conclusion

L'étude bibliographique réalisée dans ce chapitre nous a permis de comprendre les paramètres et les phénomènes physiques qui interviennent lors du fraisage. Les articles scientifiques résumés à la fin de ce chapitre nous ont permis de comprendre les méthodes de modélisation en fraisage, principalement la méthodologie de surface de réponse et la méthode des réseaux de neurone artificielle.

CHAPITRE II

MOYENS UTILISES ET

PROGRAMME D'EXPERIENCES

II-1-INTRODUCTION:

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des moyens mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le but de caractériser le comportement des matériaux de coupe étudiés, vis à vis du matériau à usiner. Cela mènera à la présentation des différents équipements utilisés qui ont servi au suivi de la rugosité des surfaces obtenues lors de l'usinage, de l'évolution de l'usure et des efforts de coupe générés. Nous présentons également les différentes méthodes utilisées pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées au Laboratoire pédagogique de Coupe des Métaux du département de Génie Mécanique (Université du 08 Mai 1945 de Guelma).

II-2-MOYENS UTILISES:

II-2-1/ Machine-outil:

La fraiseuse qui a servie à nos essais est une fraiseuse universelle de la Société Nationale de Production des Machines Outils Industrielles (PMO), modèle **almo** de puissance 5 KW (fig. II-1).



Fig. II-1: Fraiseuse universelle **almo**.

a- Fréquences de rotation:

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée. Les fréquences de rotation disponibles sur la fraiseuse sont présentées sur la figure. II-2.

b- Vitesses d'avances:

Les vitesses d'avances disponibles sur la fraiseuse sont mentionnées sur la figure. II-3.

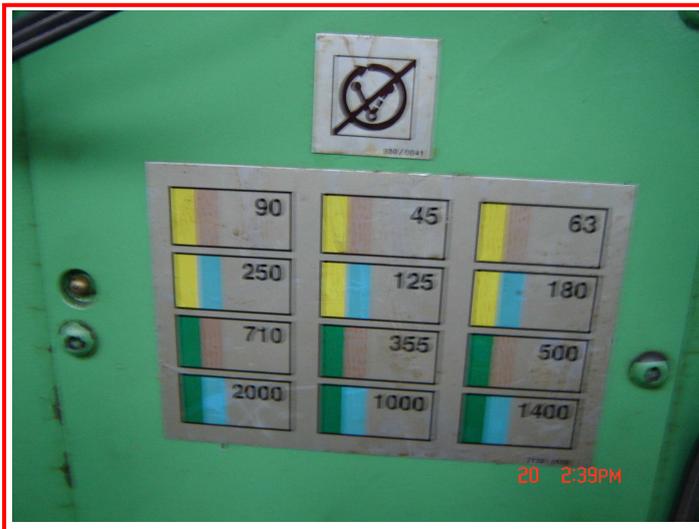


Fig II-2 : image de la fréquence de rotation.



Fig. II-3 : image de la vitesse d'avances.

II-2-2- Matériau usiné:

Le matériau que nous avons utilisé dans nos essais pour tester nos plaquettes de coupe, est un acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 (304L), dérivé de la nuance de base X5CrNi18-10 (304). Ces aciers couvrent un large domaine d'utilisation, vu leurs bonnes résistances à la corrosion, notamment les équipements liés à la santé ou qui demandent beaucoup d'hygiène. Parmi leurs milieux d'emploi, le secteur médical tel que les instruments chirurgicaux à savoir : pinces, bistouris, ciseaux, etc..., l'intérieur des conteneurs frigorifiques, tubes de transport de fluide, l'industrie automobile (certains éléments de structures, les organes de sécurité), industries de transports terrestres et maritimes, électroménager, ménager et coutellerie, équipements pour industries, voitures ferroviaires. Etc. [19]. Pour ces essais nous avons utilisé les éprouvettes présentées sur les figures (II-4 ; II-5 ; II-6) :

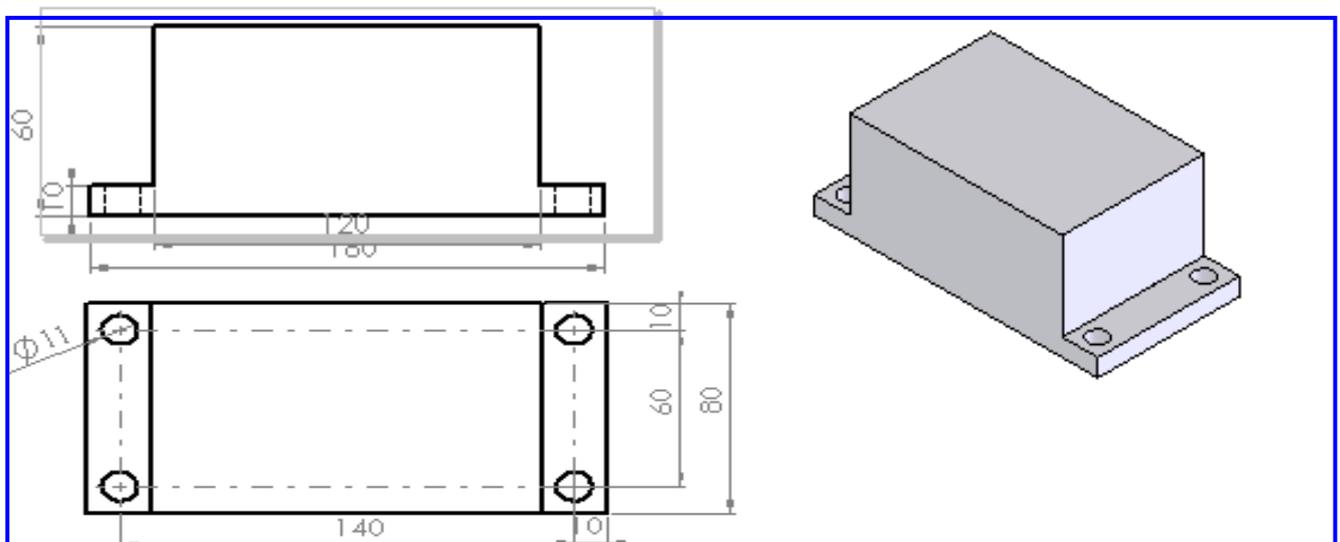


Fig.II-4 : Eprouvette pour les essais de l'effort de coupe.

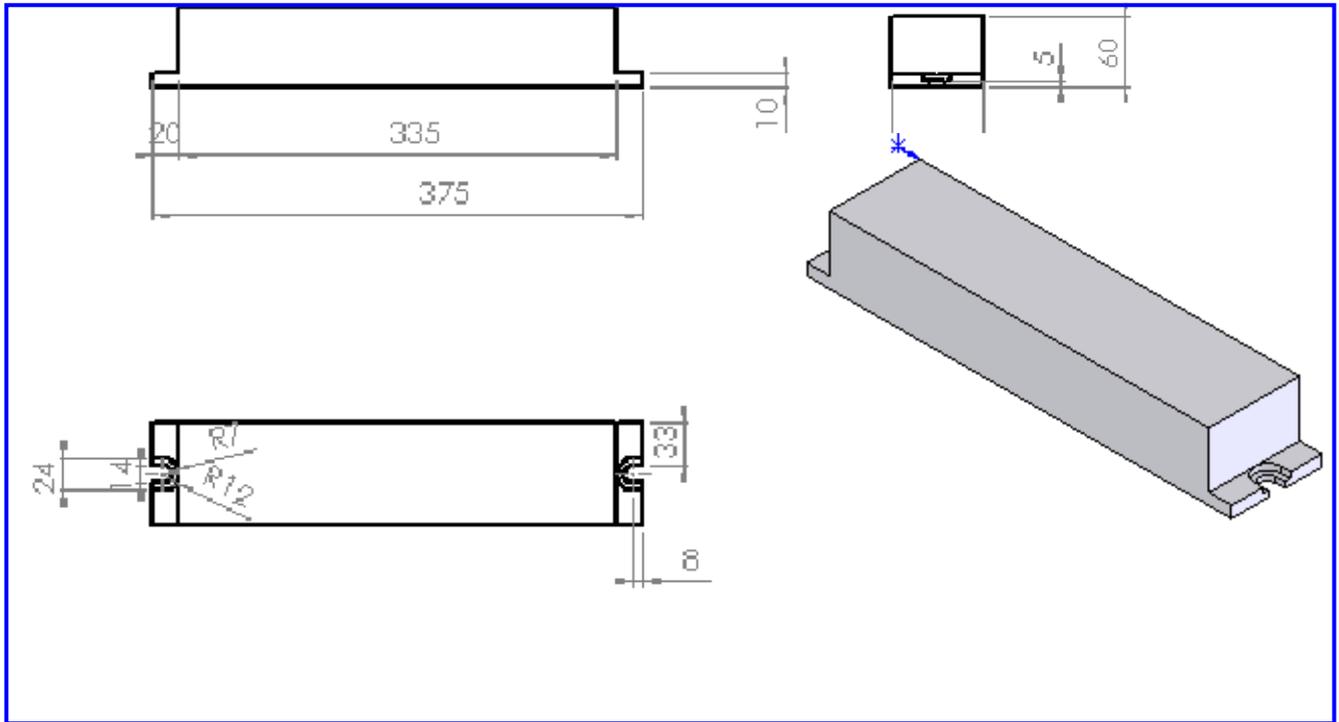


Fig.II-5 : Eprouvette pour les essais d'usure.

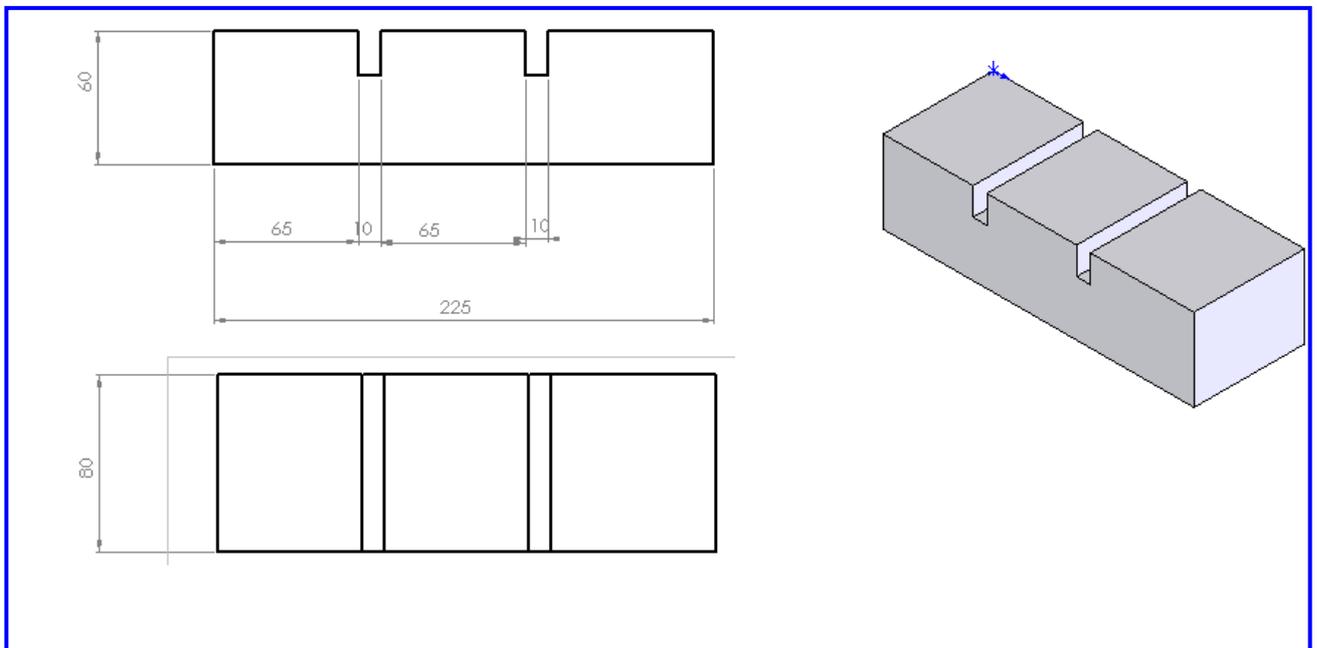


Fig. II-6 : Eprouvette pour les essais de la rugosité.

a- Désignation :

C'est un acier inoxydable austénitique fortement allié classé parmi les super alliages, sa désignation est présentée dans le tableau (Tab. II-1).

Tab. II-1: Désignation du matériau de la pièce [20].

Niveau de la norme	CEN		AFNOR	Etats-Unis	
Norme	EN 10088-2		NFA35-573:1990	AISI	N°UNS*
Type de désignation	Symbolique	Numérique	Symbolique		
Désignation	X2CrNi18-9	1.4307	Z3CN18-10	304L	S30403

*UNS: Unified Numbering Systems (Systèmes De Numération Unifiés).

b- Composition chimique :

La composition chimique de l'acier **X2 Cr Ni 18-9 (304 L)** qui est représentée dans le tableau (Tab II-2), a été réalisée ou produit par le complexe sidérurgique d'El-Hadjar - metal-steel-.

Tab. II-2: Composition chimique de l'acier X2 Cr Ni 18-9 (304L).

Eléments Chimique	Pourcentages (%)	Eléments Chimique	Pourcentages (%)
C	0,02	Nb	0,013
Mn	1,44	Ni	7,69
Si	0,33	Cr	16,91
P	0,02	Mo	0,402
S	0,016	V	0,112
Cu	0,727	Sn	0,0121
Al	0,012	W	0,066
Ti	0,005	Fe	72,1

c- Caractéristiques mécaniques:

Les caractéristiques mécaniques à température ambiante de l'acier X2CrNi18-9 (304L) (d'après EN10088-3) sont représentées dans le tableau (Tab.II-3) [21].

Tab. II-3: Caractéristiques mécaniques de l'acier X2CrNi18-9 (304L) [21].

d (mm)	Dureté max (HB)	Limite d'élasticité min.		Résistance à la traction	Allongement à la rupture min	
		$R_{p0,2}$	$R_{p1,0}$	R_m	A%	
		N/mm ²		N/mm ²	long.	tr
$d \leq 160$	215	175	210	450-680	45	-

La dureté de notre matériau (X2CrNi18-9) est de l'ordre de **142HB** (dureté mesurée au complexe CYCMA de Guelma).

d- Propriétés physiques:

Les propriétés physiques de cet acier à température ambiante d'après la norme européenne (EN 10088-1) sont présentées dans le tableau II-4.

Tab. II-4: Propriétés physiques de l'acier X2CrNi18-9 (304L) [21].

Masse volumique	Module d'élasticité à 20°C	Conductivité thermique à 20°C	Capacité thermique massique à 20°C	Résistivité électrique à 20°C	Magnétisable
(kg/dm ³)	(KN/mm ²)	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	(j.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	(Ω x mm ² /m)	
7,9	200	15	500	0,73	non

II-2-3- Outil de coupe:

L'outil de coupe qui a servi aux essais, est une fraise à surfacer de 100mm de diamètre, (fig. II-7). Elle est composée de trois éléments essentiels:

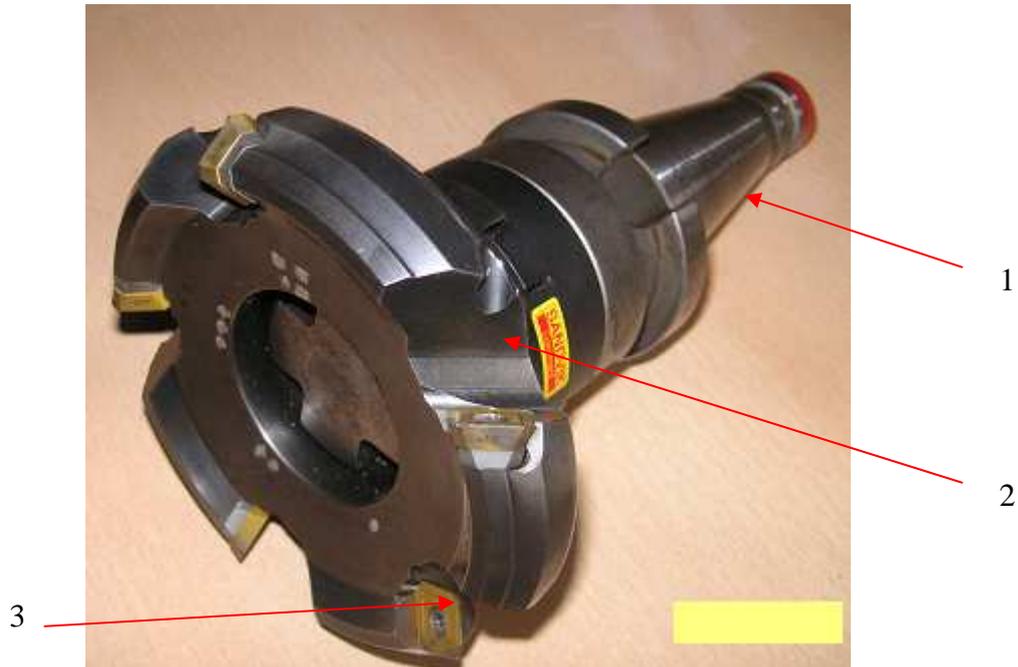


Fig. II-7 : Fraise à surfacer.

- D'un cône morse (1).
- D'une cloche **CoroMill 245** à surfacer (2) sur laquelle sont montées 5 plaquettes Amovibles à fixation par vis fabriquée à la firme SANDVIK (fig. II-8), dont les caractéristiques géométriques de cette fraise sont données sur la figure II-8-b, et sur le tableau II-5.
- De plaquettes rapportées (3) dont les caractéristiques sont représentés dans les tableaux (II-6 ; II-7) et les figures (II-9 ; II-10):



Fig. II-8: fraise à surfacer Coromill 245.

Tab. II-5: Caractéristiques géométriques et dimensions de la fraise.

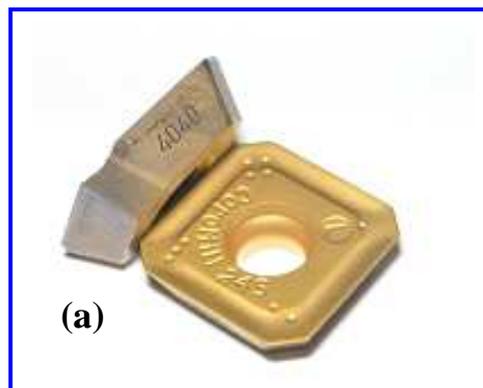
Désignation	Dimensions							
R245-100Q32-12L	Dc	dm _m	D _{c2}	l ₁	a _p Max	tr/min max	κ _r	γ
	100	32	112,5	50	6	11300	45°	+23°

κ_r : Angle de direction principale,

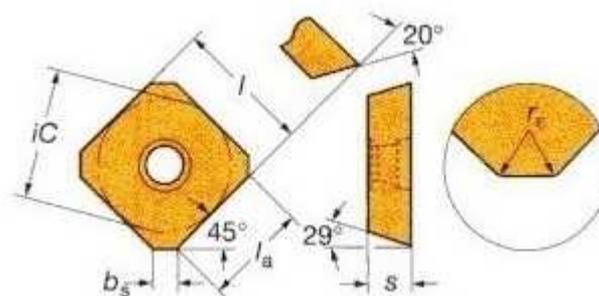
γ : Angle d'attaque.

Tab. II-6 : Désignation des plaquettes de coupe.

	Matériau de coupe	Désignation SANDVIK	Désignation ISO
A	Carbure revêtu	GC4040 (M20-M40)	R245-12 T3 M-PL



a: Carbure revêtu

Fig. II-9: Plaquettes de coupe utilisées.**Fig. II-10:** Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.

Tab. II-7:Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.

	Designation	$l=iC$	s	bs	la	r_ϵ
12	R245-12 T3 E-PL	13,4	3,97	2,1	10	1,5

II-3- EQUIPEMENTS DE MESURE UTILISÉS :

II-3-1-Rugosimètre:

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) Surf test 201 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (fig. II-11). Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.

**Fig. II-11:** Rugosimètre Surf test Rj201

II-3-2- Microscope pour la mesure de l'usure:

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (V_B) est du type HUND (W-AD). La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0.001mm. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure V_B . Après chaque séquence de travail la plaquette de coupe est démontée de la fraise, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figure II-12).



(a)



(b)

Fig. II-12 : Microscope Optique: **a)** Pour les photos de l'arrête rapportée de la plaquette de coupe.

b) Pour:- Mesurer l'usure des plaquettes de coupe.

- Photographier l'usure des plaquettes de coupe.

II-3-3-Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe:

Pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) nous avons utilisé un dynamomètre qui se compose d'un support équipé de capteurs piézoélectriques, d'un transmetteur qui permet l'enregistrement sélectif des trois composantes de l'effort de coupe et d'un amplificateur de mesure à 4 canaux. L'acquisition des données sur PC se fait par une interface analogique numérique Black Star I/O 2308 via un câble RS232 (figure II.13).

Composants du système :

Le système de mesure des efforts de coupe se compose de :

- Amplificateur de mesure à 4 canaux, l'unité contient 3 amplificateurs autonomes et précis à tension continue avec facteur d'amplificateur réglable et un quatrième amplificateur sert à amplifier la tension de sortie délivrée par le thermocouple de l'outil pour mesurer la température de coupe.
- Transmetteur d'effort de coupe : enregistrement sélectif des trois composantes d'une force (Force de coupe, force axiale et force radiale).
- Transmetteur de mesure de la température des plaquettes.
- Transmetteur de force, moment de perçage.

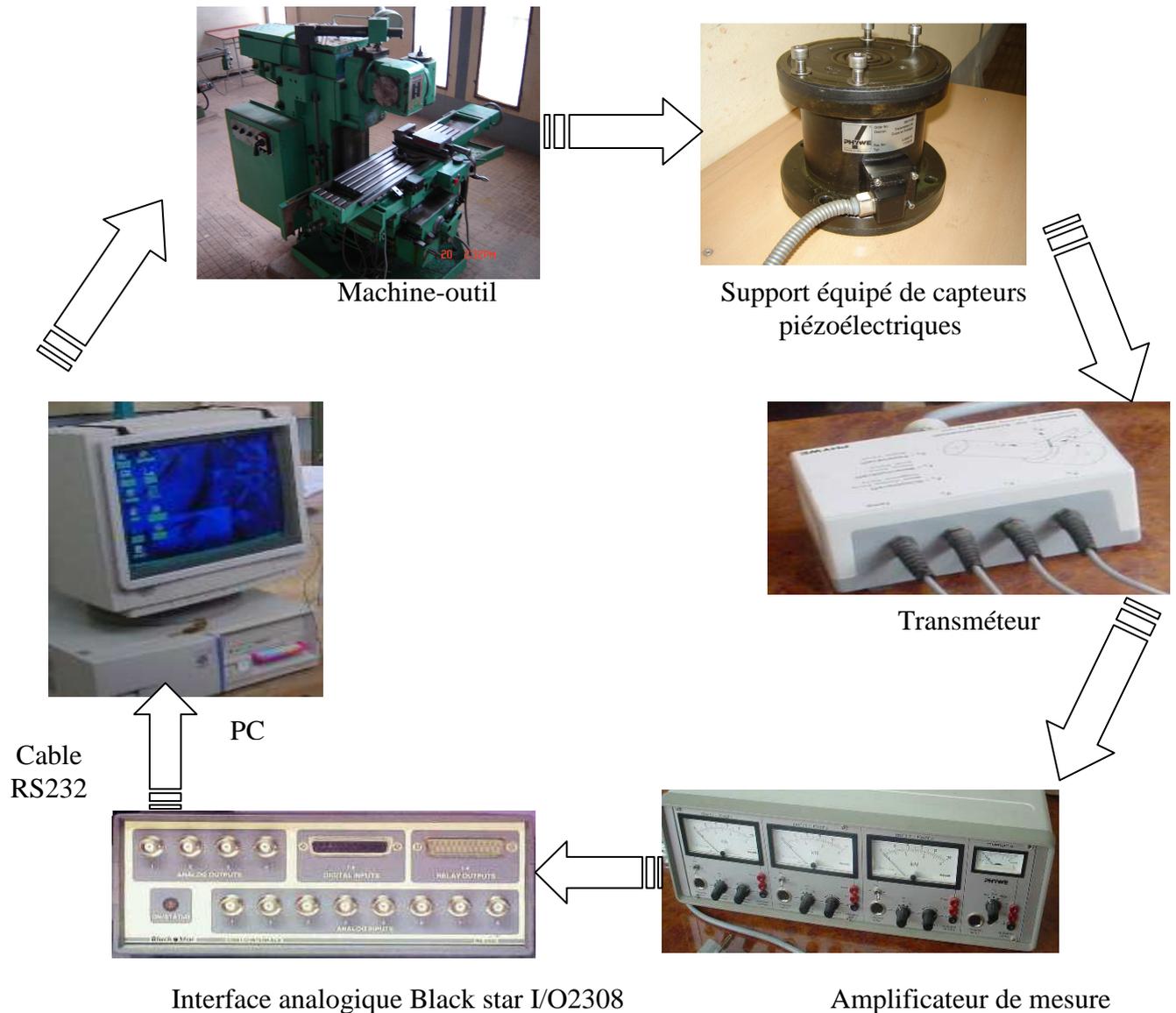


Fig. II-13 : Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.

II-4- Planification des expériences:

II-4-1- Introduction:

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage on peut citer, les éléments du régime de coupe (V_c , f_z , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (r , α , β , γ , ϵ_r , ...etc.), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, lubrification). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, les efforts, la rugosité, la température de coupe présentent les paramètres de sortie. Dans cette étude plusieurs points seraient intéressants d'être traité. Mais à notre niveau on s'est limité à l'évolution des paramètres suivants:

- Evolution de la rugosité en fonction des paramètres (V_c , f_z , a_p) ;
- Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille VB ;
- Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres (V_c , f_z , a_p) ;

- Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille VB ;
- Evolution de l'usure des matériaux de coupe.

Les essais ont été réalisés suivant deux méthodes de planification des expériences qui sont:

- méthode unifactorielle ;
- méthode multifactorielle.

II-4-2- Méthode multifactorielle:

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes.

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_z , a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe, durée de vue). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

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

Où: - N: nombre d'essais;

- q: nombre de niveau de variations des facteurs de base;

- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons :

a- Effort de coupe et rugosité :

Trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur a trois niveaux de variation (un niveau Supérieur (+1), niveau moyen (0) et un niveau inférieur (-1)).

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

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau (Tab. II-9).

Tab. II-9: Matrice de planification par la méthode multifactorielle (Effort de coupe ; rugosité).

Niveau de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs		
	V_c (m/min)	f_z (mm/dent)	a_p (mm)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau moyen (0)	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur moyenne
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale	Valeur minimale
N° des essais	Valeurs codifiées des facteurs		
	X_1	X_2	X_3

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

Chapitre III

modélisation du processus

de fraisage en utilisant

RMS

III-1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques du processus de coupe en fraisage de face. Les modèles trouvés permettent d'exprimer les relations entre les éléments du régime de coupe (V_c , f_z et ap) et les paramètres technologiques étudiés (rugosité, l'effort de coupe, la pression spécifique de coupe, la puissance de coupe et le volume du copeau enlevé).

III-2 Résultats expérimentaux

Dans le tableau (III-1) sont présentées les valeurs expérimentales de la rugosité (Ra), de l'effort de coupe (F_c), de la pression spécifique (K_s), de la puissance de coupe (P_c) et du volume de copeau enlevé (VCE). Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience factorielle complet L27 lors du fraisage de face avec des plaquettes en carbure revêtu [22]

Tableau III-1 : Les résultats expérimentaux pour un plan L27

N° d'essais	Paramètres d'usinage			Facteurs de Réponse				
	V_c (m/min)	f_z (mm /tooth)	ap (mm)	Ra (μm)	F_c (N)	(K_s) (MPa)	(P_c) (W)	VCE (mm^3/min)
1	111	0.08	0.3	0.98	390	16250.00	721.50	3393.63
2	111	0.08	0.6	1	500	10416.67	925.00	6787.26
3	111	0.08	0.9	1.42	625	8680.56	1156.25	10180.89
4	111	0.16	0.3	1.14	430	8958.33	795.50	6787.26
5	111	0.16	0.6	0.66	576	6000.00	1065.60	13574.52
6	111	0.16	0.9	1.35	810	5625.00	1498.50	20361.78
7	111	0.25	0.3	2.04	531	7080.00	982.35	10605.10
8	111	0.25	0.6	2.05	712	4746.67	1317.20	21210.19
9	111	0.25	0.9	2.25	932	4142.22	1724.20	31815.29
10	157	0.08	0.3	0.64	279	11625.00	730.05	4800
11	157	0.08	0.6	1	389	8104.17	1017.88	9600
12	157	0.08	0.9	0.94	501	6958.33	1310.95	14400
13	157	0.16	0.3	1.23	340	7083.33	889.67	9600

14	157	0.16	0.6	1.27	483	5031.25	1263.85	19200
15	157	0.16	0.9	1.26	603	4187.50	1577.85	28800
16	157	0.25	0.3	1.57	367	4893.33	960.32	15000
17	157	0.25	0.6	2	635	4233.33	1661.58	30000
18	157	0.25	0.9	1.52	809	3595.56	2116.88	45000
19	222	0.08	0.3	0.74	211	8791.67	780.70	6787.26
20	222	0.08	0.6	0.82	377	7854.17	1394.90	13574.52
21	222	0.08	0.9	1.09	487	6763.89	1801.90	20361.78
22	222	0.16	0.3	0.86	291	6062.50	1076.70	13574.52
23	222	0.16	0.6	1.1	407	4239.58	1505.90	27149.04
24	222	0.16	0.9	1.33	541	3756.94	2001.70	40723.57
25	222	0.25	0.3	1.13	318	4240.00	1176.60	21210.19
26	222	0.25	0.6	1.28	531	3540.00	1964.70	42420.38
27	222	0.25	0.9	1.25	661	2937.78	2445.70	63630.57

La méthode appliquée pour la détermination des modèles mathématiques est la méthodologie de surface de réponse (RMS), en utilisant deux logiciels de statistique, Minitab 16 et Design-Expert 10. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif. Pour cela on a choisie un niveau de signification α fixé à ($\alpha = 0.05$).

III-3 Analyse des résultats de la rugosité (Ra)

III-3-1 Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra)

Le tableau (III-2) expose les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour le critère de rugosité (Ra). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur la rugosité (Ra).

Tableau III-2: Résultats de l' ANOVA pour la rugosité de surface (Ra)

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Modèle	3.77607254	9	0.41956362	7.44717165	0.0002		Signifiant
Vc	0.6230982	1	0.6230982	11.0598705	0.0040	17.242	Signifiant
fz	2.18434559	1	2.18434559	38.7717045	< 0.0001	60.444	Signifiant
ap	0.23652901	1	0.23652901	4.19834333	0.0562	6.545	Insignifiant
$Vc \times fz$	0.3500083	1	0.3500083	6.21257856	0.0233	9.685	Signifiant
$Vc \times ap$	0.0018755	1	0.0018755	0.03328973	0.8574	0.052	Insignifiant
$fz \times ap$	0.05474429	1	0.05474429	0.9717004	0.3381	1.515	Insignifiant
Vc^2	0.00068421	1	0.00068421	0.01214458	0.9135	0.019	Insignifiant
fz^2	0.15988226	1	0.15988226	2.83787864	0.1103	4.424	Insignifiant
ap^2	0.00267407	1	0.00267407	0.04746429	0.8301	0.074	Insignifiant
Error	0.95775709	17	0.05633865				
Total	4.73382963	26				100	

On remarque que l'avance par dent (fz) est le facteur le plus influent sur la rugosité de surface (Ra) avec une contribution de 60,44%, suivie de la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 17,24% et l'interaction ($Vc \times fz$) avec une contribution 9,68% et une contribution de profondeur de passe avec 6,54%. Les interactions ($fz \times ap$) et ($Vc \times ap$) ont des faibles contributions de (1,51% et 0,05%) par conséquent ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (Vc^2 , fz^2 et ap^2) ne sont pas aussi significatifs. Des résultats similaires sont obtenus par [23, 24].

III-3-2 Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-1) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité (Ra). On remarque que l'avance est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ra) car il a la plus grande pente suivie par la vitesse de coupe (Vc) et en dernier lieu la profondeur de passe (ap). Sur le graphe l'influence de la vitesse de coupe (Vc) est presque existante.

La figure (III-2) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la rugosité (Ra). Cette figure nous montre des interactions entre tous les variables, mais le tableau (ANOVA) (III-2) de la rugosité indique que l'interaction ($Vc \times fz$) est la plus significative, par contre les deux autres ($fz \times ap$) et ($Vc \times ap$) ne sont pas significatives.

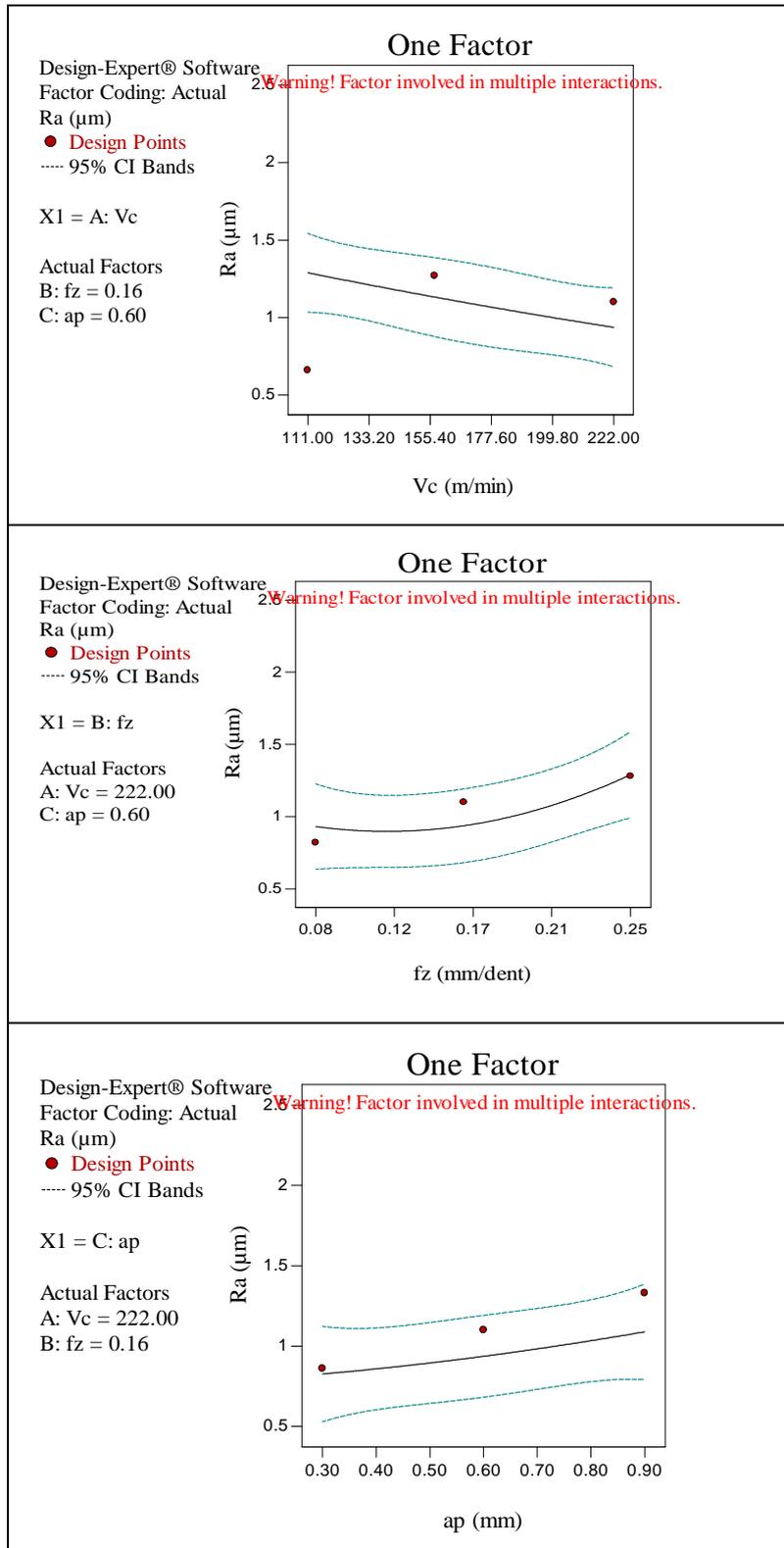


Fig. III-1 Graphique des effets principaux pour (Ra).

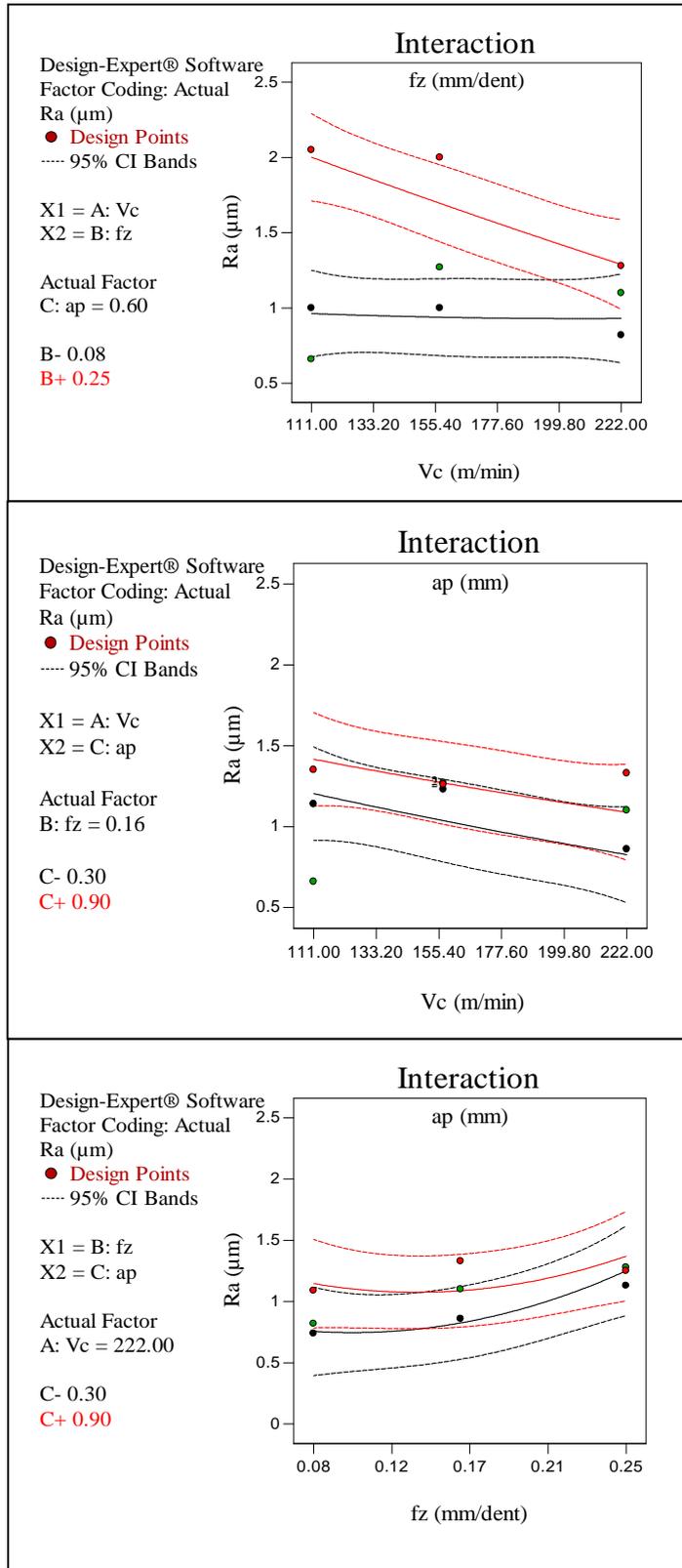


Fig. III-2 Diagramme d'interaction pour (Ra).

III-3-3 Equation de régression pour le critère de rugosité (Ra)

La relation entre la variable dépendante (Ra) et les variables indépendantes (Vc , fz et ap) sont exprimées par le modèle mathématique quadratique indiqué par l'équation (1) avec un coefficient de détermination (R^2) qui égale à 79,77% .

$$\begin{aligned}
 Ra = & 39.723 \times 10^{-2} + 944.279 \times 10^{-6} Vc + 420.543 \times 10^{-2} fz + 41.404 \times 10^{-2} ap + \\
 & 358.887 \times 10^{-8} Vc^2 + 22.685 fz^2 + 23.457 \times 10^{-2} ap^2 - 360.061 \times 10^{-4} Vc \times fz + \\
 & 747.211 \times 10^{-6} Vc \times ap - 264.721 \times 10^{-2} fz \times ap
 \end{aligned} \quad (1)$$

III-3-4 Diagrammes de surfaces 3D et Graphiques de Contour

La figure (III-3) présente les diagrammes (3D) de la rugosité de surface (Ra) en fonction des paramètres de régime de coupe. La figure (III-3-a) présente le diagramme (3D) de (Ra) en fonction de (Vc) et (fz), on remarque que l'avance à la plus grande influence car elle possède la plus grande pente, avec son augmentation la rugosité (Ra) augmente. Par contre l'augmentation (Vc) induit une diminution de (Ra). La figure (III-3-b) présente le diagramme (3D) de (Ra) en fonction de (Vc) et (ap) on remarque que légère augmentation de (Ra) en fonction de (ap) et aussi une légère diminution de (Ra) en fonction de (Vc). La figure (III-3-c) présente le diagramme (3D) de (Ra) en fonction de (fz) et (ap). On remarque que légère augmentation de (Ra) en fonction de (ap) et aussi une grande influence de (fz) sur (Ra). D'autre part les graphes de contour figure (III-4) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas Ra) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

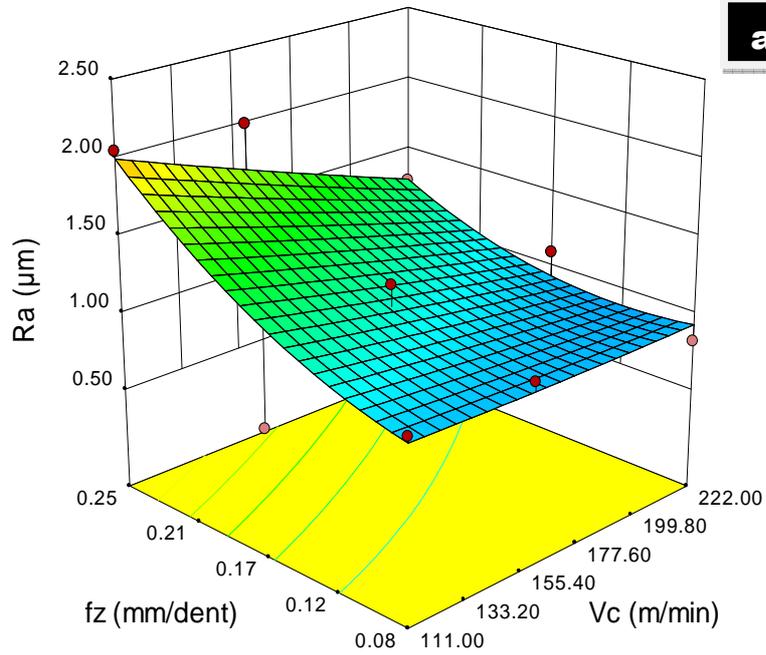
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Ra (μm)

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value



X1 = A: Vc
 X2 = B: fz

Actual Factor
 C: ap = 0.60



a

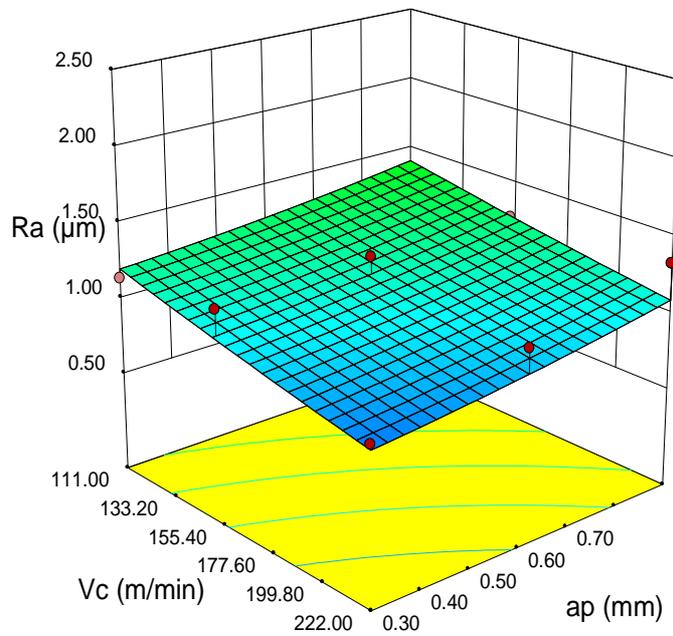
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Ra (μm)

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value



X1 = A: Vc
 X2 = C: ap

Actual Factor
 B: fz = 0.16



b

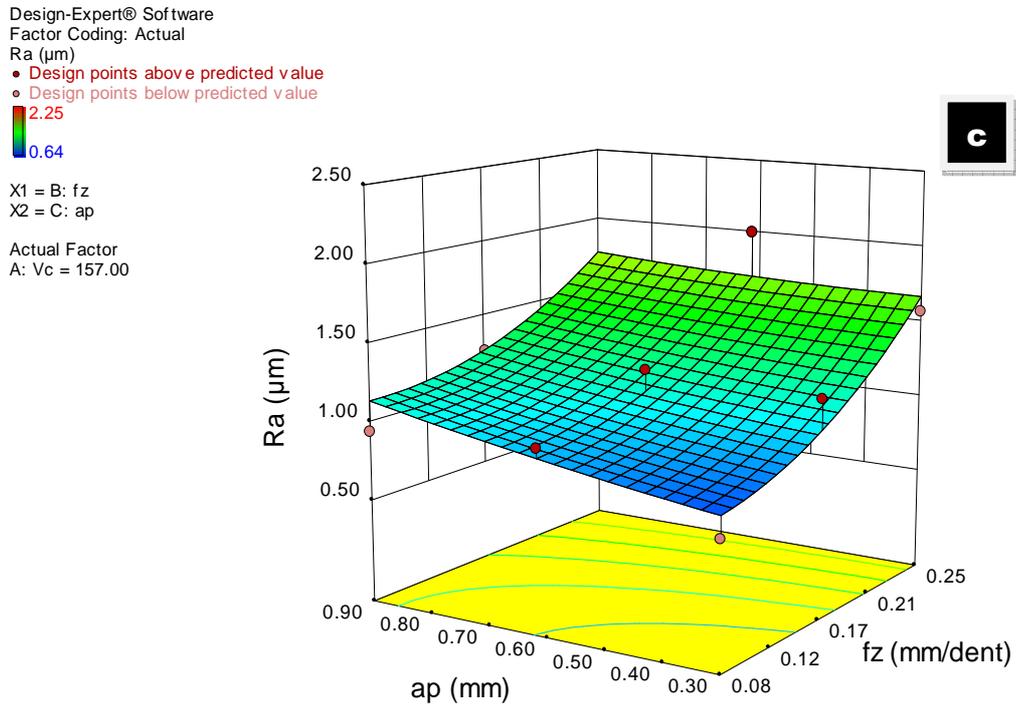
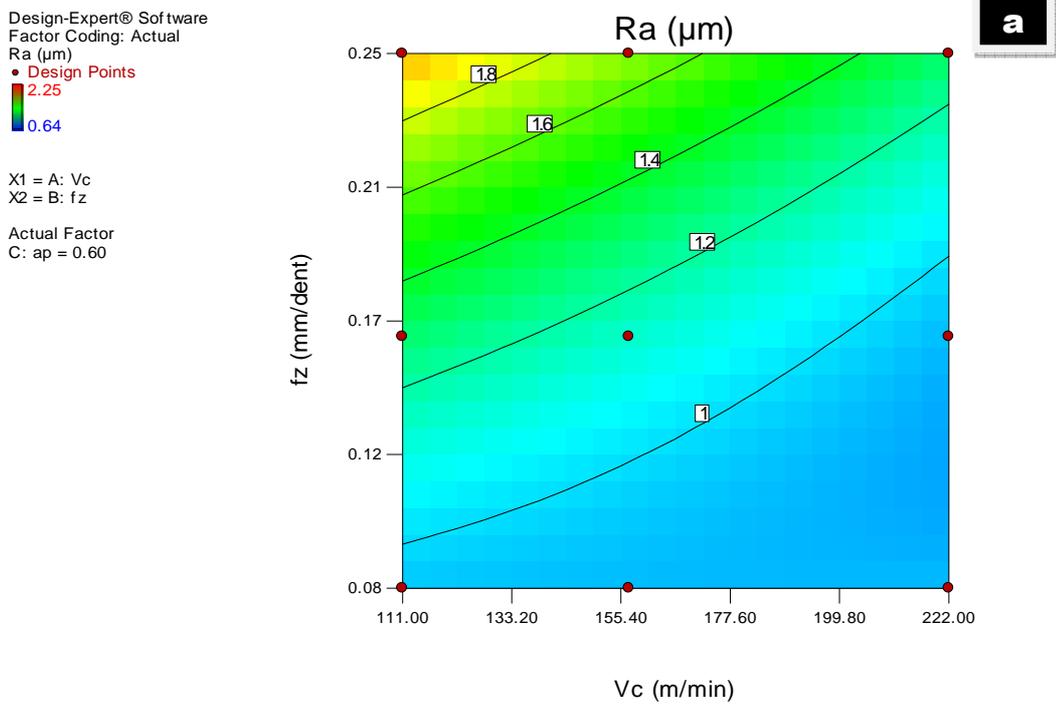
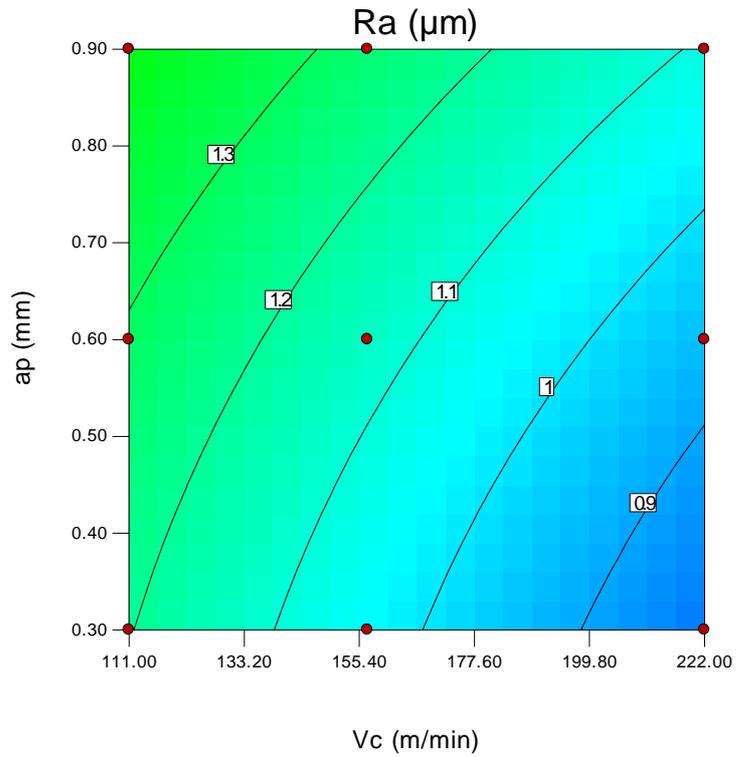


Fig. III-3 Diagrammes (3D) de la rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc ; fz ; ap

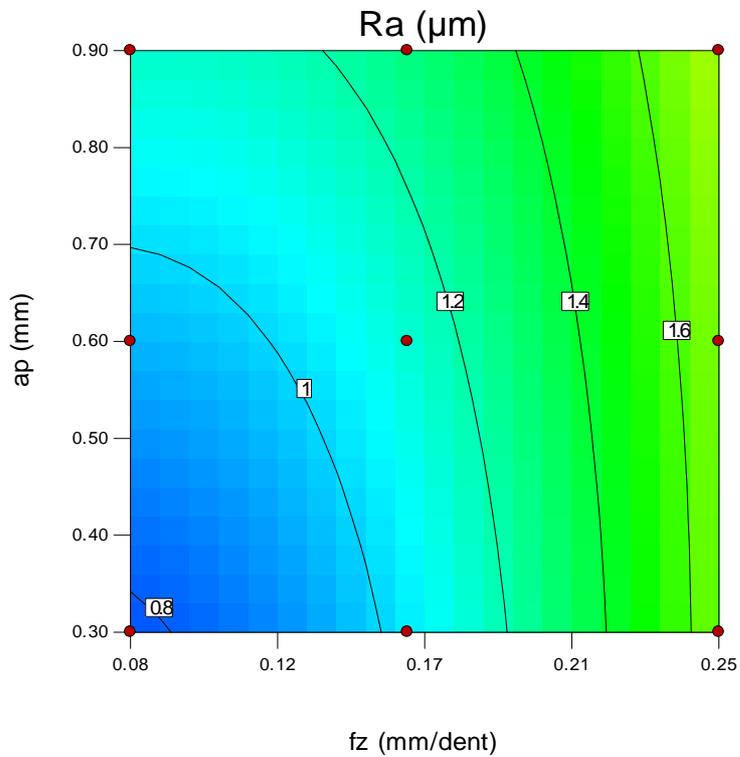


Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Ra (μm)
 • Design Points
 2.25
 0.64
 X1 = A: Vc
 X2 = C: ap
 Actual Factor
 B: fz = 0.16



b

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Ra (μm)
 • Design Points
 2.25
 0.64
 X1 = B: fz
 X2 = C: ap
 Actual Factor
 A: Vc = 157.00



c

Fig. III-4 Graphique de Contour de (Ra) en fonction de Vc ; fz ; ap

III-3-5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure (III-5) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la rugosité (Ra). L'analyse de la figure (III-5) montre une corrélation acceptable entre les deux courbes puisque $R^2 = 79.77\%$

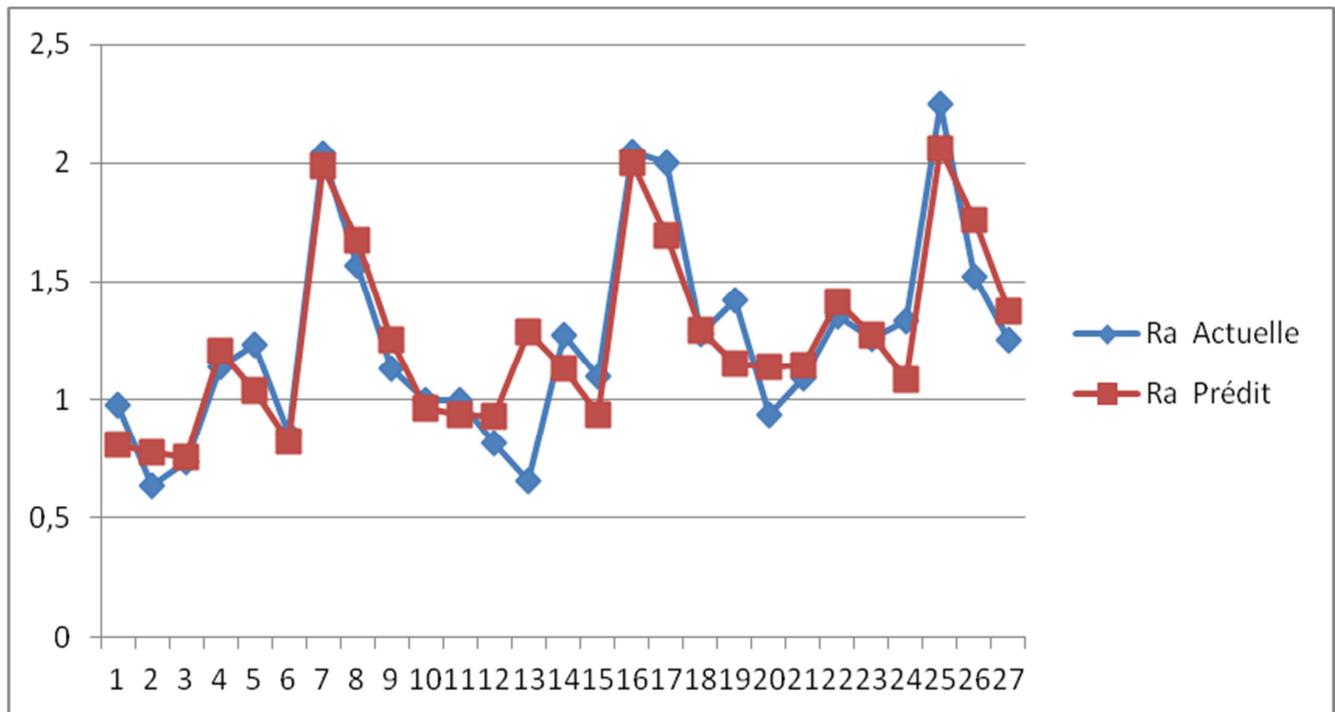


Fig. III-5 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (Ra)

III-4 Analyse des résultats de l'effort de coupe (F_c)

III-4-1 Analyse de la variance (ANOVA) pour (F_c)

Le tableau (III-3) expose les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort de coupe (F_c). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur l'effort de coupe (F_c).

Tableau III-3: Résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe (F_c)

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Modèle	794381.697	9	88264.633	120.256479	< 0.0001		Signifiant
V_c	158363.166	1	158363.166	215.762486	< 0.0001	19.921	Signifiant
f_z	163016.499	1	163016.499	222.102437	< 0.0001	20.506	Signifiant
ap	437266.414	1	437266.414	595.755257	< 0.0001	55.005	Signifiant
$V_c \times f_z$	4549.4083	1	4549.4083	6.19835832	0.0234	0.572	Signifiant
$V_c \times ap$	1740.67553	1	1740.67553	2.37158987	0.1420	0.219	Insignifiant
$f_z \times ap$	17278.2801	1	17278.2801	23.5408572	0.0001	2.173	Signifiant
V_c^2	11911.2753	1	11911.2753	16.2285615	0.0009	1.498	Signifiant
f_z^2	673.549411	1	673.549411	0.91767991	0.3515	0.085	Insignifiant
ap^2	163.62963	1	163.62963	0.2229378	0.6428	0.021	Insignifiant
Erreur	12477.4879	17	733.969879				
Total	806859.185	26				100	

On remarque que les paramètres significatifs sont (ap) avec la contribution de 55%, suivie par (f_z) et (V_c) avec (20,5 et 19,92)% de contributions respectivement. Les termes ($V_c \times f_z$), ($f_z \times ap$) et (V_c^2) se révèlent significatifs avec de légères contributions (moins de 2,2%). Les mêmes résultats sont observés par [25, 26].

III-4-2 Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-6) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort de coupe (F_c). On remarque que la profondeur de passe est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe (F_c) car il a la plus grande pente suivie par la vitesse de coupe (V_c) et en dernier lieu l'avance par dent (f_z). La figure (III-7) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour l'effort de coupe (F_c).

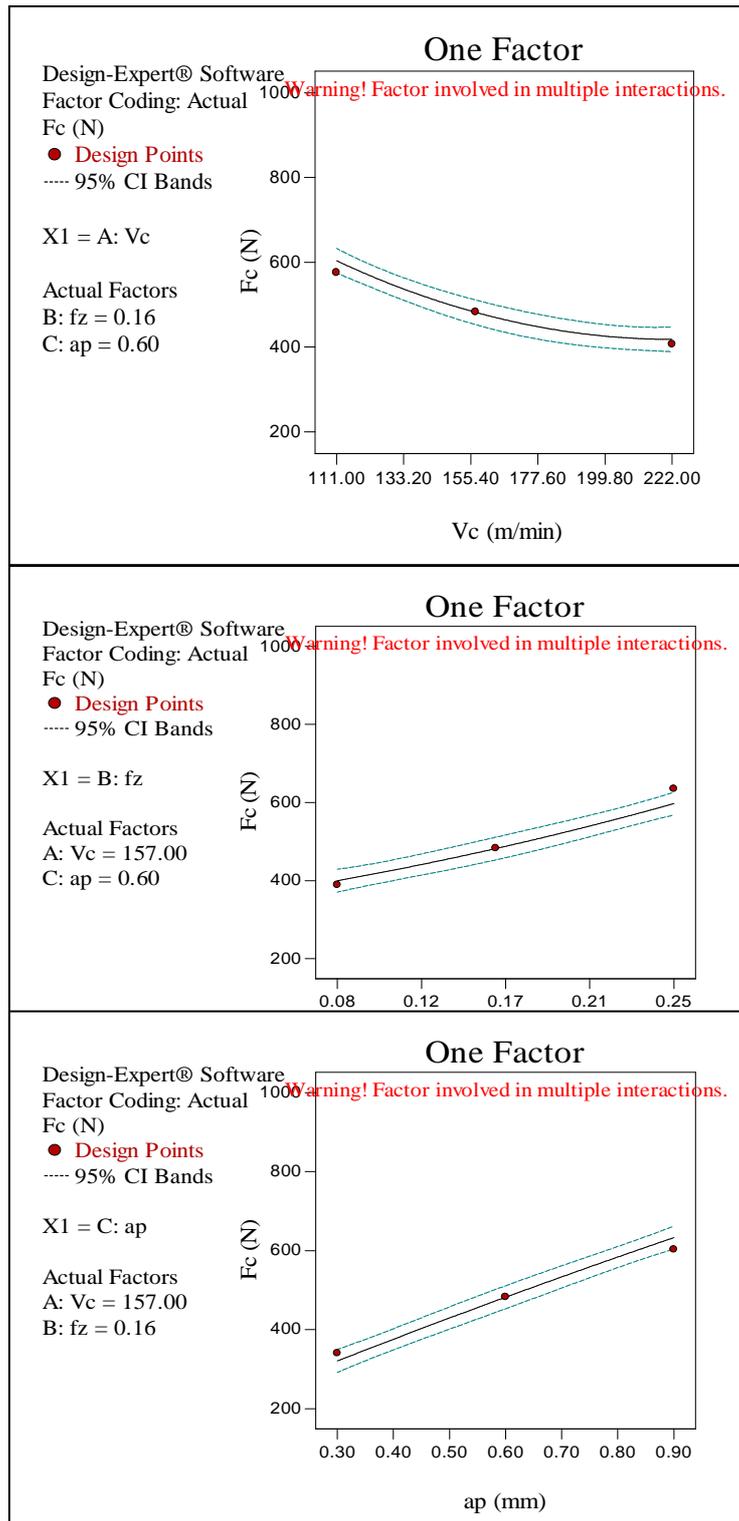


Fig. III-6 Graphique des effets principaux pour (Fc).

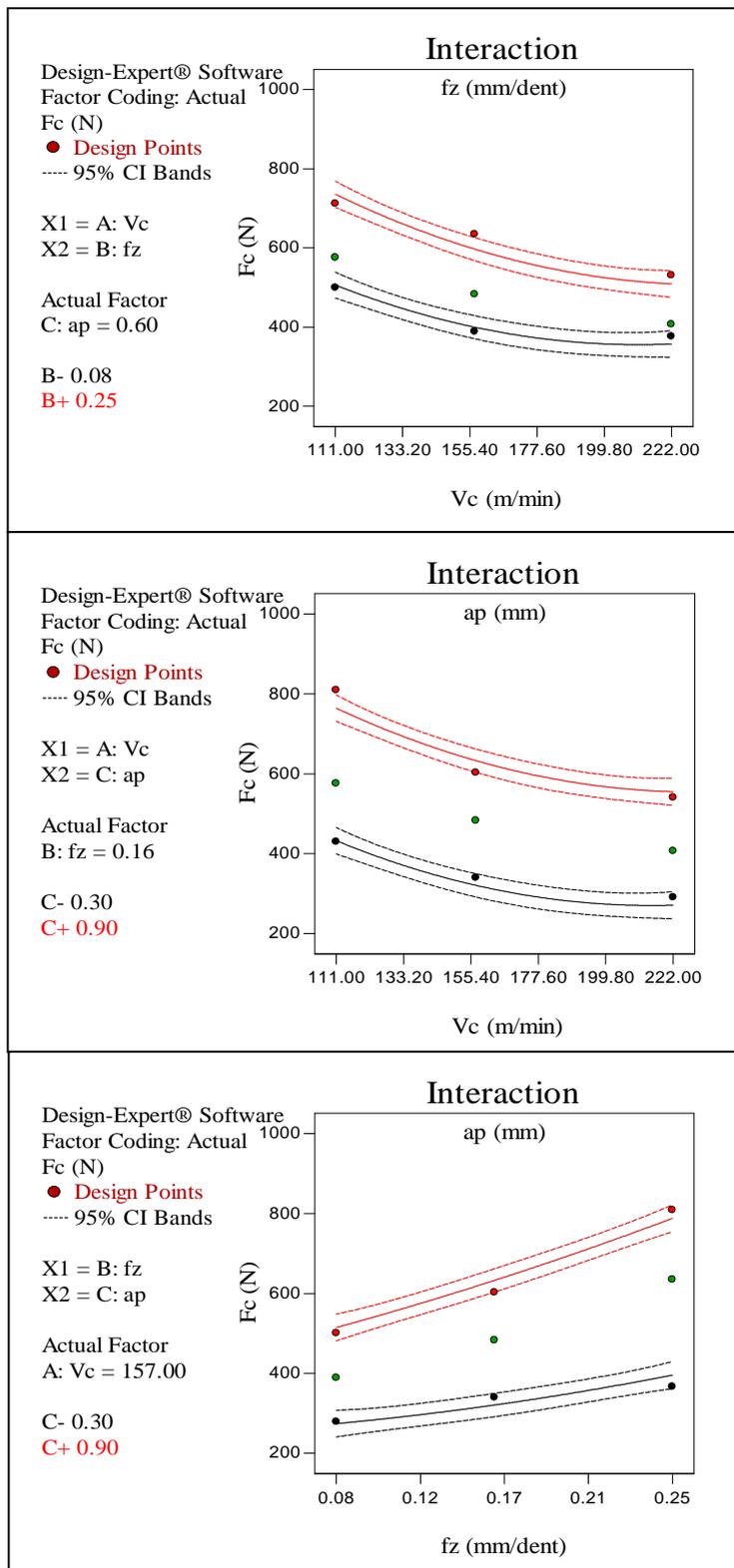


Fig. III-7 Diagramme d'interaction pour (Fc).

III-4-3 Equation de régression pour l'effort de coupe (F_c)

Le modèle de l'effort de coupe (F_c) est donné par l'équation suivante (3). Son coefficient de détermination (R^2) est de 98,45%

$$F_c = 651.046 - 556.769 \times 10^{-2} V_c + 427.566 f_z + 465.037 a_p + 14.974 \times 10^{-3} V_c^2 + 1472404 f_z^2 - 5802469 \times 10^{-2} a_p^2 - 410.501 \times 10^{-2} V_c \times f_z - 719.85 \times 10^{-3} V_c \times a_p + 14.872 \times 10^2 f_z \times a_p \quad (3)$$

III-4-4 Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour

Les graphiques 3D de l'effort de coupe (F_c) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée dans la figure (III-8-a). Cette figure montre que l'augmentation de vitesse de coupe fait diminuer l'effort de coupe (F_c), par contre l'augmentation de l'avance (f_z) fait augmenter l'effort de coupe (F_c). La figure (III-8-b) montre que la profondeur de passe a une grande influence sur (F_c). La figure (III-8-c) montre que l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance par dent fond augmenter l'effort de coupe (F_c)

Par conséquent l'effort minimal est obtenu par l'application d'une grande vitesse de coupe et une faible avance de profondeur de passe. Les graphes de contour sont représentés dans la figure, (III-9), il permet de visualiser la surface de réponse et d'établir les valeurs de réponse.

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Fc (N)

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

932

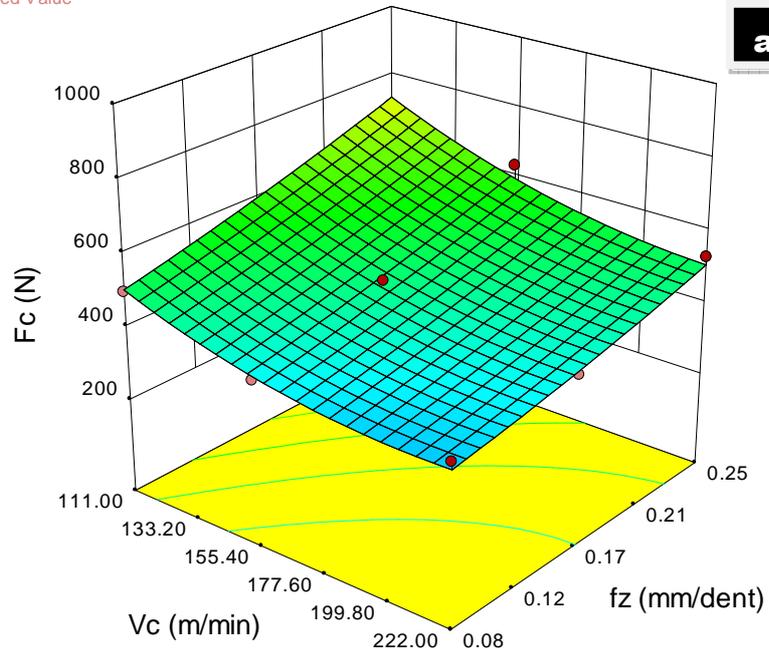
211

X1 = A: Vc

X2 = B: fz

Actual Factor

C: ap = 0.60



Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Fc (N)

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

932

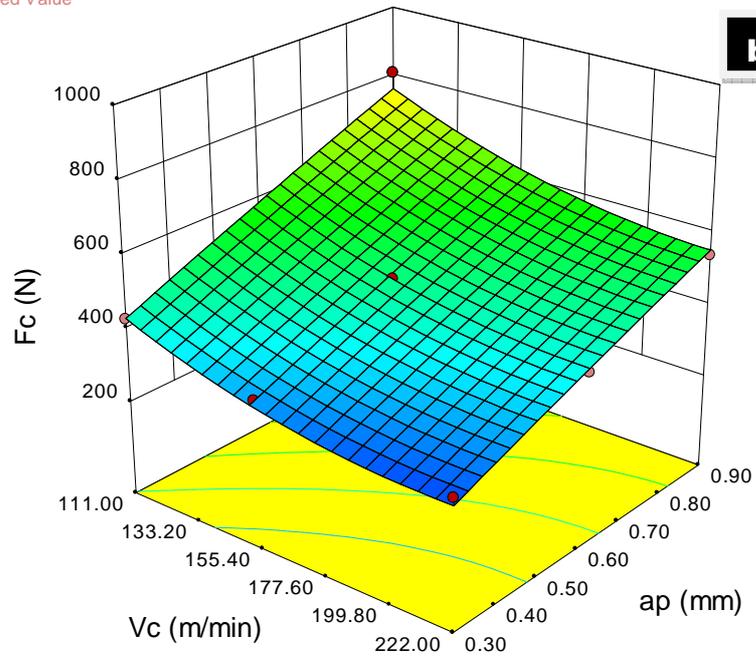
211

X1 = A: Vc

X2 = C: ap

Actual Factor

B: fz = 0.16



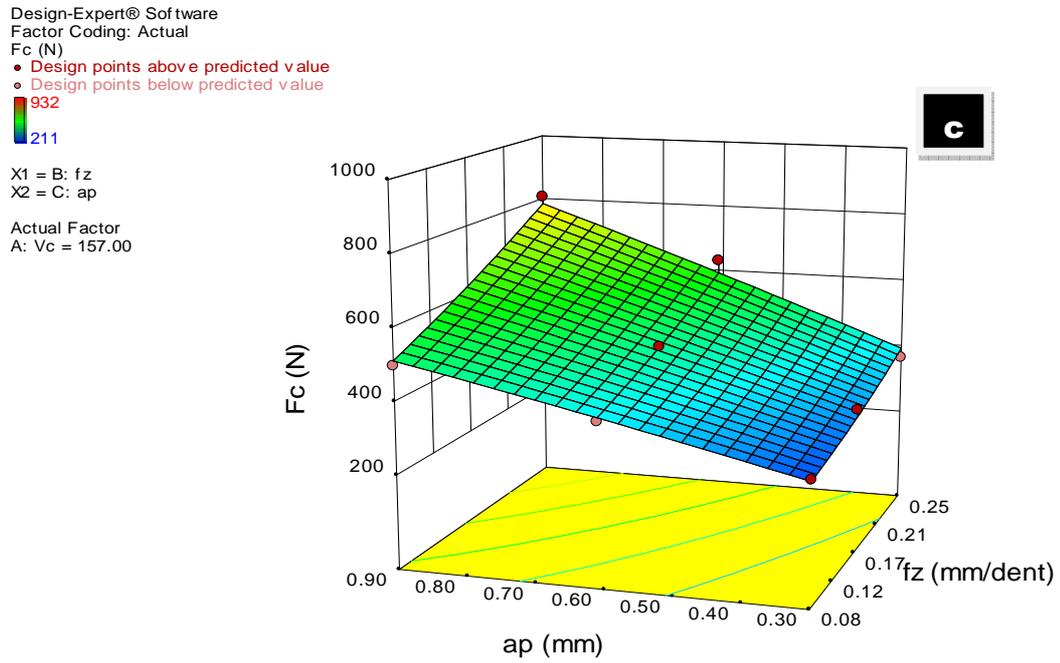
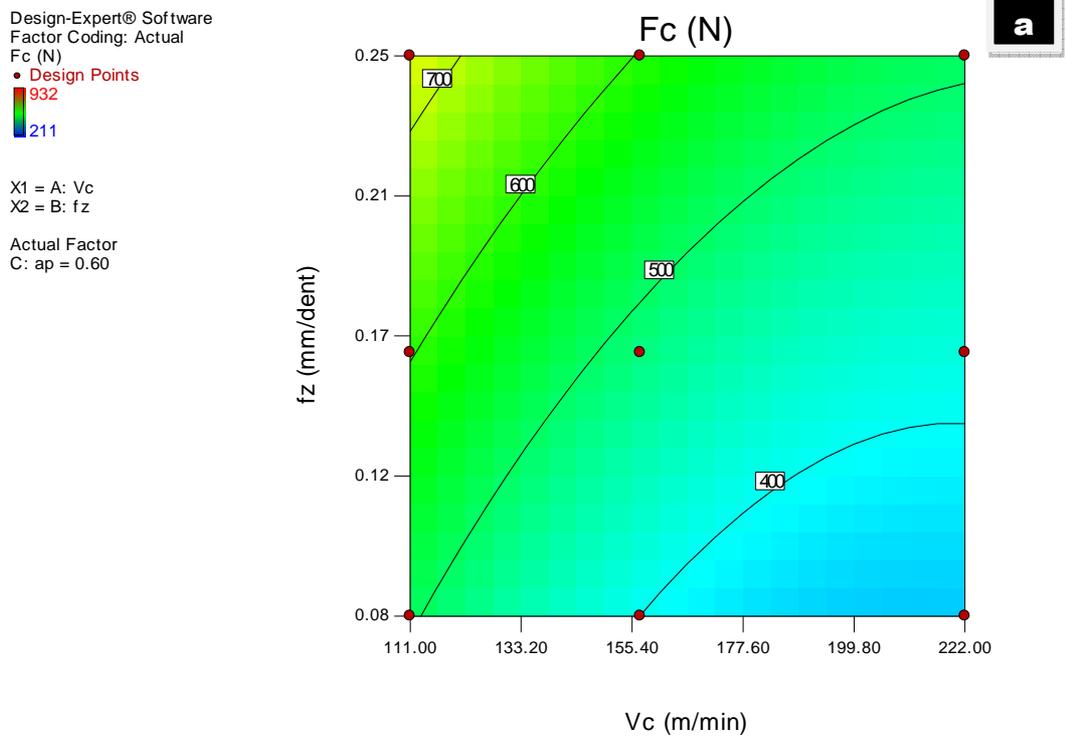


Fig-III-8 Diagrammes de surfaces de (F_c) en fonction de (V_c , f_z , a_p).



Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Fc (N)

• Design Points

932

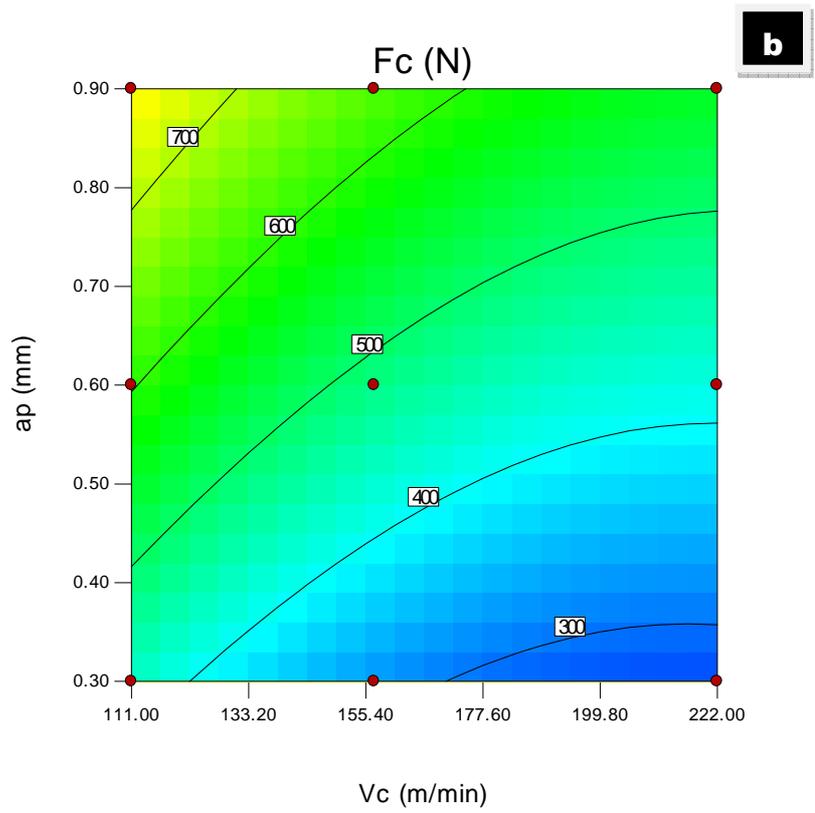
211

X1 = A: Vc

X2 = C: ap

Actual Factor

B: fz = 0.16



Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Fc (N)

• Design Points

932

211

X1 = B: fz

X2 = C: ap

Actual Factor

A: Vc = 157.00

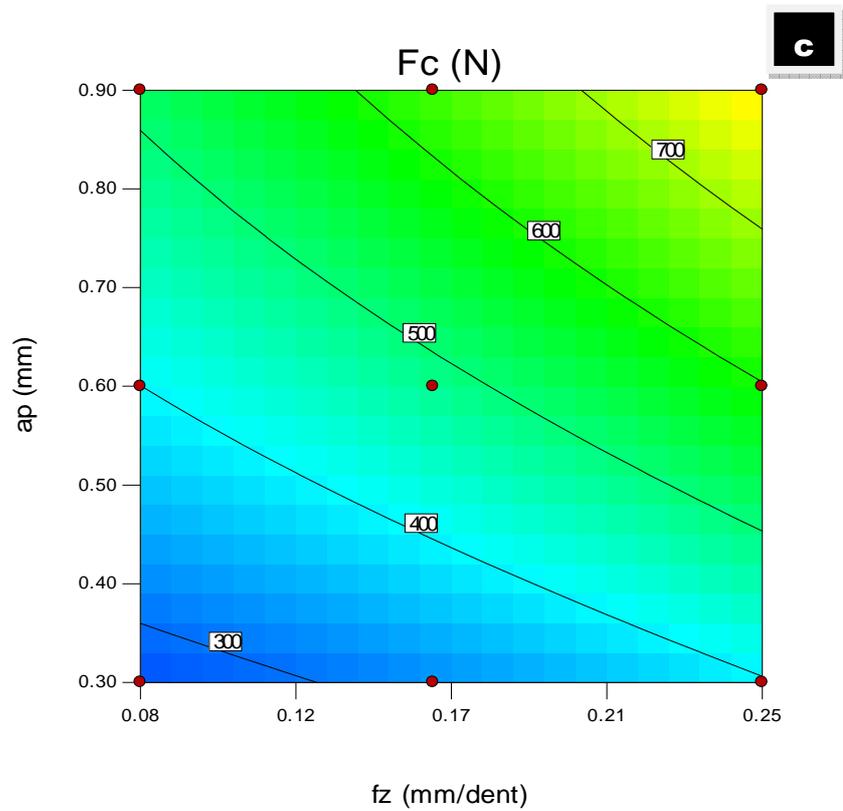


Fig. III-9 Graphique de Contour de (F_c) en fonction de V_c ; f_z ; a_p

III-4-5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure (III-10) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de l'effort de coupe (F_c). L'analyse de la figure (III-10) montre une très bonne corrélation entre les deux courbes puisque $R^2 = 98.45\%$

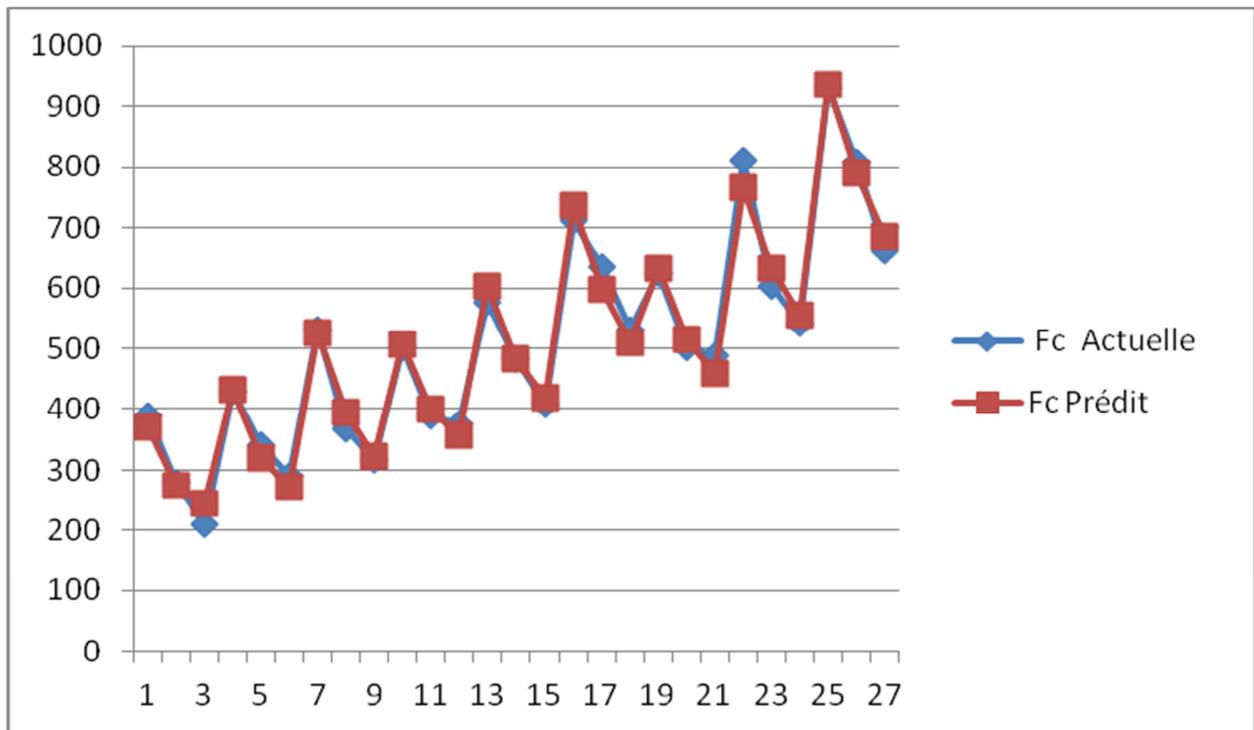


Fig. III-10 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (F_c)

III-5 Analyse des résultats de la pression spécifique de coupe (K_s)

III-5-1 Analyse de la variance (ANOVA) pour (K_s)

Le tableau (III-4) expose les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour la pression spécifique de coupe (K_s). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur la pression spécifique de coupe (K_s)

Tableau III-4: Résultats de l'ANOVA pour la pression spécifique de coupe (K_s)

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Modèle	223044642	9	24782738	54.5270088	< 0.0001		Signifiant
V_c	30734962.4	1	30734962.4	67.6230998	< 0.0001	13.964	Signifiant
f_z	114441433	1	114441433	251.794173	< 0.0001	51.993	Signifiant
a_p	41468205.3	1	41468205.3	91.2383933	< 0.0001	18.840	Signifiant
$V_c \times f_z$	3346801.37	1	3346801.37	7.36363623	0.0147	1.521	Signifiant
$V_c \times a_p$	5421081.6	1	5421081.6	11.92747	0.0030	2.463	Signifiant
$f_z \times a_p$	6260522.23	1	6260522.23	13.7744082	0.0017	2.844	Signifiant
V_c^2	2967906.6	1	2967906.6	6.52999152	0.0205	1.348	Signifiant
f_z^2	12190995.6	1	12190995.6	26.8226425	< 0.0001	5.539	Signifiant
a_p^2	3275877.57	1	3275877.57	7.20758962	0.0157	1.488	Signifiant
Error	7726566.25	17	454503.897				
Total	230771208	26				100	

On remarque que les paramètres significatifs sont (f_z) avec la contribution de 51,99%, suivie par (a_p) et (V_c) avec (18,84 et 13,96)% de contributions respectivement. Tous les autres termes sont jugés importants avec de faibles contributions. Les mêmes résultats sont observés par [27, 28].

III-5-2 Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-11) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la pression spécifique de coupe (K_s). On remarque que l'avance par dent (f_z) est le facteur le plus influent sur la pression spécifique de coupe (K_s) car il a la plus grande pente, suivie par la profondeur de passe (a_p) et en dernier lieu la vitesse de coupe (V_c). La figure (III-12) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la pression spécifique de coupe (K_s). cette figure nous montre des interactions entre tous les variables, mais le tableau (ANOVA) (III-4) et indique que tous les interactions est significatives

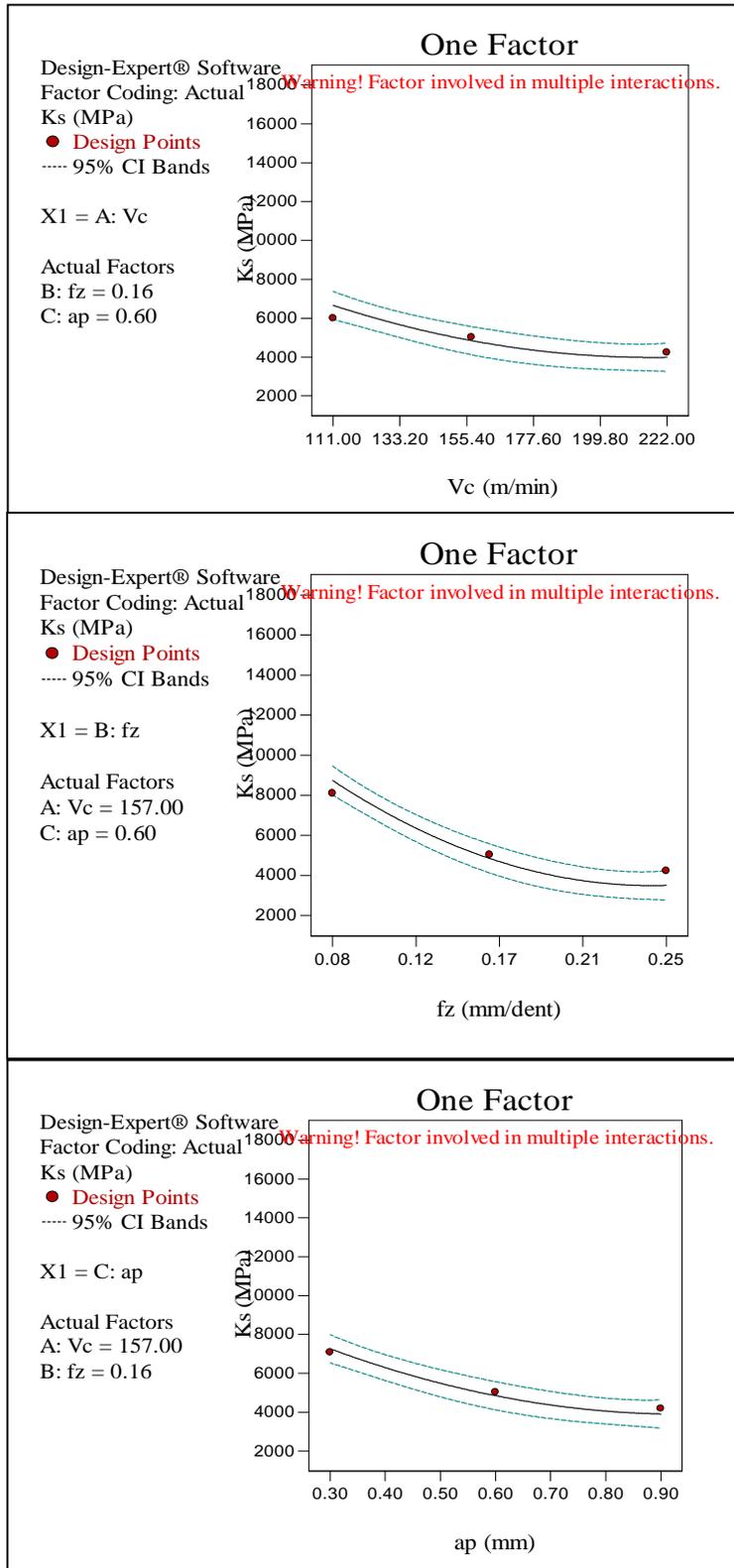


Fig. III-11 Graphique des effets principaux pour (K_s).

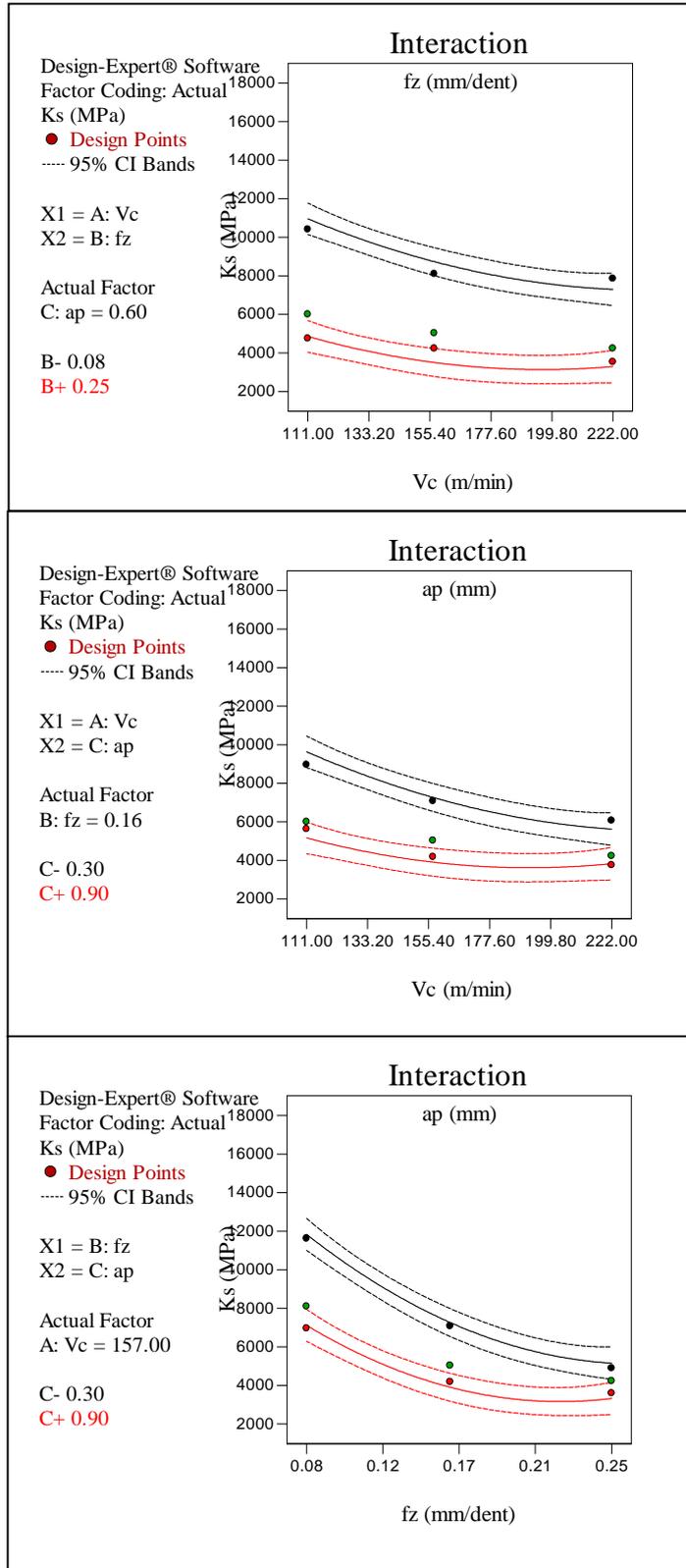


Fig. III-12 Diagramme d'interaction pour (K_s).

III-5-3 Equation de régression pour le critère (K_s)

Le modèle de la pression spécifique de coupe (K_s) est donné par l'équation qui suit (4). Son coefficient de détermination (R^2) est de 96,65%.

$$\begin{aligned}
 K_s = & 410.928 \times 10^2 - 144.736 V_c - 130.629 \times 10^3 f_z - 262.848 \times 10^2 a_p + \\
 & 111.34 V_c \times f_z + 40.172 V_c \times a_p + 283.09 \times 10^2 f_z \times a_p + 23.637 \times 10^{-2} V_c^2 \\
 & + 198.09 \times 10^3 f_z^2 + 82.1 \times 10^2 a_p^2
 \end{aligned} \quad (4)$$

III-5-4 Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour

La figure (III-13) présente les diagrammes (3D) de la pression spécifique de coupe (K_s) en fonction des facteurs d'expérimentation. La figure (III-13-a). Cette figure montre que l'avance par dent (f_z) a une grande influence sur la pression spécifique de coupe (K_s). La figure (III-13-b) on remarque que légère diminution de (K_s) en fonction de (a_p) et (V_c). La figure (III-13-c). Montre que l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) et l'avance par dent (f_z) fait la pression spécifique de coupe (K_s). D'autre part les graphes de contour figure (III-14) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas P_c) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Ks (MPa)

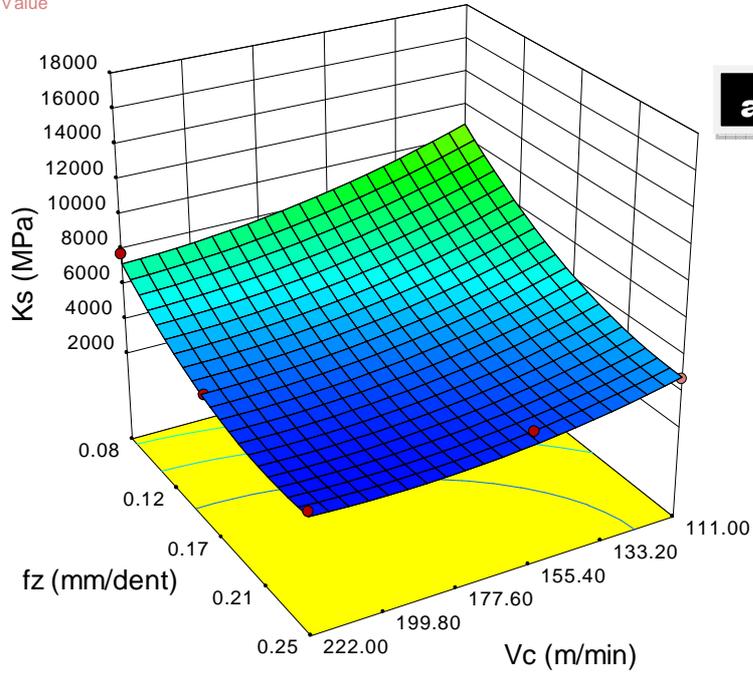
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value



X1 = A: Vc
X2 = B: fz

Actual Factor
C: ap = 0.60



a

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Ks (MPa)

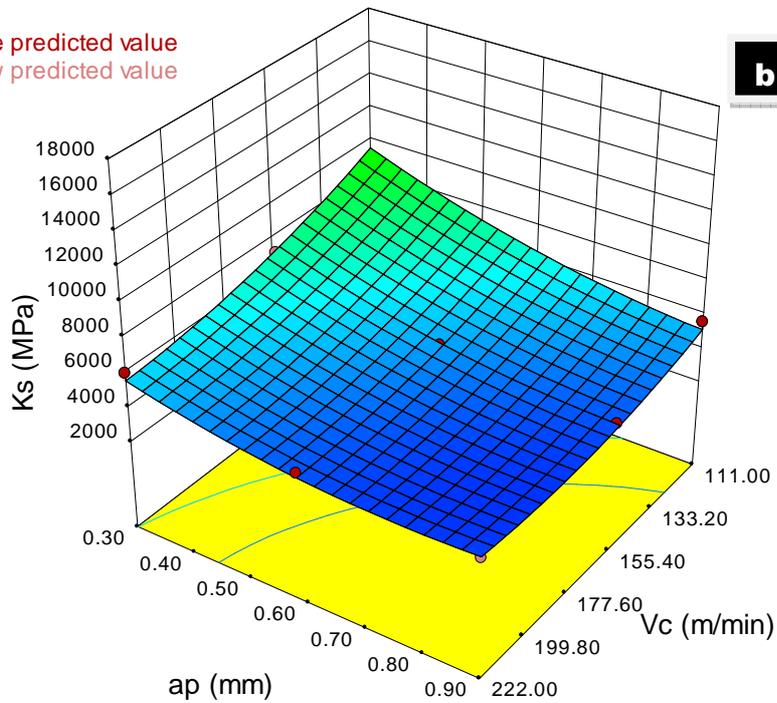
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value



X1 = A: Vc
X2 = C: ap

Actual Factor
B: fz = 0.16



b

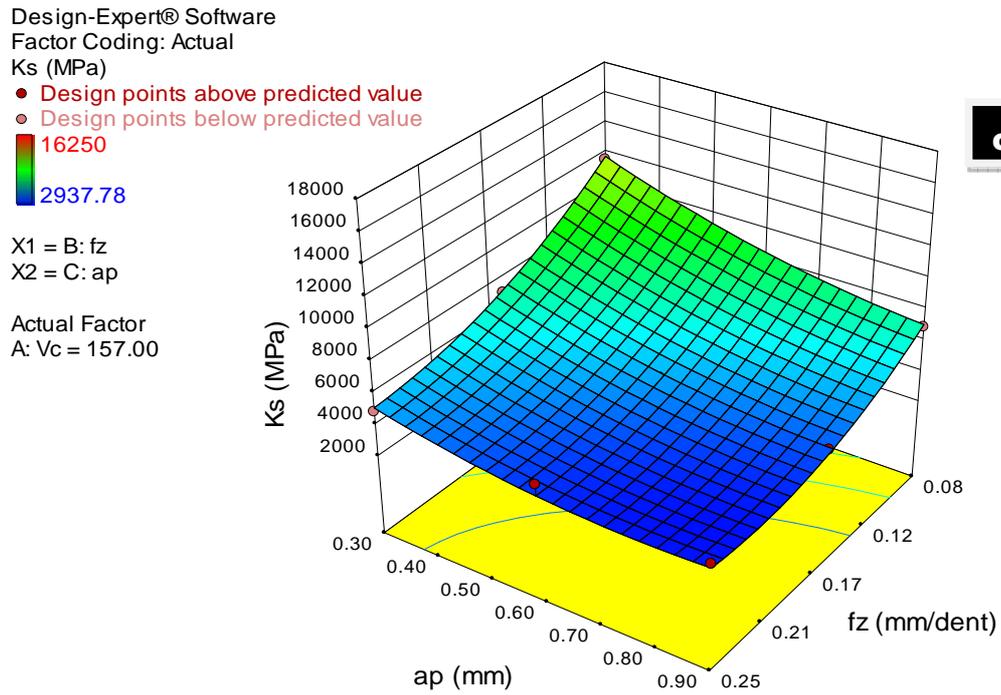
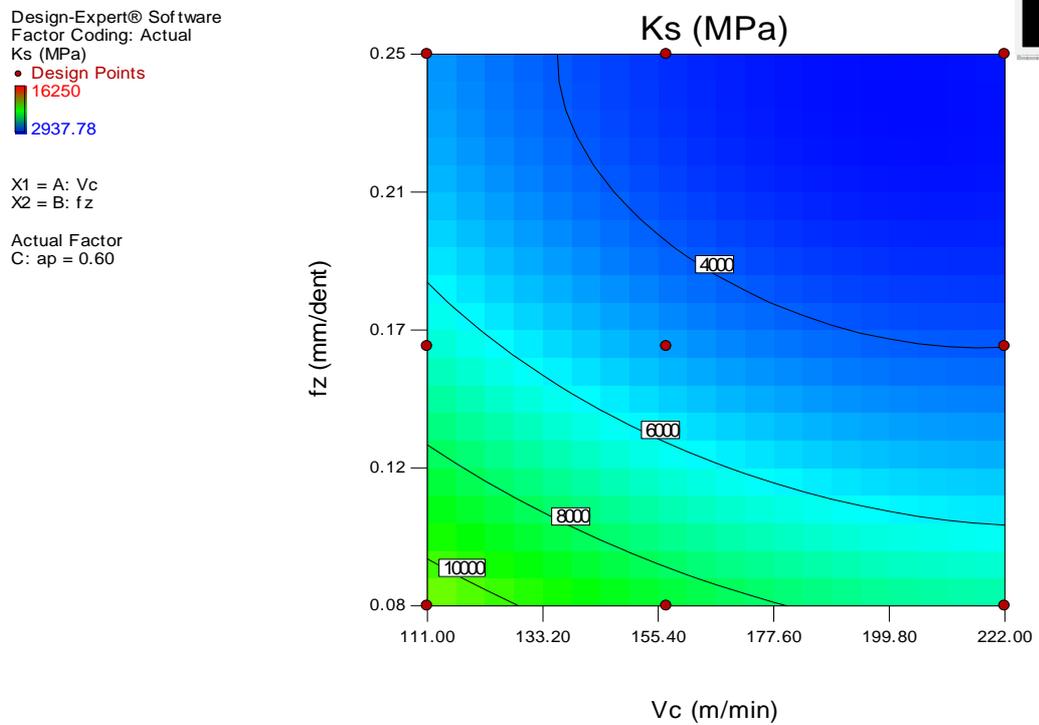
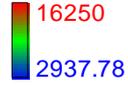


Fig. III-13 Diagrammes de surfaces de (K_s) en fonction de (V_c , f_z , a_p).



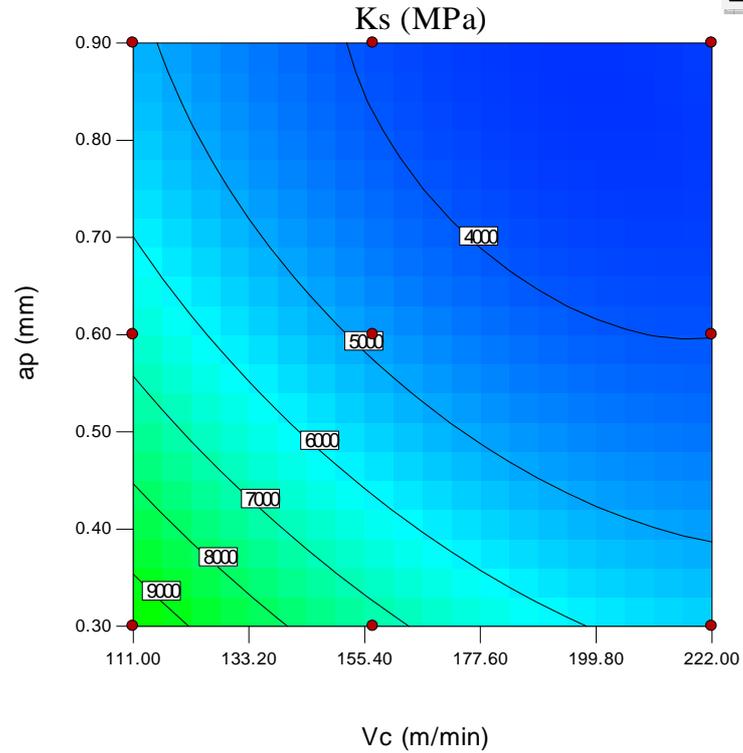
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Ks (MPa)

● Design Points



X1 = A: Vc
X2 = C: ap

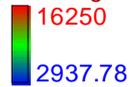
Actual Factor
B: fz = 0.16



b

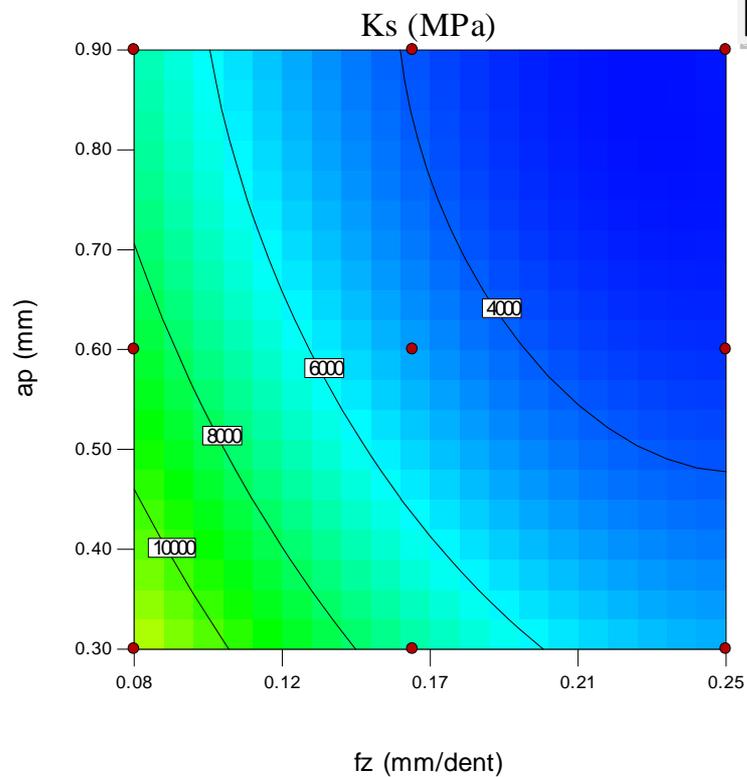
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Ks (MPa)

● Design Points



X1 = B: fz
X2 = C: ap

Actual Factor
A: Vc = 157.00



c

Fig. III-14 Graphique de Contour de (Ks) en fonction de Vc ; fz ; ap

III-5-5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure (III-15) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la pression spécifique de coupe (K_s). L'analyse de la figure (III-10) montre une bonne corrélation entre les deux courbes puisque $R^2 = 96,65\%$

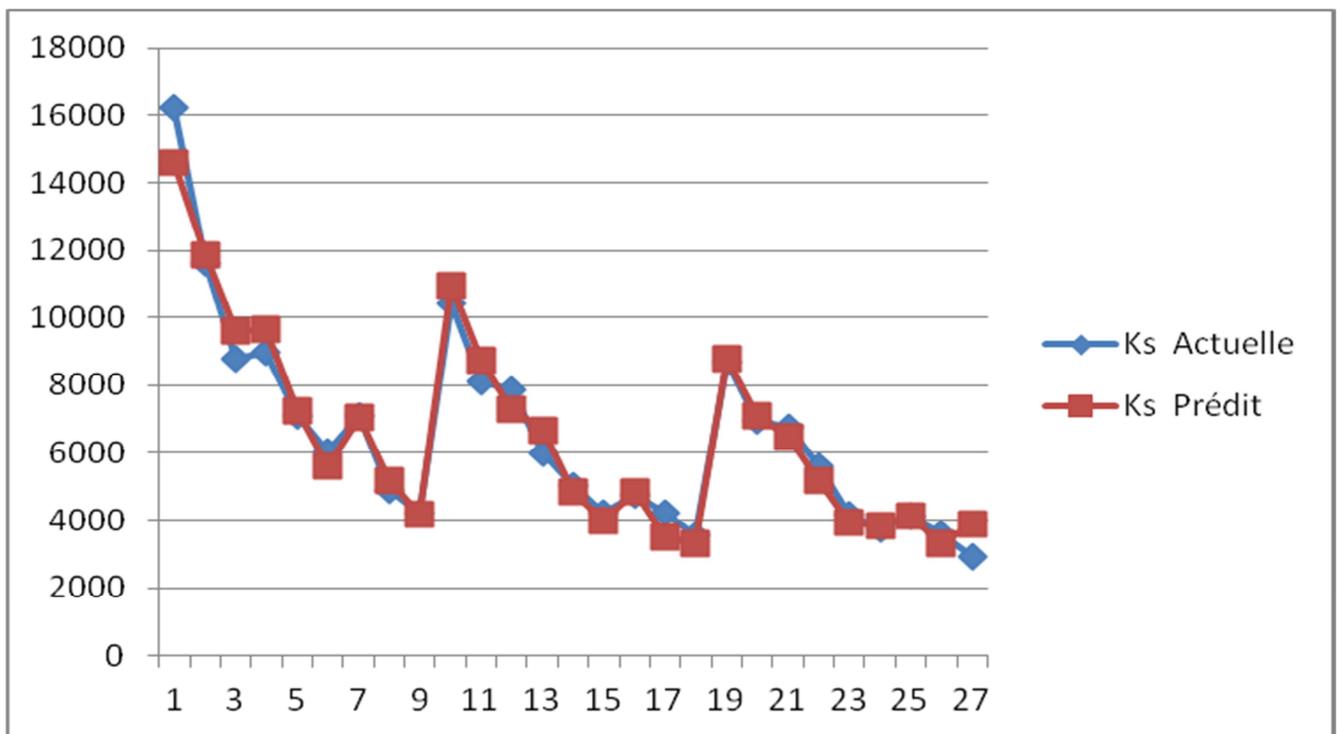


Fig. III-15 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (K_s)

III--6 Analyse des résultats de la puissance de coupe (P_c)

III-6-1 Analyse de la variance (ANOVA) pour (P_c)

Le tableau (III-5) expose les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour le critère de puissance de coupe (P_c). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur (P_c).

Tableau III-5: Analyse Résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c)

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Modèle	5462072.6	9	606896.956	112.098827	< 0.0001		Signifiant
V_c	876554.494	1	876554.494	161.906778	< 0.0001	15.786	Signifiant
f_z	1140185.17	1	1140185.17	210.601518	< 0.0001	20.533	Signifiant
ap	3249395.4	1	3249395.4	600.189882	< 0.0001	58.517	Signifiant
$V_c \times f_z$	10908.2691	1	10908.2691	2.01484643	0.1738	0.196	InSignifiant
$V_c \times ap$	150316.739	1	150316.739	27.7647299	< 0.0001	2.707	Signifiant
$f_z \times ap$	108532.76	1	108532.76	20.0468877	0.0003	1.955	Signifiant
V_c^2	6569.94836	1	6569.94836	1.21352315	0.2860	0.118	InSignifiant
f_z^2	6069.25545	1	6069.25545	1.12104108	0.3045	0.109	InSignifiant
ap^2	4372.50013	1	4372.50013	0.8076365	0.3814	0.079	InSignifiant
Error	92037.076	17	5413.94564				
Total	5554109.68	26				100	

On remarque que la profondeur de passe est la plus influente sur (P_c) avec une contribution de 58,51%, suivie de (f_z) et (V_c) avec les contributions respectives (20,53 et 15,78)%. Les faibles contributions correspondent aux interactions ($V_c \times ap$) et ($f_z \times ap$). Des résultats similaires sont obtenus par [29].

III-6-2 Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-16) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la puissance de coupe (P_c). On remarque que les trois paramètres de coupe (V_c , f_z et ap) ont une influence sur la puissance (P_c).

La figure (III-17) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la puissance de coupe (P_c). Cette figure montre interaction entre tous les variables InSignifiant sauf que l'interaction ($V_c \times f_z$) InSignifiant

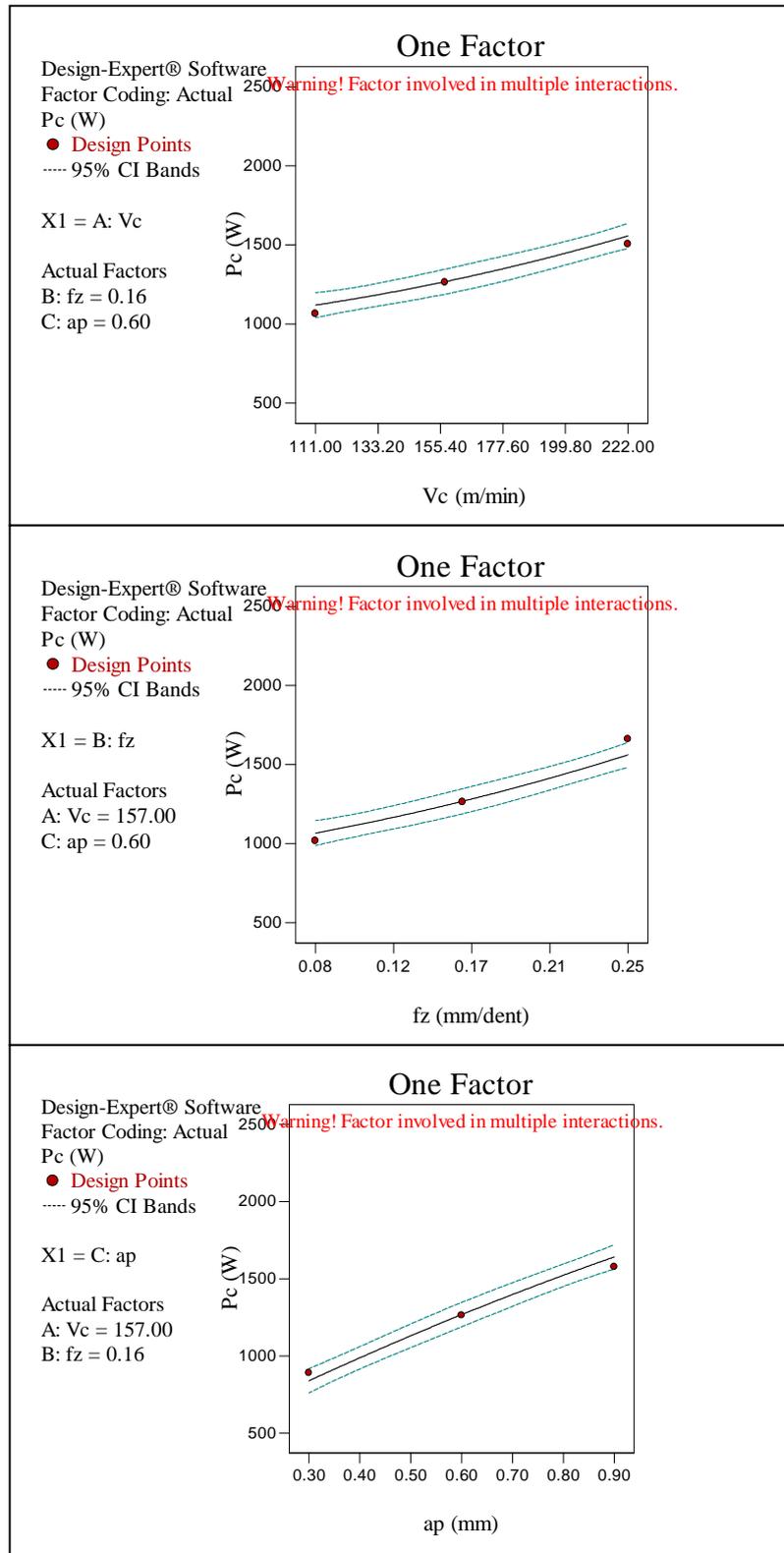


Fig. III-16 Graphique des effets principaux pour la puissance de coupe (P_c).

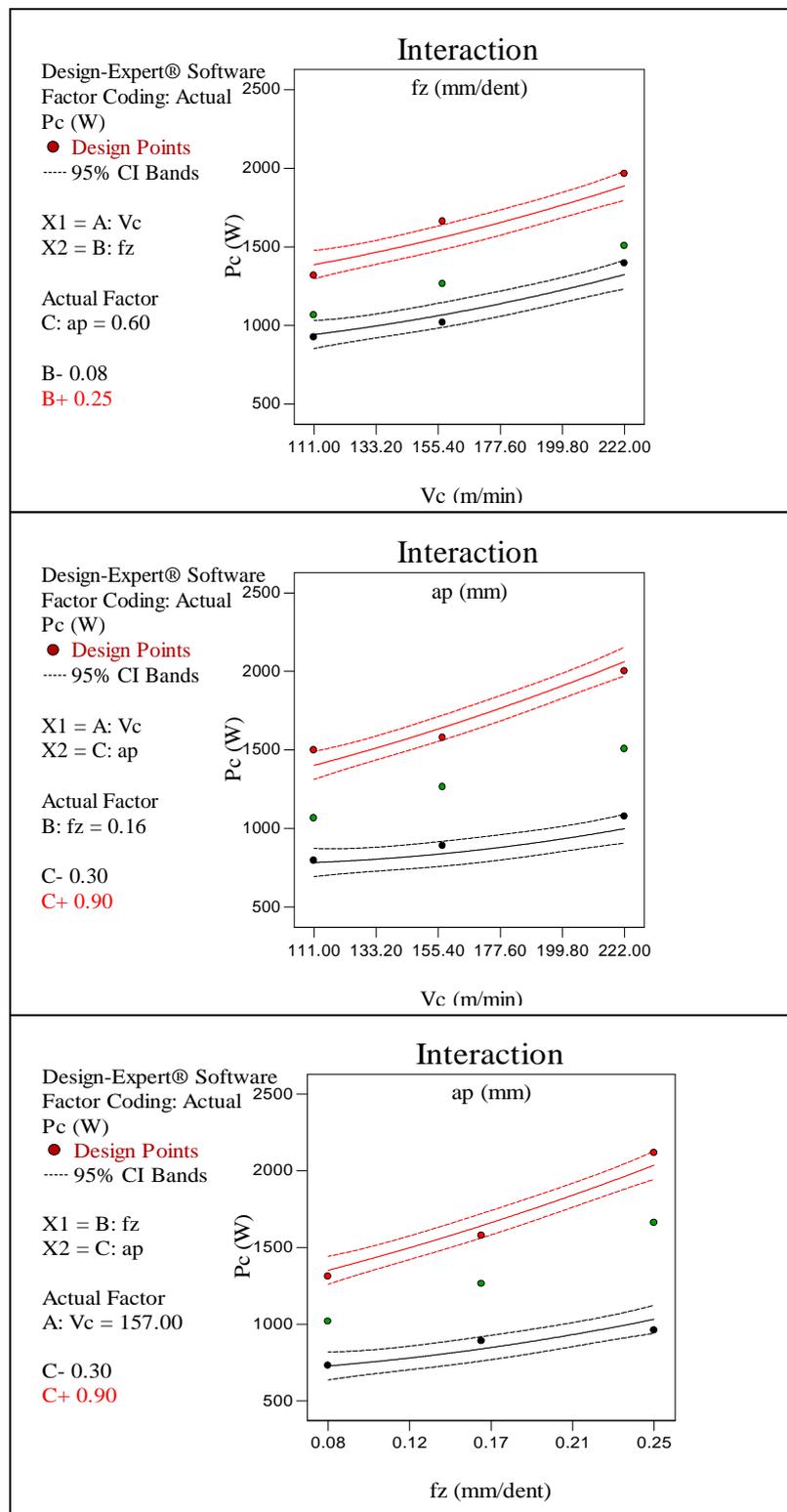


Fig. III-17 Diagramme d'interaction pour la puissance de coupe (P_c)

III-6-3 Equation de régression pour la puissance de coupe (P_c)

Le modèle de la puissance de coupe (P_c) est donné par l'équation (5) ci-après. Son coefficient de détermination (R^2) est de 98,34%.

$$P_c = 847.853 - 478.85 \times 10^{-2} V_c - 1785.21 f_z + 5122.851 \times 10^{-2} ap + 111.21 \times 10^{-4} V_c^2 + 4419.874 f_z^2 - 299.948 ap^2 + 635.645 \times 10^{-2} V_c \times f_z + 668.942 \times 10^{-2} V_c \times ap + 3727.342 f_z \times ap \quad (5)$$

III-6-4 Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour

Les graphiques (3D) de la puissance de coupe (P_c) en fonction des facteurs d'expérimentation sont représentées dans la figure (III-18-a). Cette figure montre que l'augmentation de l'avance (f_z) à supérieures que la vitesse de coupe car la pente fait augmenter la puissance de coupe (P_c). La figure (III-18-b) montre que la profondeur de passe (ap) a une grande influence sur la puissance de coupe (P_c). La figure (III-18-c). Montre que l'augmentation de la profondeur de passe (ap) et l'avance par dent (f_z) fait augmenter la puissance de coupe (P_c). D'autre part les graphes de contour figure (III-19) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas P_c) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

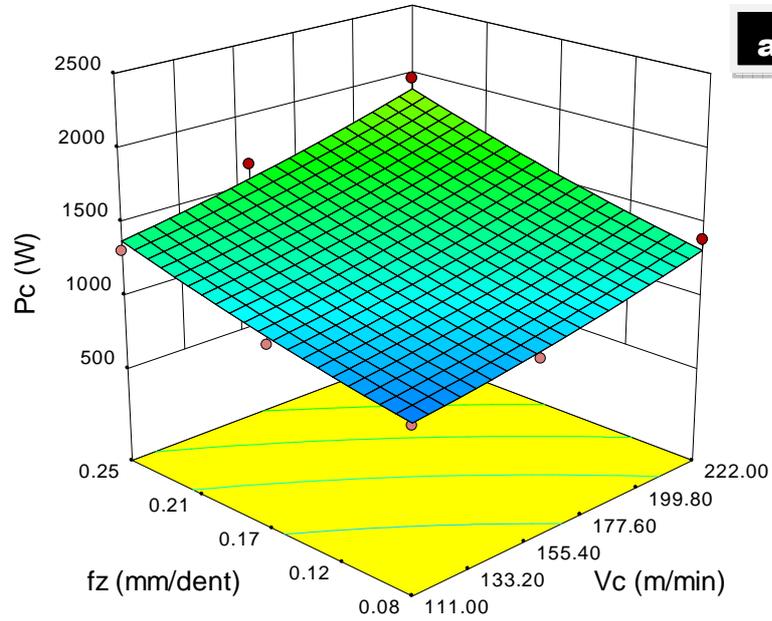
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Pc (W)

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value



X1 = A: Vc
X2 = B: fz

Actual Factor
C: ap = 0.60



a

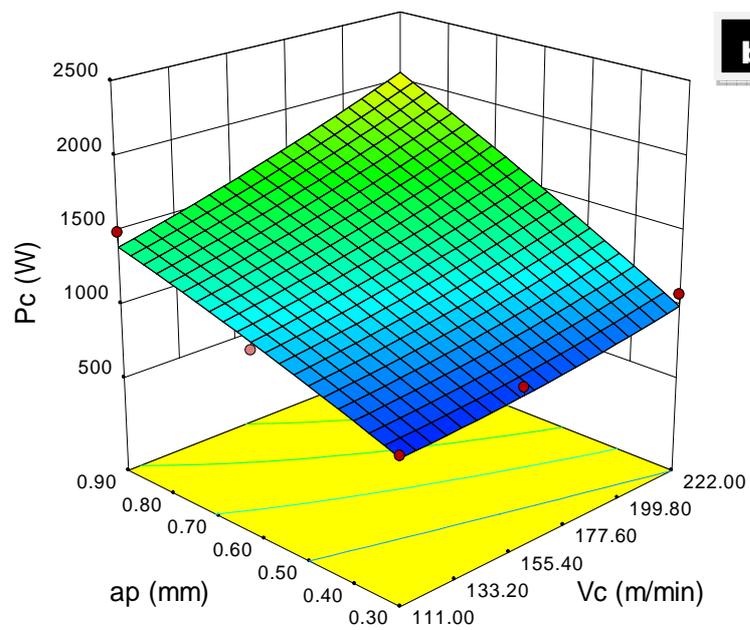
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Pc (W)

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value



X1 = A: Vc
X2 = C: ap

Actual Factor
B: fz = 0.16



b

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Pc (W)

- Design points above predicted v value
- Design points below predicted v value



X1 = B: fz
 X2 = C: ap

Actual Factor
 A: Vc = 157.00

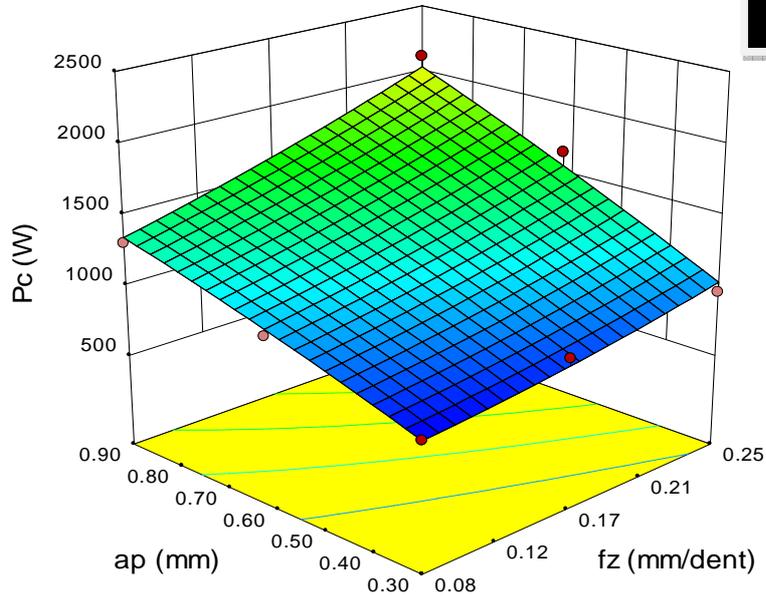


Fig-III-18 Diagrammes de surfaces du (P_c) en fonction de (V_c, fz, ap).

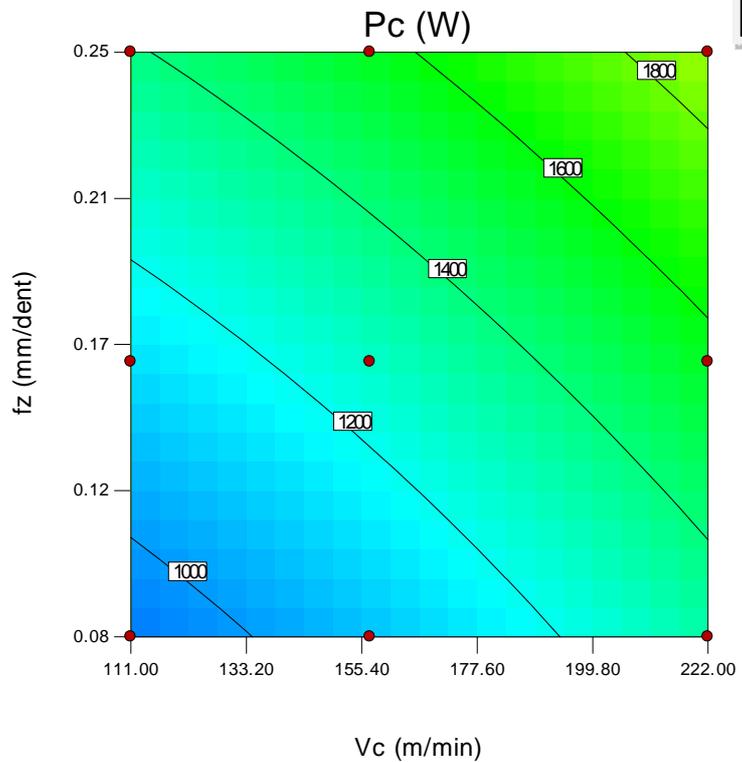
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Pc (W)

- Design Points



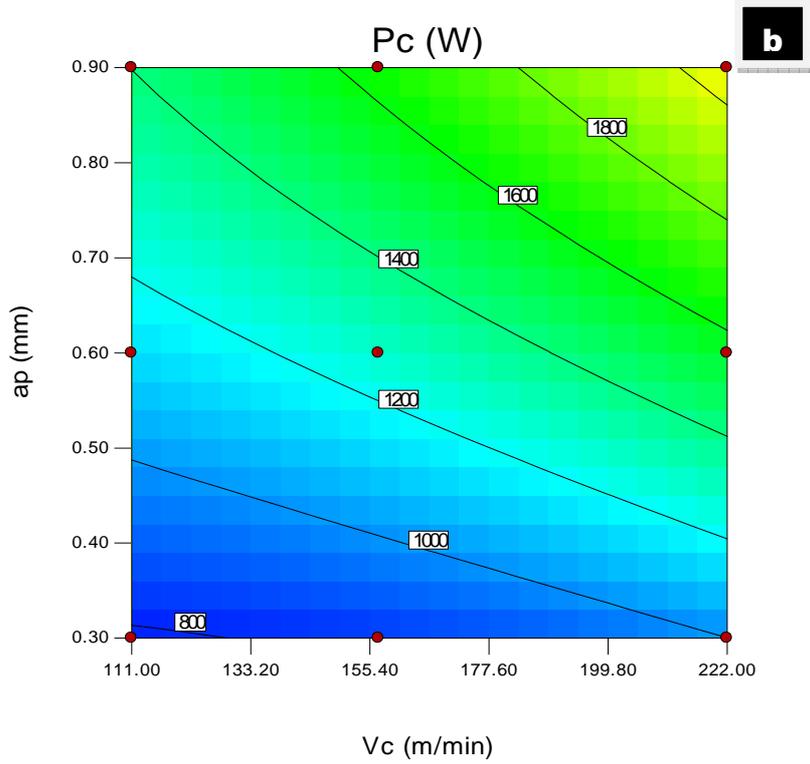
X1 = A: Vc
 X2 = B: fz

Actual Factor
 C: ap = 0.60



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Pc (W)
 • Design Points
 2446
 722

X1 = A: Vc
 X2 = C: ap
 Actual Factor
 B: fz = 0.16



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Pc (W)
 • Design Points
 2446
 722

X1 = B: fz
 X2 = C: ap
 Actual Factor
 A: Vc = 157.00

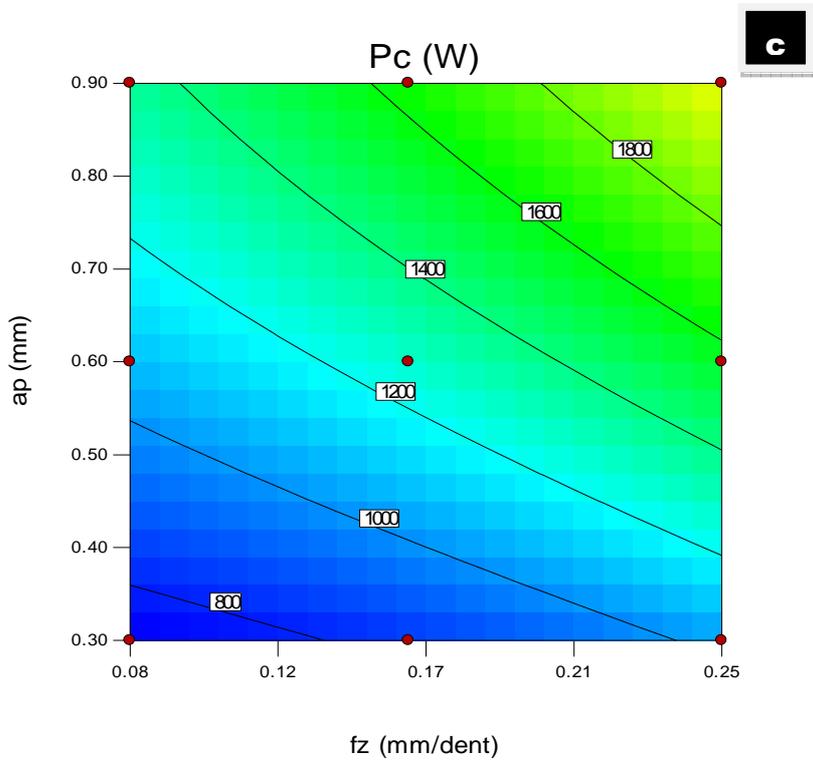


Fig. III-19 Graphique de Contour de (Pc) en fonction de Vc ; fz ; ap

III-6-5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure (III-20) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la puissance de coupe (P_c). L'analyse de la figure (III-20) montre une bonne corrélation entre les deux courbes puisque $R^2 = 98,34\%$

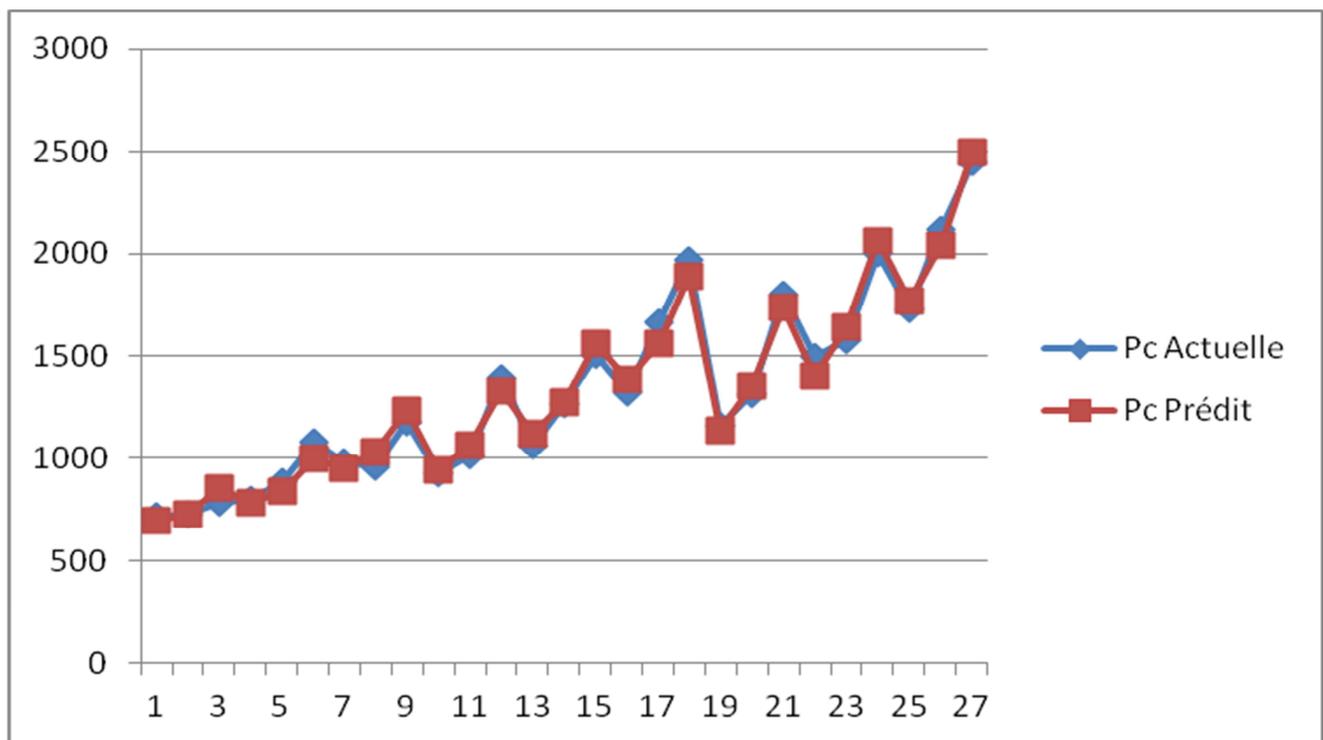


Fig. III-20 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la puissance de coupe (P_c)

III-7 Analyse des résultats de volume de copeau enlevé (VCE)

III-7-1 Analyse de la variance (ANOVA) pour le volume de copeau enlevé (VCE)

Le tableau (III-6) expose les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour le critère du volume de copeau enlevé (VCE). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur (VCE).

Tableau III-6: Analyse Résultats de l'ANOVA pour le volume de copeau enlevé (*VCE*)

Termes	Som des carrés	DL	Moy des carrés	Valeur de F	Prob.	Cont. %	Remarques
Model	5.41E+09	9	6.02E+08	389.04	< 0.0001		Signifiant
<i>Vc</i>	8.81E+08	1	8.81E+08	569.97	< 0.0001	15.76213956	Signifiant
<i>fz</i>	2.10E+09	1	2.10E+09	1355.56	< 0.0001	37.48710617	Signifiant
<i>ap</i>	1.97E+09	1	1.97E+09	1275.77	< 0.0001	35.28056702	Signifiant
<i>Vc x fz</i>	1.58E+08	1	1.58E+08	102	< 0.0001	2.820741855	Signifiant
<i>Vc x ap</i>	1.45E+08	1	1.45E+08	94.05	< 0.0001	2.600889916	Signifiant
<i>fz x ap</i>	3.38E+08	1	3.38E+08	218.72	< 0.0001	6.048555476	Signifiant
<i>Vc</i> ²	0	1	0	0	1	0	InSignifiant
<i>fz</i> ²	0	1	0	0	1	0	InSignifiant
<i>ap</i> ²	0	1	0	0	1	0	InSignifiant
Error	2.63E+07	17	1.55E+06				
Total	5.44E+09	26		3616.07		100	

On remarque que (*fz*) et (*ap*) ont plus d'influence sur (*VCE*) avec les contributions respectives (37.48 et 35.28) %, suivies par (*Vc*) Avec 15, 76% de contribution. Toutes les autres interactions sont significatives mais avec des faibles pourcentages de contributions. [29, 30]

III-7-2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La figure (III-21) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur le volume du copeau enlevé (*VCE*). On remarque que les trois paramètres de coupe (*Vc*, *fz* et *ap*) ont une influence sur le volume du copeau enlevé (*VCE*).

La figure (III-22) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour le volume du copeau enlevé (*VCE*) Cette figure ne montre aucune interaction entre tous les variables

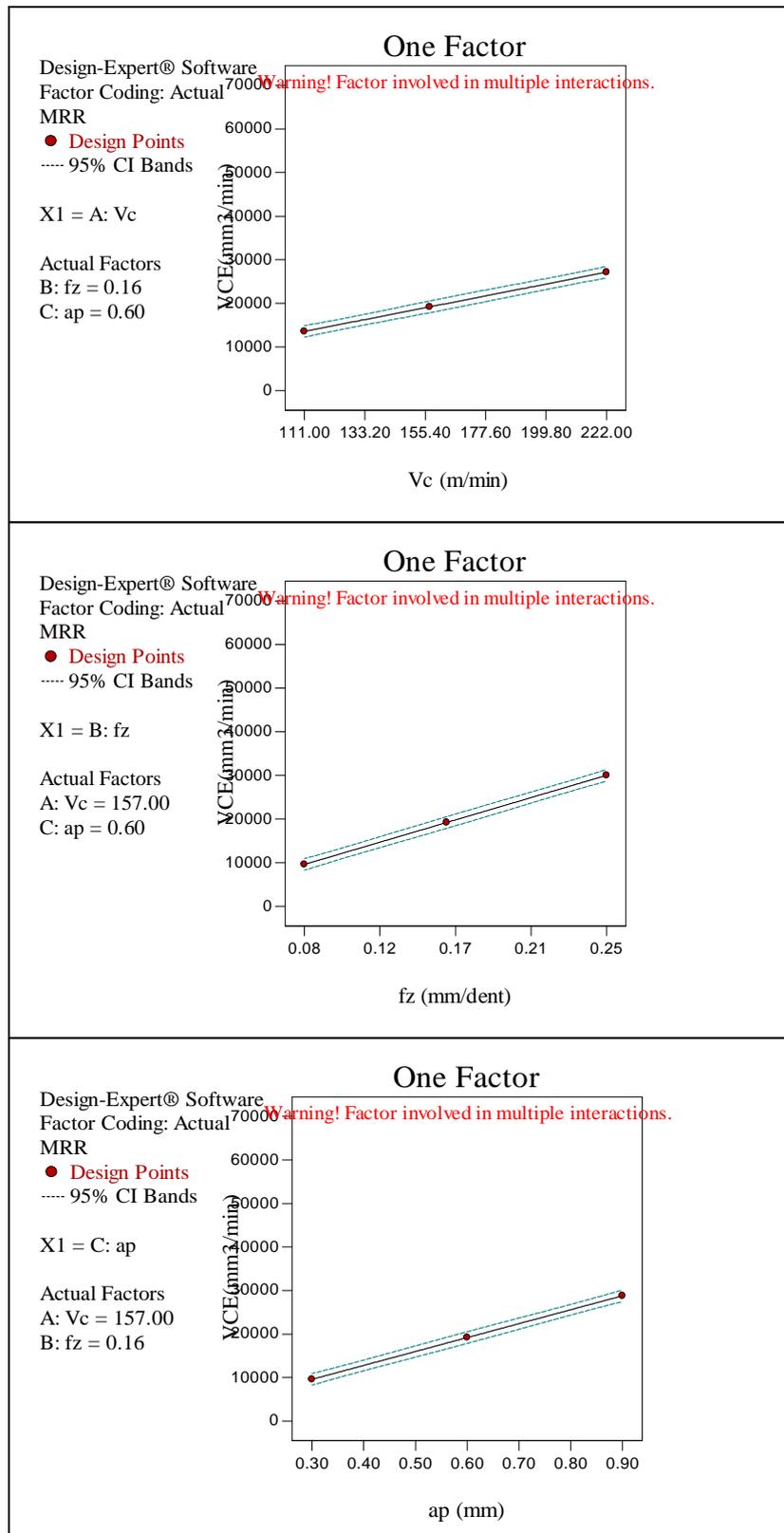


Fig. III-21- Graphique des effets principaux pour le volume du copeau enlevé (VCE)

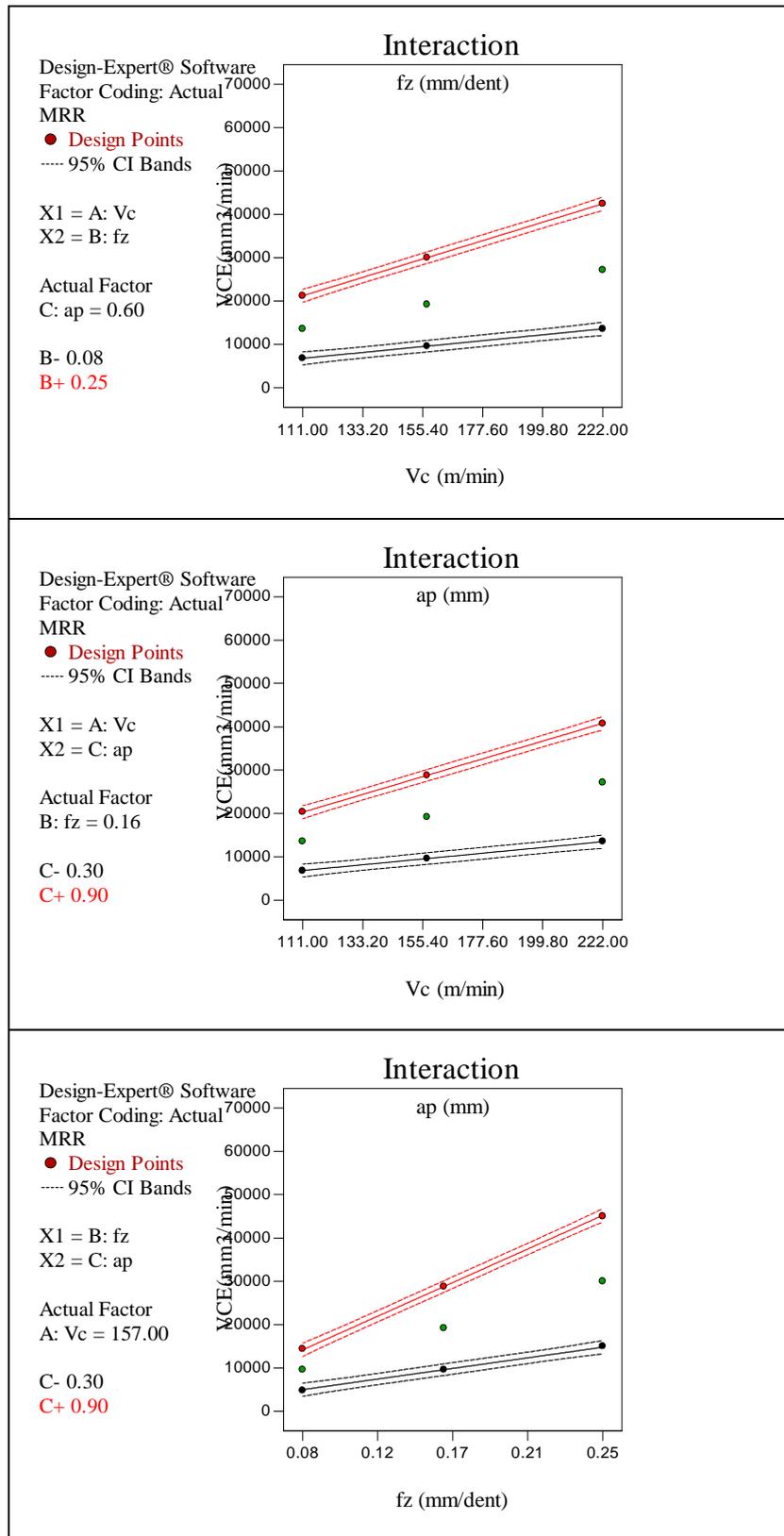


Fig. III-22 Diagramme d'interaction pour le volume du copeau enlevé (VCE)

III-7-3 Equation de régression pour le volume du copeau enlevé (VCE)

Le modèle du volume du copeau enlevé (*VCE*) est donné par l'équation suivante (6). Son coefficient de détermination (R^2) est de 99,52%.

$$\begin{aligned}
 VCE = & 203.907 \times 10^2 - 124.841V_c - 124.841 \times 10^3 fz - 339.844 \times 10^2 ap + \\
 & 764.331V_c \times fz + 208.068V_c \times ap + 208.068 \times 10^3 fz \times ap - \\
 & 603.649 \times 10^{-13} V_c^2 - 148.347 \times 10^{-7} fz^2 - 107.393 \times 10^{-8} ap^2
 \end{aligned} \tag{6}$$

III-7-4 Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour

La figure (III-23) présente les diagrammes (3D) de volume du copeau enlevé (*VCE*) en fonction des paramètres de régime de coupe. La figure (III-23-a) présente le diagramme (3D) de (*VCE*) en fonction de (V_c) et (fz), on remarque que l'avance par dent le supérieur avec une grande influence car elle possède la plus grande pente, avec son augmentation du volume du copeau enlevé (*VCE*) augmente. En dernier lieu l'augmentation (V_c)

La figure (III-23-b) présente le diagramme (3D) de (*VCE*) en fonction de (V_c) et (ap) on remarque que légère augmentation de (*VCE*) en fonction de (ap) et aussi une légère augmenter de (*VCE*) en fonction de (V_c).

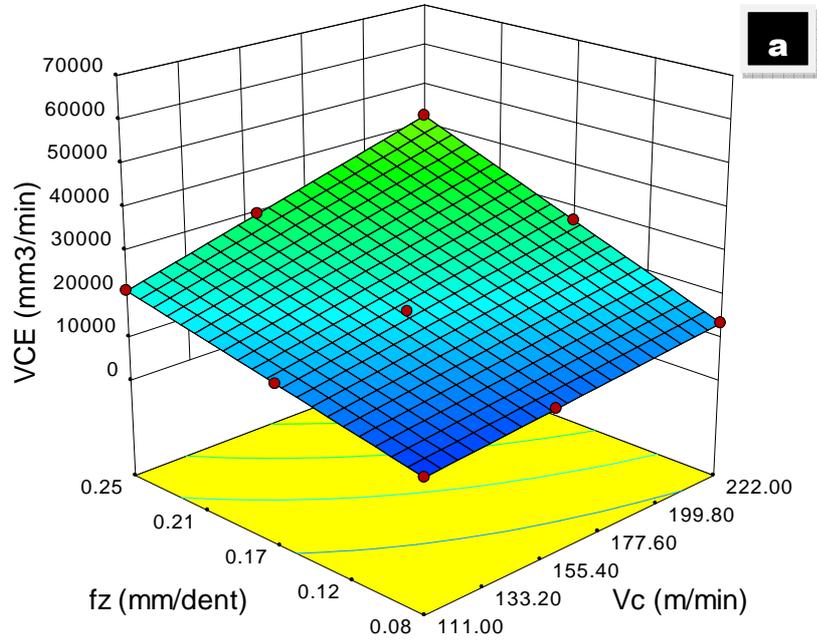
La figure (III-23-c) présente le diagramme (3D) de (*VCE*) en fonction de (fz) et (ap). On remarque que légère augmentation de (*VCE*) en fonction de (ap) et aussi une grande influence de (fz) sur (*VCE*). D'autre part les graphes de contour figure (III-24) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas *VCE*) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
MRR



X1 = A: Vc
X2 = B: fz

Actual Factor
C: ap = 0.60



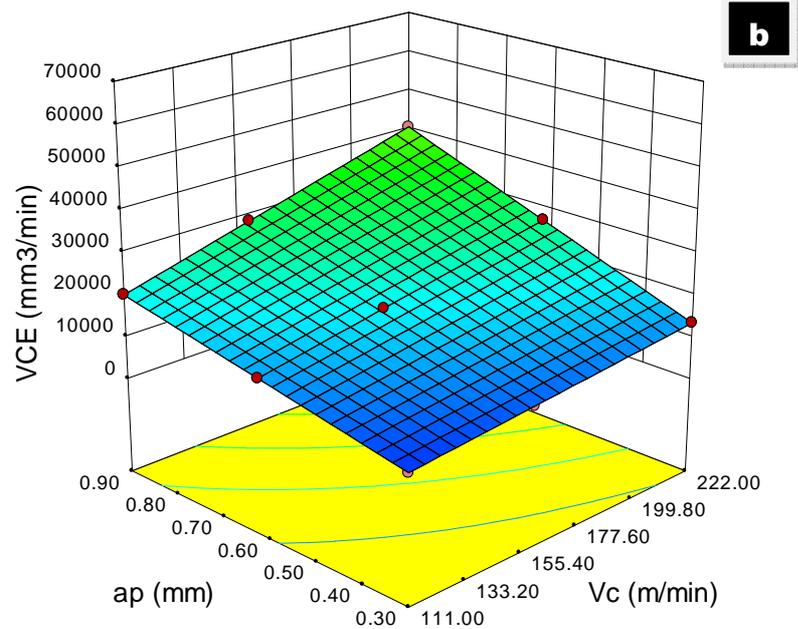
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
MRR

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value



X1 = A: Vc
X2 = C: ap

Actual Factor
B: fz = 0.16



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 MRR

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value



X1 = B: fz
 X2 = C: ap

Actual Factor
 A: Vc = 157.00

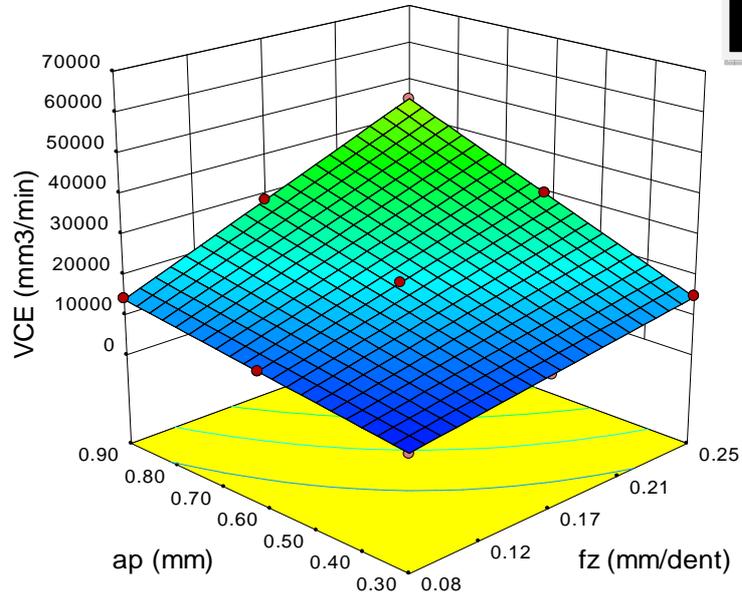


Fig-III-23 Diagrammes de surfaces du volume du copeau enlevé (VCE) en fonction de (Vc , fz , ap).

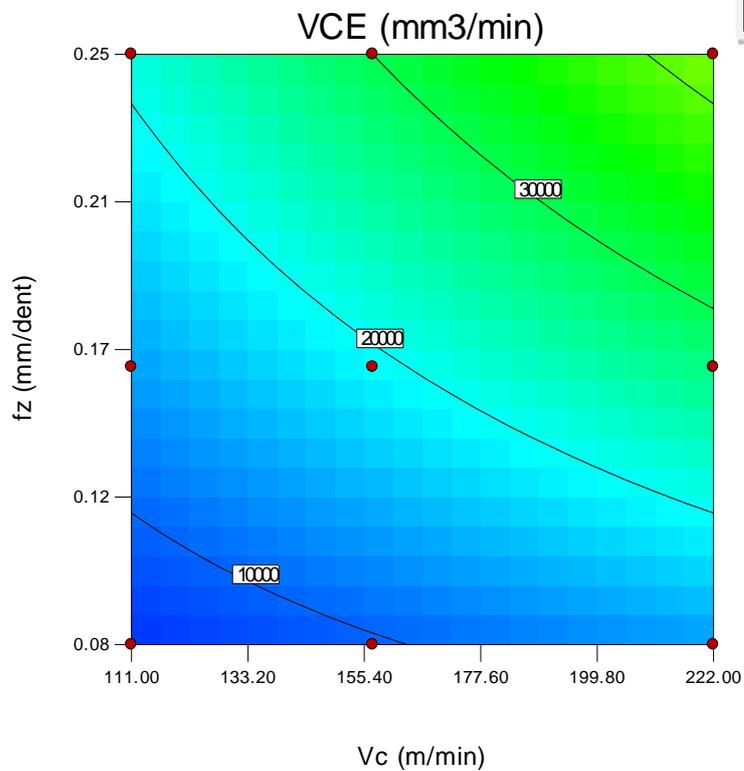
Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 MRR

- Design Points

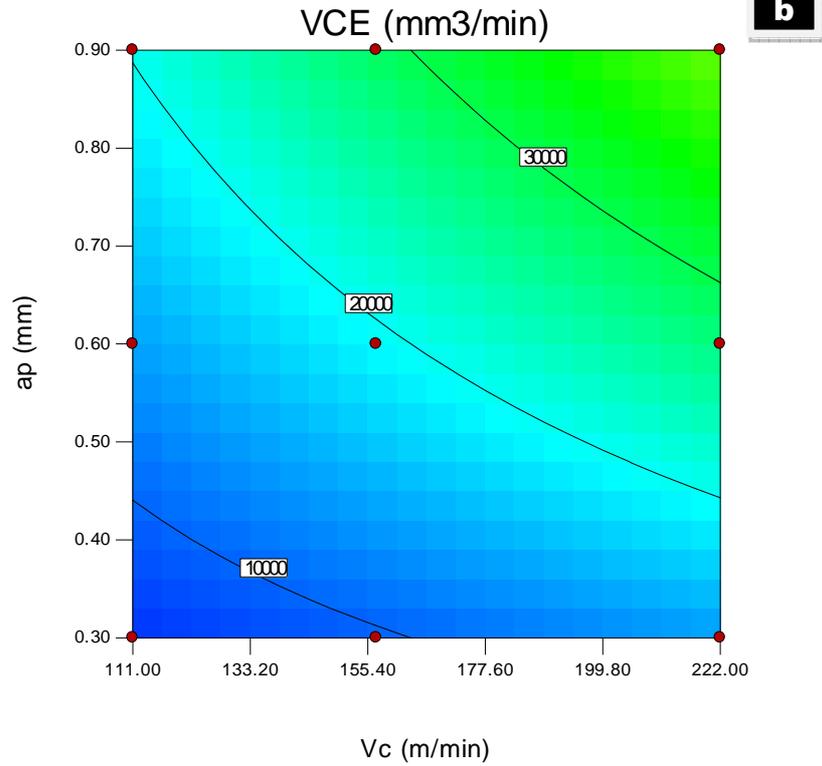


X1 = A: Vc
 X2 = B: fz

Actual Factor
 C: ap = 0.60



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 MRR
 • Design Points
 63630.6
 3393.63
 X1 = A: Vc
 X2 = C: ap
 Actual Factor
 B: fz = 0.16



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 MRR
 • Design Points
 63630.6
 3393.63
 X1 = B: fz
 X2 = C: ap
 Actual Factor
 A: Vc = 157.00

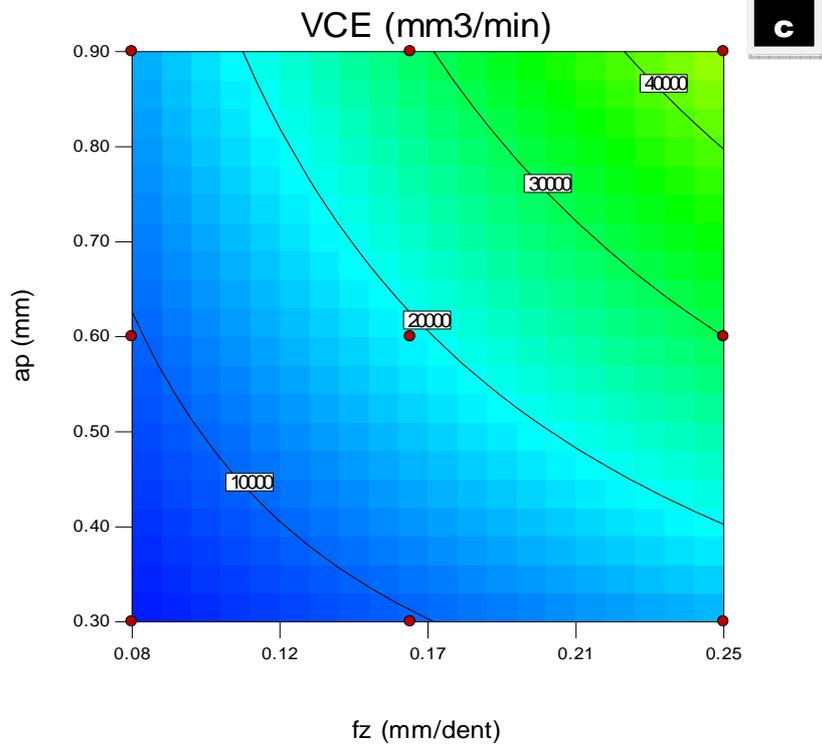


Fig. III-24 Graphique de Contour de (VCE) en fonction de Vc ; fz ; ap

III-7-5 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure (III-25) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) du volume du copeau enlevé (*VCE*). L'analyse de la figure (III-25) montre une excellent corrélation entre les deux courbes puisque $R^2 = 99,52\%$

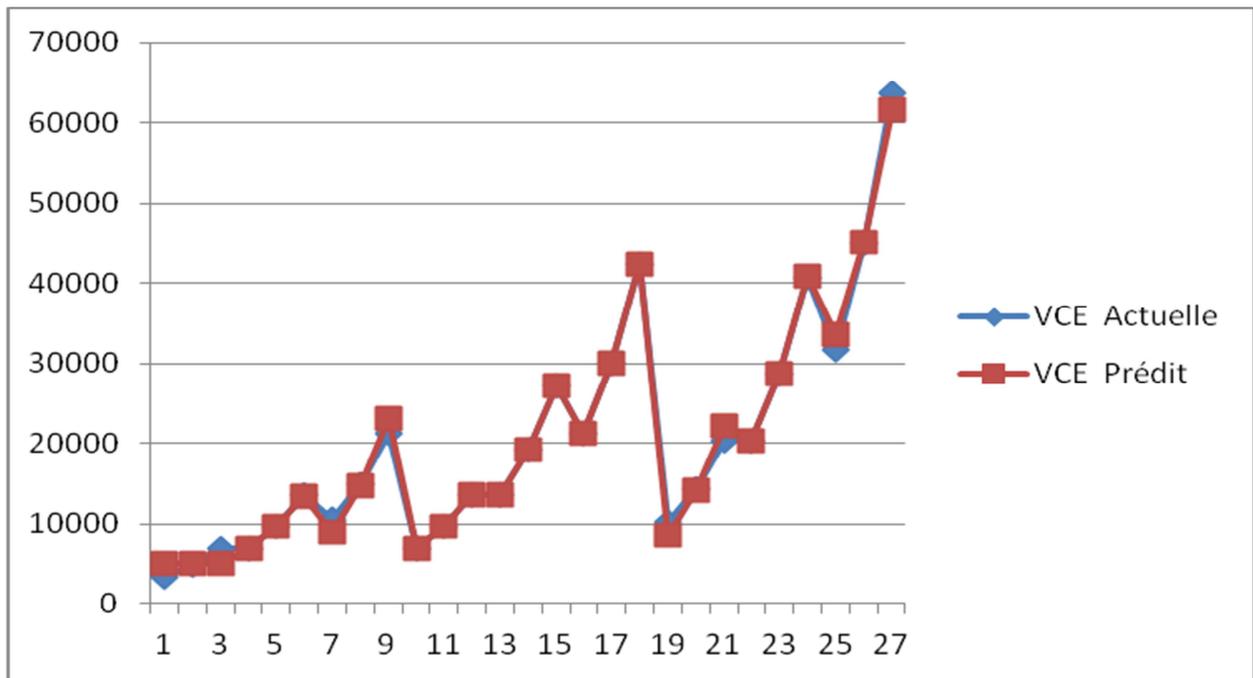


Fig. III-25 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites le volume du copeau enlevé (*VCE*)

III-8 Conclusion

En ce basant sur les résultats obtenus dans ce chapitre nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Les facteurs les plus significatifs affectant la rugosité de la surface est l'avance par dent, suivi par la vitesse de coupe et cela dans les conditions de coupe utilisées.
- Les facteurs les plus significatifs affectant l'effort de coupe est la profondeur de passe suivi par l'avance par dent.

- Les facteurs les plus significatifs affectant la pression spécifique de coupe est l'avance par dent, suivi par la profondeur de passe.
- Les facteurs les plus significatifs affectant la puissance de coupe est la profondeur de passe, suivi par l'avance par dent.
- Les facteurs les plus significatifs affectant le volume de copeau enlevé est l'avance par dent, suivi par la profondeur de passe.

CHAPITRE IV

APPLICATION DE L'APPROCHE DES

RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

(ANN)

IV.1 Modélisation par la méthode des réseaux de neurone artificiels ANN

IV.1.1 Introduction

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement d'un vrai neurone (humain 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 [31]

IV.1.2 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 *Wight*, 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.

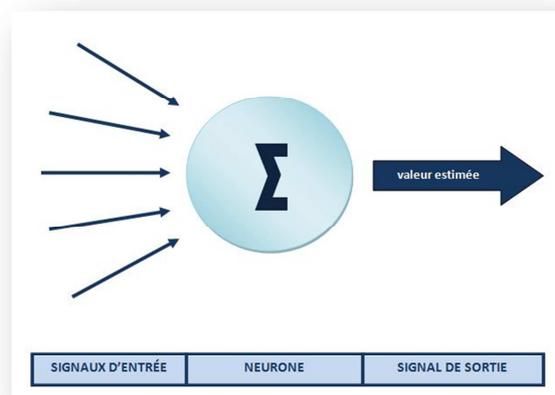


Figure IV.1 Un neurone artificiel est donc composé de

IV.1.3 Réseau de neurones artificiel

- Un ensemble de **valeurs d'entrée** $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ discrètes $\{0, 1\}$ ou réelles $[-1, 1]$.

- Un ensemble de **pooids** réels $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ entre chaque connexion neuronale.
- Une fonction de sommation Σ qui calcule la **somme pondérée** (sous-entendu pondérée par les poids) des entrées :

$$(X_1 \times W_1) + (X_2 \times W_2) + \dots + (X_n \times W_n) \dots \dots \dots (IV.1)$$

- Un biais **b** associe pour chaque neurone.
- Une fonction d'activation **f** qui nous donne le nouvel état du neurone à partir d'une certaine fonction choisie : **f(x)**
- Et enfin une sortie **Y**.

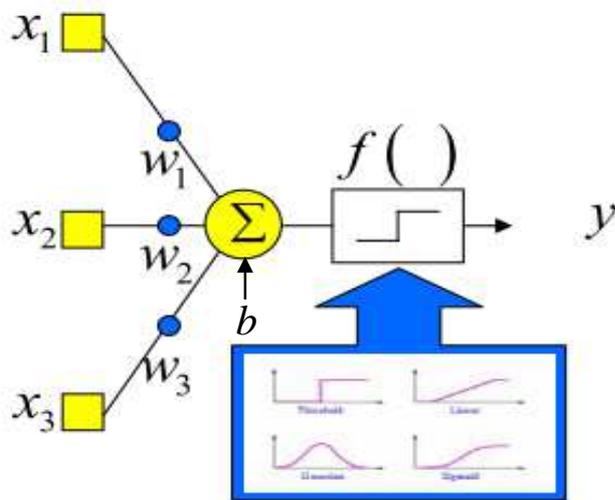


Figure IV.2 Arrangement logique d'un neurone

Pour le neurone de la figure (IV.3), nous avons :

$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_R\}$, (Vecteur colonne), $\mathbf{W} = \langle w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R} \rangle$, (Vecteur ligne)

$$w_{1,1} x_1 + w_{1,2} x_2 + \dots + w_{1,R} x_R + b_1 = \mathbf{W} * \mathbf{X} + \mathbf{b}$$

La sortie **Y** est alors de la forme :

$$Y = f(\mathbf{W} * \mathbf{X} + \mathbf{b}) \dots \dots \dots (IV.2)$$

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). L'apprentissage ayant été réalisé auparavant, le poids des connexions à cette étape est 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 les connexions montrées sur la figure IV.3 ci-dessous :

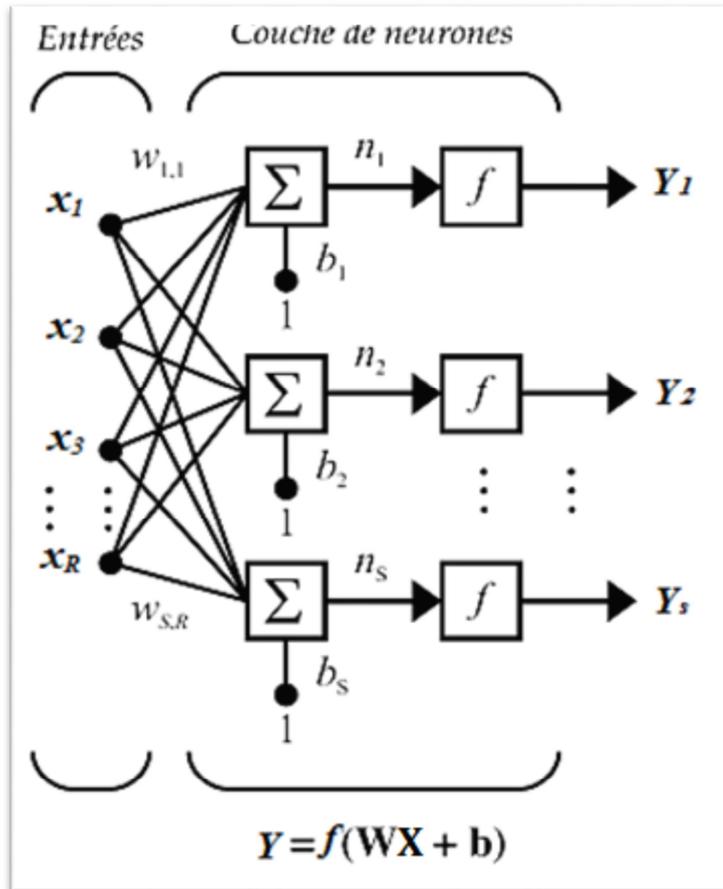


Figure IV.3 Schéma d'une couche de neurones

Les fonctions de transfert (fonction d'activation) déterminent la valeur de l'état du neurone qui sera transmise aux neurones aval. 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 $[-1 ; +1]$.

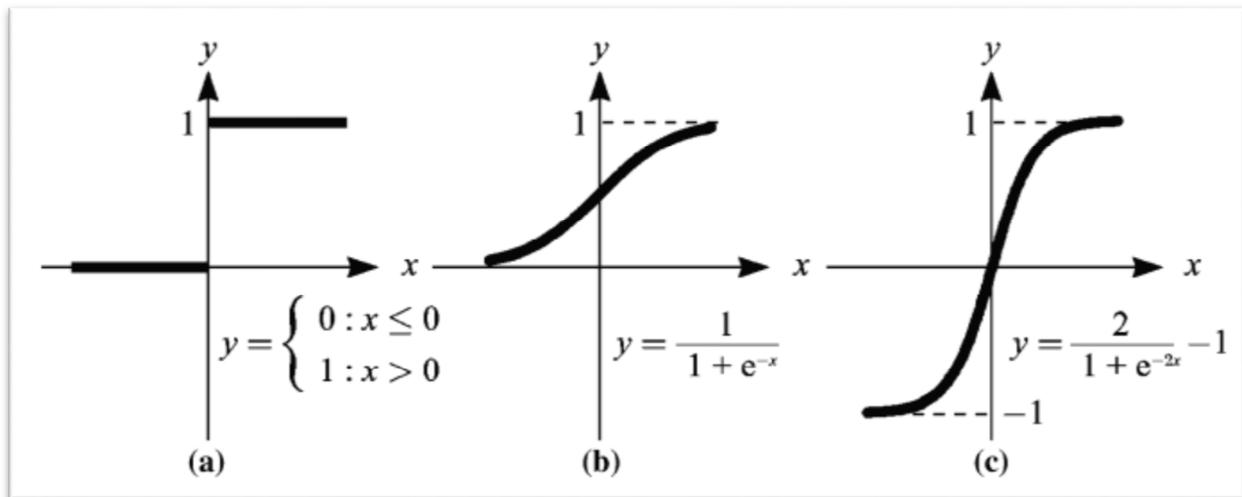


Figure IV.4 Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones
 (a) : fonction seuil, (b) tangente sigmoïde, (c) tangente hyperbolique

IV.1.4 L'apprentissage

L'apprentissage est la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux, 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.

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'issue 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 *rétro-propagation* : 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.[32]

IV.1.5 Le perceptron

Un réseau de neurones monocouche, aussi appelé perceptron, est caractérisé de la manière suivante [15].

- 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 (IV.5).

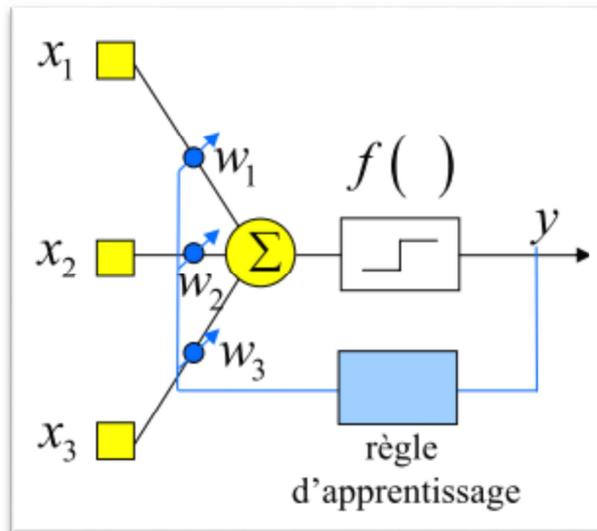


Figure IV.5 Schéma de principe du perceptron simple

IV.1.6 La rétro-propagation

La rétro propagation consiste à rétro propagé 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 rétro propagation du gradient de l'erreur (ou back-propagation en anglais), 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. [31]

IV.1.7 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. [33]

IV.2 Modélisation de la rugosité de surface (Ra) par un réseau de neurones artificiel (ANN)

Afin de modéliser la rugosité de surface en fraisage dur nous avons employé un perceptron multicouche MLP. Les données expérimentales présentées dans le tableau IV.1 ont été utilisées pour établir le modèle. Le plan expérimental se compose de 27 essais, dont 25 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 2 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones a été fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant. Plusieurs

structures de réseau ont été testées, nous nous limitons à présenter seulement la structure qui a donnée de meilleurs résultats qui est 3-20-1 (Figure IV.6). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre des paramètres), une couche cachée à 20 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 10 a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau. Les paramètres d'apprentissage ont été établis tels que le tau d'apprentissage $\eta = 0.1$ avec un nombre d'itérations maximum de 100.

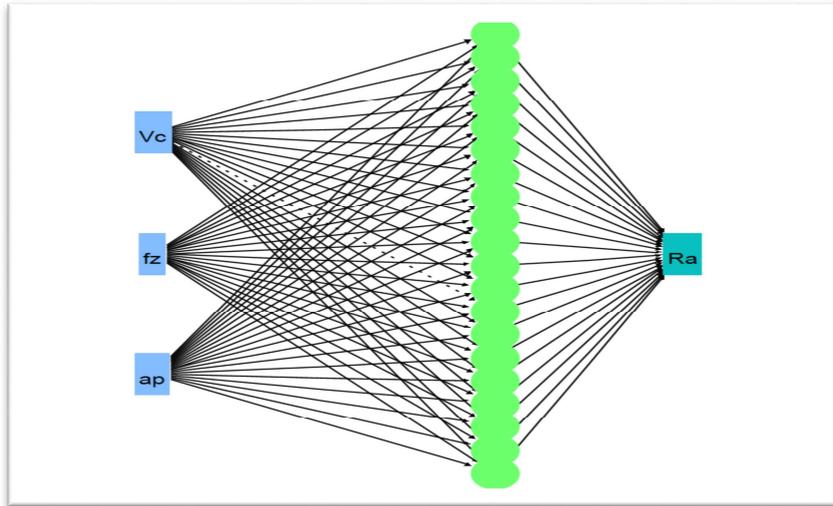


Figure IV.6 Structure du réseau de neurone du modèle de la rugosité de surface.

Tableau IV.1 Résultats expérimentaux et du modèle ANN de la rugosité de surface (Ra)

N° d'essais	Paramètres d'usinage			Facteurs de Réponse				
	V_c (m/min)	f_z (mm/tooth)	ap (mm)	Ra (μm)	F_c (N)	K_s (MPa)	P_c (W)	VCE (mm^3/min)
1	111	0.08	0.3	0.98	390	16250.00	721.50	3393.63
2	111	0.08	0.6	1	500	10416.67	925.00	6787.26
3	111	0.08	0.9	1.42	625	8680.56	1156.25	10180.89
4	111	0.16	0.3	1.14	430	8958.33	795.50	6787.26
5	111	0.16	0.6	0.66	576	6000.00	1065.60	13574.52
6	111	0.16	0.9	1.35	810	5625.00	1498.50	20361.78
7	111	0.25	0.3	2.04	531	7080.00	982.35	10605.10
8	111	0.25	0.6	2.05	712	4746.67	1317.20	21210.19
9	111	0.25	0.9	2.25	932	4142.22	1724.20	31815.29
10	157	0.08	0.3	0.64	279	11625.00	730.05	4800
11	157	0.08	0.6	1	389	8104.17	1017.88	9600
12	157	0.08	0.9	0.94	501	6958.33	1310.95	14400
13	157	0.16	0.3	1.23	340	7083.33	889.67	9600
14	157	0.16	0.6	1.27	483	5031.25	1263.85	19200
15	157	0.16	0.9	1.26	603	4187.50	1577.85	28800
16	157	0.25	0.3	1.57	367	4893.33	960.32	15000
17	157	0.25	0.6	2	635	4233.33	1661.58	30000
18	157	0.25	0.9	1.52	809	3595.56	2116.88	45000
19	222	0.08	0.3	0.74	211	8791.67	780.70	6787.26
20	222	0.08	0.6	0.82	377	7854.17	1394.90	13574.52
21	222	0.08	0.9	1.09	487	6763.89	1801.90	20361.78
22	222	0.16	0.3	0.86	291	6062.50	1076.70	13574.52
23	222	0.16	0.6	1.1	407	4239.58	1505.90	27149.04
24	222	0.16	0.9	1.33	541	3756.94	2001.70	40723.57
25	222	0.25	0.3	1.13	318	4240.00	1176.60	21210.19
26	222	0.25	0.6	1.28	531	3540.00	1964.70	42420.38
27	222	0.25	0.9	1.25	661	2937.78	2445.70	63630.57

L'équation ci-dessous présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour la rugosité de surface Ra . H_1 à H_{20} présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 20 neurones) de la couche cachée.

$$H1 = \tanh(.5*(0.0262992916928479*Vc + 1.62084235537934*fz + -0.80885736160054*ap + -4.5457188475346));$$

$$H2 = \tanh(.5*(0.0218992493564664*Vc + -3.43895918798877*fz + -2.00889880330701*ap + -1.51333885047846));$$

$$H3 = \tanh(.5*(0.00139493643821009*Vc + -6.96386775670877*fz + 7.91689510915805*ap + -3.56922287053501));$$

$$H4 = \tanh(.5*(-0.00322751757890215*Vc + -26.3692502150238*fz + -5.83841237044191*ap + 8.65722460194916));$$

$$H5 = \tanh(.5*(0.0244286238227746*Vc + -11.9619859748645*fz + -1.53712000156629*ap + -1.90165141274749));$$

$$H6 = \tanh(.5*(-0.0150428317321723*Vc + -19.2833806924783*fz + 5.26267066396174*ap + 3.34671407618989));$$

$$H7 = \tanh(.5*(0.00369016466980643*Vc + 7.94092308373091*fz + -0.766241187921853*ap + -1.62991919102712));$$

$$H8 = \tanh(.5*(-0.0304731996450481*Vc + -25.5033349441046*fz + 2.2747522553811*ap + 8.68270734177576));$$

$$H9 = \tanh(.5*(-0.00438165155264012*Vc + -2.9272000171324*fz + 8.88366507809055*ap + -5.54678218678257));$$

$$H10 = \tanh(.5*(0.00574417420083212*Vc + 1.75749131970363*fz + -3.79608969007968*ap + 0.661990768864566));$$

$$H11 = \tanh(.5*(0.0567994397795376*Vc + -7.61905250654428*fz + -0.5311797458771*ap + -7.31346212157502));$$

$$H12 = \tanh(.5*(0.00580245645315481*Vc + -11.0571550447686*fz + 1.93965413030051*ap + 0.571628862228658));$$

$$H13 = \tanh(.5*(0.0239413895307923*Vc + 43.0388881440873*fz + 1.17878572462935*ap + -10.7052657400943));$$

$$H14 = \tanh(.5*(0.00692182912541993*Vc + -4.78207099749226*fz + -0.00753044768459192*ap + -1.75692229310323));$$

$$H15 = \tanh(.5*(0.0176023230261996*Vc + 13.3070207998233*fz + 6.48844179071171*ap + -10.0151208662936));$$

$$H16 = \tanh(.5*(-0.0234985192898909*Vc + 1.18109868047245*fz + -5.63032367354724*ap + 8.11256978747298));$$

$$H17 = \tanh(.5*(-0.0330553688540324*V_c + 5.96352926237126*f_z + 0.218233317176342*ap + 3.16255085613982));$$

$$H18 = \tanh(.5*(0.0187945670969439*V_c + -11.6520696375338*f_z + -1.55589228932987*ap + -0.128194389794388));$$

$$H19 = \tanh(.5*(0.0150153071781308*V_c + -33.6383605190865*f_z + 1.41150877050852*ap + 0.851256989665714));$$

$$H20 = \tanh(.5*(0.017717908807215*V_c + 9.27018528148814*f_z + -8.51529861917316*ap + 2.23306813448877));$$

La somme des sorties des 20 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de la rugosité de surface (R_a).

$$\begin{aligned} Ra = & -0.32427754963095*H1 + -2.47916846928941*H2 + 3.02071192556918*H3 + - \\ & 0.563647828154758*H4 + -2.47570767854899*H5 + -1.98267821891582*H6 + -1.58520542561752*H7 \\ & + 0.805434556685908*H8 + 1.92541665402924*H9 + 2.12968039124333*H10 + - \\ & 0.460904494498531*H11 + -2.79655182227682*H12 + 0.590583448512537*H13 + \\ & 9.02506683591886*H14 + 1.07747327940992*H15 + 2.09305997507959*H16 + \\ & 0.311489077487731*H17 + 4.61305128544541*H18 + 0.209672010852476*H19 + \\ & 2.30131593206318*H20 + \\ & 6.78533843442389; \dots \dots \dots (IV.3) \end{aligned}$$

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

<i>Apprentissage</i>		<i>Validation</i>	
<i>Ra</i>	<i>Mesures</i>	<i>Ra</i>	<i>Mesures</i>
R^2	99.89	R^2	99.98
<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	0.0134	<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	0.0030
<i>Somme fréquences</i>	25	<i>Somme fréquences</i>	2

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 $R^2 = 0.9989$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9998$ pour la validation présentent 99,89% et 99,98% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

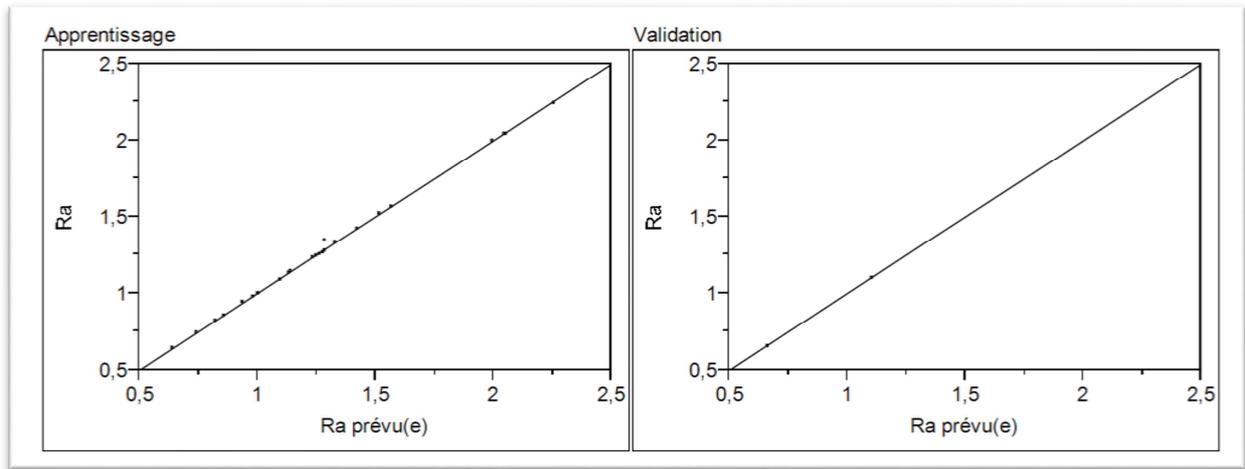


Figure IV.7 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (Ra)

La figure (IV.8) présente que l'avance par dent (f_z) le facteur le plus influent sur la rugosité de surface (Ra) suivie de la vitesse de coupe (V_c) et avec une faible pente de profondeur de passe (ap)

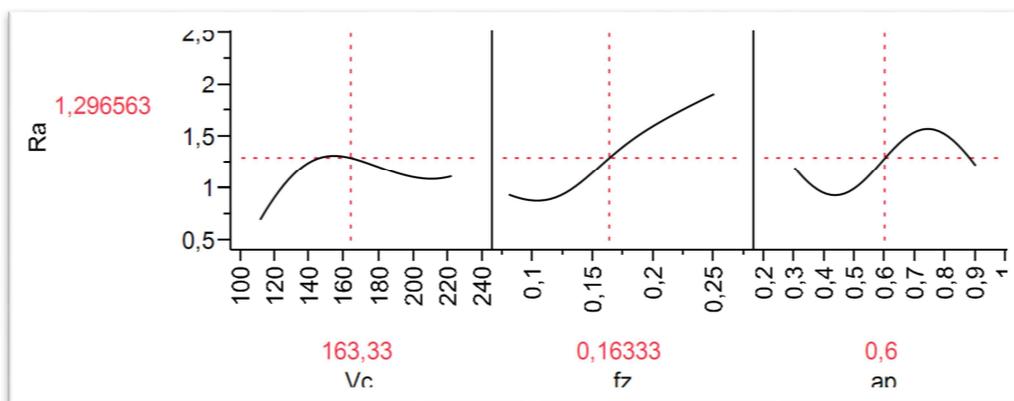


Figure IV.8 Graphique de profil de prévision pour (Ra)

IV.3 Modélisation de l'effort de coupe (F_c) par un réseau de neurones artificiel (ANN)

Afin de modéliser l'effort de coupe nous avons employé un perceptron multicouche MLP. Les données expérimentales présentées dans le tableau IV.1 ont été utilisées pour établir le modèle. Le plan expérimental se compose de 27 essais, dont 22 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 5 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones a été fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant. Plusieurs structures de réseau ont été testées, nous nous limitons à présenter seulement la structure qui a donné de meilleurs résultats qui est 3-7-1 (Figure IV.9). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre des paramètres), une couche cachée à 7 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une

couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 10 a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau. Les paramètres d'apprentissage ont été établis tels que le tau d'apprentissage $\eta = 0.1$ avec un nombre d'itérations maximum de 100.

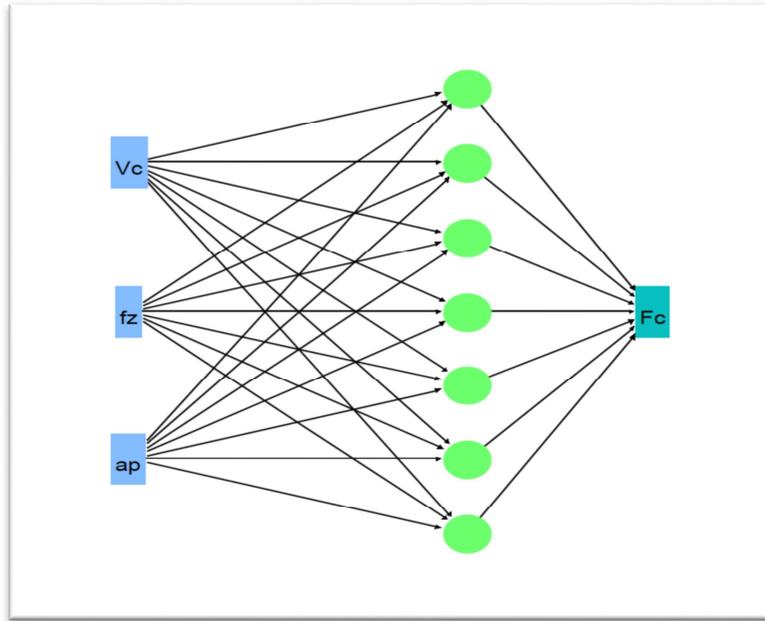


Figure IV.9 Structure ANN pour (F_c).

L'équation suivante présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour l'effort de coupe. H_1 à H_7 présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 7 neurones) de la couche cachée.

$$H_1 = \tanh(.5*(-0.029037308282194*V_c + -11.262825157783*f_z + -2.81002062943193*ap + 10.2049984827947));$$

$$H_2 = \tanh(.5*(-0.0131609150264327*V_c + -4.49262373272824*f_z + 0.471752967564487*ap + 3.31246672480798));$$

$$H_3 = \tanh(.5*(0.0197451222613407*V_c + -47.4466032329467*f_z + 15.9063565956547*ap + -3.62653585259803));$$

$$H_4 = \tanh(.5*(-0.0263238026425346*V_c + 12.7127933125138*f_z + 2.82156540648202*ap + -1.54964658047152));$$

$$H_5 = \tanh(.5*(-0.117612349722843*V_c + 113.282061187924*f_z + -14.8548525509963*ap + 13.9239459211663));$$

$$H_6 = \tanh(.5*(-0.0339956450931737*V_c + -9.84829804517647*f_z + -46.7110158431077*ap + 33.7218635765667));$$

$$H_7 = \tanh(.5*(-0.00594001638489834*V_c + -1.20227019256015*f_z + 1.56256536794956*ap + 0.36462893086705));$$

La somme des sorties des 7 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de l'effort de coupe (F_c).

$$F_c = -124.903678567117 * H_1 + 61.4833256279024 * H_2 + -6.21635017265748 * H_3 + 248.488058056272 * H_4 + 22.6764049057337 * H_5 + -34.6035691641144 * H_6 + 244.494636273539 * H_7 + 682.086121112164 ; \dots \dots \dots (IV.4)$$

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 l'effort de coupe (F_c)

Apprentissage		Validation	
F_c	Mesures	F_c	Mesures
R^2	99.45	R^2	99.11
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	10.3649	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	23.7640
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). Les valeurs de l'effort de coupe (F_c) s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de l'effort de coupe est adéquat. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0.9945$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9911$ pour la validation présentent 99,45% et 99,11% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

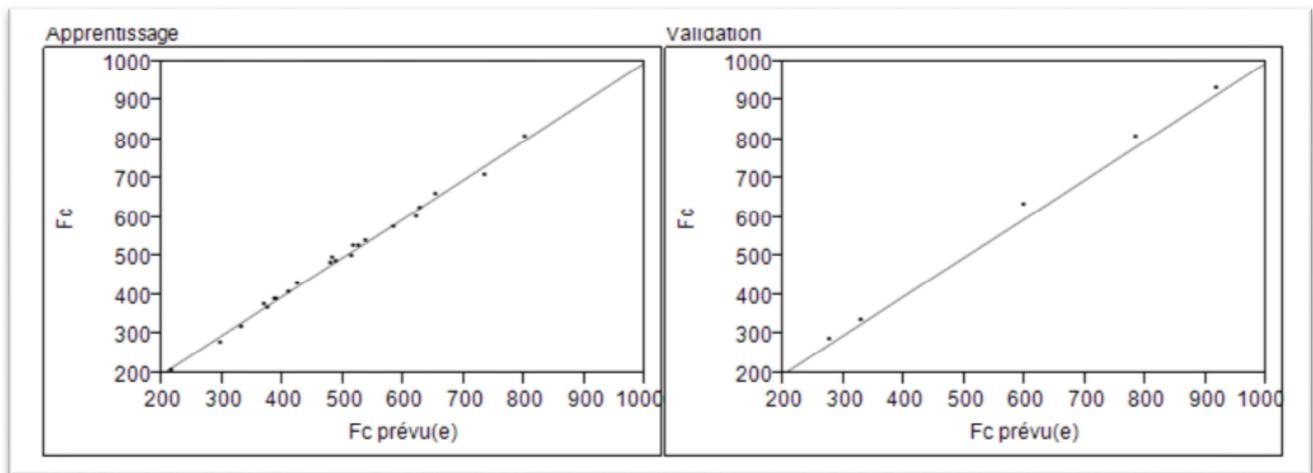


Figure IV.10 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (F_c)

La figure (IV.11) présente que la profondeur de passe (ap) est augment sur l'effort de coupe (F_c) suivie par l'avance par dent (f_z), par contre la vitesse de coupe (V_c) est diminuée

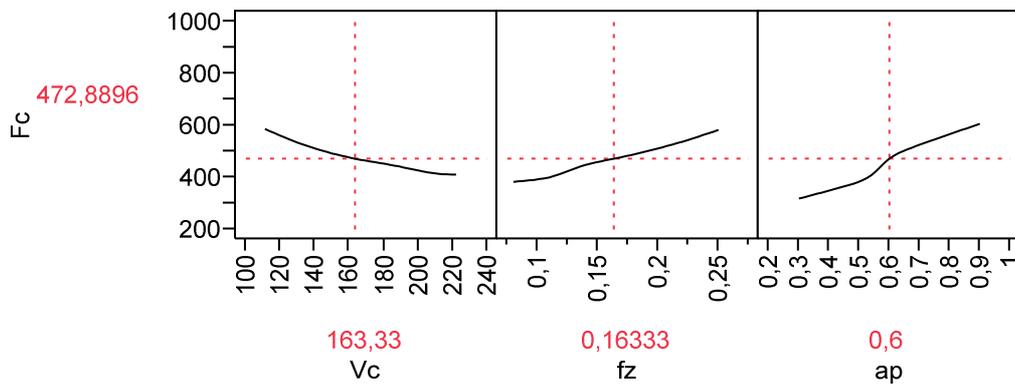


Figure IV.11 Graphique de profil de prévision pour (F_c)

IV.4 Modélisation de la pression spécifique de coupe (K_s) par un réseau de neurones artificiel (ANN)

Afin de modéliser la pression spécifique de coupe nous avons employé un perceptron multicouche MLP. Les données expérimentales présentées dans le tableau IV.1 ont été utilisées pour établir le modèle. Le plan expérimental se compose de 27 essais, dont 22 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 5 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones a été fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant. Plusieurs structures de réseau ont été testées, nous nous limitons à présenter seulement la structure qui a donné de meilleurs résultats qui est 3-8-1 (Figure IV.12). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre des paramètres), une couche cachée à 8 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 10 a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau. Les paramètres d'apprentissage ont été établis tels que le tau d'apprentissage $\eta = 0.1$ avec un nombre d'itérations maximum de 100.

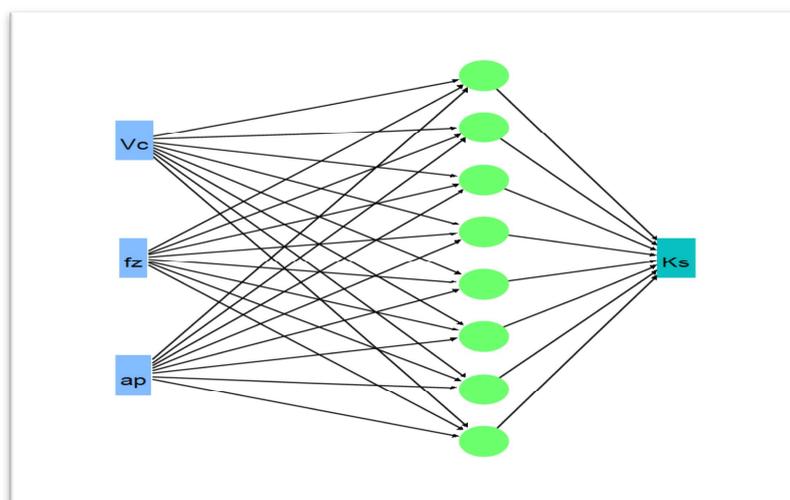


Figure IV.12 Structure (ANN) pour (K_s).

L'équation suivante présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour la pression spécifique de coupe. H_1 à H_8 présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 8 neurones) de la couche cachée.

$$H1 = \tanh(.5*(-0.0121622239002193*Vc + -17.134151951299*fz + -1.39781238767687*ap + 4.17777980921501));$$

$$H2 = \tanh(.5*(0.0139325075631321*Vc + 2.76736491984334*fz + 5.65915080394618*ap + -4.03897225453971));$$

$$H3 = \tanh(.5*(-0.00788083317933697*Vc + -24.318465169323*fz + -0.00564023845174506*ap + 3.89846939259289));$$

$$H4 = \tanh(.5*(0.0114532748109793*Vc + 2.50591064951686*fz + 2.49354900160612*ap + -3.07326798670886));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.0143229518984814*Vc + -10.4577646757981*fz + 4.11871203980401*ap + -0.232854797126689));$$

$$H6 = \tanh(.5*(-0.000456461895552861*Vc + 5.37755848201186*fz + -5.23521607204455*ap + 1.97627204576412));$$

$$H7 = \tanh(.5*(0.0283955924056083*Vc + -2.65387918279666*fz + 0.151612884105722*ap + -3.37409940540522));$$

$$H8 = \tanh(.5*(-0.0282206950203646*Vc + -35.5755813378724*fz + -3.57114488794511*ap + 10.7999082099568));$$

La somme des sorties des 8 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de la pression spécifique de coupe (Ks).

$$Ks = 15757.1596542157*H1 + -5430.5724937264*H2 + 1492.79160277055*H3 + 13551.2835783363*H4 + -2127.78792873628*H5 + 3082.26504913706*H6 + -4222.70587854539*H7 + -4601.31598658159*H8 + 12895.1006216863 ; \dots \dots \dots (IV.5)$$

Le tableau IV.4 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.4 R^2 et RMSE du modèle de la pression spécifique de coupe (Ks)

Apprentissage		Validation	
Ks	Mesures	Ks	Mesures
R^2	99.61	R^2	99.32
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	185.0148	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	166.4155
Somme fréquences	22	Somme fréquences	5

La figure (IV.13) présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de la pression spécifique de coupe (K_s) s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique la pression spécifique de coupe (K_s) est adéquat. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0,9961$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9932$ pour la validation présentent 99,61% et 99,32% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

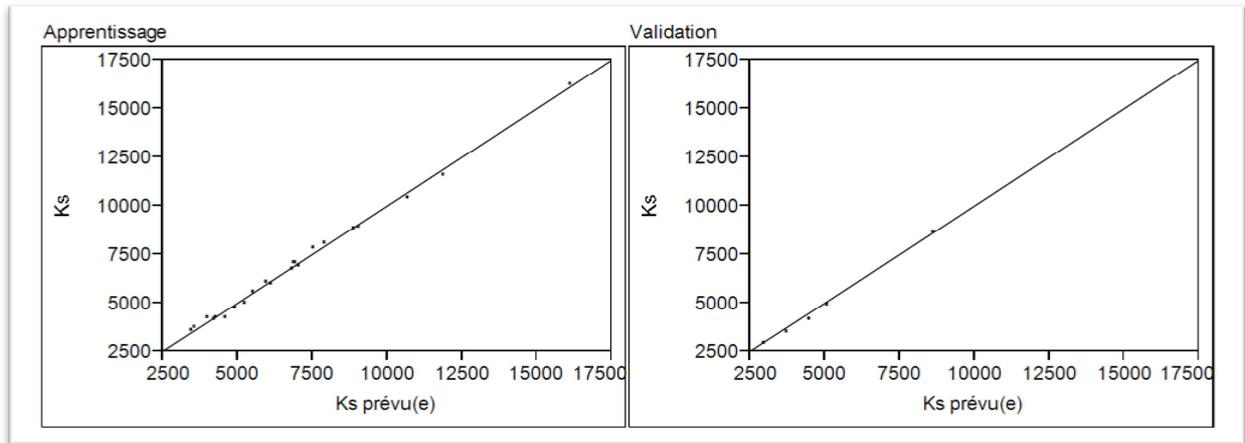


Figure IV.13 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (K_s)

La figure (IV.14) présente que l'avance par dent (f_z) diminue sur la pression spécifique de coupe (K_s) suivie de la vitesse de coupe (V_c) et avec une faible pente de profondeur de passe (ap)

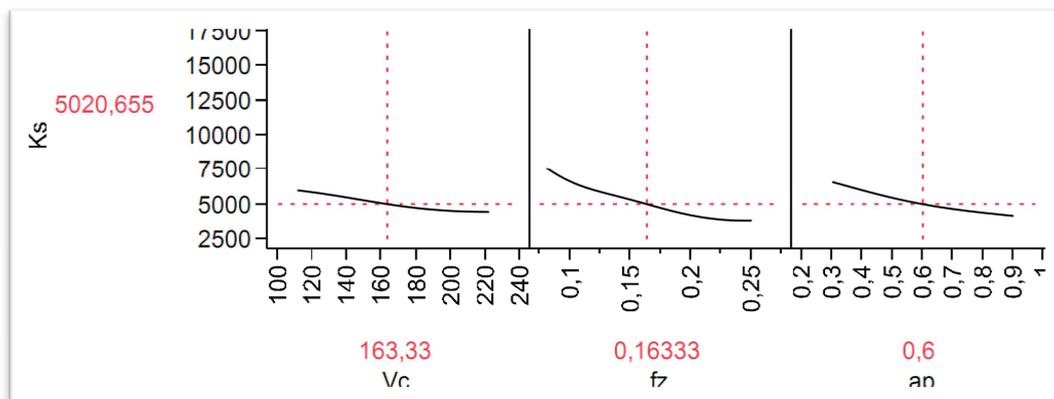


Figure IV.14 Graphique de profil de prévision pour (K_s)

IV.5 Modélisation de la puissance de coupe (P_c) par un réseau de neurones artificiel (ANN)

Afin de modéliser la puissance de coupe nous avons employé un perceptron multicouche MLP. Les données expérimentales présentées dans le tableau IV.1 ont été utilisées pour établir le modèle. Le plan expérimental se compose de 27 essais, dont 22 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 5 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones a été fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant. Plusieurs structures de réseau ont été testées, nous limitons à présenter seulement la structure qui a donnée de meilleurs résultats qui est 3-6-1

(Figure IV.15). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre des paramètres), une couche cachée à 6 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 10 a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau. Les paramètres d'apprentissage ont été établis tels que le tau d'apprentissage $\eta = 0.1$ avec un nombre d'itérations maximum de 100.

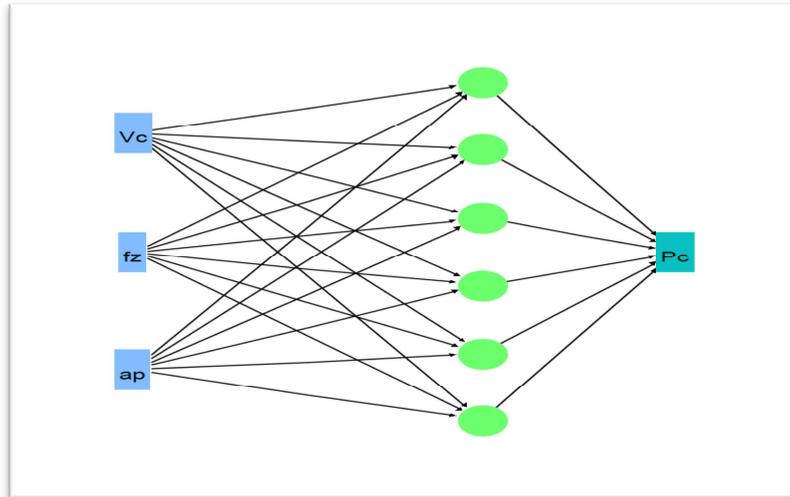


Figure IV.15 Structure ANN pour (P_c).

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

$$H1 = \tanh(.5*(-0.0195163805342625*Vc + 12.4708452849459*fz + 12.8082516175657*ap + -6.05499947356809));$$

$$H2 = \tanh(.5*(-0.0601205700935563*Vc + 20.5158589890115*fz + -9.33359757115164*ap + 13.6022256646408));$$

$$H3 = \tanh(.5*(0.0194442306250079*Vc + -0.53838942773278*fz + 4.25902465866177*ap + -6.35758734042083));$$

$$H4 = \tanh(.5*(-0.0102569567230311*Vc + -10.8808936845395*fz + 5.35436134125442*ap + 3.0931700455599));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.00509941513616217*Vc + -25.4314392663496*fz + 0.553857612195285*ap + 2.18034776106589));$$

$$H6 = \tanh(.5*(0.0215994090473319*Vc + 33.9628895751332*fz + -2.08174625655348*ap + -9.70208990067616));$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de la puissance de coupe (P_c)

$$Pc = -37.7963698732715*H1 + 255.30223420736*H2 + 943.279265234455*H3 + 763.665499624711*H4 + -214.940949175855*H5 + 322.520508070625*H6 + 915.310713577349 ; \dots \dots \dots (IV.6)$$

Le tableau IV.4 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.4 R^2 et RMSE du modèle de la puissance de coupe (P_c)

Apprentissage		Validation	
P_c	Mesures	P_c	Mesures
R^2	99.31	R^2	99.50
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	40.2133	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	18.1690
Somme fréquences	22	Somme fréquences	5

La figure (IV.16) présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de la puissance de coupe s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de la puissance de coupe est adéquat. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0.9931$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9950$ pour la validation présentent 99,31% et 99,50% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

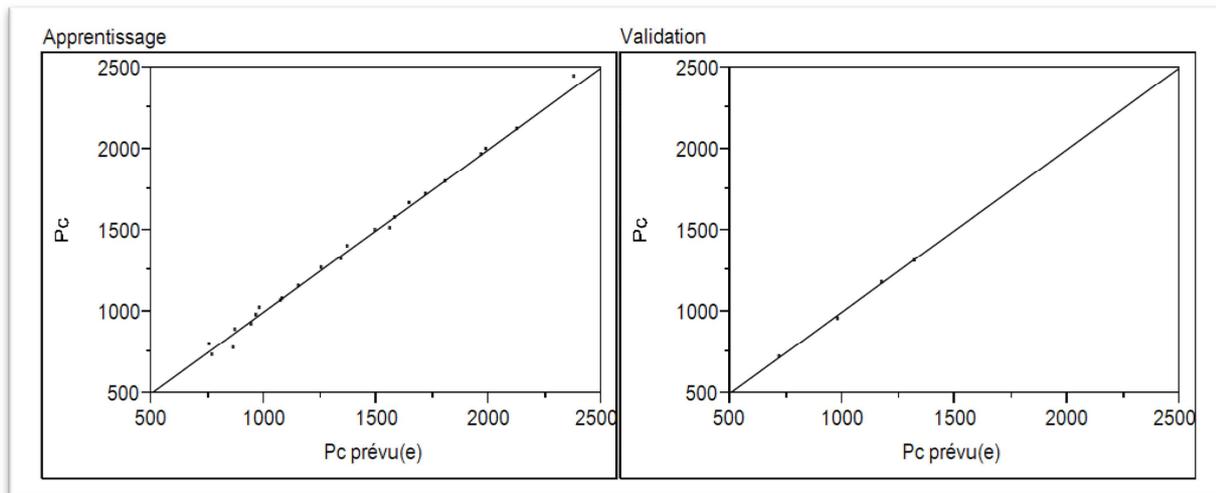


Figure IV.16 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (P_c)

La figure (IV.17) présente que la profondeur de passe (ap) est augment sur la puissance de coupe (P_c) suivie par l'avance par dent (f_z), est on dernier lieu la vitesse de coupe (V_c)

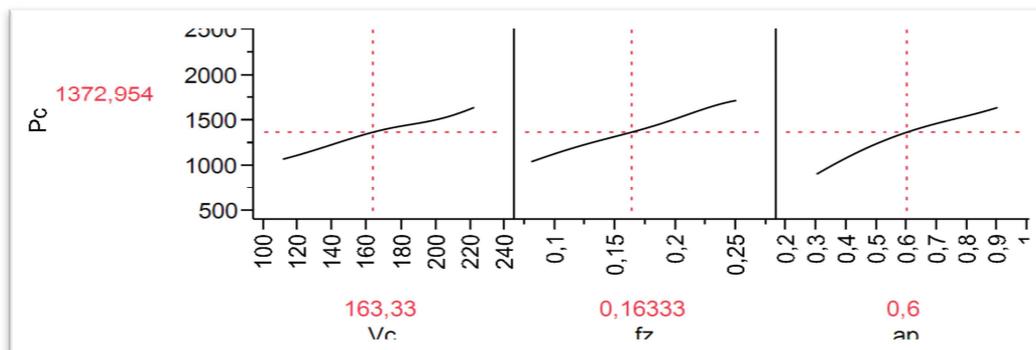
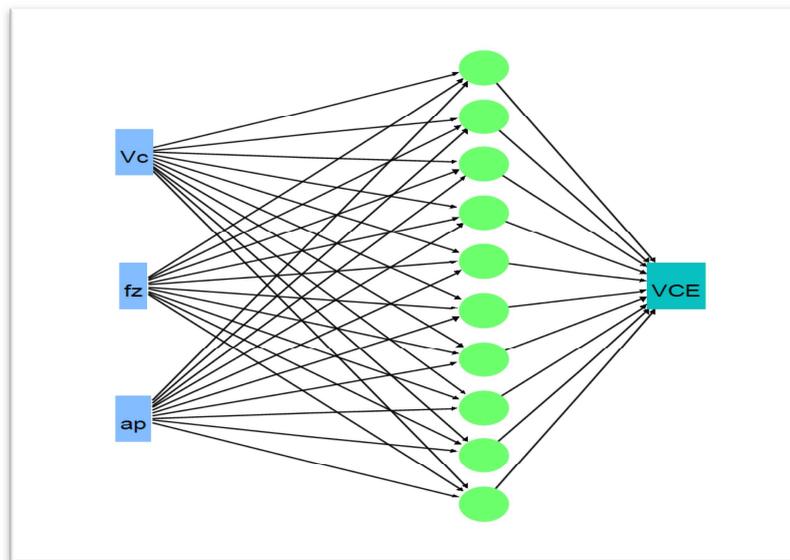


Figure IV.17 Graphique de profileur de prévision pour (P_c)

IV.6 Modélisation du volume du copeau enlevé (VCE) par un réseau de neurones artificiel (ANN)

Afin de modéliser le volume du copeau enlevé, nous avons employé un perceptron multicouche MLP. Les données expérimentales présentées dans le tableau IV.1 ont été utilisées pour établir le modèle. Le plan expérimental se compose de 27 essais, dont 18 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 9 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones a été fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant. Plusieurs structures de réseau ont été testées, nous limitons à présenter seulement la structure qui a donné de meilleurs résultats qui est

3-10-1 (Figure IV.18). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 nœuds (au nombre des paramètres), une couche cachée à 10 nœuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 10 a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau. Les paramètres d'apprentissage ont été établis tels que le tau d'apprentissage $\eta = 0.1$ avec un nombre d'itérations maximum de 100.

**Figure IV.18** Structure ANN pour (VCE).

L'équation suivante présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour le volume du copeau enlevé. H_1 à H_{10} présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 10 neurones) de la couche cachée.

$$H_1 = \tanh(.5*(0.0388364587500648*V_c + -15.9244711326319*f_z + 6.0824569177564*ap + -6.53484460732632));$$

$$H_2 = \tanh(.5*(-0.019214038676423*V_c + -15.4096380270951*f_z + 2.12038671283852*ap + -5.34491093396224));$$

$$H3 = \tanh(.5*(0.000461632692948285*Vc + -16.4671646623094*fz + -0.719843400543406*ap + 3.23129281565071));$$

$$H4 = \tanh(.5*(0.0135140020138423*Vc + 7.94295973529308*fz + 7.25419303478491*ap + -7.21096569638794));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.00530285830848896*Vc + -4.89747182357715*fz + -3.94981135595293*ap + 5.54476718212853));$$

$$H6 = \tanh(.5*(-0.000854468534348478*Vc + 1.3329325608324*fz + -0.924845890749922*ap + 0.473347792927031));$$

$$H7 = \tanh(.5*(0.0164980457411984*Vc + -13.8872065235936*fz + 1.00908799772327*ap + 1.22907785286508));$$

$$H8 = \tanh(.5*(-0.0110988413240747*Vc + -5.65909016485069*fz + 11.7795020331646*ap + -4.4897336720594));$$

$$H9 = \tanh(.5*(-0.0134009148247673*Vc + -8.72458898525464*fz + -11.2895192440352*ap + 9.17184487811713));$$

$$H10 = \tanh(.5*(0.00852992166906854*Vc + -8.4588708923356*fz + 2.86568516041172*ap + -1.74494990014915));$$

La somme des sorties des 10 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle du volume du copeau enlevé (VCE)

$$VCE = 1494.61850869069*H1 + -9300.26128798613*H2 + 8305.23469448445*H3 + -42013.227355236*H4 + -75996.6232201014*H5 + 190920.004781863*H6 + 10034.1924925597*H7 + 3242.37096885227*H8 + -39695.8979333773*H9 + 10879.0920787632*H10 + 55716.6055980885 ; (IV.7)$$

Le tableau IV.5 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.5 R² et RMSE du modèle du volume du copeau enlevé (VCE)

<i>Apprentissage</i>		<i>Validation</i>	
<i>VCE</i>	<i>Mesures</i>	<i>VCE</i>	<i>Mesures</i>
<i>R²</i>	99.99	<i>R²</i>	99.23
<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	110.7791	<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	1005.8861
<i>Somme fréquences</i>	18	<i>Somme fréquences</i>	9

La figure (IV.19) présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de la puissance de coupe s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de la puissance de coupe est adéquat. Les coefficients de corrélations R² = 0,9999 pour l'apprentissage et R² = 0,9923 pour la validation présentent 99,99% et 99,23% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

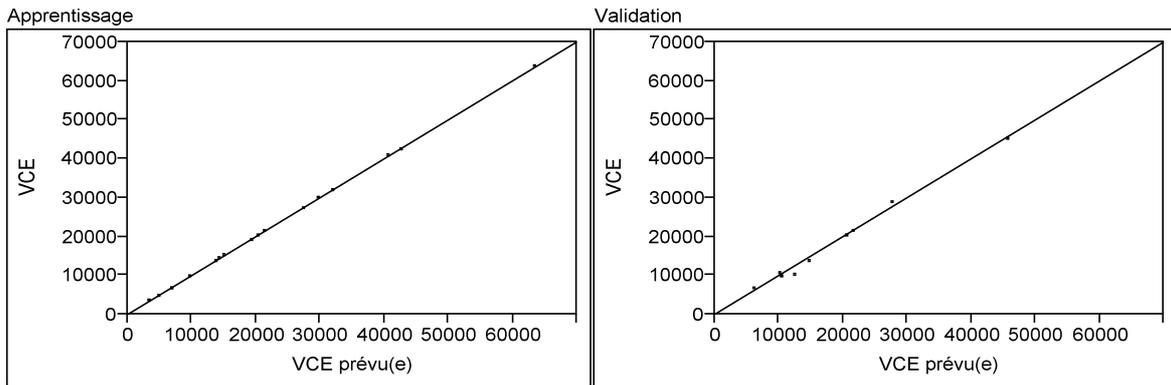


Figure IV.19 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour (VCE)

La figure (IV.20) présente que l'avance par dent (fz) est augment sur le volume du copeau enlevé (VCE) suivie par la profondeur de passe (ap), est on dernier lieu la vitesse de coupe (Vc).

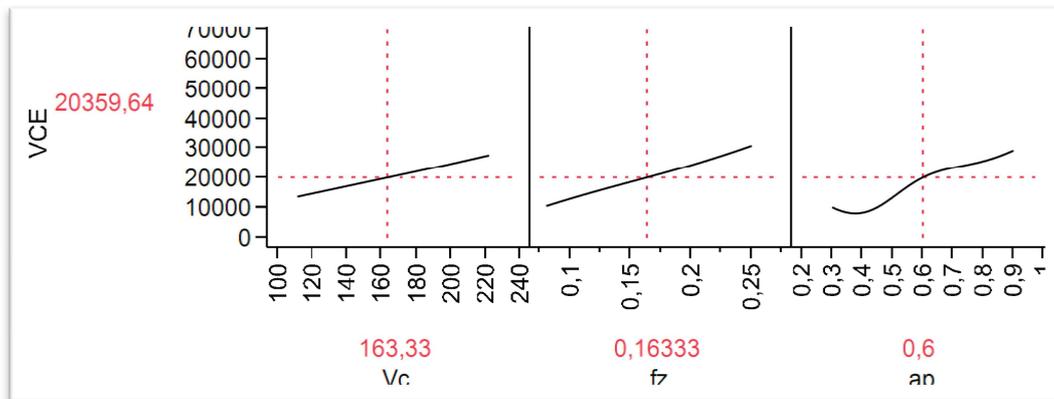


Figure IV.20 Graphique de profil de prévision pour (VCE)

IV.7 Comparaison entre les modèles (ANN) et (RMS)

La comparaison entre les valeurs expérimentales pour la rugosité de surface (Ra), l'effort de coupe (Fc), la pression spécifique de coupe (Ks), la puissance de coupe (Pc) et le volume du copeau enlevé (VCE) avec ceux prédites par les modèles pour le plan de Taguchi 27 essais obtenus par réseaux de neurone artificiels (ANN) et la Méthodologie de Surface de Réponse (RMS) est présentée dans les tableau (IV.6) et graphiquement sur les figures (IV.21, IV.22, IV.23, IV.24 et IV.25).

Tableau IV.6 Comparaison entre les modèles (RMS) et (ANN)

Modèle	Coefficient de corrélation R ²		
	RMS	ANN Apprentissage	ANN Validation
$Ra = f(Vc, fz, ap)$	0,7977	0,9989	0,9998
$Fc = f(Vc, fz, ap)$	0,9845	0,9945	0,9911
$Ks = f(Vc, fz, ap)$	0,9665	0,9961	0,9932
$Pc = f(Vc, fz, ap)$	0,9834	0,9931	0,9950

VCE = f (Vc, fz, ap)	0,9952	0,9999	0,9923
----------------------	--------	--------	--------

Le tableau IV.6 récapitule les résultats de la modélisation par régression multiple et par réseau de neurones artificiel des paramètres technologiques. En se rapportant aux coefficients de corrélation R^2 , les résultats s'avèrent généralement satisfaisants. Ainsi, les modèles proposés peuvent être employés efficacement pour prédire la rugosité de surface et les efforts de coupe générés par le processus de fraisage dur. Néanmoins, il est à noter que les modèles (ANN) produisent des résultats meilleurs comparés à ceux de la régression multiple. Concernant la rugosité de surface, le tableau montre que le modèle basé sur les paramètres de coupe, développé par la méthodologie de surface de réponse, a un coefficient de corrélation de 0.79 et que l'addition de la vibration de l'outil a mené à son amélioration jusqu'à 0.99. Par contre, le coefficient de corrélation du modèle neuronal basé seulement sur les paramètres de coupe est de 0.9989 pour l'ensemble d'apprentissage et 0.9998 pour l'ensemble de validation. Pour l'effort de coupe, la différence entre les coefficients de corrélation des deux modèles est flagrante, car il se trouve que le coefficient de corrélation du modèle (RMS) est de 0.9845 tandis que celui du modèle (ANN) est de 0.9945 pour l'ensemble d'apprentissage et 0.9911 pour l'ensemble de validation. Aussi, une petite amélioration du coefficient de corrélation du modèle neuronal de l'effort de coupe est enregistrée. Pour la pression spécifique de coupe, la différence entre les coefficients de corrélation des deux modèles est trop grande différence, car il se trouve que le coefficient de corrélation du modèle (RMS) est de 0.9665 tandis que celui du modèle (ANN) est de 0.9961 D'apprentissage et 0.9932 pour l'ensemble de validation. Pour la puissance de coupe, la différence entre les coefficients de corrélation des deux modèles est proche, car il se trouve que le coefficient de corrélation du modèle (RMS) est de 0.9834 tandis que celui du modèle (ANN) est de 0.9931 d'apprentissage et 0.9950 pour l'ensemble de validation et pour le volume de copeau enlevé, la différence entre les coefficients de corrélation des deux modèles est très proche, car il se trouve que le coefficient de corrélation du modèle (RMS) est de 0.9952 tandis que celui du modèle (ANN) est de 0.9999 d'apprentissage et 0.9923 pour l'ensemble de validation.

Tableau IV.7 Comparaison des résultats expérimentaux et prédites par (RMS) et (ANN) pour (Ra) et (Fc)

N° Essai	Rugosité de surface (Ra)					Effort de coupe (Fc)				
	Ra (μm) Expér	Préd (ANN)	Préd (RMS)	% erreur (ANN)	% erreur (RMS)	Fc (N) Expér	Préd (ANN)	Préd (RMS)	% erreur (ANN)	% erreur (RMS)
1	0,98	0,9768	0,8148	-0,0033	-0,1686	390	374,3166	370,7166	0,9598	-0,0494
2	0,64	0,6383	0,7803	-0,0026	0,2192	279	280,3036	274,1642	1,0047	-0,0173
3	0,74	0,7592	0,7574	0,0260	0,0236	211	215,0678	245,7702	1,0193	0,1648
4	1,14	1,1346	1,2035	-0,0047	0,0557	430	422,5140	432,4324	0,9826	0,0057
5	1,23	1,2267	1,0365	-0,0027	-0,1573	340	340,8813	320,7736	1,0026	-0,0565
6	0,86	0,8494	0,8264	-0,0123	-0,0390	291	291,4241	271,0334	1,0015	-0,0686
7	2,04	2,0445	1,9879	0,0022	-0,0255	531	530,2691	524,3904	0,9986	-0,0124
8	1,57	1,5787	1,6719	0,0055	0,0649	367	365,3366	395,7368	0,9955	0,0783
9	1,13	1,1433	1,2511	0,0118	0,1072	318	315,7197	321,9824	0,9928	0,0125
10	1	0,9936	0,9637	-0,0064	-0,0363	500	480,3580	506,2828	0,9607	0,0126
11	1	0,9933	0,9395	-0,0067	-0,0605	389	388,7120	399,7964	0,9993	0,0278
12	0,82	0,8268	0,9312	0,0082	0,1356	377	374,1089	357,3652	0,9923	-0,0521
13	0,66	0,6692	1,2889	0,0140	0,9529	576	575,2658	603,6913	0,9987	0,0481
14	1,27	1,2785	1,1322	0,0067	-0,1085	483	478,6648	482,0985	0,9910	-0,0019
15	1,1	1,1188	0,9367	0,0171	-0,1485	407	429,2483	418,3213	1,0547	0,0278
16	2,05	2,0476	2,0018	-0,0012	-0,0235	712	714,4890	735,8037	1,0035	0,0334
17	2	1,9912	1,6961	-0,0044	-0,1520	635	665,9366	597,2162	1,0487	-0,0595
18	1,28	1,2780	1,2899	-0,0016	0,0077	531	531,0379	509,4246	1,0001	-0,0406
19	1,42	1,4170	1,1548	-0,0021	-0,1867	625	624,6026	631,4045	0,9994	0,0102
20	0,94	0,9396	1,1409	-0,0004	0,2138	501	506,2816	514,9842	1,0105	0,0279
21	1,09	1,0927	1,1472	0,0024	0,0525	487	486,3049	458,5158	0,9986	-0,0585
22	1,35	1,3563	1,4165	0,0047	0,0492	810	807,8040	764,5058	0,9973	-0,0562
23	1,26	1,2628	1,2701	0,0022	0,0080	603	608,8757	632,9790	1,0097	0,0497
24	1,33	1,3289	1,0891	-0,0008	-0,1811	541	536,6545	555,1647	0,9920	0,0262
25	2,25	2,2573	2,0579	0,0033	-0,0854	932	929,1038	936,7725	0,9969	0,0051
26	1,52	1,5299	1,7625	0,0065	0,1595	809	803,2686	788,2511	0,9929	-0,0256
27	1,25	1,2540	1,3709	0,0032	0,0967	661	659,3667	686,4224	0,9975	0,0385

Tableau IV.8 Comparaison des résultats expérimentaux et prédites par (RMS) et (ANN) pour (K_s) et (P_c)

N° Essai	la pression spécifique de coupe (K_s)					la puissance de coupe (P_c)				
	K_s (MPa) Expér	Préd (ANN)	Préd (RMS)	% erreur (ANN)	% erreur (RMS)	P_c (W) Expér	Préd (ANN)	Préd (RMS)	% erreur (ANN)	% erreur (RMS)
1	16250,0000	16077,1507	14616,1682	-0,0106	-0,1005	721,5	722,3457	695,8539	0,0012	-0,0355
2	11625,0000	11625,6659	11836,3590	-0,0860	0,0182	730,05	790,441	728,3884	0,0827	-0,0023
3	8791,6667	8668,6736	9613,7633	-0,0254	0,0935	780,7	789,3813	854,5991	0,0111	0,0947
4	8958,3333	9009,0121	9637,2755	0,0090	0,0758	795,5	799,9581	783,8002	0,0056	-0,0147
5	7083,3333	7067,9648	7267,1979	-0,1433	0,0260	889,6666	872,1826	839,7264	-0,0197	-0,0561
6	6062,5000	6047,4873	5623,5707	-0,0915	-0,0724	1076,7	1059,5398	998,9907	-0,0159	-0,0722
7	7080,0000	6923,9338	7066,7929	-0,0220	-0,0019	982,35	925,383	950,3638	-0,0580	-0,0326
8	4893,3333	4914,3863	5157,6633	0,0043	0,0540	960,3166	948,3042	1032,6057	-0,0125	0,0753
9	4240,0000	4165,8656	4165,3758	-0,0175	-0,0176	1176,6	1168,519	1229,0552	-0,0069	0,0446
10	10416,6667	10824,568	10964,5892	0,1352	0,0526	925	913,5122	942,4502	-0,0124	0,0189
11	8104,1667	7870,3657	8739,1589	-0,0288	0,0784	1017,8833	1042,0007	1067,2986	0,0237	0,0485
12	7854,1667	7986,392	7299,9247	-0,1105	-0,0706	1394,9	1388,5048	1323,9530	-0,0046	-0,0509
13	6000,0000	6070,003	6665,1120	0,1450	0,1109	1065,6	1067,7469	1119,8527	0,0020	0,0509
14	5031,2500	5017,4152	4849,4133	0,0370	-0,0361	1263,85	1270,0012	1268,0928	0,0049	0,0034
15	4239,5833	4440,4938	3989,1476	0,0474	-0,0591	1505,9	1596,0597	1557,8008	0,0599	0,0345
16	4746,6667	4567,1948	4858,9717	0,0675	0,0237	1317,2	1395,1295	1387,0545	0,0592	0,0530
17	4233,3333	4144,5323	3504,2210	-0,0642	-0,1722	1661,5833	1669,0441	1561,6104	0,0045	-0,0602
18	3540,0000	3530,2639	3295,2950	-0,0310	-0,0691	1964,7	1949,4207	1888,5036	-0,0078	-0,0388
19	8680,5556	8757,2615	8790,8188	0,0204	0,0127	1156,25	1157,943	1135,0557	0,0015	-0,0183
20	6958,3333	6786,5112	7119,7675	0,0759	0,0232	1310,95	1303,5641	1352,2181	-0,0056	0,0315
21	6763,8889	6756,5667	6463,8948	0,0078	-0,0444	1801,9	1805,25	1739,3162	0,0019	-0,0347
22	5625,0000	5533,6427	5170,7570	0,0549	-0,0808	1498,5	1496,7334	1401,9144	-0,0012	-0,0645
23	4187,5000	4161,7159	3909,4373	0,0894	-0,0664	1577,85	1578,3204	1642,4686	0,0003	0,0410
24	3756,9444	3607,5107	3832,5331	-0,0664	0,0201	2001,7	2001,4548	2062,6202	-0,0001	0,0304
25	4142,2222	4232,9594	4128,9591	0,0219	-0,0032	1724,2	1723,3641	1769,7545	-0,0005	0,0264
26	3595,5556	3617,9407	3328,5874	0,0340	-0,0742	2116,8833	2113,4891	2036,6244	-0,0016	-0,0379
27	2937,7778	2930,4004	3903,0229	-0,0025	0,3286	2445,7	2448,7075	2493,9612	0,0012	0,0197

Tableau IV.9 Comparaison des résultats expérimentaux et prédites par (RMS) et (ANN) pour (VCE)

N° Essai	le volume de copeau enlevé (VCE)				
	VCE (mm ³ /min) Expér	Préd (ANN)	Préd (RMS)	% erreur (ANN)	% erreur (RMS)
1	3393,63057	3384,9943	5060,2972	-0,0025	0,4911
2	4800	4825,1112	5001,6985	0,0052	0,0420
3	6787,26115	6787,1176	4918,8960	0,0000	-0,2753
4	6787,26115	6789,7643	6853,9278	0,0004	0,0098
5	9600	9697,7795	9608,0679	0,0102	0,0008
6	13574,5223	13523,5600	13499,7877	-0,0038	-0,0055
7	10605,0955	10647,8938	8871,7622	0,0040	-0,1634
8	15000	15025,0360	14790,2335	0,0017	-0,0140
9	21210,1911	21265,5353	23153,2909	0,0026	0,0916
10	6787,26115	6797,4742	6787,2611	0,0015	0,0000
11	9600	9637,8404	9600,0000	0,0039	0,0000
12	13574,5223	13508,8631	13574,5223	-0,0048	0,0000
13	13574,5223	13500,4328	13574,5223	-0,0055	0,0000
14	19200	19231,9786	19200,0000	0,0017	0,0000
15	27149,0446	27219,8779	27149,0446	0,0026	0,0000
16	21210,1911	21284,7266	21210,1911	0,0035	0,0000
17	30000	29990,5669	30000,0000	-0,0003	0,0000
18	42420,3822	42557,7790	42420,3822	0,0032	0,0000
19	10180,8917	9944,3496	8514,2251	-0,0232	-0,1637
20	14400	14400,0000	14198,3015	0,0000	-0,0140
21	20361,7834	20639,3057	22230,1486	0,0136	0,0918
22	20361,7834	14607,3883	20295,1168	-0,2826	-0,0033
23	28800	28800,0000	28791,9321	0,0000	-0,0003
24	40723,5669	40594,6148	40798,3015	-0,0032	0,0018
25	31815,2866	31332,0536	33548,6200	-0,0152	0,0545
26	45000	45000,0000	45209,7665	0,0000	0,0047

27	63630,5732	63487,3446	61687,4735	-0,0023	-0,0305
----	------------	------------	------------	---------	---------

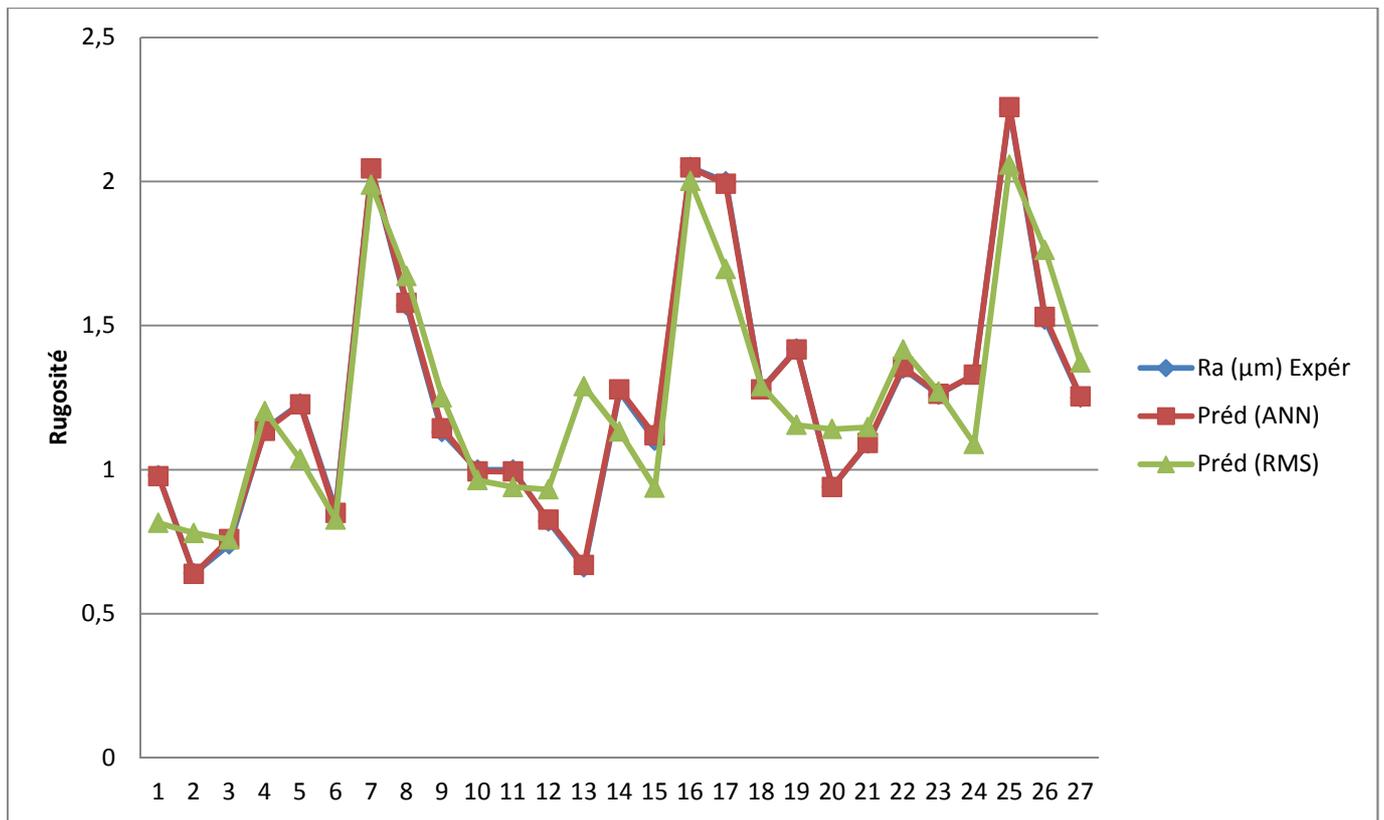


Figure IV.21: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra)

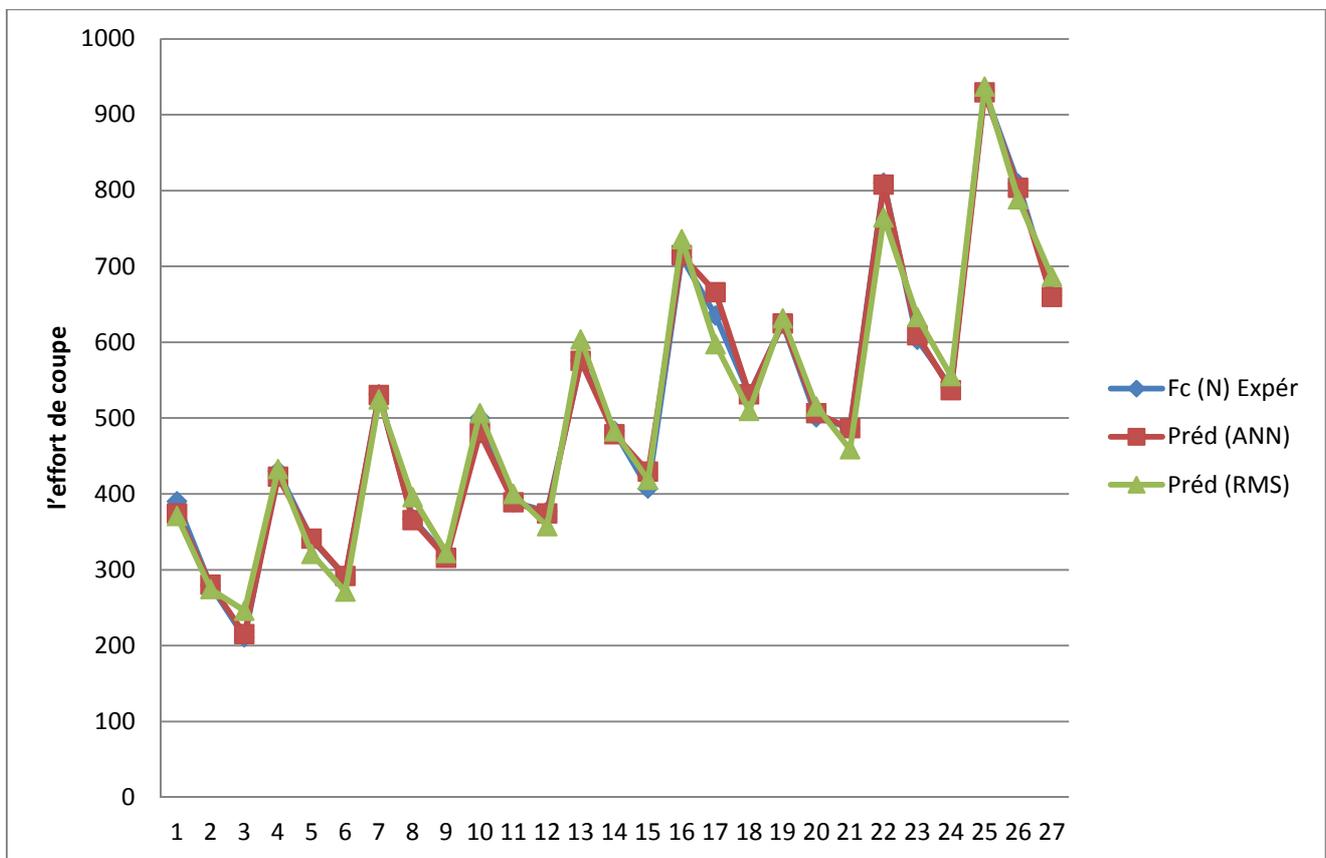


Figure IV.22 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour l'effort de coupe (F_c)

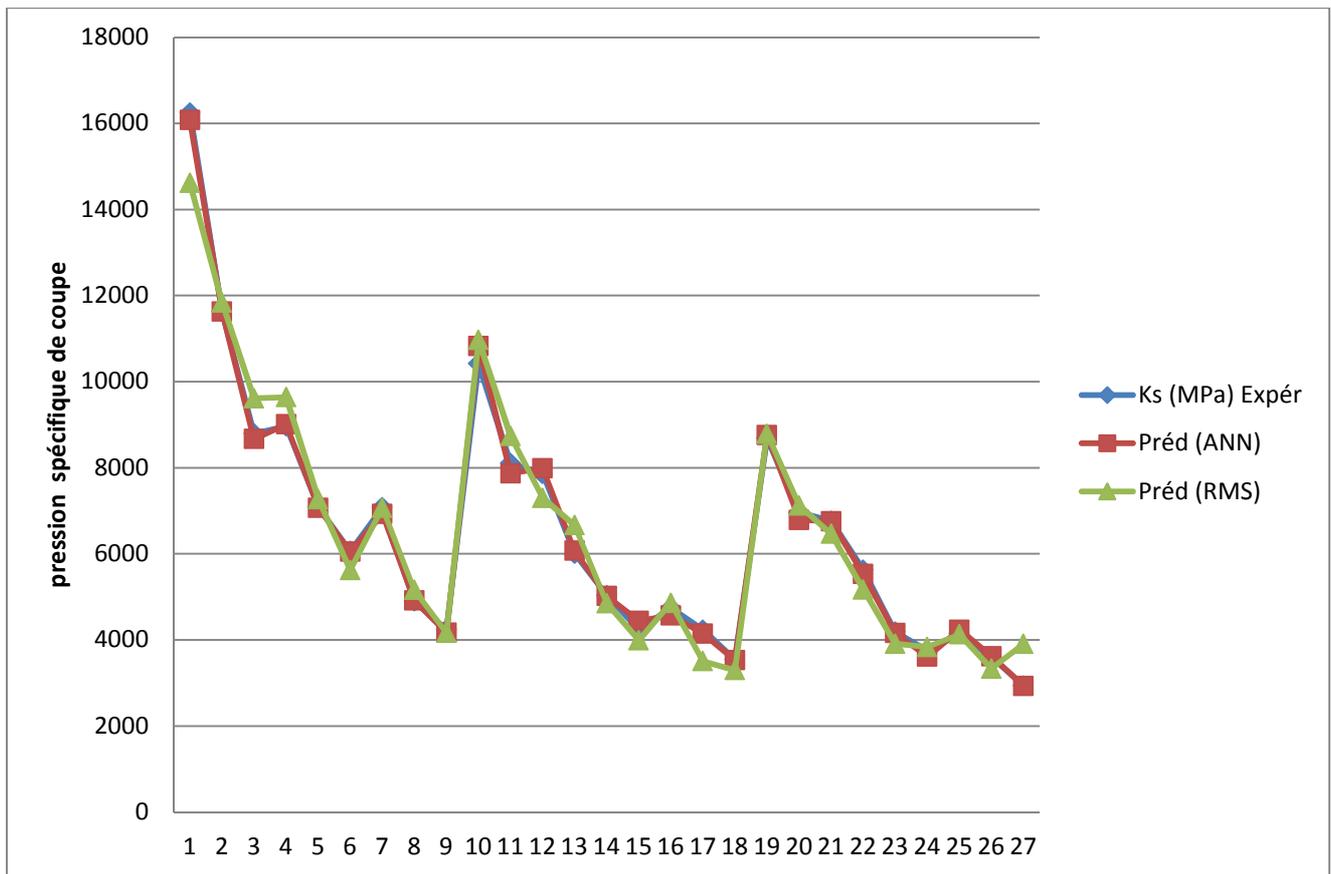


Figure IV.23 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la pression spécifique de Coupe (K_s)

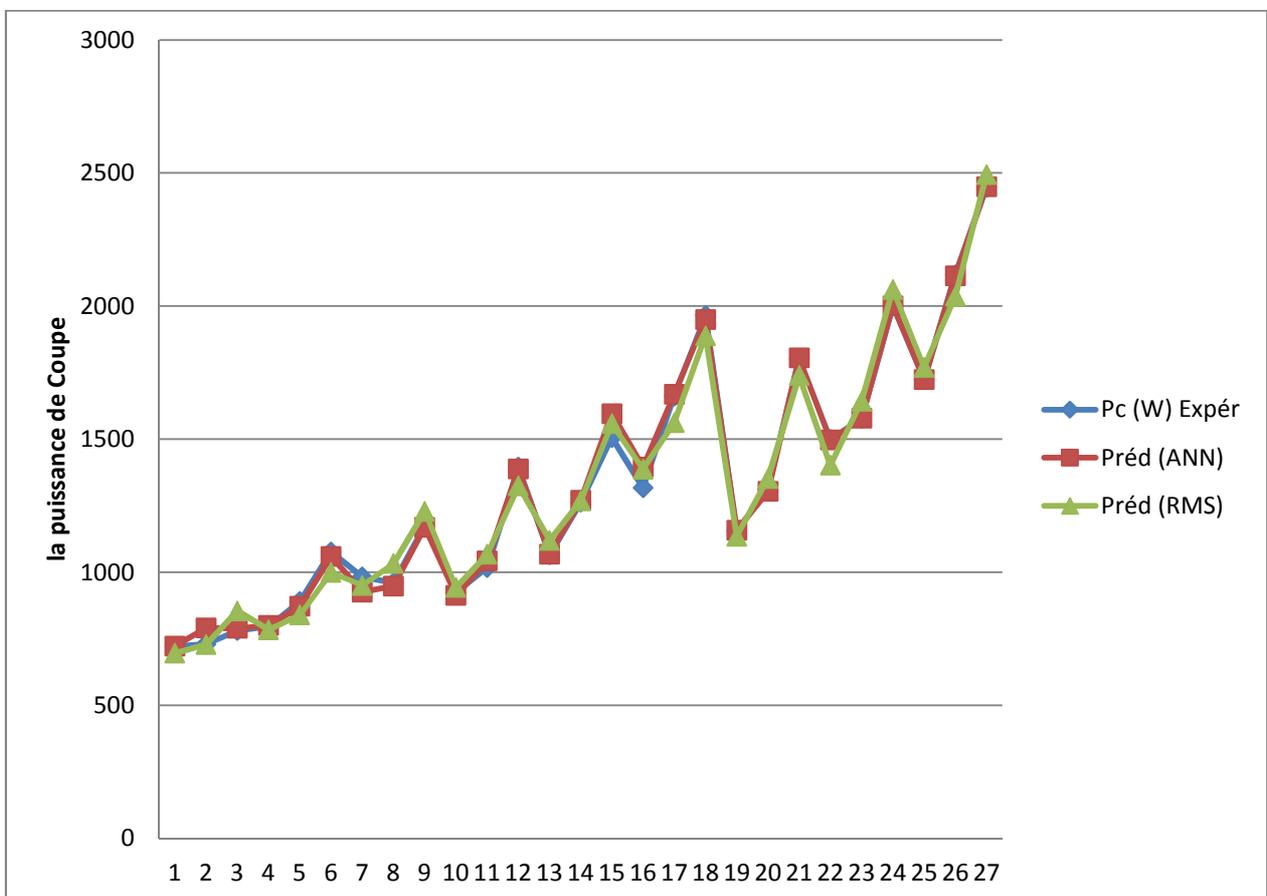


Figure IV.24 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la puissance de Coupe (P_c)

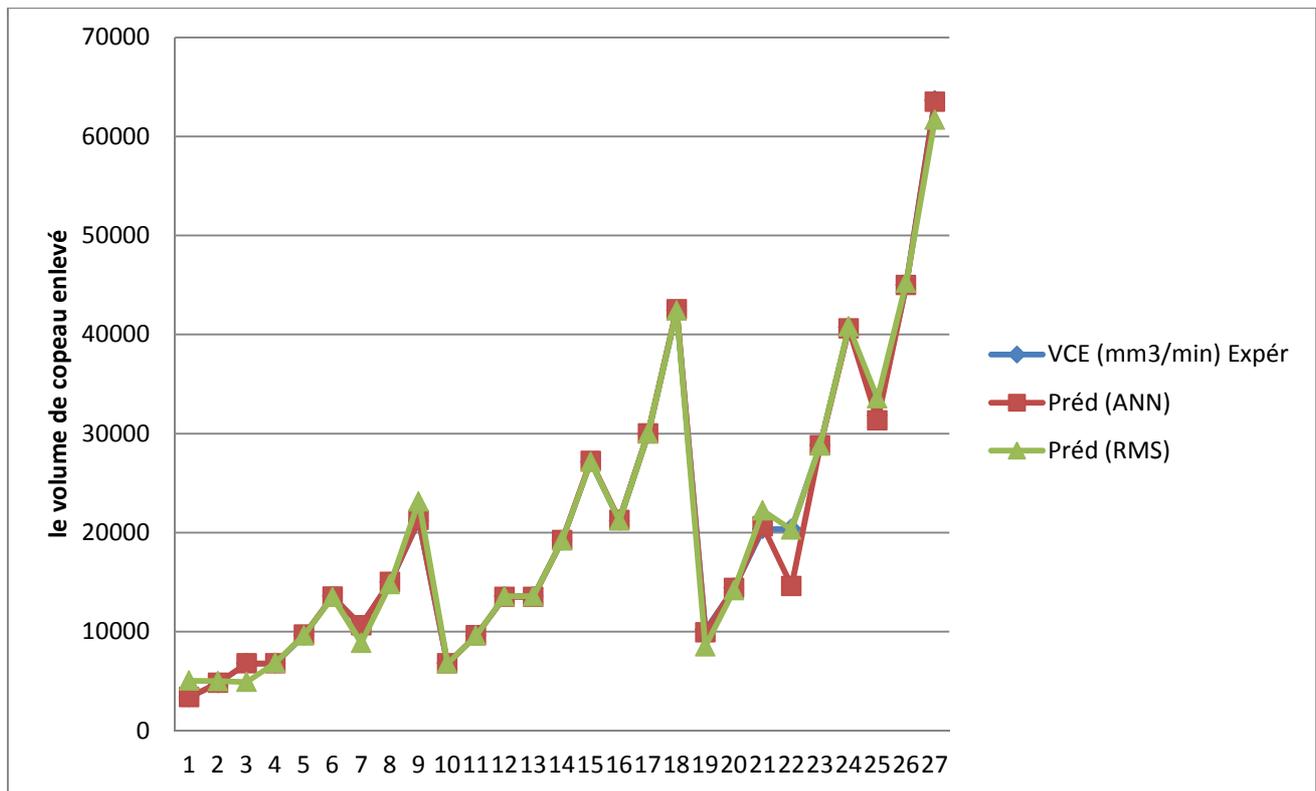


Figure IV.25 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour le volume de copeau enlevé (VCE)

Les figures (IV.21, IV.22, IV.23, IV.24 et IV.25), montrent que les valeurs expérimentales et les valeurs prédites sont très proches, et aussi que les valeurs données par le modèle (ANN) sont plus proches aux valeurs expérimentales que les valeurs données par (RMS). Pour cela on peut dire que modèle (ANN) est jugée la meilleure par rapport au modèle (RMS).

VI.8. Conclusion

Dans cette dernière partie de thèse nous avons appliqué la technique (ANN) pour développer des modèles de prédiction de la rugosité de surface, l'effort de coupe, la pression spécifique de coupe, la puissance de coupe et le volume de copeau enlevé. Ensuite, nous avons comparé les modèles (ANN) avec ceux développés par la méthodologie de surface de réponse (RMS). D'où les conclusions suivantes ont été tirées :

1. L'application de la technique (ANN) sur un nombre limité d'expériences est capable de donner des résultats très satisfaisants. Les modèles obtenus ont été testés par une partie du plan expérimental qui n'a été pas introduite lors de l'apprentissage du réseau.
2. Le nombre des échantillons n'est pas l'issue principale pour obtenir une bonne prédiction. Les résultats dépendent aussi de la structure du réseau, qui peut être modifiée à travers le nombre des couches et des nœuds de la couche cachée. Aussi, il s'avère que les paramètres d'apprentissage jouent un rôle important dans l'amélioration du modèle.

3. Les modèles (ANN) expliquent la relation non linéaire entre les réponses étudiées et les paramètres d'usinage plus efficacement que les modèles de régression multiple. Dans le cas de la rugosité de surface, il a été même trouvé que le modèle (ANN) basé sur les paramètres de coupe (V_c , f_z , ap) est meilleur que celui de régression basé sur les paramètres de coupe et la vibration de l'outil (V_c , f_z , ap).

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, une recherche expérimentale est conduite afin de modéliser les paramètres de performances d'usinage (la rugosité de surface, l'effort de coupe principale, la pression spécifique de coupe, la puissance de coupe et le volume de copeau enlevé), lors du fraisage de face de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 avec des plaquettes en carbure revêtues. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

-L'analyse ANOVA de la rugosité de surface révèle que l'avance par dent est le facteur le plus important qui affecte la rugosité (Ra) avec une contribution de 60,44%, suivie par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 17,24%, l'interaction ($Vc \times fz$) avec une contribution 9,68% et en fin la profondeur de passe avec une contribution de 6,54%. Les interactions ($fz \times ap$) et ($Vc \times ap$) ont des faibles contributions de (1,51% et 0,05%) par conséquent, ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (Vc^2 , fz^2 et ap^2) ne sont pas aussi significatifs.

- L'analyse ANOVA des résultats de l'effort de coupe (Fc) indique que les paramètres significatifs sont (ap) avec une contribution de 55%, suivie par (fz) et (Vc) avec une contribution respective de (20,5 et 19,92)%. Les interactions ($Vc \times fz$), ($fz \times ap$) sont aussi significatives avec une légère contribution de moins de 2,2%. Pour le terme de (Vc^2), son effet est significatif avec une légère contribution (moins de 1.5 %).

- L'analyse ANOVA des résultats de la pression spécifique de coupe (Ks) indique que les paramètres significatifs sont (fz) avec la contribution de 51,99%, suivie par (ap) et (Vc) avec (18,84 et 13,96)% de contributions respectivement. Tous les autres termes sont jugés significatifs avec de faibles contributions qui ne dépassent pas les 5,6%. Le choix d'une avance (fz) et d'un (ap) trop faible génère des pressions de coupe énormes qui peuvent endommager l'arête tranchante de l'outil. Les grandes vitesses de coupe engendrent d'une part une diminution des efforts et d'autre part une accélération de l'usure. Ce qui nous pousse à chercher un compromis entre un effort minimal et une tenue exploitable sur le plan industriel.

- L'analyse ANOVA des résultats de la puissance de coupe montre que la profondeur de passe est la plus influente sur (Pc) avec une contribution de 58,51%, suivie par (fz) et (Vc) avec les contributions respectives (20,53 et 15,78)%. Les faibles contributions correspondent aux interactions ($Vc \times ap$) et ($fz \times ap$) avec un pourcentage inférieur à 2.8%.

- L'analyse ANOVA des résultats de la quantité de copeau enlevée (VCE) indique que (fz) et (ap) ont la plus grande influence avec les contributions respectives de (37.48 et 35.28)%,

suivies par (V_c) avec 15,76% de contribution. L'interaction ($f_z \times a_p$) est significative avec 6.04% de contribution. Les deux autres interactions sont significatives mais avec des contributions inférieures à 3%.

-Les modèles mathématique basés sur la méthodologie de surface de réponse (RMS) pour la rugosité de surface, l'effort de coupe, l'effort de coupe spécifique, la puissance de coupe et le volume du copeau enlevé, ayant un (R^2) de 79.77%, 98.45%, 96.65%, 98.34 et 99.52%, respectivement, présentent la bonne concordance avec les données expérimentales. Ces modèles ont un intérêt industriel parce qu'ils peuvent être employés pour la prédiction des paramètres technologiques d'usinage et aussi pour l'optimisation.

-Les graphes de contour déterminés dans ce travail, permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

-L'apparition des micro-copeaux soudés sur la surface usinée de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 et la formation de l'arête rapportée sur le bec de l'outil, contribuent de manière significative à la dégradation de la rugosité de surface, en raison des caractéristiques physiques et mécaniques du l'acier inoxydable austénitique testé.

-La modélisation des paramètres de performance (rugosité de surface, efforts de coupe, pression spécifique, puissance de coupe et volume de copeau enlevé) par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones artificiels a montré une ultime efficacité compte tenu des indicateurs d'adéquation (le coefficient de détermination, la valeur du tableau de Fisher (F -table) et le niveau de signification ou la probabilité d'obtenir ce résultat par hasard P). La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles RSM et ANN montre clairement que, les modèles issus de la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents ($R^2_{(Ra)} = 99,89\%$; $R^2_{(Fc)} = 99,45\%$; $R^2_{(Ks)} = 99,61\%$; $R^2_{(Pc)} = 99,31\%$ et $R^2_{(VCE)} = 99,99\%$) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2_{(Ra)} = 79,77\%$; $R^2_{(Fc)} = 98,45\%$; $R^2_{(Ks)} = 96,65\%$; $R^2_{(Pc)} = 98,34\%$ et $R^2_{(VCE)} = 99,52\%$) et pour cela on peut dire que le modèle (ANN) est jugée le meilleure par rapport au modèle (RMS).

Références bibliographiques

[1] Définition de l'usinabilité.

http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition.

[2] Le conseil de l'outilleur.

<https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:kSok0Vad2OsJ:hssforum.com/Francais/9-INFO>.

[3] Fraisage définition et explications.

<http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=1809/?onglet=glossaire&definition=1809>.

[4] Le fraisage.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Fraisage>.

[5] Définition de la fraiseuse.

<http://fr.scribd.com/doc/38741999/Definition-de-la-fraiseuse>.

[6] Fraisage sur petite fraiseuse. Guide méthodique micromécanicien, édition 2007.

http://jvr33.free.fr/pdf_laser/16_cnc/Proc%E9d%E9s_et_Techniques/Fraisage_sur_petite_fraiseuse.pdf.

[7] Recommandations Générales Pour le Fraisage.

<http://www.dormertools.com/sandvik/2531/internet/s004114.nsf>.

[8] Matériaux pour outils de coupe. Techniques de l'Ingénieur.

<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/outillage-et-machine-outil-pour-le-travail-des-mat%C3%A9riaux-42511210>.

[9] Claude Barlier. Les matériaux pour outils de coupe en usinage. Novembre 2012 - Equip'prod.

<http://www.equip-prod.com/voir43megazinesrcPDF6.pdf>.

[10] R. Weili . Technique d'usinage. Dunod. Paris 1971.

[11] A Benyoucef. Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique. Mémoire de magister, Université de Batna, 06-2006.

[12] Les solutions Sandvik Coromant aux problématiques d'états de surface Antoine Sarazin – 2010.

<http://rdm.cnrs.fr/spip.php?action=autoriser&arg=1077>.

[13] Coupe des métaux.

<http://www.umc.edu.dz/vf/images/cours/FabricationMecanique/chapitreii.pdf>.

[14] Usure de l'outil.

http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/Pages/default.aspx.

[15] Copeaux de fraisage. Techniques de l'Ingénieur.htm.

<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/procedes-d-usinage-42190210/fraisage-bm7082/copeaux-de-fraisage-bm7082niv10002.html>.

[16] Épaisseur maximum des copeaux.

http://www.sandvik.coromant.com/fr/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/max_chip_thickness/Pages/default.aspx.

[17] M. Benghersallah, S. Belhadi, L. Boulanouar, G. Lecoz, D. Dudzinski.

Fraisage à grande vitesse des rechargements « stellite 6 » sur les aciers de forgeage.

vol755, pp12-23, 7554. 9^{ème} Congrès de Mécanique, **21-24 Avril 2009**, Marrakech.

[18] Mohamad Al-Ahmad, Alain D'Acunto, Patrick Martin. Influence de différentes stratégies de tréflage sur la qualité de surface et la productivité. vol 4, pp 3096-57078. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, CFM, Grenoble, **France, 2007**.

[19] Mohamad Al-Ahmad, Alain D'Acunto, Patrick Martin. Influence de différentes stratégies de tréflage sur la qualité de surface et la productivité. vol 4, pp3096- 57078. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, CFM, Grenoble, **France, 2007**.

[20] Khairi Yusuf1*, Y. Nukman1, T. M. Yusof1, S. Z. Dawal1, H. Qin Yang1, T. M. I. Mahlia2 and K. F. Tamrin3. Effect of cutting parameters on the surface roughness of titanium alloys using end milling process. Vol. 5(11), pp. 1284-1293, 4 June, 2010

[21] Sadettin Orhan_, Ali Osman Er, Necip Camus-cu, Ersan Aslan. Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. NDT&E International vol40. (2007). pp 121–126

[22] C. CAMPOSECO-NEGRETE, Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA, *Journal of Cleaner Production*, 53 (2013) 195-203.

[23] A. M. ZAIN, H. HARON, S. SHARIF, Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network, *Expert Systems with Applications*, 37 (2010) 1755-1768.

- [24] M. CHAHAL, V. SINGH, R. GARG, Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, (2016) 1-13.
- [25] M.Subramanian, M.Sakthivel, K.Sooryaprakash, R.Sudhakaran, Optimization of Cutting Parameters for Cutting Force in Shoulder Milling of Al7075-T6 Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm, *Procedia Engineering*, 64 (2013) 690 – 700.
- [26] L. Tang, C. Gao, J. Huang, X. Lin. J. Zhang, Experimental investigation of the three-component forces in finish dry hard turning of hardened tool steel at different hardness levels, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,70 (2014) 1721 – 1729.
- [27] R. K. BHUSHAN, Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites, *Journal of Cleaner Production*, 39 (2013) 242-254.
- [28] T. KIVAK, Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts, *Measurement*, 50 (2014) 19-28.
- [29] M. FNIDES, M. A. YALLESE, R. KHATTABI, T. MABROUKI, F. GIRARDIN, Modeling and optimization of surface roughness and productivity thru RSM in face milling of AISI 1040 steel using coated carbide inserts, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8 (2017) 493-512.
- [30] M. A. YALLESE, J. F. RIGAL, K. CHAOUI, L. BOULANOUAR , The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219 (2005) 35-55.
- [31] [<https://fr.wikipedia.org>].
- [32] [<http://e-philo.univ-paris1.fr>] .
- [33] [<http://www.statsoft.fr>] .