

République Algérienne Démocratique & populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

**Doctorat en sciences**  
De  
**L'université de 8 Mai 1945 Guelma**

Filière : Génie Mécanique

Présentée par

**ABDERREZAK LABIDI**

---

**Étude de l'évaluation de l'usinabilité d'un acier à outil pour  
travail à froid X210Cr12 avec une céramique mixte  $Al_2O_3/TiC$   
utilisant différentes méthodes statistiques**

---

Directeur de thèse : Pr. Yallese Mohamed Athmane

Devant le jury d'examen composé de :

H. Hamadache	Professeur, Université Badji mokhtar	Annaba	Président
L. Laouar	Professeur, Université Badji mokhtar	Annaba	Examineur
A. Belbah	MC / A, Université 8 Mai 1945	Guelma	Examineur
M.A. Yallese	Professeur, Université 8 Mai 1945	Guelma	Rapporteur
S. Belhadi	MC / B, Université 8 Mai 1945	Guelma	Invité

---

2018

# *Dédicaces*

*Je dédie cette thèse à :*

*La mémoire de ma mère et mon père, eux qui m'ont été un grand soutien jusqu'à leur décès. Que DIEU les accueille dans son vaste paradis ;*

*Ma femme qui m'a tant soutenu et encouragé ;*

*Mes chers enfants, à qui je souhaite plein de succès,*

*Dhoha, Chemss edine et Kamer ;*

*Mes sœurs et mon frère ;*

*Toute ma famille ;*

*Mes amis*

# **Remerciements**

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre **DIEU**, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur **YALLESE Mohamed Athmane**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, à qui je tiens à exprimer m'a profonde gratitude pour toute la confiance qu'il m'a témoignée, les encouragements, les conseils et l'aide qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de cette période.*

*Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail. Ainsi, Je remercie Monsieur **Hamid HAMADACHE**, Professeur à l'Université de Badji Mokhtar-Annaba d'avoir accepté de présider le jury.*

*J'exprime aussi ma gratitude à Messieurs : **Lakhder LAOUR** Professeur à l'Université de Badji Mokhtar-Annaba et **A BELBAH**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, qui ont accepté d'examiner mon travail et participer au jury de thèse.*

*J'adresse également mes chaleureux remerciements et ma gratitude à Monsieur : **Salim BELHADI**, Docteur au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, pour m'avoir aidé.*

*J'adresse mes remerciements à tous les membres, les thésards et les techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (**LMS**).*

*J'adresse également mes aimables remerciements et ma gratitude au Docteur **Hamza Benssouilah**, pour m'avoir aidé.*

*J'adresse aussi mes remerciements à tous les membres, Structure (**LMS**) et du département de Mécanique de Guelma.*

*Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail.*

## Résumé

Lors de l'usinage des pièces mécaniques ayant des propriétés mécaniques élevées telles que la dureté, l'usure des outils de coupe apparaît comme un obstacle majeur qui dégrade la surface usinée de la pièce, réduit la tenue de l'outil, affecte la précision dimensionnelle et la productivité. Ce problème se pose de manière aiguë lors du tournage dur des pièces trempées avec des outils de coupe en céramique mixte, ce qui limite leur mise en œuvre. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de cette thèse de doctorat. La première partie a été consacrée à la présentation des résultats de l'usinabilité de l'acier fortement allié X210Cr12 avec des outils en céramique mixte revêtue CC6050, en présentant les résultats de l'évolution des réponses en fonction des conditions de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ). En suite, l'exposition des résultats de la modélisation de la tenue, la rugosité de surface, l'effort de coupe, la puissance consommée et le volume de copeau enlevé en fonction de la variation de la vitesse de coupe et de l'avance suivant un plan factoriel ( $3^2$ ).

Dans la deuxième partie nous exposons également les résultats des essais d'usinage réalisés lors du tournage dur de l'acier trempé X210Cr12, selon le plan expérimental de Taguchi L27( $3^3$ ) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiés. La méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) ont été utilisées en premier temps afin de calculer la contribution des différents facteurs ( $V_c$ ,  $f$ , et  $T_m$ ). Dans un deuxième temps la présentation des résultats de la modélisation des paramètres de sortie en utilisant les réseaux de neurones artificiels (ANN). Cela nous a conduits à faire une étude comparative des modèles obtenus par les deux approches (RSM) et (ANN) en termes des indicateurs ( $R^2$ , RMSE et MPE), afin de vérifier l'efficacité et la précision des deux méthodes. Les modèles issus de la méthode (ANN) donnent d'excellents résultats par rapport aux modèles issus du (RSM).

Dans la dernière partie, deux types d'optimisation ont été utilisés à savoir ; l'optimisation mono objective, en utilisant la méthode de Taguchi et l'optimisation multi-objective basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs d'optimisation choisie ont été calculées pour différentes cas d'optimisation. On constate que la méthode de Taguchi est plus efficace dans le cas d'une seule réponse, par contre la fonction de (DF) est meilleure pour l'optimisation multi-objective.

**Mots clés :** Tournage dur, usure, rugosité, efforts de coupe, ANOVA, optimisation, Taguchi, RSM, ANN.

## *Abstract*

When machining mechanical parts with high mechanical properties such as high hardness, cutting tool wear appears as a major obstacle that degrades the machined surface of the part, reduces tool holding, and affects dimensional accuracy and productivity. This problem is acute when hard turning hardened parts with mixed ceramic cutting tools, which limits their use. It is within this framework that the research work of this doctoral thesis is inscribed.

The first part was devoted to presenting the results of the machinability of high-alloy steel X210Cr12 with CC6050 coated mixed ceramic tools, presenting the results of evolution the responses according to the cutting conditions ( $V_c$ ,  $f$  and  $ap$ ).

Also, the results of the modeling of tool life, surface roughness, cutting force, power consumed and cutting volume removed are exposed as a function of the variation of cutting speed and feed rate following a factorial plan  $3^2$ . In the second part we present the results of the machining tests carried out during the hard turning X210Cr12 hardened steel, according to the Taguchi L27 ( $3^3$ ) experimental plan in order to determine the mathematical models of the different studied responses. We first used the response surface methodology (RSM) and the analysis of variance (ANOVA) to calculate the contribution of the different factors ( $V_c$ ,  $f$  and  $T_m$ ). In a second step, the results of the modeling of output parameters using artificial neural networks (ANN) are presented. This led us to make a comparative study of the models obtained by the two approaches (RSM) and (ANN) in terms of indicators ( $R^2$ , RMSE and MPE), in order to verify the effectiveness and precision of the two methods. Models derived from the method (ANN) give excellent results compared to models derived from the (RSM).

In the last part, two types of optimization were used; mono-objective optimization, using Taguchi's method and multi-objective optimization based on the desirability function (DF) approach. The optimum values of the cutting parameters in relation to the selected optimization objectives were calculated for different optimization cases. It can be seen that Taguchi's method is more efficient in the case of a single answer, whereas the function of (DF) is better for multi-objective optimization.

**Keywords:** Hard turning, wear, surface roughness, cutting force, ANOVA, optimization, Taguchi, RSM, ANN.

## المخلص

عند تصنيع القطع الميكانيكية ذات الخصائص الميكانيكية العالية مثل الصلابة العالية، يظهر تآكل أدوات القطع كعائق رئيسي يحط من سطح القطعة المصنعة ، ويقفل من مدة حياة الأقسام ويؤثر على دقة الأبعاد والإنتاجية. هذه المشكلة تطرح بشكل حاد اثناء الخراطة الصلبة للقطع المقاسة بواسطة أقلام القطع من الخزف الممزوج مما يحد من استخدامها. في هذا الإطار يندرج هذا العمل البحثي لأطروحة الدكتوراه.

تم تخصيص الجزء الأول لعرض النتائج التشغيلية للفولاذ العالي الجودة X210Cr12 مع أقلام السيراميك الممزوج CC6050 ، وعرض نتائج تطور الاجابات وفقا لشروط القطع ( $Vc$  و  $f$  و  $ap$ ). أيضا عرض نتائج النمذجة لمدة الحياة، خشونة السطح، قوة القطع، الطاقة المستهلكة وحجم الجذاذة المزالة بدلالة سرعة القطع و سرعة التغذية وفقا لمستوى  $3^2$ . في الجزء الثاني نقدم نتائج اختبارات التصنيع المنجزة خلال عملية الخراطة الصلبة للفولاذ المقسى (X210Cr12) وفقا لمستوى  $3^3$  Taguchi  $L_{27}$  وهذا من أجل تحديد النماذج الرياضية لمختلف النتائج التي تم دراستها.

استخدمنا أولاً منهجية سطح الاستجابة (RSM) وتحليل التباين (ANOVA) لحساب مساهمة العوامل المختلفة ( $f$ ،  $Vc$  و  $Tm$ ). ثانياً ، قدمنا طريقة أخرى للنمذجة تتعلق بالشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) حيث قادنا هذا إلى إجراء دراسة مقارنة للنماذج التي تم الحصول عليها من خلال المقاربتين (RSM) و (ANN) من حيث المؤشرات ( $R^2$  و RMSE و MPE) للتحقق من فعالية و دقة الطريقتين. النماذج الناتجة عن طريقة (ANN) أعطت نتائج ممتازة مقارنة بالنماذج الناتجة عن (RSM).

في الجزء الأخير تم استخدام نمطين من عملية التحسين: تحسين في حالة وجود هدف واحد باستخدام طريقة Taguchi وتحسين متعدد الأهداف على أساس منهجية دلالة الرغبة (DF). كما تم حساب القيم المثلى لمعاملات القطع فيما يتعلق بأهداف التحسين المختارة لحالات تحسين مختلفة. يمكن ملاحظة أن طريقة Taguchi أكثر كفاءة في حالة وجود إجابة واحدة ، في حين أن الدالة (DF) هي الأفضل بالنسبة لأهداف متعددة.

**الكلمات المفتاحية:** الخراطة الصلبة، التآكل، خشونة السطح، قوى القطع، ANOVA، العملية التحسينية، Taguchi، RSM ، ANN.

# Index des figures

## Chapitre I

<b>Figure. I.1.</b>	Tournage dur	08
<b>Figure. I.2.</b>	Évolution de la micro dureté de la structure pièce et outil	08
<b>Figure. I.3.</b>	Marché du bore cubique d'industrie utilisant le tournage dur	08
<b>Figure. I.4.</b>	Répartition des matériaux usinés en tournage dur	12
<b>Figure. I.5.</b>	Matériaux de coupe	12
<b>Figure. I.6.</b>	Classification Matériaux de coupe	13
<b>Figure. I.7.</b>	Les Céramiques	15
<b>Figure. I.8.</b>	plaquette carrée en Céramique	16
<b>Figure. I.9.</b>	Plaquette CBN	17
<b>Figure. I.10.</b>	Rôle des revêtements	19
<b>Figure. I.11.</b>	Les composantes de l'effort de coupe	20
<b>Figure. I.12.</b>	Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe	21
<b>Figure. I.13.</b>	Représentation des différentes zones de l'usure de l'outil	22
<b>Figure. I.14.</b>	Manifestation et mesures des usures.	23
<b>Figure. I.15.</b>	Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil	23
<b>Figure. I.16.</b>	Usure des outils.	24
<b>Figure. I.17.</b>	Usure par abrasion.	25
<b>Figure. I.18.</b>	Usure chimique.	26
<b>Figure. I.19.</b>	Usure par adhérence.	27
<b>Figure. I.20.</b>	Usure en entaille.	28
<b>Figure. I.21.</b>	Usure thermique.	28
<b>Figure. I.22.</b>	Usure en peigne.	29
<b>Figure. I.23.</b>	Usure mécanique.	29
<b>Figure. I.24.</b>	Caractéristiques du profil.	32
<b>Figure. I.25.</b>	Evolution de l'usure en fonction du temps pour la céramique et le CBN.	34
<b>Figure. I.26.</b>	Effet de la vitesse de coupe sur la durée de vie de l'outil CBN.	35
<b>Figure. I.27.</b>	Micrographies de l'insert CBN avec l'usure.	35
<b>Figure. I.28.</b>	Exemple de profil 2D et topographie 3D de surface tournée.	36
<b>Figure. I.29.</b>	Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la rugosité de surface.	37
<b>Figure. I.30.</b>	Impact de l'usure sur la rugosité, les efforts et la température de coupe.	38
<b>Figure. I.31.</b>	Influence des conditions de coupe sur Ra, Fc, Ks et P	39
<b>Figure. I.32.</b>	Comparaison entre les trois types de lubrification en terme d'usure et tenue.	40
<b>Figure. I.33.</b>	Relation entre l'amplitude de vibration et l'usure de l'outil.	41
<b>Figure. I.34.</b>	Surface de réponse pour l'usure et la température de coupe.	42
<b>Figure. I.35.</b>	Usure de l'outil mesuré après enlèvement d'un volume copeau de 1200 mm <sup>3</sup> .	43
<b>Figure. I.36.</b>	Valeurs du S/B pour la vitesse, l'avance et la profondeur de passe.	44
<b>Figure. I.37.</b>	Effet de l'avance sur la température, l'effort de coupe et la rugosité	45
<b>Figure. I.38.</b>	Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la rugosité.	47
<b>Figure. I.39.</b>	Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur l'usure	47
<b>Figure. I.40.</b>	Graphique des effets principaux des facteurs et graphique S/N pour la durée de vie	48
<b>Figure. I.41.</b>	Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface	49
<b>Figure. I.42.</b>	Courbe de l'usure pour différentes vitesse de coupe utilisant des différents matériaux de l'outil	50

## Chapitre II

<b>Figure II.1.</b>	tour parallèle modèle SN40.	53
<b>Figure II.2.</b>	Eprouvette utilisée.	54
<b>Figure II.3.</b>	Diagramme de revenu.	55
<b>Figure II.4.</b>	Géométrie de Plaquette Céramique CC6050.	56
<b>Figure II.5.</b>	Porte outil utilisé	57
<b>Figure II.6.</b>	mesure de la rugosité.	57
<b>Figure II.7.</b>	Station de métrologie optique Altisurf 500	58
<b>Figure II.8.</b>	Montage du dynamomètre sur la table de la machine	59
<b>Figure II.9.</b>	Mesure des efforts de coupe	60
<b>Figure II.10.</b>	Exemple d'acquisition du logiciel « <b>DYNOWARE</b> »	61
<b>Figure II.11.</b>	Microscope pour la mesure de l'usure ( <i>Visuel Gage 250</i> ).	62

## Chapitre III

<b>Figure III.1.</b>	Evolution des critères de la rugosité : $R_a$ , $R_z$ et $R_t$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $ap$	70
<b>Figure III.2.</b>	Evolution des efforts de coupe : $F_x$ , $F_y$ et $F_z$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $ap$	72
<b>Figure III.3.</b>	Section du copeau a deux profondeurs de passes différentes.	73
<b>Figure III.4.</b>	Effort résultant.	73
<b>Figure III.5.</b>	Evolution l'effort résultant ( $F_r$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ et $ap$	74
<b>Figure III.6.</b>	Evolution de la pression spécifique en fonction de $V_c$ , $f$ et $ap$	77
<b>Figure III.7.</b>	Evolution de la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ et $ap$	78
<b>Figure III.8.</b>	Evolution de la quantité du copeau enlevé ( $MRR$ ) en fonction de $V_c$ , $f$ et $ap$	80
<b>Figure III.9.</b>	Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage à trois avances	82
<b>Figure III.10.</b>	Graphique des effets pour ( $R_a$ )	85
<b>Figure III.11.</b>	Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité	86
<b>Figure III.12.</b>	Graphique de contour de la rugosité ( $R_a$ )	86
<b>Figure III.13.</b>	Topographie en 3D et Profil en 2D de surface usinée $VB=0$ (arête neuve)	88
<b>Figure III.14.</b>	Topographie en 3D et Profil en 2D de surface usinée $VB=0,3$	88
<b>Figure III.15.</b>	Graphique des effets pour ( $T$ )	90
<b>Figure III.16.</b>	Effet des paramètres de régime de coupe sur la tenue ( $T$ )	91
<b>Figure III.17.</b>	Graphique de contour de la tenue ( $T$ )	91
<b>Figure III.18.</b>	Graphique des effets pour ( $F_z$ )	92
<b>Figure III.19.</b>	Effet des paramètres de régime de coupe sur l'effort de coupe ( $F_z$ )	93
<b>Figure III.20.</b>	Graphique de contour de l'effort de coupe ( $F_z$ )	93
<b>Figure III.21.</b>	Graphique des effets pour ( $P$ )	95
<b>Figure III.22.</b>	Effet des paramètres de régime de coupe sur la puissance ( $P$ )	95
<b>Figure III.23.</b>	Graphique de contour de la puissance ( $P$ )	96
<b>Figure III.24.</b>	Graphique des effets pour ( $V_{chip}$ )	97
<b>Figure III.25.</b>	Effet des paramètres de régime de coupe sur le volume de copeau ( $V_{chip}$ )	98
<b>Figure III.26.</b>	Graphique de contour du volume de copeau ( $V_{chip}$ )	98
<b>Figure III.27.</b>	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	100

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1.</b> Graphique des effets principaux sur l'usure en dépouille ( $VB$ )	107
<b>Figure IV.2.</b> Diagrammes (3D) de l'usure ( $VB$ ) en fonction de $V_c, f, T_m$ et graphes de contour.	109
<b>Figure IV.3.</b> Surface 3D pour l'usure ( $VB$ ) en fonction de $V_c, f$ et cinq ( $T_m$ )	109
<b>Figure IV.4.</b> Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'usure ( $VB$ )	110
<b>Figure IV.5.</b> Graphe des effets principaux sur la rugosité ( $Ra$ ).	111
<b>Figure IV.6.</b> Diagrammes (3D) et graphes de contour de l'usure ( $Ra$ ) en fonction de $V_c, f, T_m$ .	113
<b>Figure IV.7.</b> Surface 3D pour la rugosité ( $Ra$ ) en fonction de $V_c, f$ et cinq ( $T_m$ ).	114
<b>Figure IV.8.</b> Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'usure ( $Ra$ )	114
<b>Figure IV.9.</b> Graphe des effets principaux sur l'effort axial ( $F_x$ ).	118
<b>Figure IV.10.</b> Graphe des effets principaux sur l'effort radial ( $F_y$ ).	118
<b>Figure IV.11.</b> Graphe des effets principaux sur l'effort tangentiel ( $F_z$ ).	119
<b>Figure IV.12.</b> Diagrammes (3D) et graphes de contour de l'effort ( $F_x$ ) en fonction de $V_c, f, T_m$	120
<b>Figure IV.13.</b> Diagrammes (3D) et graphes de contour de l'effort ( $F_y$ ) en fonction de $V_c, f, T_m$	121
<b>Figure IV.14.</b> Diagrammes (3D) et graphes de contour de l'effort ( $F_z$ ) en fonction de $V_c, f, T_m$	121
<b>Figure IV.15.</b> Surface 3D pour l'effort tangentiel ( $F_z$ ) en fonction de $V_c, f$ et cinq ( $T_m$ ).	122
<b>Figure IV.16.</b> Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'effort ( $F_x$ )	123
<b>Figure IV.17.</b> Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'effort ( $F_y$ )	123
<b>Figure IV.18.</b> Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'effort ( $F_z$ )	123
<b>Figure IV.19.</b> Graphe des effets principaux sur la puissance de coupe ( $P$ ).	125
<b>Figure IV.20.</b> Diagrammes (3D) et graphe de contour de la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction de $V_c, f, T_m$	126
<b>Figure IV.21.</b> Surface 3D pour la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction $V_c, f$ et cinq ( $T_m$ ).	127
<b>Figure IV.22.</b> Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de la puissance ( $P$ )	128
<b>Figure IV.23.</b> Graphe des effets principaux sur le volume de copeau ( $V_{chip}$ ).	129
<b>Figure IV.24.</b> Diagrammes (3D) et graphes de contour de la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction de $V_c, f, T_m$	130
<b>Figure IV.25.</b> Surface 3D pour le volume de copeau ( $V_{chip}$ ) en fonction de $V_c, f$ et cinq ( $T_m$ ).	131
<b>Figure IV.26.</b> Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites du volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ )	132
<b>Figure IV.27.</b> Neurone naturel	132
<b>Figure IV.28.</b> Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel	133
<b>Figure IV.29.</b> Arrangement logique d'un neurone	134
<b>Figure IV.30.</b> Schéma d'une couche de neurones	135
<b>Figure IV.31.</b> Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones	135
<b>Figure IV.32.</b> Architecture optimale (3-4-8-1) pour le modèle ( $VB$ )	137
<b>Figure IV.33.</b> Architecture optimale (3-8-4-1) pour le modèle ( $Ra$ )	138
<b>Figure IV.34.</b> Architecture optimale (3-8-4-1) pour le modèle ( $F_z$ )	139
<b>Figure IV.35.</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurone pour le cas de ( $VB$ ).	141
<b>Figure IV.36.</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurone pour le cas de ( $Ra$ )	142
<b>Figure IV.37.</b> Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites par la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurone pour le cas de ( $F_z$ ).	143
<b>Figure IV.38.</b> Comparaison entre les erreurs par RSM et ANN	146

## Chapitre V

<b>Figure V.1.</b> Graphique des effets principaux pour S/N de ( $VB$ )	152
<b>Figure V.2.</b> Graphique des effets principaux pour S/N de ( $Ra$ )	153
<b>Figure V.3.</b> Graphique des effets principaux pour S/N de ( $F_x$ )	154
<b>Figure V.4.</b> Graphique des effets principaux pour S/N de ( $F_y$ )	154
<b>Figure V.5.</b> Graphique des effets principaux pour S/N de ( $F_z$ )	155
<b>Figure V.6.</b> Graphique des effets principaux pour S/N de ( $P$ )	156
<b>Figure V.7.</b> Graphique des effets principaux pour S/N de ( $V_{chip}$ )	157
<b>Figure V.8.</b> Graph de désirabilité de $VB$ , $Ra$ et $V_{chip}$ (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 1er cas.	164
<b>Figure V.9.</b> Diagramme d'optimisation de réponses multiples de ( $VB$ ), ( $Ra$ ) et ( $V_{chip}$ )	164
<b>Figure V.10.</b> Graph de désirabilité de $VB$ , $Ra$ et $V_{chip}$ (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 2ème cas.	165
<b>Figure V.11.</b> Diagramme d'optimisation de réponses multiples de ( $VB$ ), ( $Ra$ ) et ( $V_{chip}$ )	166
<b>Figure V.12.</b> Graph de désirabilité de $VB$ , $Ra$ et $V_{chip}$ (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 3ème cas.	167
<b>Figure V.13.</b> Diagramme d'optimisation de réponses multiples de ( $VB$ ), ( $Ra$ ) et ( $V_{chip}$ )	168
<b>Figure V.14.</b> Graph de désirabilité de $VB$ , $Ra$ , $F_z$ , $P$ et $V_{chip}$ (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 4ème cas.	169
<b>Figure V.15.</b> Diagramme d'optimisation de réponses multiples de ( $VB$ , $Ra$ , $F_z$ , $P$ et $V_{chip}$ ).	170
<b>Figure V.16.</b> Graph de désirabilité de $VB$ , $Ra$ , $F_z$ , $P$ et $V_{chip}$ (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 5ème cas	171
<b>Figure V.17.</b> Diagramme d'optimisation de réponses multiples de ( $VB$ , $Ra$ , $F_z$ , $P$ et $V_{chip}$ )	172

## *Index des tableaux*

### *Chapitre I*

<b>Tableau. I.1.</b>	Céramiques utilisées pour les outils de coupe	15
<b>Tableau. I.2.</b>	Comparatif des propriétés de certains revêtements.	19
<b>Tableau. I.3.</b>	différent type de Défauts de rugosité.	33
<b>Tableau. I.4.</b>	ANOVA pour l'usure ( $VC$ )	49
<b>Tableau. I.5.</b>	ANOVA pour la rugosité ( $Ra$ )	49

### *Chapitre II*

<b>Tableau II.1.</b>	Composition chimique de l'acier X210Cr12.	54
<b>Tableau II.2.</b>	Conditions de traitement thermique.	55
<b>Tableau II.3.</b>	Informations relatives à la plaquette utilisées.	56
<b>Tableau II.4.</b>	Caractéristiques du porte plaquette utilisé.	57
<b>Tableau II.5.</b>	Réalisation d'essais d'après la méthode unifactorielle.	63
<b>Tableau II.6.</b>	Matrice de planification pour un plan $3^2$ .	64
<b>Tableau II.7.</b>	Matrice de planification pour un plan $3^3$ .	65
<b>Tableau II.8.</b>	Conditions de coupe pour les essais unifactorielle.	66
<b>Tableau II.9.</b>	Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan 9 essais.	67
<b>Tableau II.10.</b>	Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 27 essais.	67

### *Chapitre III*

<b>Tableau III.1.</b>	Plan d'expérience L9	84
<b>Tableau III.2.</b>	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité ( $Ra$ )	84
<b>Tableau III.3.</b>	Analyse de la variance (ANOVA) pour la tenue ( $T$ )	89
<b>Tableau III.4.</b>	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe ( $Fz$ ).	92
<b>Tableau III.5.</b>	Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe ( $P$ )	94
<b>Tableau III.6.</b>	Analyse de la variance (ANOVA) pour le volume de copeau ( $V_{chip}$ ).	96

## Chapitre IV

<b>Tableau IV.1.</b> Résultats expérimentaux des paramètres de sortie suivant le plan $L_{27}$	103
<b>Tableau IV.2.</b> ANOVA pour l'usure en dépouille ( $VB$ )	107
<b>Tableau IV.3.</b> ANOVA pour la rugosité de surface ( $Ra$ ).	111
<b>Tableau IV.4.</b> ANOVA pour la composante de l'effort de coupe ( $F_x$ ).	115
<b>Tableau IV.5.</b> ANOVA pour la composante de l'effort de coupe ( $F_y$ ).	116
<b>Tableau IV.6.</b> ANOVA pour la composante de l'effort de coupe ( $F_z$ ).	116
<b>Tableau IV.7.</b> ANOVA pour la puissance de coupe ( $P$ ).	124
<b>Tableau IV.8.</b> ANOVA pour le volume de copeau enlevée ( $V_{chip}$ ).	128
<b>Tableau IV.9.</b> Performance des structures ANN du modèle de ( $VB$ ).	137
<b>Tableau IV.10.</b> Performance des structures ANN du modèle de ( $Ra$ ).	139
<b>Tableau IV.11.</b> Performance des structures ANN du modèle de ( $F_z$ ).	140
<b>Tableau IV.12.</b> Comparaison entre l'approche MSR et ANN.	143
<b>Tableau IV.13</b> Comparaison des résultats expérimentaux et estimées de $VB$ et $Ra$ par RSM et ANN	144
<b>Tableau IV.14</b> Comparaison des résultats expérimentaux et estimées de ( $F_z$ ) par RSM et ANN	145

## Chapitre V

<b>Tableau V.1.</b> Résultats expérimentaux du rapport S/N des paramètres de sortie	151
<b>Tableau V.2.</b> Récapitulatif des résultats de l'optimisation	157
<b>Tableau V.3.</b> But et gamme de paramètres pour cinq cas d'optimisation	161
<b>Tableau V.4.</b> Récapitulatif des résultats d'optimisation obtenus pour tous les cas étudiés.	162
<b>Tableau V.5.</b> Résultats d'optimisation pour différents objectifs.	163

## NOMENCLATURE

<i>ANOVA</i> :	Analyse de variance.
<i>ap</i> :	Profondeur de passe (mm).
<i>ANN</i>	Réseaux de neurones artificiels
<i>f</i> :	Avance par tour (mm/tr).
<i>Fa (Fx)</i> :	Effort de coupe axial (N).
<i>Fr (Fy)</i> :	Effort de coupe radial (N).
<i>Ft (Fz)</i> :	Effort de coupe tangentiel (N).
<i>HRC</i> :	Dureté Rockwell.
<i>MPE</i> :	Erreur prédictive du modèle (%)
<i>Kc</i> :	Pression (effort spécifique) de coupe (N/mm <sup>2</sup> ).
<i>P</i> :	Puissance de coupe (Watt).
<i>R<sup>2</sup></i> :	Coefficient de détermination.
<i>Ra</i> :	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
<i>Rt</i> :	Rugosité totale (μm).
<i>Rz</i> :	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
<i>RMSE</i> :	Racine erreur quadratique moyenne
<i>RSM</i> :	Méthodologie de surface de réponse.
<i>r<sub>ε</sub></i> :	Rayon de bec de l'outil (mm).
<i>VB</i> :	Usure en dépouille (mm).
<i>VB<sub>max</sub></i> :	Usure en dépouille maximale (mm).
<i>VB<sub>C</sub></i> :	Usure du nez (mm).
<i>VB<sub>N</sub></i> :	Usure en entaille (mm).
<i>V<sub>c</sub></i> :	Vitesse de coupe (m/min).
<i>α</i> :	Angle de dépouille principal (degré).
<i>γ</i> :	Angle d'attaque (degré).
<i>λ</i> :	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).
<i>χ</i> :	Angle de direction principal (degré).

# *Sommaire*

<i>Dédicace</i>	I
<i>Remerciement</i>	II
<i>Résumé</i>	IV
<i>Index des figures</i>	VII
<i>Index des tableaux</i>	XI
<i>Nomenclature</i>	XII
<i>Sommaire</i>	XI
<i>Introduction générale</i>	1

## **CHAPITRE I**

### ***Etude bibliographique***

I.1 Introduction .....	5
I.2 Généralité sur la coupe des métaux .....	5
I.3 L'usinabilité .....	6
I.3.1 Définition de l'usinabilité .....	6
I.3.2 Critère d'évaluation l'usinabilité .....	6
I.3.3 Facteurs influençant l'usinabilité .....	7
I.4 Tournage dur .....	7
I.4.1 Introduction .....	7
I.4.2 Définition de tournage dur .....	7
I.4.3 Les matériaux usinés en tournage dur .....	9
I.4.3.1 Les aciers de construction pour TTh .....	9
I.4.3.2 Les aciers d'outillages à froid .....	9
I.4.3.3 Les aciers d'outillages à chaud .....	9
I.4.3.4 Les aciers à moules .....	10
I.4.3.5 Les aciers à roulement .....	10
I.4.3.6 Les aciers rapides .....	10
I.4.3.7 Les aciers de cémentation .....	10
I.4.3.8 Les aciers de nitruration .....	10
I.4.3.9 Les fontes .....	11
I.4.3.10 Les alliages réfractaires à base de nickel .....	11
I.5 Les matériaux de coupe .....	12
I.5.1 Introduction .....	12
I.5.2 Classification des matériaux des outils de coupe .....	13
I.5.2.1 Les Aciers Rapides .....	13
I.5.2.2 Carbures .....	14

I.5.2.3 Cermets .....	14
I.5.2.4 Céramiques .....	14
I.5.2.5 Nitrure de Bore Cubique (CBN) .....	17
I.5.2.6 Diamant .....	18
I.5.3 Les revêtements .....	18
I.6 Les efforts de la coupe .....	20
I.6.1 Définition et intérêt de leur mesure .....	20
I.6.2 Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe ...	21
I.6.2.1 Les propriétés mécaniques du matériau à usiner .....	21
I.6.2.2 Influence de la profondeur de passe et l'avance .....	21
I.6.2.3 Influence de la vitesse de coupe .....	21
I.6.2.4 Influence de l'angle d'attaque .....	21
I.6.2.5 Influence de l'angle de direction principale .....	22
I.6.2.6 Influence de matériau de coupe .....	22
I.7 Usure des outils de coupe .....	22
I.7.1 Définition .....	22
I.7.2 Usure visible sur l'outil .....	23
I.7.2.1 Usure abrasive .....	24
I.7.2.2 Usure adhésive .....	24
I.7.2.3 Usure par diffusion .....	24
I.7.2.4 Usure par la fatigue mécanique.....	25
I.7.2.5 Usure par la fatigue thermique .....	25
I.7.3 Usure des arêtes de coupe .....	25
I.7.3.1 Usure en dépouille .....	25
I.7.3.2 Usure en cratère .....	26
I.7.3.3 Arête rapportée .....	26
I.7.3.4 Usure en entaille .....	27
I.7.3.5 Déformation plastique .....	28
I.7.3.6 Usure en peigne .....	29
I.7.3.7 Écaillage ou rupture de l'arête .....	29
I.7.4 Facteurs influençant l'usure .....	30
I.8 Rugosité des surfaces .....	31
I.8.1 Généralités sur les états de surface .....	31
I.8.2 Définitions de la rugosité.....	31

I.8.3 Paramètres caractéristiques des états de surface .....	32
I.8.4 Technologie de mesure .....	32
I.8.5 Caractéristiques de la surface .....	33
I.8.6 Défauts de rugosité .....	33
I.9 État de l'art .....	34

## **CHAPITRE II**

### ***Moyens et Procédures expérimentales***

II.1 Introduction .....	53
II.2 Matériels Utilisés .....	53
II.2.1 Machine-outil .....	53
II.2.2 Matériau utilisé pour les essais d'usinage.....	54
II.2.3 Plaquettes de coupe .....	55
II.2.4 Porte outil .....	56
II.2.5 Appareillages de mesure utilisée .....	57
II.2.5.1 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	57
II.2.5.2 Rugosimètre 3D .....	58
II.2.5.3 Mesure des efforts .....	59
II.2.5.4 Microscope pour la mesure de l'usure .....	62
II.3. Plan d'expérience .....	62
II.3.1 Essais paramétriques (Méthode unifactorielle).....	62
II.3.2 Méthode multifactorielle .....	63
II.4 Conditions de coupe.....	66
II.5. Conclusion .....	67

## **CHAPITRE III**

### ***Usinabilité de l'acier fortement allié X210Cr12 et modélisation du processus***

III.1 Introduction .....	68
III.2 Etude de l'usinabilité de l'acier fortement alli X210Cr12 (54 HRC) .....	68
III.2.1 Rugosité de surface .....	68

III.2.2 Efforts de coupe et pressions spécifique de coupe.....	70
III.2.2.1 Efforts de coupe.....	70
III.2.2.2 Effort résultant .....	73
III.2.2.3 Pression spécifique. ....	75
III.2.3 Puissance de coupe .....	77
III.2.4 Quantité de copeau enlevé .....	79
III.2.5 Usure <b>du</b> cramique mixte (CC6050) .....	81
III.3 Analyse de variance ANOVA et Modélisation .....	83
III.3.1 Introduction .....	83
III.3.2 ANOVA et modélisation de la rugosité ( $Ra$ ) .....	84
III.3.2.1 Effet de l'usure sur la Topographie 2D et 3D de surface usinée.....	87
III.3.3 ANOVA et modélisation de la tenue ( $T$ ) .....	89
III.3.4 ANOVA et modélisation de l'effort de coupe ( $Fz$ ) .....	91
III.3.5 ANOVA et modélisation de la puissance ( $P$ ) .....	94
III.3.6 ANOVA et modélisation du volume de copeau ( $V_{chip}$ ) .....	96
III.3.6 Comparaison entre les valeurs mesurées et <b>calculées</b> .....	98
III.4 Conclusion .....	101

## **CHAPITRE IV**

### ***Modélisation des performances d'usinage en utilisant les méthodes RSM et ANN***

IV.1 Introduction .....	102
IV.2 Résultats des expériences .....	102
IV.3 Modélisation par la Méthodologie des Surfaces de Réponse (RSM) .....	104
IV.3.1 ANOVA de l'usure en dépouillé ( $VB$ ) et modélisation.....	106
IV.3.2 ANOVA de la rugosité ( $Ra$ ) et modélisation .....	110
IV.3.3 ANOVA de la rugosité ( $Fx$ , $Fy$ et $Fz$ ) et modélisation .....	115
IV.3.4 ANOVA de la puissance ( $P$ ) et modélisation .....	124
IV.3.5 ANOVA du volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) et modélisation .....	128
IV.4 Méthodologie de la modélisation par les réseaux de neurones artificiels (ANN) ...	132
IV.4.1 Méthodologie de comparaison entre l'approche RSM et ANN.....	136

IV.4.2 Résultats et discussion .....	137
IV.4.2.1 Modèle d'usure ( $VB$ ) de l'outil .....	137
IV.4.2.2 Modèle de la rugosité de surface ( $Ra$ ) .....	138
IV.4.2.3 Modèle de l'effort tangentiel ( $Fz$ ) .....	139
IV. 4.3 Comparaison des modèles (RSM) et (ANN) .....	140
IV. 5 Conclusion .....	147

## **CHAPITRE V**

### ***Optimisation des conditions de coupe***

V.1 Introduction .....	148
V.2 Optimisation avec mono-objectif .....	148
V.2 .1 Méthode Taguchi .....	148
V.2.2. La démarche de la méthode de Taguchi .....	148
V.2.3. Résultats et discussions .....	149
V.2.3.1 Minimisation de l'usure en dépouille ( $VB$ ) .....	152
V.2.3.2 Minimisation de la rugosité de surface ( $Ra$ ) .....	152
V.2.3.3 Minimisation de l'effort de coupe axial ( $Fx$ ).....	153
V.2.3.4 Minimisation de l'effort de coupe radial ( $Fy$ ) .....	154
V.2.3.5 Minimisation de l'effort de coupe tangentiel ( $Fz$ ) .....	155
V.2.3.6 Minimisation de la puissance de coupe ( $P$ ) .....	155
V.2.3.7 <b>Maximisation</b> du volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ).....	156
V.3. Optimisation multi-objectif .....	158
V.3.1 Optimisation par la méthode la fonction de désirabilité .....	158
V.3.2 Cas d'optimisation étudiés .....	159
V.4 Conclusion .....	172
Conclusion Générale .....	173
Perspectives .....	178
Références bibliographiques .....	179
Publication .....	187
Annexe .....	188



## ***Introduction générale***

Les conditions de coupe lors de l'usinage des pièces mécaniques ayant des propriétés mécaniques élevées ont un impact direct sur la défaillance et l'endommagement de l'outil de coupe, en termes d'usure. Cette défaillance de l'outil affecte la rugosité de surface, la précision et augmente les efforts et la puissance de coupe. Le choix rationnel des matériaux de coupe ne peut se faire qu'avec des expérimentations spécifiques à chaque nuance et leur mise en œuvre nécessitent une maîtrise suffisante du déroulement du processus de coupe, en particulier l'évolution de l'usure.

Ce problème se pose de manière aiguë lors du tournage dur des pièces trempées avec des outils de coupe en céramique mixte, ce qui limite leur mise en œuvre.

Dans ce contexte, de nombreuses études ont mis en évidence l'impact de divers paramètres du processus d'usinage sur la qualité de surface, la productivité, les efforts de coupe et l'usure des outils, ainsi que l'étude du comportement du matériau à outil en particulier la céramique mixte lors de l'usinage d'un l'acier fortement allié X210Cr12.

Aussi, afin d'en assurer une grande tenue des outils de coupe (usure minimale des plaquettes), une qualité satisfaisante des produits finis en minimisant la rugosité de surface, une consommation minimale d'énergie, des efforts de coupe minimales et une productivité élevée en augmentant le volume du copeau enlevé 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. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de notre thèse de doctorat et qui est structurée comme suit :

**Le premier chapitre**, est réservé à l'étude bibliographique qui concerne en premier temps une généralité sur la coupe des métaux à savoir, la définition de l'usinabilité des matériaux et les critères de son évaluation ainsi leurs facteurs influençant, aussi le tournage dur avec une présentation des différents matériaux de coupe usinés et leurs caractéristiques notamment les aciers fortement allié avec une dureté élevée, tout en analysant les phénomènes régissant le processus de coupe en particulier, l'usure des outils, les efforts de coupe et la rugosité de surface. La fin de ce chapitre est consacrée à l'état de l'art, qui présente le noyau de n'importe quelle étude bibliographique. Dans cette partie, nous présentons une synthèse sur les résultats des travaux de recherche antérieurs relatifs à l'usinage des aciers fortement allié et particulièrement l'usinage des aciers X210Cr12 (AISI D3) ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation du processus de coupe.

Dans le **second chapitre**, nous présentons une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe utilisées.

Dans le **troisième chapitre**, nous exposons les résultats de l'usinabilité de l'acier X210Cr12 (AISI D3) en se basant sur les critères de la rugosité de surface, les composantes de l'effort de coupe, la pression spécifique de coupe, l'effort résultant, la puissance de coupe et de l'usure de l'outil en fonction des éléments du régime de coupe (Vitesse de coupe, avance par tour et la profondeur de passe). Aussi, nous présentons les résultats des essais factoriels de la tenue, rugosité de surface, effort de coupe, puissance de coupe et volume de copeau enlevé en fonction de la variation de la vitesse de coupe et de l'avance suivant un plan factoriel  $3^2$ .

L'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D a permis de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés ( $T$ ,  $Fz$ ,  $P$ ,  $Ra$  et  $V_{chip}$ ) et de proposer des modèles mathématiques pour chaque paramètre de sortie étudié.

Dans le **quatrième chapitre**, nous présentons les résultats expérimentaux des essais réalisés sur l'acier fortement allié (X210Cr12) à l'état trempé pour un plan de Taguchi ( $L_{27}$ ) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiées. La méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) sont utilisées en premier temps afin de calculer la contribution des différents facteurs ( $Vc$ ,  $f$ , et  $Tm$ ) et leurs interactions sur les paramètres technologiques choisies. Pour cela un logiciel appelé «Design-Expert10» a été utilisé pour faire l'étude statistique. Le logiciel (Matlab 9) a aussi servi pour la présentation des courbes des paramètres technologiques en fonction des paramètres de coupe en 3D. En deuxième temps nous présentons une autre méthode de modélisation qui concerne les réseaux de neurones artificiels (ANN). Afin de vérifier l'efficacité et la précision des modèles, une étude comparative des modèles mathématique obtenus par les deux approches (RSM) et (ANN) est menée. Cette comparaison est faite en se basant sur les indicateurs suivants :

- \* **R<sup>2</sup>** (Coefficient de détermination)
- \* **RMSE** (Root main square error) (Racine erreur quadratique moyenne)
- \* **MPE** (Model predictive error). (Erreur prédictive du model)

Dans **le dernier chapitre**, nous proposons deux types d'optimisation :

-L'optimisation mono objective, en utilisant la méthode de Taguchi. Dans ce cas chaque paramètre de sortie est optimisé tout seul.

- L'optimisation multi-objective basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Nous avons proposé dans cette partie cinq cas d'optimisation pouvant être rencontrés lors de l'usinage des pièces mécaniques. Le premier cas concerne la minimisation de l'usure de l'outil ( $VB$ ), le second est réservé à la maximisation de volume du copeau enlevé ( $V_{chip}$ ), le troisième cas est aussi réservé à la maximisation de la qualité de surface en réduisant la rugosité de surface, le quatrième cas est choisi à la recherche d'une consommation d'énergie minimale en minimisant l'effort de coupe et la puissance de coupe. Le dernier cas concerne la minimisation de tous les paramètres tout en maintenant une productivité élevée.

En fin, nous avons fait une conclusion générale suivie par les perspectives et d'une liste de références bibliographiques.

# Chapitre I

## **Étude Bibliographique**

## **I.1 Introduction**

Dans le domaine de la fabrication et l'usinage des matériaux l'objectif principal c'est la recherche d'une relation entre l'amélioration de l'état de la surface, le coût et les conditions de coupe. Les meilleurs outils de coupe les plus répandus dans le domaine de la fabrication caractérisés par une grande dureté, une durée de vie importante et une bonne résistance aux chocs. Les outils modernes dans le monde industriel (CBN, céramique, carbure revêtu) sont utilisés beaucoup plus lors du tournage dur (acier durci).

Depuis toujours, le fabricant essaye dans les stratégies d'optimisation des processus d'usinage actuellement préconisées de viser à l'augmentation de la productivité, la qualité de surface, ou à réduire les coûts par plusieurs voies, tel que recherche du débit optimal d'enlèvement de matière, amélioration de la précision de l'usinage, réduction du nombre d'opérations (traitement thermique et rectification finale par exemple) et recherche d'une plus grande fiabilité au niveau des propriétés d'usage des pièces usinées.

Il est important d'utiliser un matériau de coupe et une géométrie de plaquette adaptée à la matière à usiner ainsi que des conditions de coupe convenables, pour obtenir un processus d'usinage productif et exempt de problèmes.

Cette partie est consacrée à une étude bibliographique sur la coupe des métaux, elle comporte les points suivants : l'usinabilité, la rugosité de surface, l'usure des outils de coupe et les efforts de coupe générés lors de l'usinage. Ce point est suivi par une description du tournage dur et aussi à la présentation des matériaux de coupe.

## **I.2 Généralité sur la coupe des métaux**

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, temps de coupe, arrosage...) en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) avec des différentes géométries.

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

### I.3 L'usinabilité

#### I.3.1 Définition de l'usinabilité

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée. [1]. Selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux l'usinabilité est définie sous différentes formes :

a) Selon A. Czaplicki [1] : L'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée.

b) Selon Berard Gruber [2] : l'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable, l'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou moins grande, d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et à des côtes fixes.

c) Selon G. Poulachon [3] : La notion d'usinabilité décrit l'aptitude d'un matériau, compte tenu de toutes ses propriétés, à être mis en forme par outil coupant.

#### I.3.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité

Selon M. Robelet [4] : Les principaux critères sont classés de la manière suivante: usure de l'outil ; effort de coupe et la température de coupe.

La majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suit :

- ✓ La tenue de l'outil, ou un critère dépendant ( $VB$ ,  $KT$ ,  $V_{60}$ ) ;
- ✓ Les efforts des coupes ;
- ✓ La qualité de la surface usinée.

L'absence de la température de coupe prouve qu'il s'agit d'un effet lié fortement aux critères : Usure et effort de coupe.

### I-3-3 Facteurs influençant l'usinabilité

L'usinabilité est le terme utilisé pour désigner l'exécution de l'usinage d'un matériau par un outil de coupe. La facilité avec laquelle un matériau donné peut être usiné avec un outil de coupe est dite usinabilité. Elle dépend de [5]:

- ✓ La composition chimique de la matière à usinée
- ✓ La structure
- ✓ Les propriétés mécaniques
- ✓ Les propriétés physiques
- ✓ Les conditions de coupe

## I.4. Tournage dur

### II.4.1. Introduction

L'usinage des aciers traités thermiquement dans leur état durci n'est pas nouveau, et existe depuis sans doute que les matériaux à outils durs ont vu le jour. C'est le cas des céramiques, en effet les premiers brevets et publication sur les matériaux de coupe céramique à base d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) datent du début du XX<sup>e</sup> siècle. Des résultats, permettant l'exploitation de la céramique, ont été mis au point en particulier aux États-Unis, en URSS et en Allemagne [6].

Ces produits céramiques offrent de nombreuses possibilités d'applications en raison de leurs propriétés remarquable (non métallique, inorganique, réfractaire), et leur champ d'application s'agrandit de jour en jour, malgré l'image particulière de fragilité, de rupture, ...etc. Il en est de même pour le nitrure de bore cubique (CBN) qui a été synthétisé pour la première fois en 1957 à la Compagnie General Electric aux États-Unis. Cependant, il n'a été utilisé industriellement pour la coupe des métaux qu'à partir du milieu des années 1970.

### I.4.2 Définition

Le tournage dur concerne le tournage des matériaux durcis entre 45 et 70 HRC par des opérations principalement de finition interne ou externe (figure I.1), et dans certains cas, d'ébauche à l'aide des outils modernes à géométrie définie [7].

Ces matériaux durs sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- une grande dureté à la pénétration;
- un pouvoir abrasif élevé (nombre des éléments d'addition);
- une faible ductilité ;

- un grand rapport dureté (HV)/module de Young (E), impliquant une quantité non négligeable de retour élastique local (figure I.2). L'erreur dimensionnelle devient non négligeable pour la finition des matériaux durs.

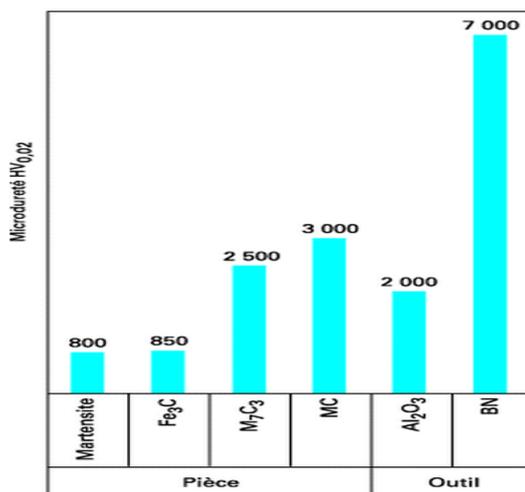


**Figure I.1** tournage dur [8].

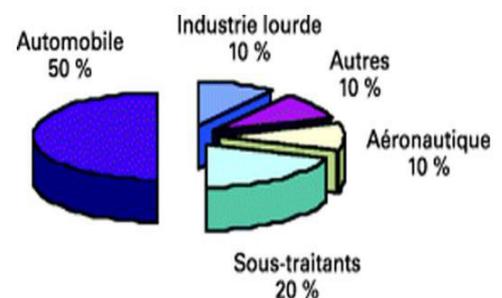
Les géométries d'outil utilisées présentent un angle de coupe fortement négatif (de l'ordre de  $-20^\circ$ ). Ce procédé existe depuis que les matériaux coupants ont été capables de résister aux efforts de coupe radiaux (apparition des céramiques en 1960, c-BN).

Cependant, l'industrie ne s'est intéressée réellement à cette technique que trente ans plus tard, pour trois raisons principales :

- ✓ un manque de fiabilité des premiers outils coupants extra-durs ;
- ✓ les faibles gains de productivité qu'elle pouvait offrir ;
- ✓ un manque de moyens de production adaptés.



**Figure I.2** Évolution de la micro dureté de la structure de :pièce et outil



**Figure I.3** Marché du bore cubique d'industrie utilisant le tournage dur

La figure I.3 montre les principales industries intéressées par ce type de technologie :

- ✓ l'industrie automobile (pignons, arbre de boîte) ;
- ✓ l'industrie du roulement ;
- ✓ la mécanique générale (outillage)... etc.

L'un des objectifs actuels du tournage dur est d'être complémentaire, voire concurrentiel (dans certains cas) de la rectification. Les états de surface obtenus sont remarquables (jusqu'à des rugosités Ra de 0,1  $\mu\text{m}$ ), les tolérances dimensionnelles sont de qualité 6 et des tolérances géométriques très précises (circularité inférieure à 1  $\mu\text{m}$ ). L'un des facteurs essentiels pour l'obtention de ces critères de qualité étant la machine-outil [7].

### **I.4.3 Les matériaux usinés en tournage dur**

Les matériaux ferreux considérés ici comprennent les aciers rapides, les aciers d'outillages à chaud et à froid, les aciers alliés, les aciers de cémentation, les aciers de nitruration, les fontes blanches, les fontes alliées...(figure I.4) [9].

#### **I.4.3.1 Les aciers de construction pour TTh**

Pendant l'usinage d'aciers durs, même à de faibles vitesses de coupe, les outils en aciers rapides et en carbure cémenté sont peut efficaces à cause de leur faiblesse à supporter des contraintes élevées à des températures élevées. Par conséquent, l'usinage des alliages ferreux traités (45HRC à 70HRC) constitue le principal domaine d'application des outils céramiques et CBN. La prudence invite à dire qu'un des matériaux devient difficile à usiner lorsque sa dureté dépasse 30HRC.

#### **I.4.3.2 Les aciers d'outillages à froid (X200Cr12, X160CrMoV12,...)**

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelle. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65HRC. Ils sont principalement utilisés pour tous travaux à froid tels que : poinçons d'estampage, outils de découpe, outils d'extrusion,...

#### **I.4.3.3 Les aciers d'outillages à chaud (X40CrMoV5-1, X38CrMoV 40NiCrMo16, 35CrNiMo4...)**

Ces aciers possèdent une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Leur résistance à haute température, leur ténacité et leur aptitude au polissage leur permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants : matriçage à chaud, moules à couler sous pression, filage à chaud, vis d'extrudeuse, lame de cisaille à chaud. La dureté après revenu peut varier de 30HRC à 55HRC.

**I.4.3.4 Les aciers à moules (XC48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16...)**

L'acier XC48, livré à l'état normalisé, permet après trempe d'obtenir une dureté de surface appréciable (50HRC). Le 40CrMnMo8 spécialement conçu pour l'élaboration des moules, pour matrice plastique est livré à l'état trempé et revendu a une résistance de 1000 à 1100 MPa. Il est caractérisé par la grande facilité d'usinage que lui donne la désulfuration. Ces aciers à moules sont utilisés pour la réalisation des carcasses de moules pour matières plastiques, semelles d'outillages, outils pour moulage sous pression, plaques porte empreintes,...

**I.4.3.5 Les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100)**

Ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils CBN sont employés avec succès [10], [11]. Lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de CBN est préférable par rapport à un outil à forte concentration de CBN ou à une céramique mixte ( $Al_2O_3+TiC$ ).

**I.4.3.6 Les aciers rapides (HS 6-5-2, HS 2-9-1-8)**

Cette famille d'acier comprend, en majorité, les matériaux utilisés pour la fabrication des lames de découpe et des poinçons. La représentation de cette catégorie de matériaux regroupe les aciers rapides, les aciers de travail à chaud et les aciers de travail à froid.

**I.4.3.7 Les aciers de cémentation (16MnCr5, 10 CrNi6, C10, 18CrMo4...)**

L'usinage de finition et la coupe continue d'aciers de cémentation de dureté de 65HRC peuvent être effectués avec des CBN à haute vitesse de coupe. En général le liant céramique TiC est plus performant qu'un métal liant CBN, en raison de sa capacité à garder une plus grande dureté aux températures élevées. L'usinage en coupe interrompue peut également être pratiqué avec satisfaction à l'aide de Pc-BN. Les outils à base de céramique peuvent être utilisés à de plus faibles conditions de coupe, mais les risques de rupture augmentent beaucoup.

**I.4.3.8 Les aciers de nitruration (30CrMo4, 30CrAlMo6-12, 40CrAlV6-10)**

Le but de la nitruration est de former une couche très dure sans trempe ultérieure. La nitruration peut être solide, gazeuse, liquide ionique, la dureté des couches peut varier 850HV à 1400HV. Suivant le procédé de nitruration et selon les matériaux traités. L'épaisseur des couches durcies n'excède pas 0,4mm. Pendant ce procédé, l'accroissement de dureté de

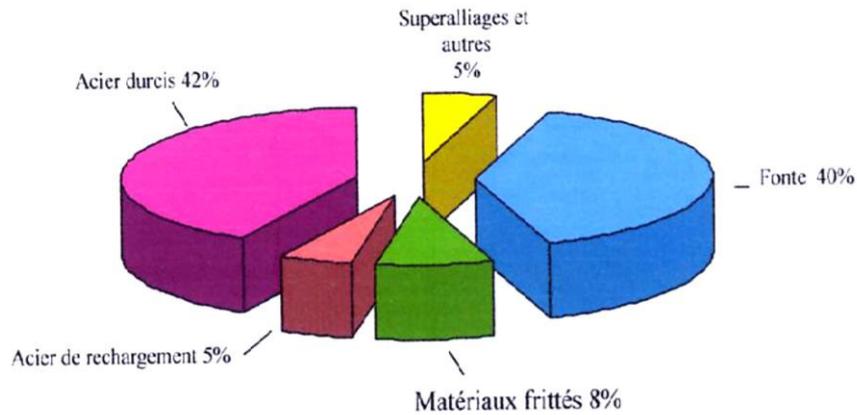
produit par insertion des atomes de carbone et d'azote dans le réseau cristallin du matériau. L'usinage de ses couches fines est très dur.

#### **I.4.3.9 Les fontes**

Les fontes grises et blanches en nickel/chrome représentent un marché important de l'utilisation des CBN et des outils céramiques. Les fontes grises (fontes moulées) sont utilisées en grandes quantités pour des applications générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les fontes grises ont une plage de dureté typiquement comprise entre 180 et 320HB. Dans ce cas, les Pc-BN dépassent de loin les performances des outils en carbures et en céramique. Cependant d'autres auteurs ont affirmé que les céramiques à base de nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ ) présentaient une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de la fonte grise. Les fontes blanches ou trempées sont beaucoup plus dures, plus fragiles et plus résistantes à l'usure à cause de la présence de carbure de fer (cémentite), au lieu de graphite. Leur dureté varie typiquement de 45 à 65HRC. Des additions de nickel et de Chrome produisent un type de fonte blanche martensitique qui est habituellement connue sous le nom de Ni-Hard. Elle est caractérisée par une dureté de 50 à 65HRC et qui est largement employée comme pièces d'usure. Les fontes Ni-Hard chrome sont dures, fragiles et difficiles à usiner. La haute dureté de ces fontes limite l'utilisation des outils carbure à des conditions de coupe non économiques.

#### **I.4.3.10 Les alliages réfractaires à base de nickel (Inconel 718) ou cobalt (stellite)**

Les alliages à base de nickel ou de cobalt sont très utilisés dans l'industrie aéronautique et sont plus difficiles à usiner que la plus part des aciers par ce qu'ils sont réfractaires. Ils maintiennent donc une grande partie de leur résistance pendant l'usinage mais s'écrouissent également. L'usure en entaille sur la face de dépouille et le principal problème. Les alliages à base de nickel et de cobalt sont habituellement usinés avec des outils en carbure avec des vitesses de coupe inférieures à 30 m/min.



**Figure I.4 :** Répartition des matériaux usinés en tournage dur [07].  
(D'après Goran Avance Métal Institue)

## I.5 Les matériaux de coupe

### I.5.1. Introduction

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie. Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu [12].

Au court du XXe siècle une part de nouveaux des matériaux sont apparus (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) (Figure I.5) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que le moulage, la rectification, la métallurgie des poudres, les revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces.



**Figure I.5.** Différents matériaux de coupe.

### I.5.2. Classification des matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure (figure I.6). Ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de propriétés spécifiques. De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes [13] :

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

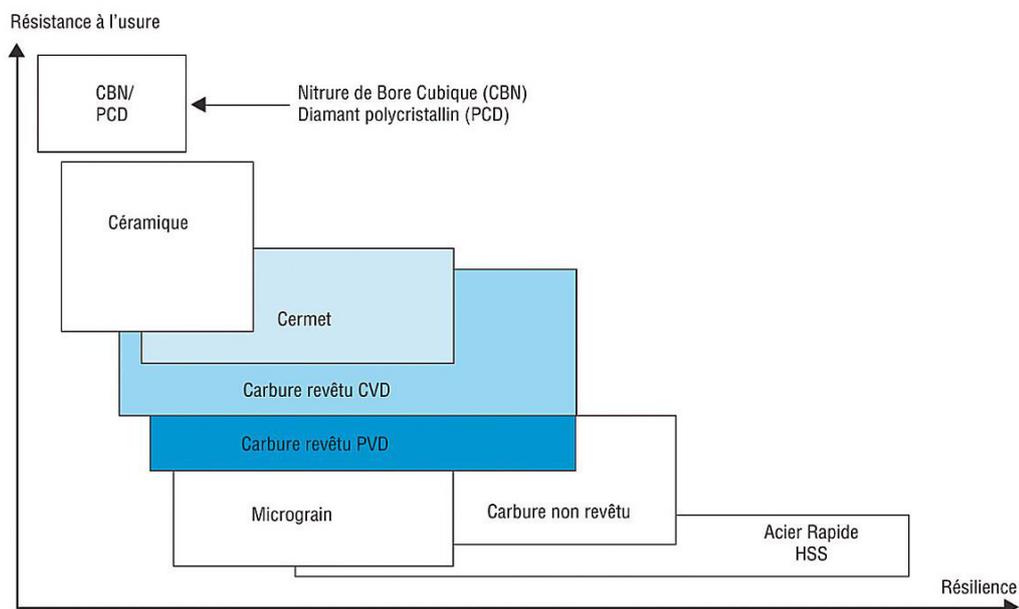


Figure I.6 Classification Matériaux de coupe.

### I.5.2.1 Les 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(Cr).
- ✓ 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 NFA35-590 en

retient<sup>16</sup>, parmi les quelles des aciers sur carburés et des aciers au cobalt.

### **I.5.2.2 Carbures**

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on fixe sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide. Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement.

Composition : Noyau en carbure de tungstène ( $T^{\circ}$  de fusion  $2600^{\circ}$ ).

Ou en carbure de titane ( $3100^{\circ}$ ), ou tantale ( $3780^{\circ}$ ) ou niobium ( $3500^{\circ}$ ).

Liant : cobalt : le plus courant ou nickel.

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

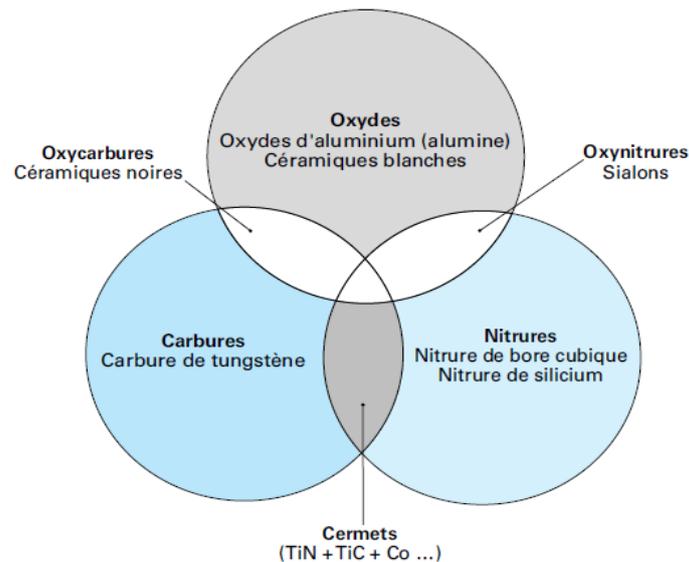
### **I.5.2.3 Cermets**

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitride de Titane ou de nitrure de Titane. Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition. Le matériau étant fragile, il ne faut pas interrompre la coupe.

### **I.5.2.4 Céramiques**

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium (figure I.7). Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

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



**Figure I.7** Les Céramiques.

Les outils en céramique peuvent être revêtus. Le revêtement le plus utilisé est le nitrure de titane TiN. Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes. Un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

**Tableau I.1** Céramiques utilisées pour les outils de coupe [14]

<i>Céramiques oxydées</i>	<i>Céramiques mixtes</i>		<i>Céramiques non oxydées</i>
Céramiques Blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes (Whiskers)	Sialons gris
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiC (30%) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiN-TiC Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WC, TaC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -fibres SiC	Base Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>

Les outils en céramique peuvent être revêtus. Le revêtement le plus utilisé est le nitrure de titane TiN. La céramique la plus courante est l'**oxyde d'aluminium** ou l'alumine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dès l'origine, il s'est révélé intéressant pour la finition des fontes, à condition de disposer de machines robustes et à grandes vitesses. Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à HRC 60 (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation. D'autres céramiques sont également employées.



*Figure I.8* plaquette carrée en Céramique.

- **Les céramiques noires** sont des mélanges d' $Al_2O_3$  et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircon (ZrO<sub>2</sub>). Elles sont beaucoup moins sensibles que les céramiques  $Al_2O_3$  aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe.

- **Le nitrure de silicium** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> permet dans certains matériaux des vitesses de coupe une fois et demie à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides...). Il s'emploie à sec.

- **Les céramiques renforcées par des whiskers** (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leur confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.

D'une façon générale les céramiques de coupe : présentent une grande dureté, d'où un très bon comportement en frottement et une grande résistance à l'usure ;

- conservent leur dureté à chaud dans des températures très élevées, il n'y a pas de soudure entre les copeaux et la face de coupe ;
- ont une très bonne stabilité chimique ;
- présentent une fragilité relative ne les prédisposant pas à être exposés aux chocs dans des conditions d'utilisation sévères.
- la résistance aux chocs et la ténacité des céramiques à base de nitrure de silicium est supérieure aux céramiques à base d'oxyde d'aluminium et aux carbures ;
- comparativement à la céramique pure, la céramique mixte a une moins bonne résistance à haute température parce qu'ils contiennent des carbures de titane qui peuvent s'oxyder dans des températures au-delà de 800 C°.
- la structure plus fine des céramiques mixte offre une meilleure résistance aux chocs mécaniques et thermiques.

### I.5.2.5 Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN (figure I.9) offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures... Son utilisation requiert

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



*Figure I.9* Plaquette en CBN.

Contrairement au diamant, il ne se trouve pas dans la nature. Il est élaboré par synthèse.

Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- nitrure de bore à structure cubique (CBN) qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;
- nitrure de bore à structure hexagonale de faible dureté (même structure que le graphite).

La forme dure est très difficile à obtenir et les techniques sont voisines de celles utilisées pour la synthèse du diamant. Les cristaux obtenus sont très petits ( $< 0,5$  mm, plutôt vers  $50 \mu\text{m}$ ) utilisables pour la réalisation de meules [15].

Il présente une résistance mécanique élevée dépendant de la nature et de la quantité de liant. Sa dureté se maintient à chaud (jusqu'à  $1\ 000$  °C), ce qui permet de travailler à des vitesses de coupe très élevées et d'usiner des matériaux durs. Comme pour le diamant, la réactivité chimique liée au couple matériau usiné/outil de coupe en limite les applications.

Les CBN sont particulièrement adaptés aux usinages de matériaux durs (dureté HRC 55, soit environ 595 HV) tels que les aciers traités, fontes alliées (au chrome, molybdène, etc.), alliages de revêtement dur, stellites, aciers à outils, etc. Ils permettent aussi l'usinage de matériaux conventionnels (fontes ordinaires par exemple) à des vitesses de coupe élevées ( $> 1$

000 m/min) aussi bien en tournage qu'en fraisage. Dans l'industrie automobile, on utilise maintenant le CBN pour le fraisage-finition des faces de carter cylindre en fonte dure ( $V_c = 850$  m/min) et l'alésage-finition des cylindres ( $V_c = 500$  m/min).

L'aptitude du CBN à usiner les aciers traités et la qualité des surfaces obtenues permettent d'envisager dans certains cas le remplacement de la technique d'usinage par rectification, par celle du tournage dur (disques de freins, pignons de boîtes de vitesses, etc.).

L'usinage au CBN permet de travailler sans liquide de coupe, la chaleur engendrée à l'interface pièce outil passant dans le copeau. Les performances observées des CBN sont supérieures à celles des céramiques. Le choix d'utiliser un outil CBN dépendra du contexte économique de l'usinage, l'outil CBN étant encore 5 à 10 fois plus coûteux à l'achat que les outils en céramique.

#### **I.5.2.6 Diamant**

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules. Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de  $650^\circ$  se transforme en un morceau de graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissable [16].

#### **I.5.3 Les revêtements**

La métallurgie des plaquettes repose sur deux composantes : le substrat et le revêtement (figure I.10). Le substrat supporte les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage. Le revêtement améliore la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur la plaquette. Les revêtements sont depuis 1960 un domaine important de recherche. Améliorant les conditions de coupe et la productivité, l'emploi des revêtements s'est généralisé. Aujourd'hui la plupart des nuances de carbure sont revêtues.

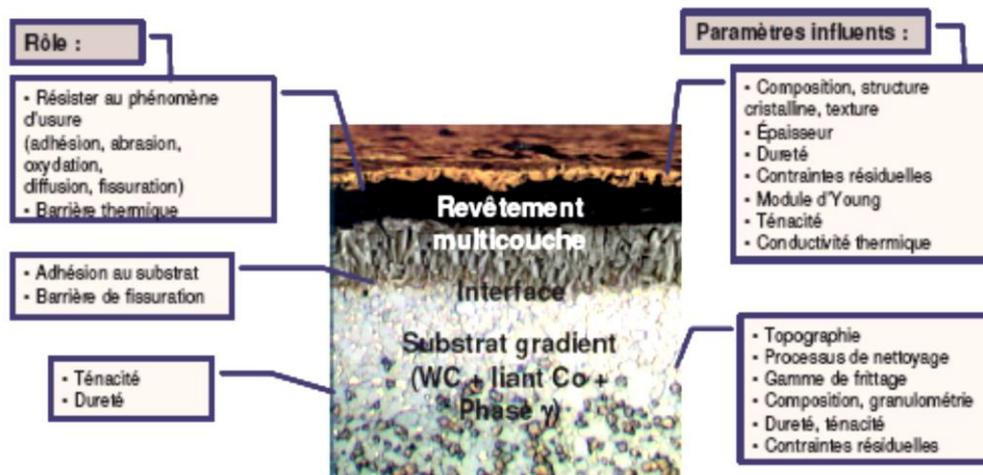


Figure I.10 Rôle des revêtements [17].

Le principe consiste à recouvrir le substrat d'un film mince. L'épaisseur totale du revêtement est généralement comprise entre 3 et 15  $\mu\text{m}$ . Les méthodes de dépôt sont de type CVD (dépôt chimique en phase vapeur à température médium, 800 – 1000°C) ou de type PVD (dépôt physique en phase vapeur, 400 – 600°C). La qualité d'adhérence au substrat est un critère essentiel pour le choix du revêtement. Les matériaux déposés sont également sélectionnés par leurs propriétés à haute température (dureté, ténacité, conductivité thermique).

La Figure 1.7 illustre le rôle d'un revêtement. Pour l'essentiel il doit protéger le substrat de l'usure (adhérence, abrasion, oxydation, diffusion entre copeau et matière usinée), protéger thermiquement et résister à la fissuration [18]. Les matériaux les plus fréquents rencontrés sont :

\*Carbure de titane TiC

\* L'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$

\* Et leurs associations TiCN (carbonitride de titane), AlTiN, ...

Différents travaux montrent que les outils carbures revêtues en TiCN ont les propriétés requises pour l'usinage des matières qui ont une dureté inférieure à 42 HRC, alors que les outils revêtues à base d'alumine s'utilisent pour des duretés supérieures à 42 HRC [19].

Les principales propriétés de ces revêtements sont présentées sous forme comparative dans le

Tableau I.2 Comparatif des propriétés de certains revêtements [20].

Revêtement	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	Excellente	Petite	Petite	Bon
TiN	Bonne	Bon	Bon	Excellent
Ti(C, N)	Moyenne	Moyen	Moyen	Très bon
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Très bonne	Excellent	Excellent	Moyen

L'usinage des pièces en fabrication mécaniques est en vérité influencé par plusieurs actions mécaniques. Ces actions mécaniques ne sont en fait que le triplet, effort de coupe puissance de coupe et pression spécifique de coupe [21].

### I.6 Les efforts de la coupe [22]

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

#### I.6.1 Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (figure I.11).

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

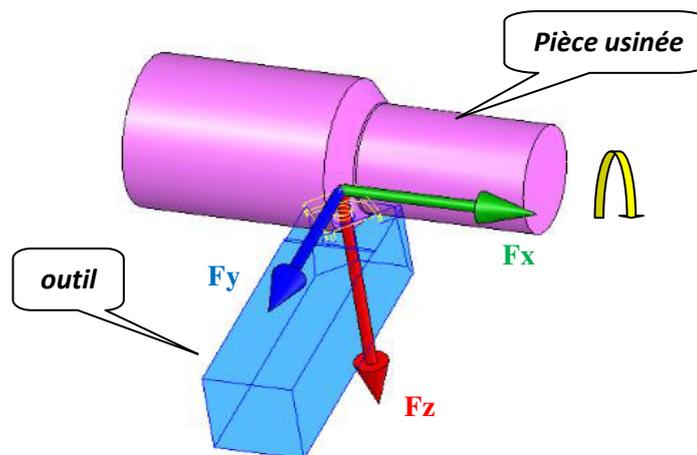


Figure I.11 Les composantes de l'effort de coupe.

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

### I.6.2.1 Les propriétés mécaniques du matériau à usiner

La valeur des composantes  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$  est proportionnelle à la charge de rupture à la traction  $R_t$  et à la dureté  $HB$  du métal à usiner.

### I.6.2.2 Influence de la profondeur de passe et l'avance

Avec l'augmentation des ces deux facteurs, la section du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus à la formation du copeau et la valeur des composantes  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$  nécessaire pour assurer la coupe est plus importante. En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance.

### I.6.2.3 Influence de la vitesse de coupe

On peut distinguer 03 zones (figure I.12)

- ✓ **Zone A** : diminution de  $\vec{F}$  avec les vitesses bases due à une diminution de frottement copeau - outil.
- ✓ **Zone B** : l'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation des frottements et par suite une diminution de l'effort tangentiel de coupe.
- ✓ **Zone C** : La  $V_C$  augmente et l'arête rapportée diminue. L'effort tangentiel de coupe  $F$  diminue et se stabilise.

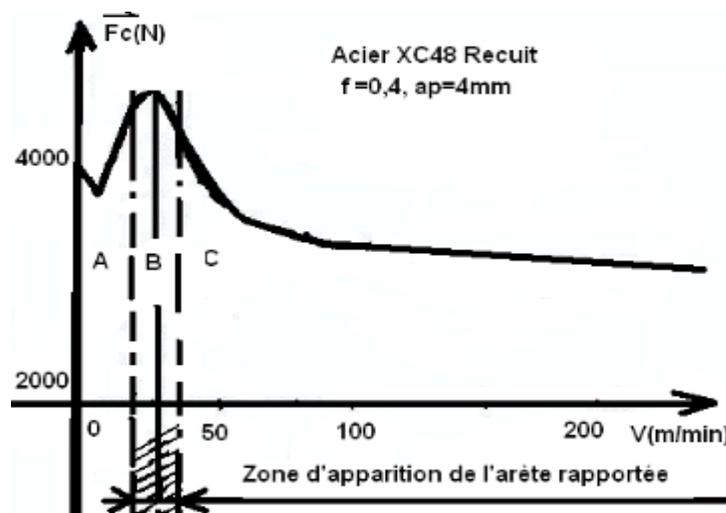


Figure I.12 Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe.

### I.6.2.4 Influence de l'angle d'attaque

Il s'agit de l'angle entre l'arête de coupe principale des plaquettes et la surface de la pièce. L'épaisseur des copeaux, les forces de coupe et la durée de vie d'outil sont influencées par

l'angle d'attaque. Lorsque l'angle d'attaque est négatif, les composantes tangentielle et radiale de l'effort de coupe sont importantes.

### I.6.2.5 Influence de l'angle de direction principale

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

### I.6.2.6 Influence de matériau de coupe

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

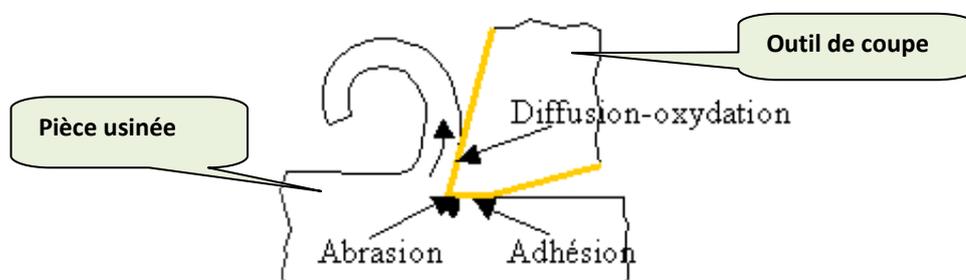
## I.7 Usure des outils de coupe

### I.7.1. Définition

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

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

Il en résulte une usure apparente schématisée par la figure (figure I.13).



**Figure I.13** Représentation des différentes zones de l'usure de l'outil durant la phase de la formation de copeau.

### I.7.2 Usure de l'outil

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

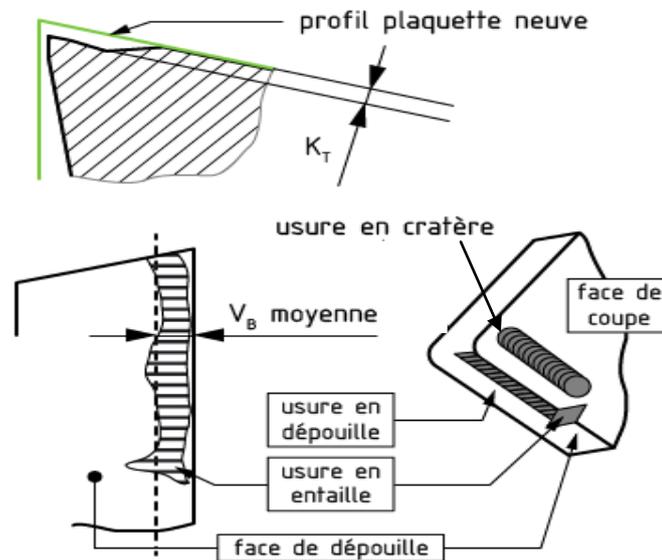


Figure I.14 Manifestation et mesures des usures.

Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables (Figure I.15).

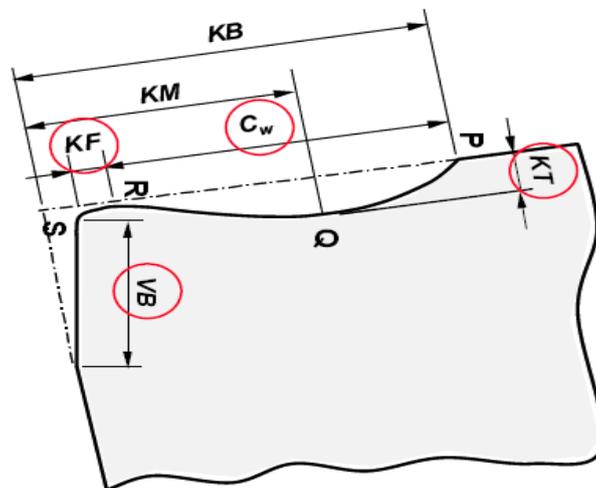


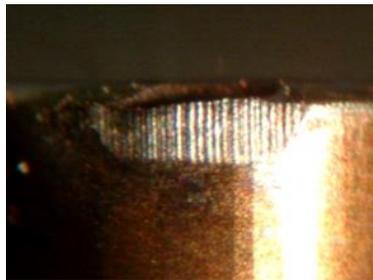
Figure I.15 Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil.

- KM: Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil.
- KT: Profondeur du cratère.
- KB: Largeur du cratère.
- $\gamma_c$ : Angle de cratérisation.
- VB: Hauteur de l'usure en dépouille.

- VN: Profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale.
- VBC: Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée.
- SV: Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée.

La qualité des surfaces obtenue est directement liée au degré d'usure de l'outil. Il est donc important de bien caractériser ce phénomène afin de le rendre observable.

L'usure provient des sollicitations mécaniques et thermiques engendrées par les mouvements relatifs entre la pièce, l'outil et le copeau, qui provoquent un transfert de métal entre les surfaces en contact (érosion ou abrasion mécanique et diffusion physico-chimique) [23].



*Figure 1.6 Usure des outils.*

Si l'on fait un inventaire des configurations de coupe que l'on rencontre dans un atelier d'usinage, on observe une très grande diversité des vitesses de coupe (entre 10 et plusieurs milliers de m/min), de la géométrie des copeaux et de leurs conditions d'évacuation, de la rigidité du contact pièce usinée/outil, de la nature et de la géométrie des outils. Dans une telle variété de configurations de coupe, il n'est pas surprenant d'observer une grande variété de faciès de dégradation. Ces mécanismes d'endommagement sont maintenant bien connus, notamment [23]:

**I.7.2.1 Usure abrasive :** provoquée par la présence d'un troisième corps contenant des particules de haute dureté dans le contact copeau/outil ;

**I.7.2 .2 Usure adhésive :** liée au frottement copeau/outil, et qui va prendre de plus en plus d'importance lorsque la vitesse de coupe croît, notamment dans le cas de certains matériaux comme les aciers inoxydables et les alliages à base de nickel ou de cobalt, ainsi que les alliages de titane ;

**I.7.2 .3 Usure par diffusion :** que l'on retrouve aux vitesses de coupe élevées, conséquence d'une diffusion du matériau usiné vers l'outil et donc d'une fragilisation de ce dernier (par exemple : usinage de matériaux à base de fer avec des outils en carbures à liant au cobalt) ;

**I.7.2.4 Usure par la fatigue mécanique :** qui est liée à l'apparition de phénomènes vibratoires de natures diverses : élimination partielle d'arête rapportée sur l'outil, apparition d'instabilités dans la formation du copeau en passant du copeau continu au copeau segmenté ;

**I.7.2.5 Usure par la fatigue thermique :** dans le cas d'outils de très faible conductivité thermique (notamment les céramiques) avec de très grandes vitesses de coupe (UGV par exemple).

### I.7.3 Usure en faces de coupe

Pour comprendre les avantages et les limites de chaque matière, il est important de connaître les différents mécanismes d'usure qui agissent sur les outils [24].

#### I.7.3.1 Usure en dépouille

C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus visible étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce.



*Figure I.17 Usure par abrasion [24]*

L'usure en dépouille normale commence lorsque des inclusions microscopiques dures ou du matériau écroui dans la pièce à usiner usent la plaquette. Les raisons de cette usure sont notamment l'abrasion à faibles vitesses de coupe et les réactions chimiques à des vitesses de coupe élevées. L'identification de l'usure en dépouille normale se traduit par une marque d'usure relativement uniforme le long de l'arête de coupe de la plaquette. De temps à autre, le métal de la pièce à usiner s'étale sur l'arête de coupe et exagère la taille apparente de la marque d'usure sur la plaquette.

Pour ralentir l'usure en dépouille normale, il est important d'employer la nuance de plaquette la plus résistante, qui ne s'écaille pas, et l'arête de coupe la plus douce pour réduire les efforts de coupe et les frictions.

L'usure en dépouille rapide, en revanche, n'est pas souhaitable, car elle réduit la durée de vie de l'outil. L'usure rapide se produit souvent lors de la coupe de matériaux abrasifs tels que

les fontes ductiles, les alliages de silicium-aluminium, les alliages à haute température, les aciers inoxydables PH traités thermiquement, l'alliage de cuivre au béryllium et les alliages de carbure de tungstène, ainsi que des matériaux non métalliques tels que des fibres de verre, l'époxyde, les matières plastiques renforcées et la céramique. Les signes de l'usure en dépouille rapide ont le même aspect que l'usure normale. Pour corriger l'usure en dépouille rapide, il est essentiel de sélectionner une nuance de plaquette plus résistante à l'usure, plus dure ou revêtue de carbure, ou encore de s'assurer que le fluide de refroidissement est correctement appliqué. La réduction de la coupe est également très efficace, mais est contre-productive car elle affecte négativement les temps de cycle [23].

### I.7.3.2 Usure en cratère

L'usure en cratère apparaît sur la face de coupe de la plaquette. Elle est provoquée par la réaction chimique entre la matière de la pièce et le matériau de coupe. La vitesse de coupe amplifie l'usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre.



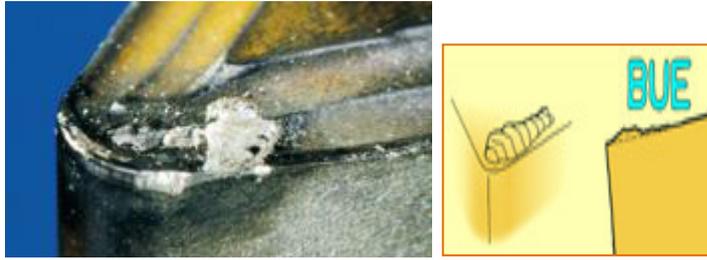
**Figure I.18** Usure chimique [24]

Survenant souvent au cours de l'usinage à grande vitesse d'alliages à base de fer ou titane, la formation de cratères est un problème de chaleur/chimique lié essentiellement à l'usure de la plaquette dans la zone où les copeaux de la pièce à usiner se forme. La combinaison d'usure de diffusion et d'abrasion provoque la formation de cratères. En présence de fer ou de titane, la chaleur dans le copeau de la pièce provoque une usure due à la diffusion de chaleur, créant ainsi un « cratère » sur le haut de la plaquette. Il finira par devenir suffisamment conséquent pour que la face de du copeau de la plaquette s'écaille, se déforme ou éventuellement entraîne une usure de dépouille rapide [23].

### I.7.3.3 Arête rapportée

Elle est provoquée par le soudage sous pression du copeau sur la plaquette. C'est le type d'usure le plus courant avec les matières collantes telles que les aciers bas carbone, les aciers

inoxydables et l'aluminium. Une faible vitesse de coupe accélère la formation d'une arête rapportée.



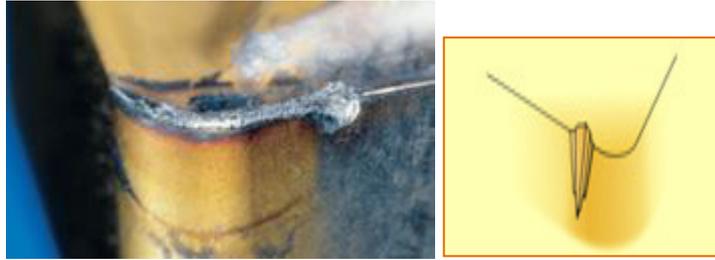
**Figure I.9 Usure par adhérence [24]**

Les arêtes rapportées se produisent lorsque des fragments de la pièce à usiner sont soudés par pression à l'arête de coupe, en raison d'une affinité chimique, à haute pression et à une température suffisante dans la zone de coupe. L'arête rapportée est susceptible de se détacher et d'emporter des morceaux de plaquette avec elle, provoquant l'écaillage et l'usure en dépouille rapide. Ce mécanisme de rupture se produit généralement avec des matériaux collants, à faibles vitesses, avec des alliages haute température, des aciers inoxydables et des matériaux non ferreux et pendant des opérations de filetage et de perçage. Une arête rapportée est identifiable grâce à des changements irréguliers dans la taille ou la finition d'une pièce, ainsi que par l'apparition de matériaux brillants sur le dessus ou sur la face de dépouille de l'arête de la plaquette.

Les arêtes rapportées peuvent être contrôlées en augmentant les vitesses de coupe et les avances, en utilisant des plaquettes revêtues de nitrure (TiN), en appliquant du fluide de refroidissement correctement (en augmentant la concentration, par exemple), et en sélectionnant des plaquettes présentant des géométries de coupe douce et/ou des surfaces plus lisses [23].

#### **I.7.3.4 Usure en entaille**

Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille, au niveau de la profondeur de coupe. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.



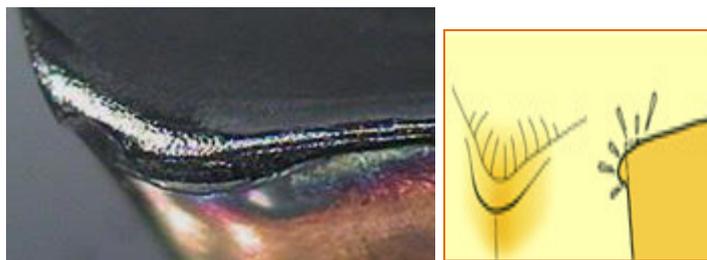
**Figure I.20 Usure en entaille [24]**

Les entailles se produisent quand la surface de pièce à usiner est abrasive dans la zone de coupe. Les surfaces forgées, oxydées, écrouies ou irrégulières peuvent provoquer la formation d'entailles. Alors que l'abrasion est la cause la plus commune, l'écaillage peut également se produire dans cette zone. La profondeur de passe sur une plaquette correspond souvent à un effort de résistance, ce qui la rend fragile aux chocs.

Ce mode d'usure devient visible lorsque des entailles et l'écaillage commencent à apparaître dans la zone de dépouille. Pour empêcher la formation d'entailles, il est important de varier la profondeur de passe, d'utiliser un outil avec un angle d'attaque plus grand, d'augmenter les vitesses de coupe lors de l'usinage des alliages haute température, de réduire les vitesses d'avance et d'empêcher l'accumulation, en particulier dans l'acier inoxydable et les alliages haute température [23].

#### **I.7.3.5 Déformation plastique**

La déformation plastique survient lorsque le matériau de coupe est ramolli par une température trop élevée. De manière générale, plus une nuance est dure et plus le revêtement est épais, meilleure est la résistance à la déformation plastique.



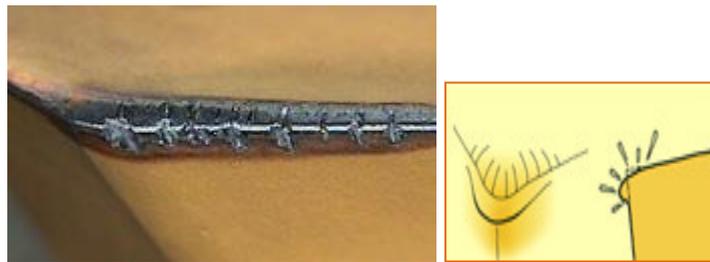
**Figure I.21 Usure thermique [24]**

Une combinaison de fluctuations de températures rapides et des chocs mécaniques peut provoquer une usure mécanique thermique. Des fissures se forment le long de l'arête de coupe, ce qui entraîne l'arrachage des particules d'usure de carbure de la plaquette et la formation de l'écaillage.

L'usure mécanique thermique survient surtout lors du fraisage et parfois lors du tournage à coupe interrompue, pendant les opérations de surfacage de grandes séries, et celles avec un flux de fluide de refroidissement intermittent. Les signes d'usure mécanique thermique se vérifient par la présence de plusieurs fissures perpendiculaires à l'arête de coupe. Il est important d'identifier ce mode d'usure avant le début de l'écaillage. Il est possible d'éviter cette usure mécanique thermique en utilisant correctement le fluide de refroidissement ou, mieux encore, à sec, en utilisant une nuance plus résistante aux chocs, à l'aide d'une géométrie de réduction de chaleur et en diminuant la vitesse d'avance [23].

#### I.7.3.6 Usure en peigne

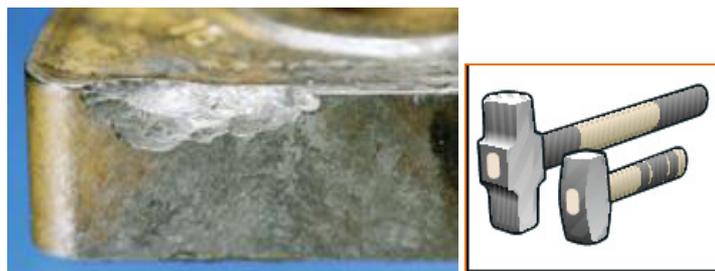
Lorsque l'arête de coupe subit des refroidissements brusques, des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent. Ce type de fissure est fréquent en cas de coupes interrompues, ce qui est courant en fraisage. L'utilisation de l'arrosage aggrave ce phénomène.



*Figure I.22 Usure en peigne [24]*

#### I.7.3.7 Écaillage ou rupture de l'arête

L'écaillage ou la rupture de l'arête survient en cas de surcharge des contraintes de traction mécanique. Celles-ci sont dues à différentes causes telles que le martèlement des copeaux, une profondeur de coupe ou une avance excessive, des inclusions de sable dans la matière de la pièce, des arêtes rapportées, des vibrations ou une usure excessive de la plaquette.



*Figure I.23 Usure mécanique [24]*

L'écaillage provient de l'instabilité mécanique souvent créée par des configurations non rigides, des roulements défailants ou des broches usées, des zones dures dans les matières premières ou une coupe interrompue. Cela se produit parfois à des moments inattendus comme pendant l'usinage des matériaux constitués de poudre où la porosité est délibérément laissée dans les pièces. Les inclusions dures dans la surface du matériau coupé et les coupes interrompues entraînent des concentrations d'efforts localisés et peuvent provoquer l'écaillage de la plaquette.

Dans ce mode d'usure, les copeaux situés le long de l'arête de coupe sont très visibles. La formation de l'écaillage peut être évitée en assurant une configuration adéquate de la machine-outil, en réduisant au maximum la flexion et vibrations, en utilisant des plaquettes rectifiées, en contrôlant la formation des arêtes rapportées, et en employant des nuances de plaquettes plus dures et/ou des géométries d'arête de coupe plus robustes.

#### I.7.4 Facteurs influençant l'usure

Les principaux facteurs influençant l'usure des outils de coupe sont :

- Les propriétés physiques et mécaniques du métal en œuvre ;
- Nature du matériau constituant l'outil;
- La géométrie de la partie active de l'outil ;
- Les facteurs technologiques d'usinage ( $V_c, f, ap$ ) ;
- L'état de l'arête tranchante et des surfaces qui la déterminent ;
- L'état de la machine-outil, la rigidité de l'ensemble porte-pièce/pièce ; porte-outil/outil.
- **Vitesse de coupe** : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe. Ce paramètre a une très grande influence sur l'usure,
- **Avance** : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe et diminuent la durée de vie de l'outil.
- **Profondeur de passe** : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur de long de l'arête tranchante son influence reste modeste sur l'usure.
- **Matériau usiné** : Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de ces certains éléments d'addition).

De nombreux essais ont été effectués pour démontrer l'effet des différents facteurs sur l'usure des outils. Il est bien établi que la vitesse de coupe est une variable importante influant sur l'usure des outils [25].

## **I.8 Rugosité des surfaces**

### **I.8.1 Généralités sur les états de surface**

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

### **I.8.2 Définitions de rugosité**

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micro géométrique et macrographique.

Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. [26]

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

#### **➤ Surface géométrique**

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

#### **➤ Surface spécifiée**

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

#### **➤ Surface mesurée**

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

#### **➤ Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication (figure I.24).

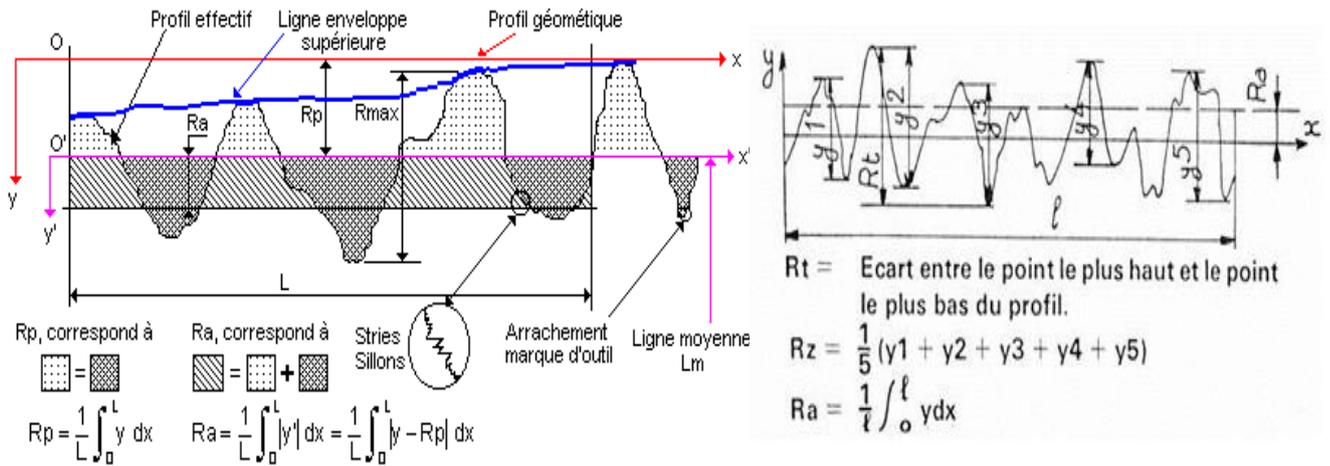


Figure. I.24 Caractéristiques du profil.

- **L** : Longueur de base du profil moyen
- **R<sub>p</sub>** : Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L.
- **R<sub>a</sub>** : Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y' (entre chaque point de la courbe et l'axe Ox').

### I.8.3 Paramètres caractéristiques des états de surface

- **Rugosité moyenne arithmétique R<sub>a</sub>** : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation

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

- **Rugosité moyenne des profondeurs R<sub>z</sub>** : Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluations successives  $L_e R_a = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4})$  (eq I.2)
- **Hauteur maximale des pics R<sub>p</sub>** : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation  $L_m R_p = R_{p3}$  (eq I.3)

### I.8.4 Technologie de mesure

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

### I.8.5 Caractéristiques de la surface

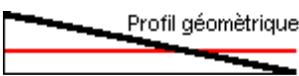
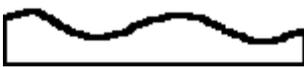
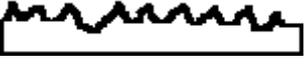
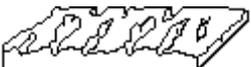
La nouvelle norme ISO 25178 définit l'analyse en 3D de l'état de surface, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface [7].

### I.8.6 Défauts de rugosité

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces (tableau I.3). L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que :

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

*Tableau I.3* différent type de Défauts de rugosité.

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

## I.9 Etat de l'art

Diverses recherches ont été entreprises pour étudier le comportement des outils de coupe lors de l'usinage des aciers à l'état traité et particulièrement l'acier fortement allié X210Cr12 (AISI D3). Les études se sont focalisées sur l'endommagement et l'usure des outils de coupe, l'intégrité de surfaces, la mesure des efforts de coupe, la puissance de coupe, le volume de copeau enlevé, la formation de copeau, la géométrie des plaquettes de coupe et les vibrations en usinage dur. Aussi, d'autres travaux se sont intéressés par la modélisation des paramètres technologiques d'usinage en utilisant divers techniques qui se rattachent à l'intelligence artificielle. Ces techniques permettent de proposer des modèles mathématiques qui seront utilisés pour l'optimisation des conditions de coupe en utilisant différentes approches. Parmi eux, on peut citer les travaux de recherche suivants :

**Yallese et al [27]** ont réalisé une étude comparative sur l'effet des paramètres de coupe sur l'usure et la durée de vie d'une céramique mixte revêtue et d'un CBN lors du tournage dur de l'acier X200Cr12. Les résultats indiquent que la plage de comparaison pour les deux matériaux de l'outil est limitée à une vitesse de 180 m/min à laquelle un affaissement catastrophique de l'arête de coupe de la céramique a eu lieu. Le rapport de durée de vie de l'outil est passé de 4,37 à 17,14 lorsque la vitesse de coupe est passée de 90 à 180 m/min en faveur du CBN, qui a résisté jusqu'à une vitesse de coupe de 350 m/min (figure I.25).

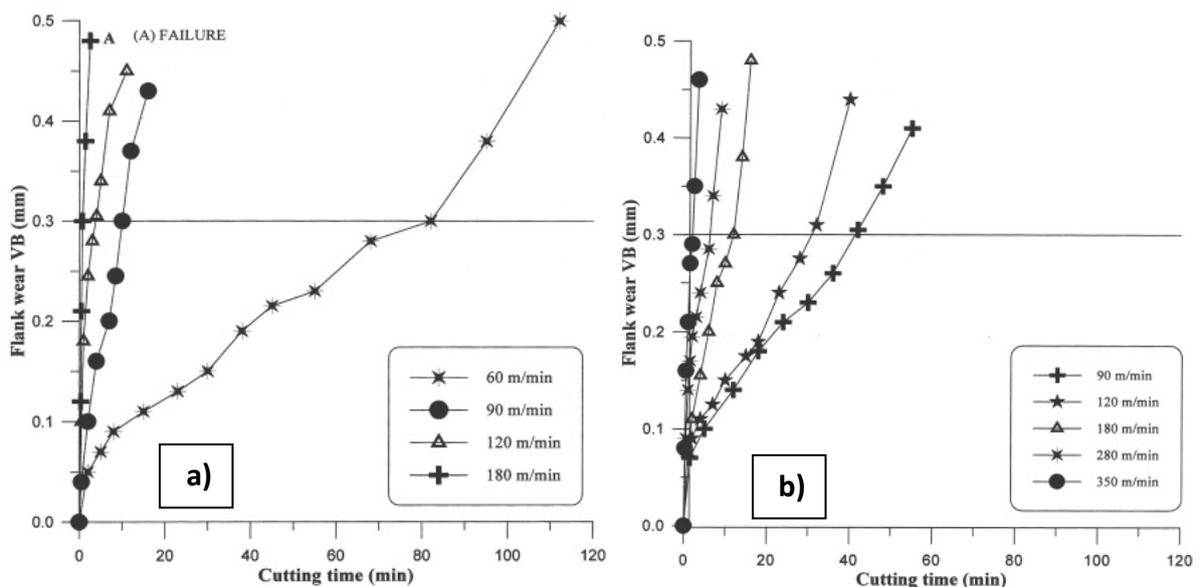
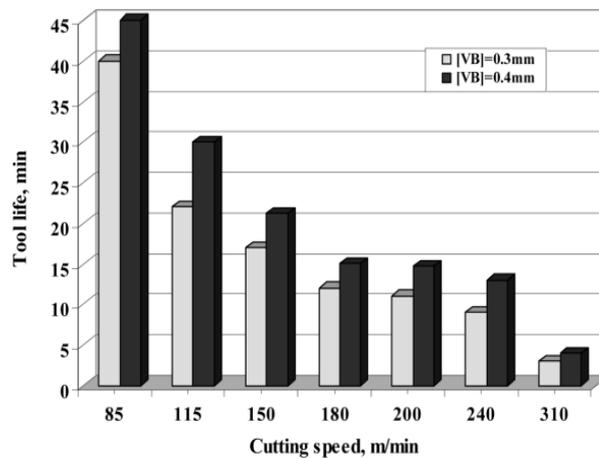
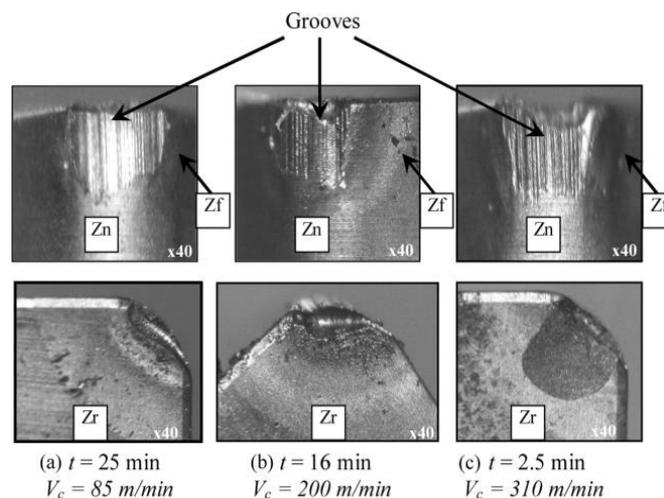


Figure I.25 Évolution de l'usure en fonction du temps pour : a) céramique et b) CBN

L'étude expérimentale réalisée par **bouchelaghem** et al [28] montre l'analyse des performances de l'insert CBN lors du tournage dur de l'acier à outils pour travail à froid (D3). Les opérations d'usinage ont été réalisées en tournage. L'usure a été étudiée sans lubrification selon les paramètres de coupe suivants : avance ( $f$ ) de 0,08 et 0,16 mm/tr, profondeur de coupe ( $ap$ ) de 0,5 mm et vitesse de coupe ( $V_c$ ) de 85 à 310 m/min. Les auteurs ont déterminé les tenues du CBN pour différentes conditions de coupe (Figure I.26). Aussi, ils ont observé lors de l'usinage et pour toutes les conditions testées, des sillons sur la surface en dépouille de l'outil, qui apparaissent généralement au début de l'usinage et ne disparaissent jamais (Figure I.27). Ces sillons sont orientés dans le sens de la vitesse de coupe. Cette morphologie d'usure semble être le résultat d'une usure abrasive élevée.

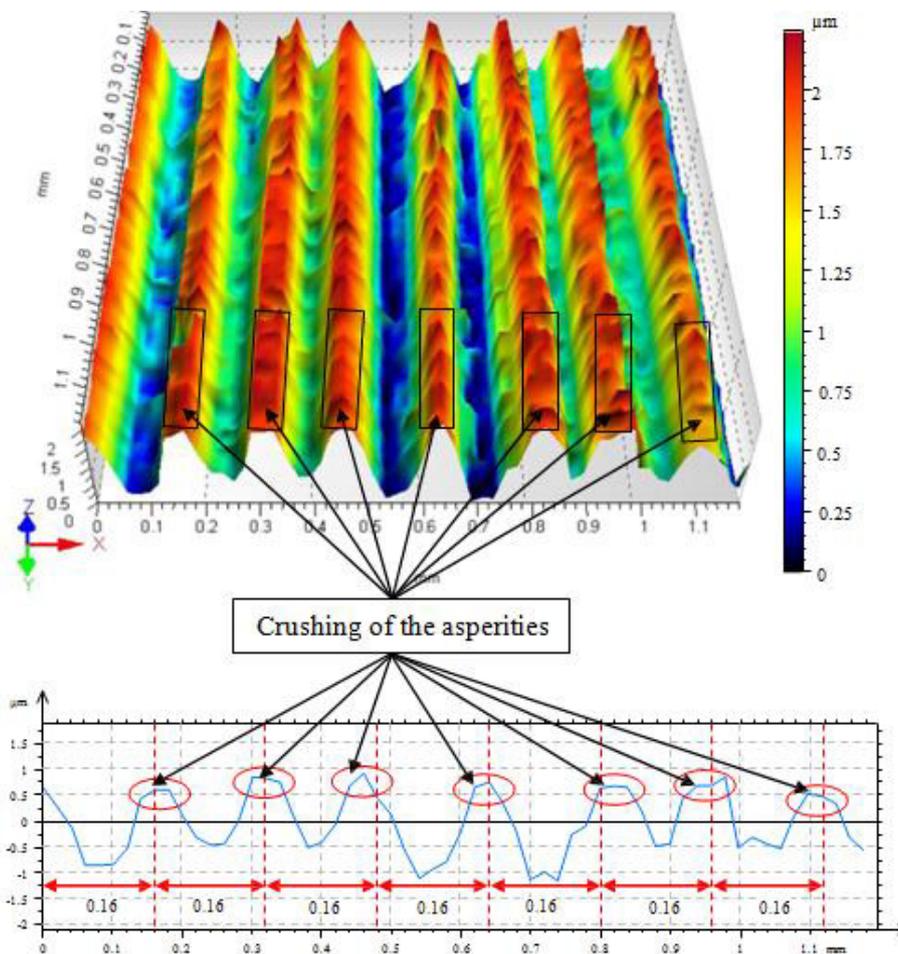


**Figure I.26** Effet de la vitesse de coupe sur la durée de vie de l'outil CBN.



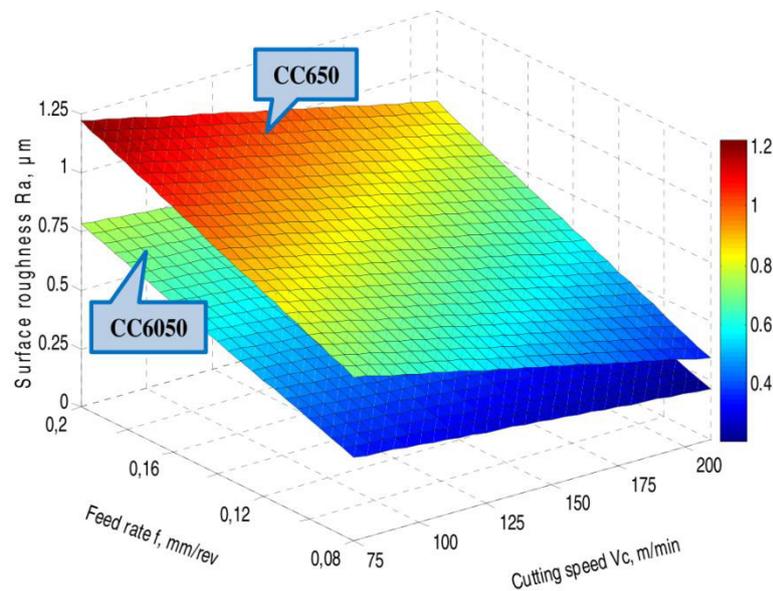
**Figure I.27** Micrographies de l'insert CBN avec l'usure sur la face en dépouille et la face d'attaque.

**Zerti** et autres [29] ont étudié l'optimisation des paramètres technologiques lors du tournage à sec de l'acier AISI D3 avec une céramique mixte en utilisant le plan de Taguchi ( $L_{18}$ ). Les paramètres de coupe considérés sont l'angle de direction principale, le rayon du bec, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe. L'auteur a montré d'après la figure **I.28**, l'influence de l'avance et du rayon de bec sur la rugosité de surface. Il affirme que l'utilisation d'une grande avance donne une mauvaise rugosité de surface, car la distance entre les pics et les creux est importante. Alors que l'utilisation d'un grand rayon de bec améliore la rugosité de surface par l'écrasement des aspérités et que la topographie 3D de la surface usinée obtenue par la plate-forme optique de métrologie modulaire est d'une grande importance pour une meilleure visualisation.



**Figure I.28** Exemple de profil 2D et topographie 3D de surface tournée :  $X_r = 75^\circ$ ,  $r = 1,6$  mm,  $V_c = 220$  m / min,  $f = 0,16$  mm / t et  $a_p = 0,15$  mm.

**Benssouillah** et al [30] ont présenté une étude sur l'effet des paramètres de coupe sur l'évolution de la rugosité de surface et les composants de force de coupe lors du tournage dur de l'acier à outils pour travail à froid AISI D3 avec des plaquettes céramiques mixtes revêtu et non revêtu (CC6050 et CC650). Les essais ont été réalisés selon le plan de Taguchi  $L_{16}$ , L'analyse de variance (ANOVA), le rapport signal/bruit et la méthodologie de surface de réponse (RSM) ont été adoptés dans ce travail. Les résultats trouvés ont révélé que la qualité de surface obtenue avec l'insert céramique revêtu (CC6050) est 1,6 fois meilleure que celle obtenue avec une céramique non revêtu (CC650). Cependant, l'insert céramique non revêtu était performante pour réduire la force d'usinage.



**Figure I.29** Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la rugosité de surface pour les céramiques CC6050 et CC650 à  $a_p = 0,25$  mm.

**Bouchelaghem** et al [31] ont exploré le comportement à l'usure de l'outil CBN lors du tournage de finition de l'acier d'outil X210Cr12 durci à 60HRC. Les résultats ont prouvé que l'usure de l'outil CBN a un impact direct sur l'élévation de la rugosité de surface, des composantes de l'effort de coupe ainsi que la température de coupe (figure I.30). Malgré l'usure ( $VB$ ) a dépassé la valeur admissible [ $VB$ ]=0.3mm, la valeur de la rugosité ( $Ra$ ) n'a pas dépassé le 01 micron.

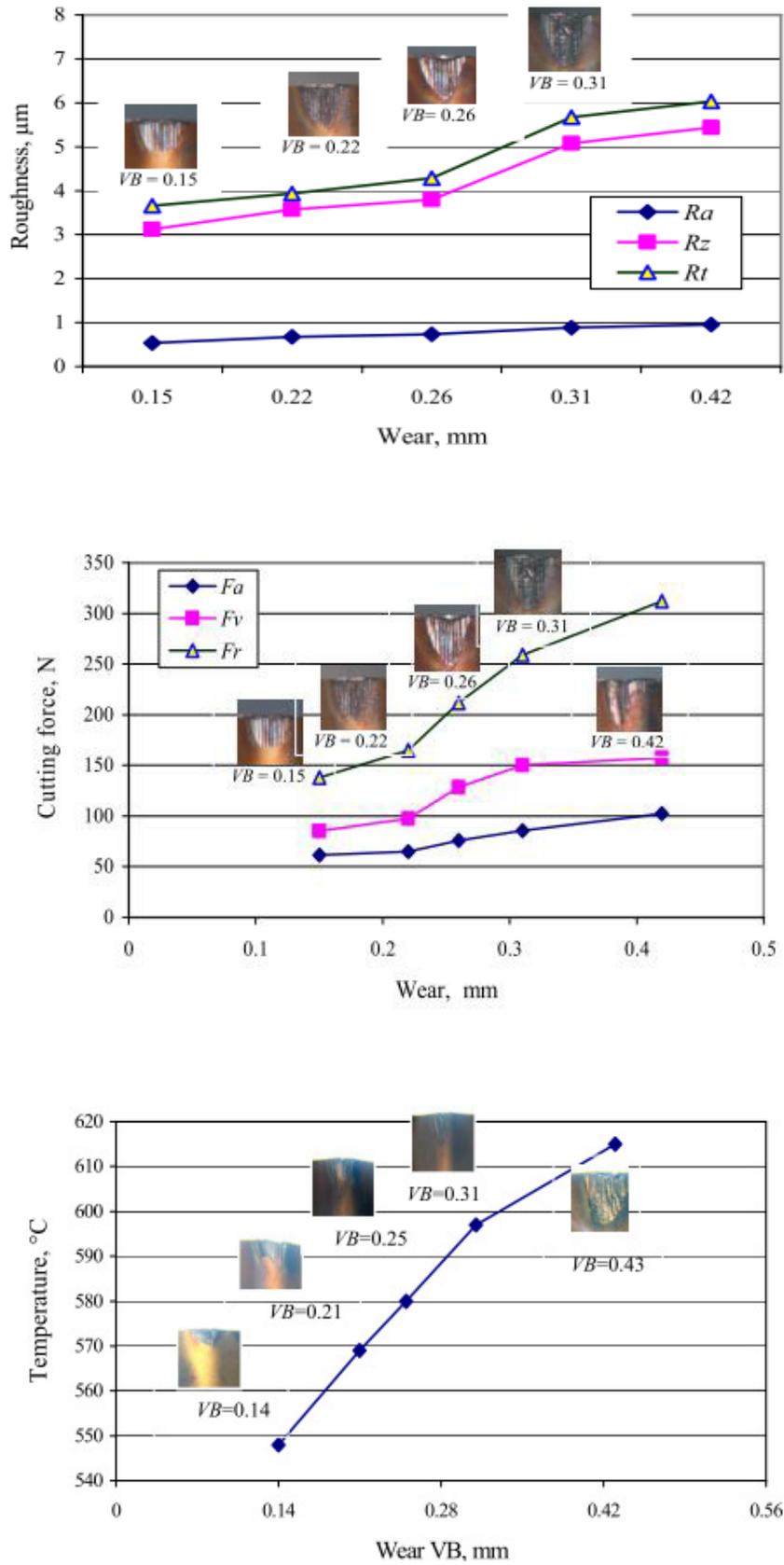


Figure I.30 Impact de l'usure sur la rugosité, les efforts et la température de coupe.

**Aouici** et al [32] ont fait une investigation sur l'effet des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface, la force de coupe, la pression de coupe spécifique et la puissance durant le tournage de l'acier pour travail à froid AISI D3 traité thermiquement à une dureté de 60 HRC. Les auteurs ont déterminé les modèles mathématiques des paramètres de sortie, ces modèles ont été exploités pour faire une optimisation des conditions de coupe en utilisant la fonction de désirabilité (Figure I.31).

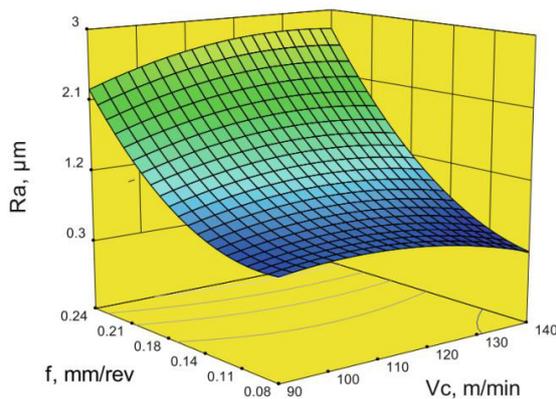


Fig. 6 Effect of feed rate and cutting speed on surface roughness

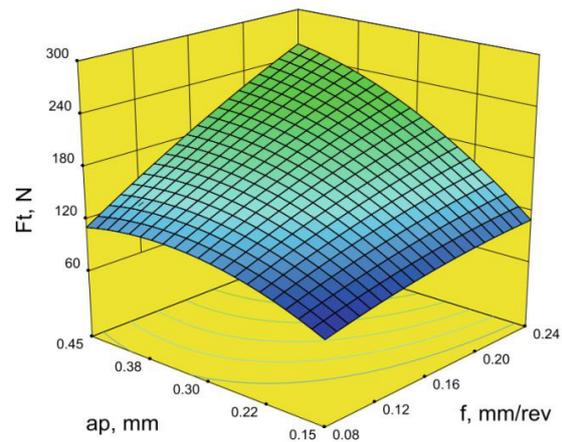


Fig. 8 Effect of depth of cut and feed rate on cutting force

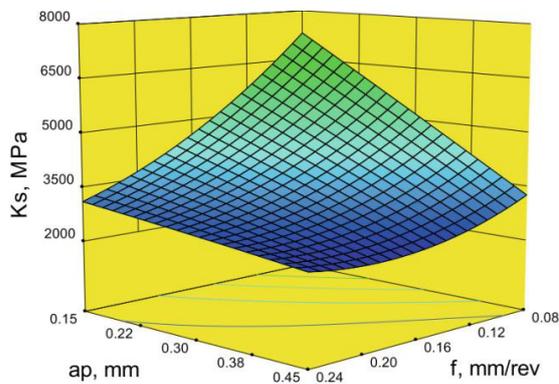


Fig. 10 Effect of feed rate and depth of cut on specific cutting force

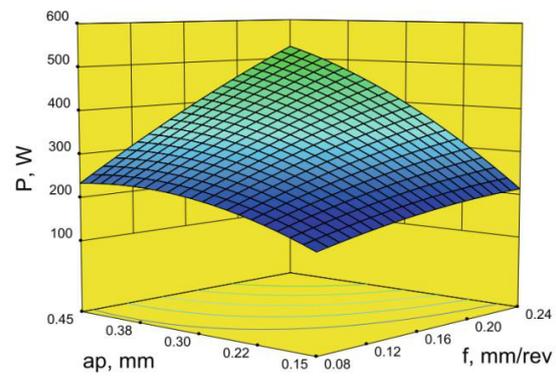


Fig. 12 Effect of depth of cut and feed rate on power

**Figure I.31** Influence des conditions de coupe sur  $Ra$ ,  $F_c$ ,  $K_s$  et  $P$ .

**Nouioua** et al [33] ont menée une étude expérimentale en tournage afin d'évaluer l'influence de différents paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ,  $r$  et le type de lubrification) sur les différents facteurs d'usinage tels que la force de coupe de la rugosité de surface, la puissance de coupe,

le taux d'enlèvement du métal. Des modèles mathématiques ont été développés grâce à la méthodologie de surface de réponse (RSM). Les résultats indiquent que l'avance et le rayon de l'outil sont les principaux facteurs affectant la rugosité de la surface, tandis que la force tangentielle et la puissance de coupe dépendent principalement de la profondeur de coupe, de l'avance et du rayon du bec de l'outil. Les résultats trouvés ont révélé qu'une lubrification en quantité minimale (MQL) conduit à une amélioration importante de la durée de vie de l'outil de coupe par un gain de 23 ~ 40% par rapport à l'usinage lubrifié et sec (Figure I.32).

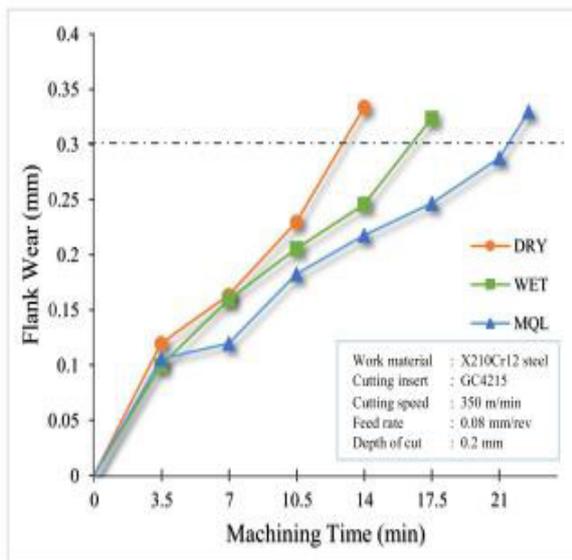


Fig. 9 Progression of nose wear under dry, wet, and MQL cooling by the tool nose radius  $r = 0.8$  mm

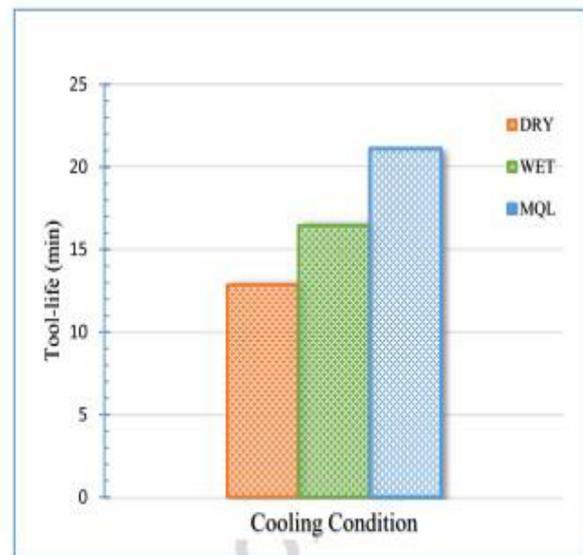
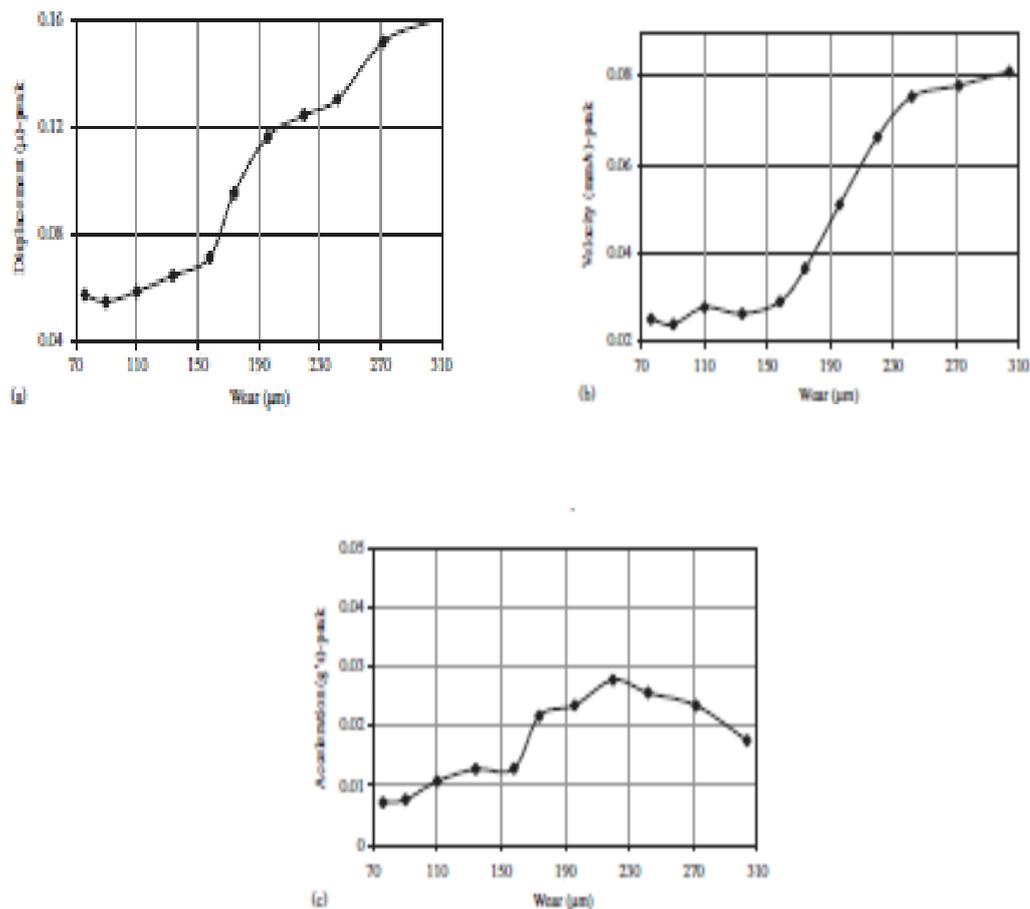


Fig. 11 Progression of lifetime of the cutting insert GC4215 during turning of X210Cr12 steel under dry, wet, and MQL, for  $[VB] = 0.3$  mm

**Figure I.32** Comparaison entre les trois types de lubrification en termes d'usure et tenue.

**Sadettin** et al [34] ont réalisé une étude sur la relation entre la vibration de la pièce et l'usure de l'outil pendant le fraisage de finition de l'acier d'outil pour travail à froid d'AISI D3 traité thermiquement à 35HRC. Les auteurs ont indiqué que l'amplitude de vibration n'a pas une augmentation considérable jusqu'à une valeur d'usure en dépouille ( $VB$ ) de  $160\mu\text{m}$ , au-dessus de cette valeur l'amplitude de vibration a augmenté de manière considérable (figure I.33).

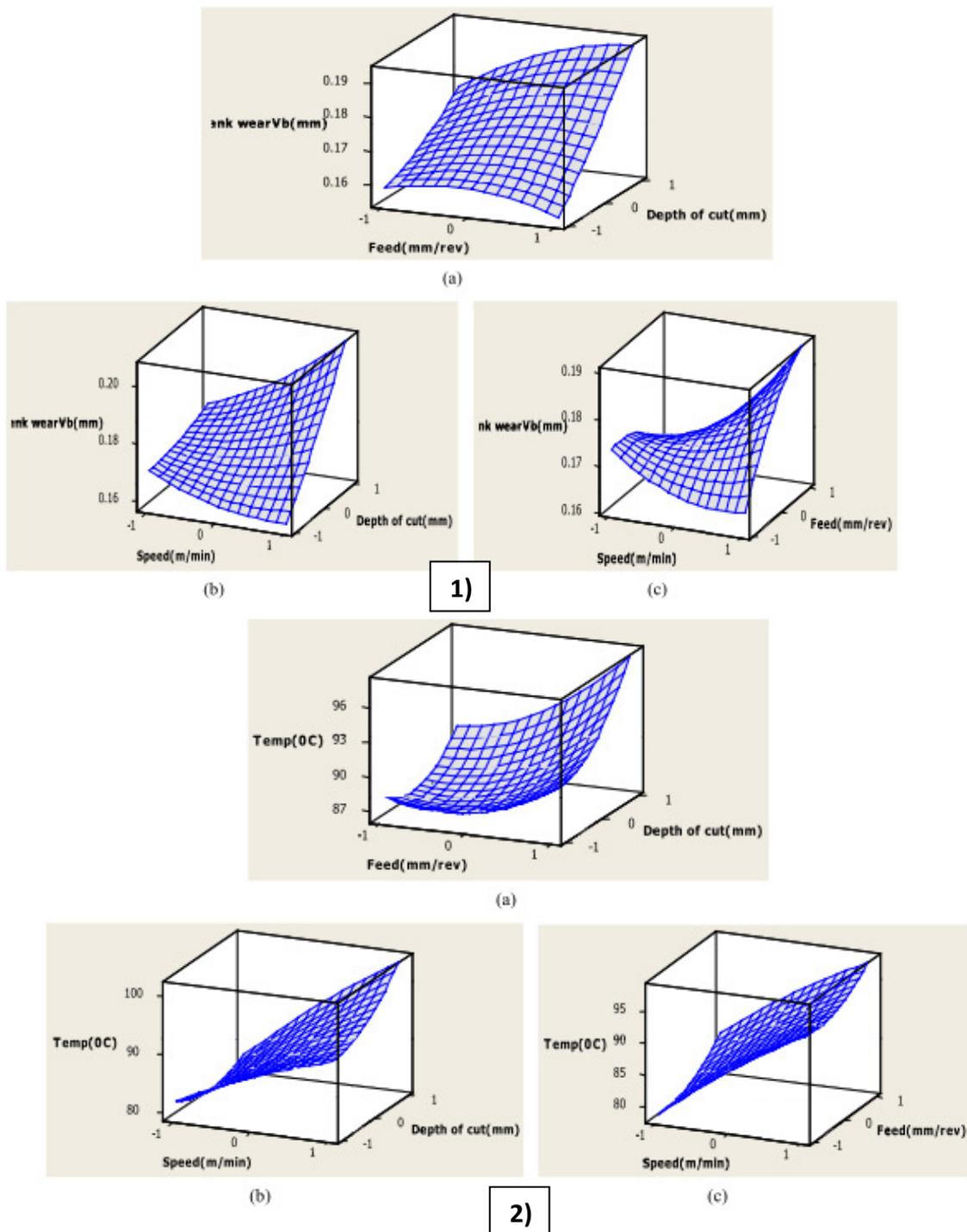


**Figure I.33** Relation entre l'amplitude de vibration et l'usure de l'outil (a) déplacement, (b) vitesse et (c) accélération [34].

**Varaprasad** et al [35] ont tenté de développer un modèle de prédire l'usure de l'outil en céramique  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$  et la température de l'acier traité AISI D3 à l'aide de la méthode de surface de réponse (RSM). Les effets combinés de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe ont été étudiés en utilisant l'analyse de la variation (ANOVA). La conception composite centrale (CCD) basée sur RSM est appliquée (20 essais). L'adéquation des modèles développés a été vérifiée à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA). Les tracés principaux et d'interaction ont été dessinés pour étudier l'effet des paramètres de processus sur les réponses de sortie (figure I.34). Les Modèles trouvés sont:

$$\mathbf{VB} = 0,172945 + 0,004550 \times V_c + 0,003700 \times f + 0,013400 \times d + 0,009125 V_c \times f + 0,010125 V_c \times d + 0,005125 f \times d \quad (\text{eq I.4})$$

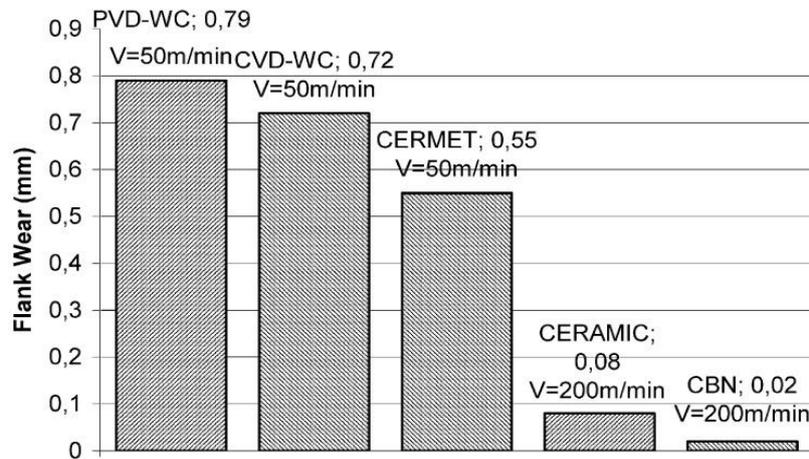
$$\mathbf{T} = 87,8667 + 7,3400 \times V_c + 2,5280 \times f + 2,3800 \times d \quad (\text{eq I.5})$$



*Figure I.34* Surface de réponse pour : 1) l'usure et 2) la température de coupe.

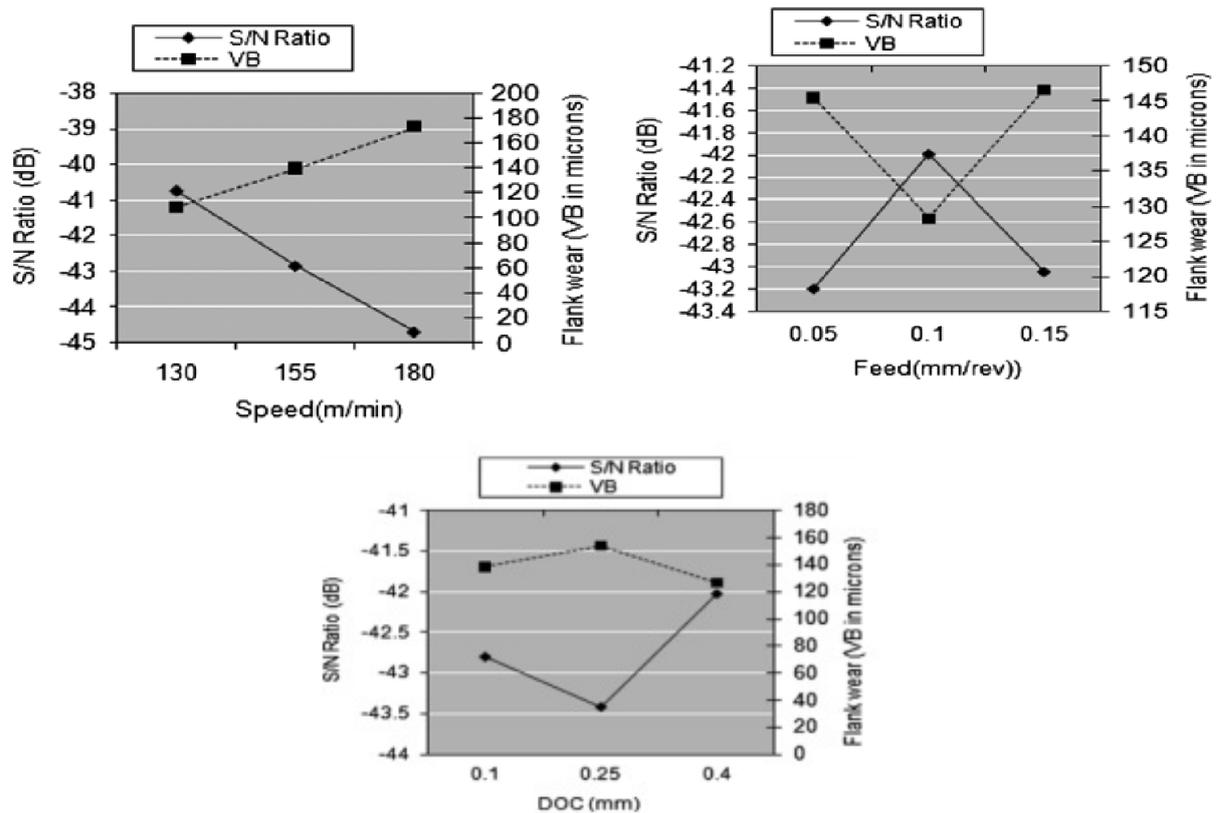
**E. Aslan [36]** a exploré les performances et le comportement d'usure de différents outils de coupe dans le fraisage de finition de l'acier d'outil pour travail à froid X210Cr12 durci à 62HRC. Le but de ces expériences est l'étude de l'usure d'un carbure de tungstène revêtu TiCN, un carbure de tungstène revêtu TiCN+TiAlN, un cermet revêtu TiAlN, une céramique

mixte avec  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$  et un outil en CBN. Les résultats ont indiqué que l'outil CBN présente les meilleures performances de coupe en termes d'usure en dépouille et d'état de surface. Le volume du métal enlevé le plus élevé a été obtenu avec l'outil CBN (figure I.35).



**Figure I.35** Usure de l'outil mesuré après enlèvement d'un volume copeau de  $1200 \text{ mm}^3$  [36].

**Dureja** et al [37] ont effectué une Optimisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI D3 (58HRC) avec un outil de coupe en carbure revêtu ( $\text{TiSiN-TiAlN}$ ), en utilisant un plan réduit de Taguchi L9. Le rapport S/N et l'analyse ANOVA ont été effectuées pour identifier les paramètres importants influençant l'usure de l'outil et la rugosité de la surface. Le traitement des résultats a été effectué par la méthodologie de surface de réponse (RSM). Les auteurs ont indiqué que la solution optimale fournie par l'optimisation de la fonction de désirabilité était comparé avec le réglage optimal des paramètres donnés par l'analyse de Taguchi et les résultats d'optimisation fournis par les deux techniques sont très proches (figure I.36).



**Figure I.36** Valeurs du S/B pour la vitesse, l'avance et la profondeur de passe.

**Esmail Soltani** et al [38] ont réalisé une étude expérimentale sur l'usinabilité lors du tournage dur de l'acier à outils AISI D3. Le but est de faire une modélisation et optimisation des paramètres d'usinage de l'acier trempé dur AISI D3 en utilisant la méthodologie de surface de réponse. Les effets combinés de quatre paramètres d'usinage (la vitesse de coupe, l'avance, la dureté de la pièce et le rayon du bec de l'outil), ont été étudiés en fonction de deux caractéristiques de performance : la rugosité de surface et l'effort de coupe principale. Les auteurs ont utilisé un plan composite centré (CCD) pour effectuer 30 essais avec six points centraux. Un outil en céramique mixte  $Al_2O_3/TiC$  avec trois rayons d'angle différents comprenant 0,4, 0,8 et 1,2 a été employé. Les principaux effets des facteurs et de leurs interactions ont été pris en compte dans cette étude en utilisant l'analyse de la variance. De plus, le modèle 2FI prédictif et le modèle linéaire sont présentés en raison de leur meilleure modélisation de la performance pour la rugosité de surface et la force de coupe principale respectivement. A la fin de l'étude, ils ont proposé des régimes de coupe optimaux obtenus grâce à l'optimisation séquentielle par approximation (SAO) afin d'obtenir une diminution remarquable de la rugosité de surface et de l'effort de coupe.

**Ravi et al [39]** ont fait une recherche expérimentale sur l'influence du refroidissement cryogénique par jet d'azote liquide ( $LN_2$ ) sur les performances dans le fraisage de l'acier à outils AISI D3 trempé avec des inserts en carbure revêtus TiN. Les expériences ont été effectuées à vitesse constante (125 m/min) et avec trois vitesses d'avance différentes dans la gamme 0,01-0,02 mm/dent. Les résultats trouvés montre que durant l'usinage et en utilisant le refroidissement cryogénique par jet d'azote liquide ( $LN_2$ ), la température de coupe a été réduite de 43 à 48% et de 26 à 35%, et l'effort de coupe moyenne a diminué de 50 à 40% et de 39 à 22% par rapport à l'usinage à sec et humide. La pénétration effective et l'effet de refroidissement potentiel élevé du  $LN_2$  sur l'interface copeau-outil forme une couche de lubrification lorsque la température de coupe est abaissée, ce qui améliore le fini de surface et la durée de vie de l'outil (figure I.37).

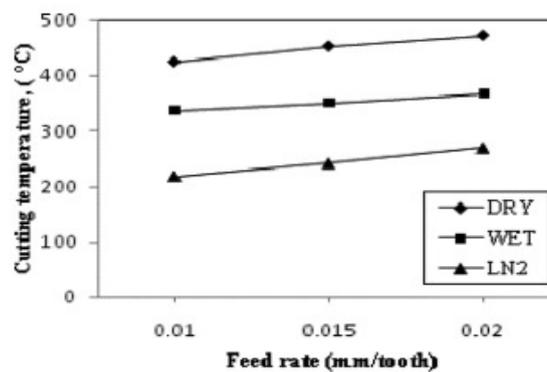


FIGURE 2.—Effect of feed rate on cutting temperature under different machining conditions.

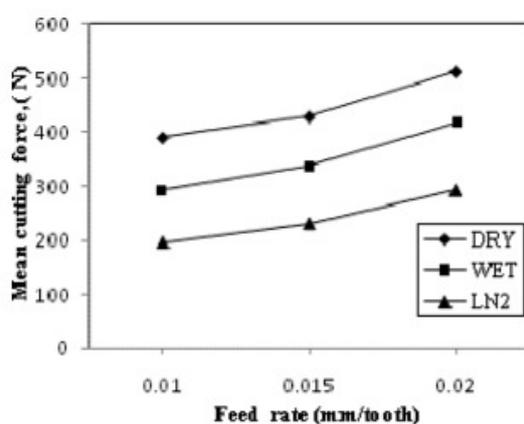


FIGURE 3.—Effect of feed rate on cutting force in different machining conditions.

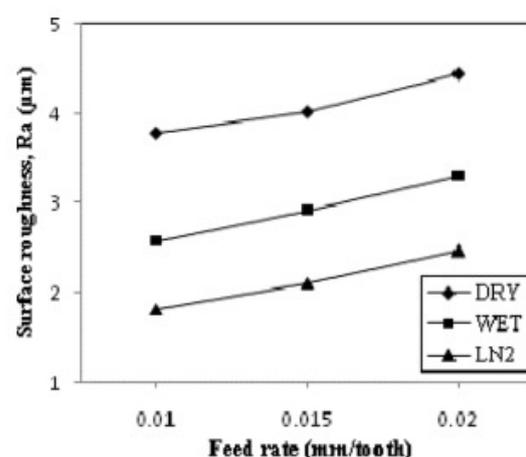
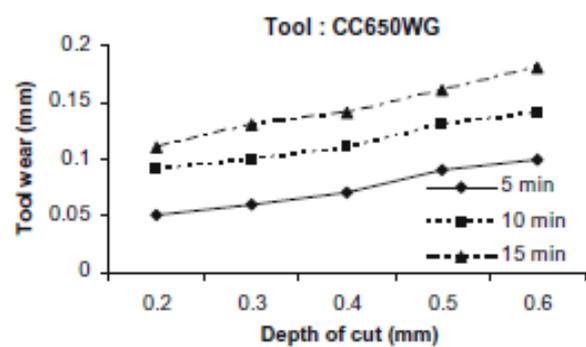
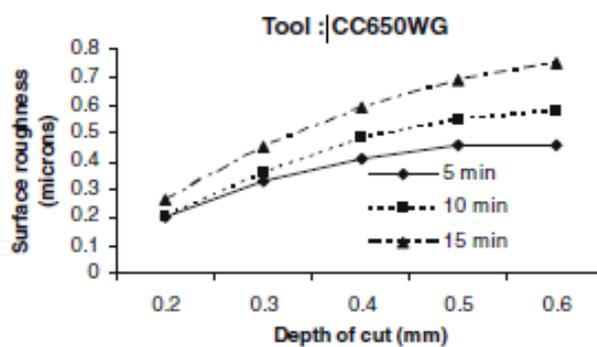
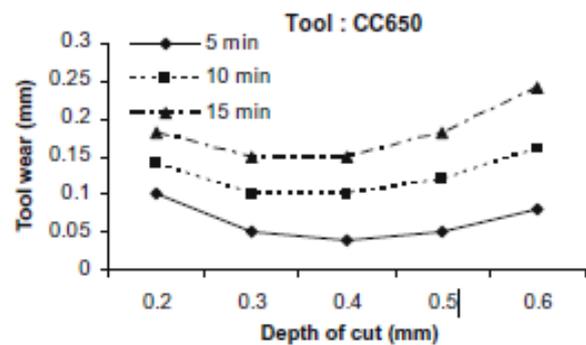
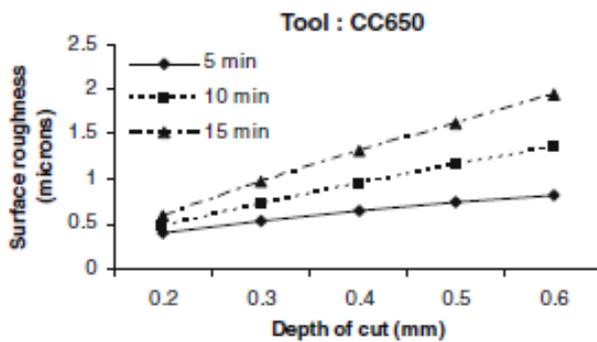
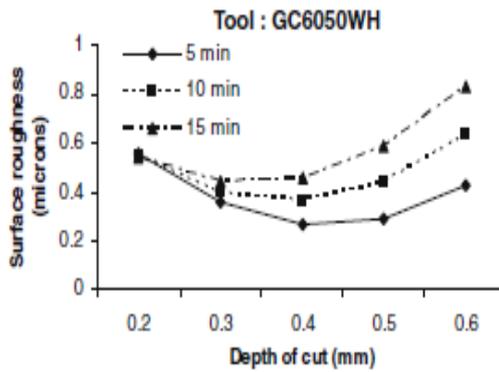


FIGURE 4.—Effect of feed rate on surface roughness under various machining conditions.

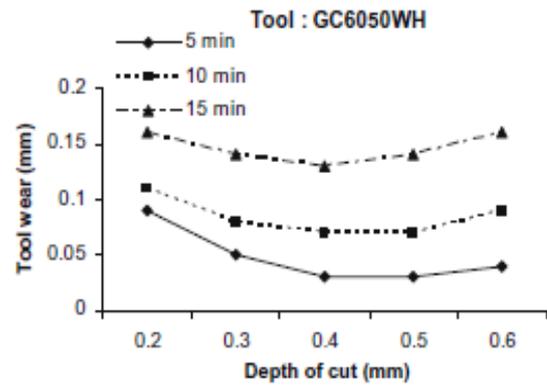
*Figure I.37 Effet de l'avance sur la température, l'effort de coupe et la rugosité sous différents conditions d'usinage.*

**Gaitonde** et al [40] ont étudié les caractéristiques de l'usinabilité sur la précision élevée et les composantes de haute dureté. Une tentative a été faite pour analyser les effets de la profondeur de passe et du temps d'usinage sur des aspects d'usinabilité tels que la force d'usinage, la puissance, l'effort de coupe spécifique, la rugosité de surface et de l'usure de l'outil en utilisant les modèles mathématiques du deuxième degré lors du tournage de l'acier d'outil pour travail à froid à haut teneur en chrome AISI D2 (très proche AISI D3) avec les plaquettes en céramique (CC650, CC650WG et GC6050WH). La planification des expériences par un plan factoriel complet (FFD). D'après l'analyse paramétrique, il s'est révélé que la plaquette CC650WG est mieux performante concernant la rugosité de surface et l'usure de l'outil, alors que la plaquette conventionnelle CC650 est utile en réduisant la force d'usinage, la puissance et l'effort de coupe spécifique (figures I.38 et I.39).





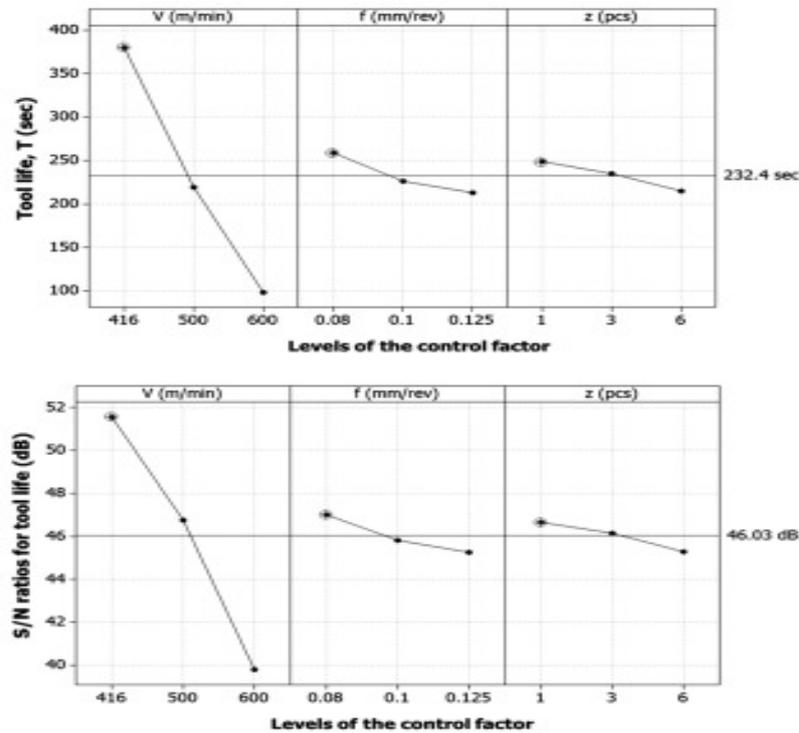
**Figure I.38 :** Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la rugosité [40].



**Figure I.39 :** Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur l'usure [40].

**J. Paulo** et al [41] ont étudié l'usinabilité de l'acier D2 pour le travail à froid avec les outils en céramique en utilisant des techniques statistiques lors du tournage dur. Les résultats indiquent qu'avec les paramètres de coupe appropriés, le choix est possible d'obtenir une rugosité de la surface ( $Ra < 0.8\mu\text{m}$ ) qui permet d'éliminer les opérations de rectification cylindrique.

**Murat Sarýkaya** et al [42] Ont réalisé une étude sur la méthode de Taguchi, qui est un outil puissant pour concevoir l'optimisation de la qualité, dans le but de trouver la rugosité de surface optimale et la durée de vie de l'outil dans les opérations de fraisage. Une matrice orthogonale, un rapport signal sur bruit ( $S/N$ ) et une analyse de variance (ANOVA) ont été utilisés pour étudier la durée de vie de l'outil et les caractéristiques de surface-rugosité de l'acier AISI D3. Les auteurs montrent que la rugosité de surface la plus faible et la durée de vie de l'outil la plus élevée ont été estimées respectivement à  $0,436\ \mu\text{m}$  et  $434,1\ \text{s}$  et que l'analyse ANOVA a révélé que le paramètre le plus important influençant la rugosité de surface était 75.27%, et que la vitesse de coupe était le paramètre le plus influençant sur la durée de vie de l'outil avec 95% d'importance (figure I.40).



*Figure I.40* Graphique des effets principaux des facteurs et graphique S/N pour la durée de vie

**Lima et al [43]** ont étudié l'usinabilité des aciers durcis à différents niveaux de dureté et à l'aide de divers matériaux d'outil de coupe. Leur étude a été concentrée sur l'usinage d'AISI 4340 durci (acier faiblement allié de haute résistance) et d'AISI D2 (acier d'outil travail à froid). Les résultats ont indiqué que lors du tournage de l'acier AISI 4340, la rugosité de surface des pièces usinées a été amélioré avec l'augmentation de la vitesse de coupe par contre avec l'augmentation de l'avance la rugosité se détériore, tandis que la profondeur de passe présente un effet moins significatif sur l'amélioration de rugosité de surface. L'usinage de l'acier AISI D2 avec les plaquettes mixte à base d'alumine a permis un état de la surface comparable à celui obtenu en rectification cylindrique (figure **I.41**).

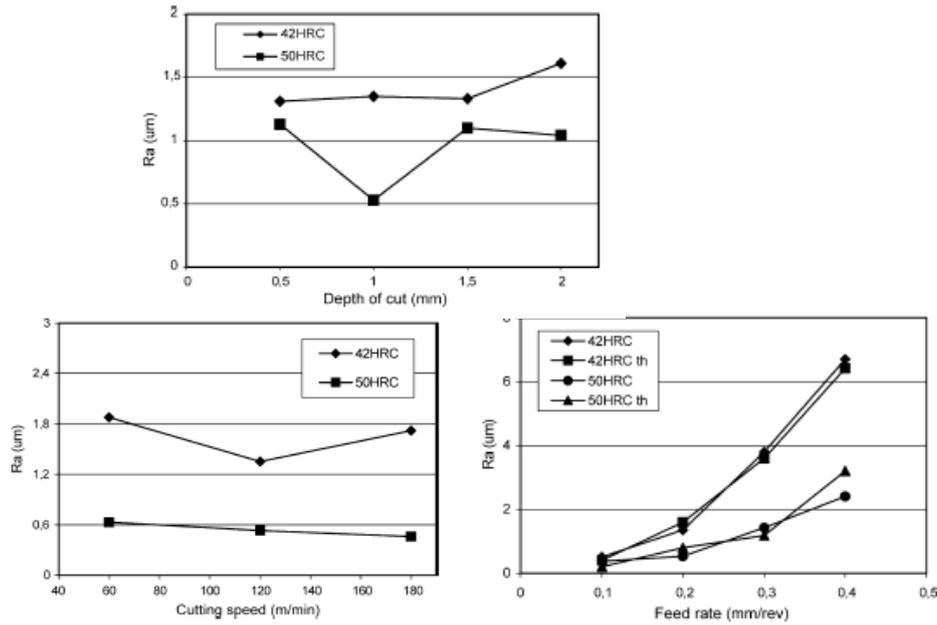


Figure I.41 Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface pour  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$ ,  $V_c = 120 \text{ m/min}$  et  $a_p = 1 \text{ mm}$  (acier AISI 4340) [43].

Davim et Figueira [44] ont étudié l'influence des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur les paramètres technologiques ( $VB$ ,  $K_s$  et  $Ra$ ) lors de l'usinage de l'acier AISI D2, avec des outils en céramique, en utilisant ANOVA. Les résultats ont montré que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) a une grande influence sur le l'usure ( $VC$ ) suivi par le temps de coupe ( $t$ ), tandis que la rugosité ( $Ra$ ) est influencée par le temps ( $t$ ) (Tableau I.4 et I.5).

Tableau I.4 ANOVA pour l'usure ( $VC$ )

Source of variance	SDQ	df <sup>a</sup>	Variance	F test	F 5%	P (%) <sup>b</sup>
A - $V_c$ (m/min)	1.082	2	0.541	137.7	3.27	57.4
B - $a$ (mm/rev)	0.058	2	0.029	7.3	3.27	2.7
C - $t_c$ (min)	0.258	2	0.129	32.9	3.27	13.4
AB	0.141	4	0.035	9.0	2.64	6.7
AC	0.135	4	0.034	8.6	2.64	6.4
BC	0.061	4	0.015	3.9	2.64	2.4
Error	0.138	35	0.004	-	-	11.1
Total	1.872	53	-	-	-	100

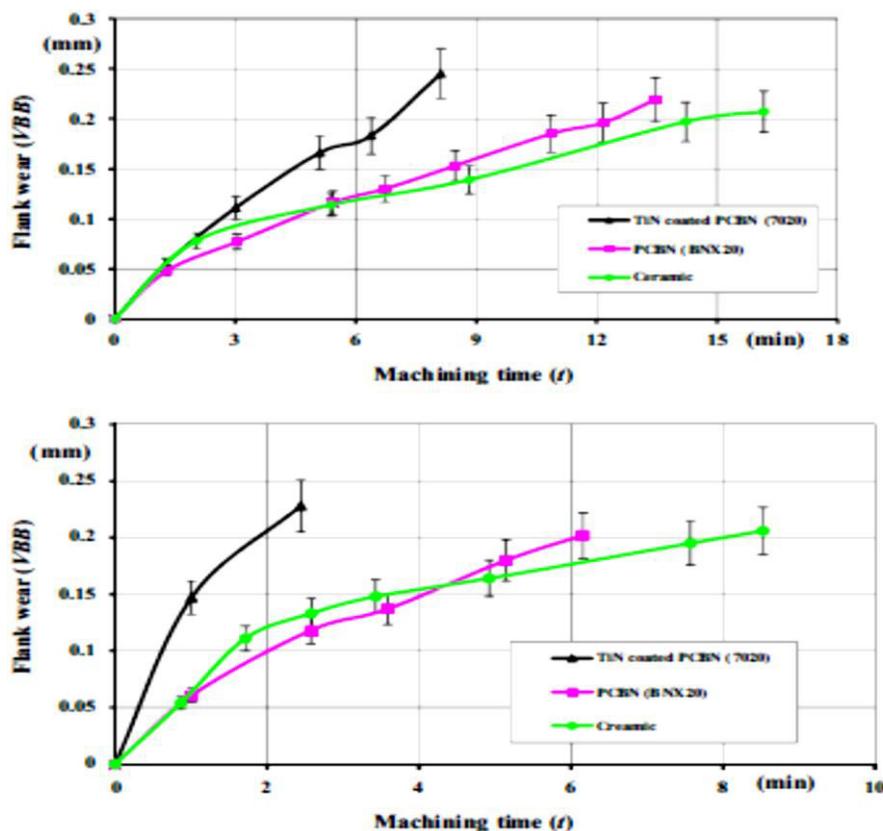
Tableau I.5 ANOVA pour la rugosité ( $Ra$ )

Source of variance	SDQ	df <sup>a</sup>	Variance	F test	F 5%	P (%) <sup>b</sup>
A - $V_c$ (m/min)	0.656	2	0.328	22.0	3.27	9.9
B - $f$ (mm/rev)	1.906	2	0.953	64.1	3.27	29.6
C - $t_c$ (min)	2.053	2	1.026	69.0	3.27	32.0
AB	0.477	4	0.119	8.0	2.64	6.6
AC	0.648	4	0.162	10.9	2.64	9.3
BC	0.071	4	0.018	1.2	2.64	0.2
Error	0.521	35	0.015	-	-	12.5
Total	6.331	53	-	-	-	100

**Davim et Figueira [45]** ont utilisé l'analyse ANOVA pour étudier l'influence des paramètres d'entrée et pour modéliser les paramètres de sortie à l'aide des inserts à outils conventionnels et wiper pendant le tournage dur de l'acier AISI D2. Les auteurs concluent que l'usinage avec la céramique wiper, permet d'obtenir une rugosité ( $Ra$ ) inférieure à  $0,8\mu\text{m}$ . Par conséquent, les qualités de surface (précision dimensionnelle) d'une pièce de précision mécanique,  $IT < 7$ , sont possibles.

**Singh et Dureja [46]** ont exploité la méthode de Taguchi et la méthode (RSM) afin de faire une étude comparative. Les auteurs ont constaté que l'optimisation fournie par la fonction de désirabilité (DF) était très proche des solutions optimales fournies par la méthode Taguchi.

**Shalaby et al [47]** ont évalué la performance des outils en céramique mixte ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ), PCBN et PCBN/TiN en termes d'usure lors du tournage de l'acier AISI D2 (52 HRC). L'étude comparative a révélé que la céramique mixte donne une longue durée de vie de l'outil avec des composants de force de coupe plus faibles. L'étude a également montré que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) a une grande influence sur ( $VB$ ) suivie par le temps de coupe ( $t$ ), alors que la rugosité est influencée par le temps ( $t$ ) (figure I.42).



**Figure I.42** courbe de l'usure pour différentes vitesse de coupe utilisant des différents matériaux de l'outil; (a)  $V_c = 100 \text{ m/min}$ , (b)  $V_c = 175 \text{ m/min}$  ou  $f = 0,05 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 0,06 \text{ mm}$  et  $r_e = 1,2 \text{ mm}$  [47].

**Sahin [48]** a effectué une comparaison de la durée de vie des outils de coupe en céramiques et CBN pendant l'usinage de l'AISI 52100 en utilisant la méthode Taguchi. Les résultats trouvés ont montré que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur dominant sur la durée de vie de l'outil, suivi par la dureté de l'outil et en dernier lieu l'avance ( $f$ ), aussi le CBN a montré des meilleures performances par rapport à la céramique.

**Neseli et autres [49]** ont choisi la méthode RSM comme technique essentielle pour optimiser l'effet des paramètres géométriques de l'outil sur la rugosité ( $R_a$ ) lors du tournage dur de l'acier AISI 1040 avec un outil en carbure (P25). Les auteurs ont constaté que le rayon du nez ( $r$ ) est le facteur statistiquement significatif sur la rugosité ( $R_a$ ).

**Dureja et autres [50]** ont mené une étude expérimentale sur les mécanismes d'usure des outils en céramique revêtu de TiN pendant le tournage dur de l'acier AISI D3. Ils ont conclu que les différents mécanismes d'usure observés sont l'usure par abrasion à des faibles vitesses de coupe ( $V_c$ ), faible avance ( $f$ ) et une dureté élevée de la pièce à usiner. De plus, à des vitesses modérées des réactions tribochimiques entre l'outil de coupe et la pièce à usiner ont provoqué la formation d'une couche protectrice et d'un bord accumulé (BUE). A haute température et à des vitesses élevées ( $V_c$ ), ces phénomènes n'existeront plus.

**Aslan et autres [51]** ont réalisé une étude expérimentale en utilisant les méthodes (Taguchi et ANOVA) pour étudier les effets combinés de trois paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ) sur deux paramètres de sortie ( $VB$  et  $R_a$ ). Ils ont constaté que ( $V_c$ ) est le seul facteur statistiquement significatif qui influence ( $VB$ ).

**Lima et autres [52]** ont effectué des essais de tournage à sec pour étudier l'usinabilité des aciers trempés (AISI 4340 et AISI D2) à différents niveaux de dureté avec des outils de coupe tels que le carbure revêtu et le PCBN. Les résultats montrent que les forces de coupe générées pendant l'usinage de l'acier AISI 4340 sont plus élevées avec des faibles vitesses d'avance ( $f$ ) et la profondeur de coupe ( $ap$ ), tandis que l'augmentation de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) améliore la rugosité de surface ( $R_a$ ) de la pièce usinée. L'outil était principalement soumis à l'usure abrasive lors du tournage de l'acier (42 HRC), tandis que la diffusion était présente pour l'acier (50 HRC).

**Quiza et autres [53]** ont mené une étude expérimentale pour prédire l'usure des outils de coupe en céramique ( $Al_2O_3+TiC$ ), lors du tournage dur de l'acier AISI D2 (60 HRC). Ils ont utilisé deux méthodes de modélisation, l'une basée sur des statistiques de régression et l'autre sur un réseau neuronal de perception multicouche. Ils ont conclu que le modèle ANN donnait de meilleures performances que le modèle de régression pour prédire la valeur précise de l'usure ( $VB$ ) de l'outil de coupe.

De plus, **Tebassi** et al [54] ont comparé les modèles de la rugosité de surface ( $Ra$ ) et l'effort tangentiel ( $Fz$ ) obtenus par les méthodes (RSM) et (ANN) en termes de meilleures ( $R^2$ , RMSE et MPE). Leurs résultats indiquent que l'ANN apporte un bénéfice maximal en termes de précision de 10,1% pour l'effort ( $Fz$ ) et 24,38% pour la rugosité ( $Ra$ ) par rapport au RSM.

**Dureja** et autres [55,56] ont utilisé la méthode RSM et la fonction de désirabilité (DF) dans leur étude pour optimiser les paramètres d'entrée ( $Vc$ ,  $f$ ,  $ap$  et dureté de la pièce) afin de minimiser l'usure ( $VB$ ) et la rugosité de surface ( $Ra$ ) de l'acier AISI H11 usiné avec de la céramique revêtue et du CBN.

**Chabbi** et al [57] ont proposé une méthode d'optimisation basée sur RSM et la fonction de désirabilité (DF) afin d'optimiser les paramètres d'entrée ( $Vc$ ,  $f$  et  $ap$ ). Cette optimisation consiste à fixer quatre objectifs, un minimum ( $Ra$ ,  $Fz$ ,  $Pc$ ) et un maximum (MRR).

## I. 12 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases nécessaires à la compréhension de cette étude :

- un rappel des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux.
- un bref descriptif des matériaux de coupe et des mécanismes d'endommagements des outils de coupe.
- un résumé sur les différents travaux scientifiques de recherche publiés ces 15 dernières années et qui concernent l'usinage dur ainsi que le comportement du couple outil matière et les différents méthodes de modélisation et optimisation utilisées.
- En se basant sur l'étude bibliographique, il ressort que les outils céramiques et les CBN sont des matériaux en pleine évolution par rapport aux carbures métalliques. Ils permettent des performances irréalisables avec les autres matériaux à outil du point de vue :
  - Ces outils offrent la possibilité d'usiner des matériaux difficilement usinables.
  - Ils permettent d'obtenir des qualités de surface, avec toute satisfaction, lors des opérations de finition.

La suite de ce chapitre porte sur la description : des caractéristiques de la matière testée dans cette étude, ainsi que celle des plaquettes de coupe utilisées, des différents équipements, et les méthodes de mesure mise en œuvre permettant d'aboutir à une caractérisation scientifique.

## Chapitre II

### ***Moyens et Procédures expérimentales***

## II.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre l'ensemble du matériel mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique, qui a servi à l'étude de l'évolution des différents paramètres technologiques d'usinage, tel que l'usure, la rugosité de surface, les efforts de coupe, afin de caractériser le comportement des outils en céramique mixte revêtue lors de l'usinage d'un acier fortement allié (**X210Cr12**) à différentes conditions de travail. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

## II.2 Matériels utilisés

### II.2.1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «**TOS TRENCIN**», modèle **SN 40C** de puissance sur la broche égale à 6,6KW. Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont limitées entre 45 et 2000 tr/min.

Les avances disponibles sur la machine sont : (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24; ...0,8) mm/tr (figure **II.1**).



*Figure II.1* Tour modèle *SN 40C*.

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

Les éprouvettes sont en acier inoxydable fortement allié de nuance **Afnor X210Cr12** avec une dureté de 56 HRC.

L'acier fortement allié X210Cr12 est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitements thermiques. Il a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à l'usure). Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit :

- Densité :  $7,7\text{g/cm}^3$ .
- Module d'élasticité : 21,10 MPA.
- Conductibilité thermique :  $20\text{ W/m.C}^\circ$ .

L'acier fortement allié X210cr12 est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filières d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois, peignes à rouler des filets, etc.... [58].

Pour l'étude de l'influence des conditions de coupe sur l'usure, les critères du rugosité ( $Ra$ ,  $Rz$  et  $Rt$ ) et les composantes de l'effort ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ), nous avons usiné des éprouvettes de diamètre  $\Phi=70\text{mm}$  et de longueur  $L=350\text{mm}$  pour (figure II.2).

La photo des éprouvettes utilisées est représentée dans la figure II.2.



*Figure II.2 Pièces utilisées.*

La composition chimique de l'acier **X210Cr12** est représentée dans le tableau II.1.

*Tableau II.1 Composition chimique de l'acier X210Cr12*

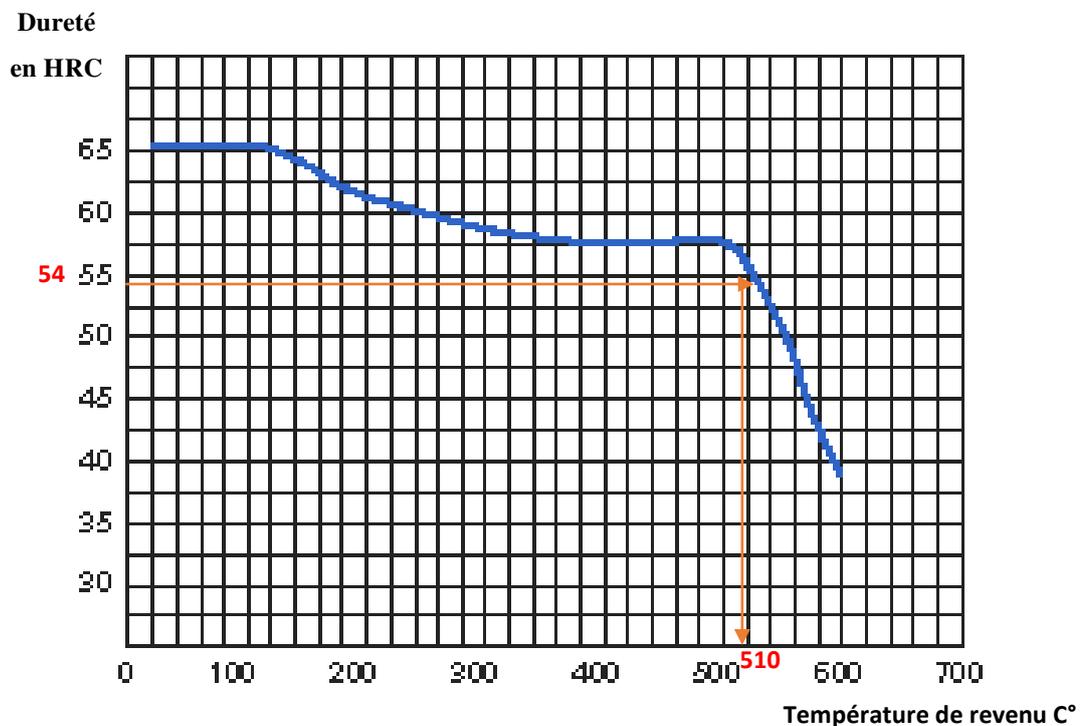
Composition	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	Cu	p	S
(Wt. %)	2	11,09	0,277	0,55	0,44	0,207	0,13	0,036	0,056

Pour le traitement thermique des éprouvettes, nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu, ce qui a augmenté la dureté des éprouvettes à 54 HRC (tableau II.2)

*Tableau II.2 Conditions de traitements thermiques.*

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement thermique		Temps de maintien
			Trempe	Revenu	
X210Cr12	27 HRC	54 HRC	960°C	510°C	60 minutes

La figure II.3 présente le diagramme de revenu de l'acier X210Cr12 établi par le fabricant [BÖHLER].



*Figure II.3 Diagramme de revenu ( $HRC=f(T^{\circ}revenu)$ ).*

### II.2.3 Plaquettes de coupe

La plaquette utilisée pour les essais d'usinage est une plaquette en céramique mixte revêtue (CC6050), elle est amovible de forme carrée (figure II.4) à fixation par trou central. Toutes les informations relatives à la plaquette de coupe sont données au tableau II.3:

**Tableau II.3** Informations relatives aux plaquettes utilisées.

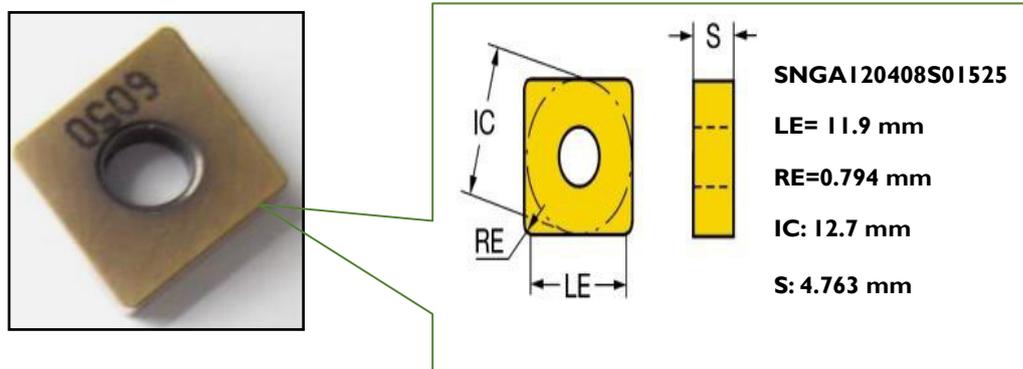
Matériau de l'outil	Désignation	Géométrie	Marque	Composition
Céramique revêtue	CC6050	CNGA 12 04 08S01525	Sandvik	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30%TiC +TiN

Les propriétés de la céramique revêtue (**CC6050**) notamment sa dureté à chaud très élevée, sa très grande stabilité thermique et chimique, sa haute résistance à la chaleur est très appropriée pour le tournage dur. Le revêtement permet de compenser l'absence de refroidissement.

Elle est ainsi particulièrement recommandée pour toutes les opérations d'usinage à grande vitesse et à sec.

Les plaquettes ont un revêtement PVD (à base de nitrure de titane).

- Dépôt : Base TiN
- Dureté (HV) : 2100
- Coefficient de frottement (acier à sec) : 0,5. - Epaisseur : 3-7 $\mu$ m
- Température max d'utilisation en °C : 700

**Figure II.4** Géométrie de la Plaquette CC6050 utilisée.

## II.2.4 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil sur lequel se fixe la plaquette mécaniquement par trou central (figure II.5). Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette. La géométrie du porte outil est donnée au tableau II.4.

**Tableau II.4** Caractéristiques du porte plaquette utilisé

Désignation	Marque	$\alpha$	$\gamma$	$\chi$	$\lambda$
PSBNR 2525 M12	SANDVIK Coromant	6°	-6°	75°	-6°

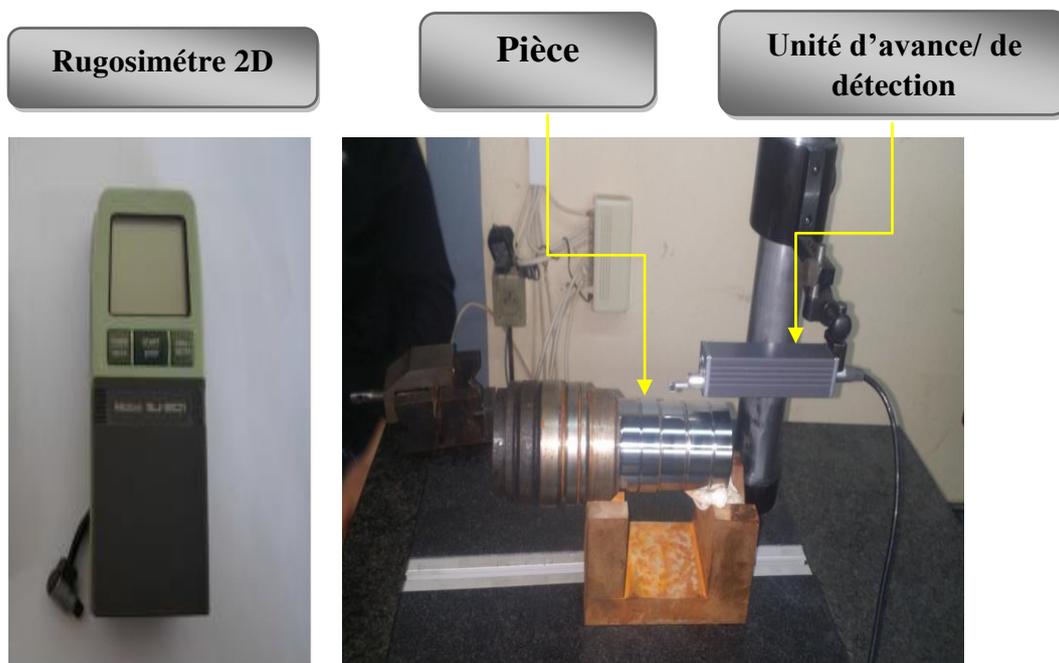
**Figure II.5** Porte outil utilisé.

## II.2.5 Appareillages de mesure utilisés

### II.2.5.1 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $Ra$ ) ( $Rt$ ), ( $Rq$ ) et ( $Rz$ ), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo), la plage de mesure des critères de rugosité est de (0,05 à 40 $\mu$ m) pour ( $Ra$ ), la mesure de la rugosité est présentée dans la (figure II.6).

Les mesures sont répétées à trois reprises sur la surface de la pièce usinée à trois lignes de référence également positionnées à 120° et le résultat final est une moyenne de ces valeurs.

**Figure II.6** Mesure de la rugosité.

### II.2.5.2 Rugosimètre 3D

Dans le but de mieux montrer la topographie de la surface usinée en tournage dur, un appareil de métrologie optique Altisurf 500 (Figure II.7) a été utilisé afin de donner une vision topographique tridimensionnelle. Cet appareil permet d'étudier finement la topographie des surfaces usinées des échantillons. Cet instrument se compose:

- D'une base en granite parfaitement plane;
  - D'une table de déplacement motorisée de haute précision permettant le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y pouvant balayer une surface ( $x \times y$ ) qui peut atteindre (100mm x 100mm) ;
  - D'une plateforme rectangulaire permettant de poser l'échantillon à mesurer ;
  - D'un support de capteur optique motorisé qui se déplace suivant l'axe Z pouvant atteindre un parcours de 100 mm ;
  - D'une télécommande externe qui est connectée à la station de mesure, elle permet de déplacer les axes et de paramétrer une mesure à distance ;
  - D'un ensemble qui se compose ; d'un boîtier de contrôle Altimate, d'une interface graphique et d'une unité centrale sur laquelle est installé un logiciel de traitement « Phénix » ;
- L'exécution et le traitement des mesures est réalisé par le logiciel Phénix qui est un interface de l'Altisurf 500. Ce logiciel permet de configurer l'ensemble des paramètres et de programmer. Il se décompose en une partie graphique et une partie serveur qui dialogue en permanence avec le matériel et fait appel à différentes cartes placées dans le PC industriel. Une fois que la mesure est réalisée, elle est analysée par le logiciel d'analyse Altimap.

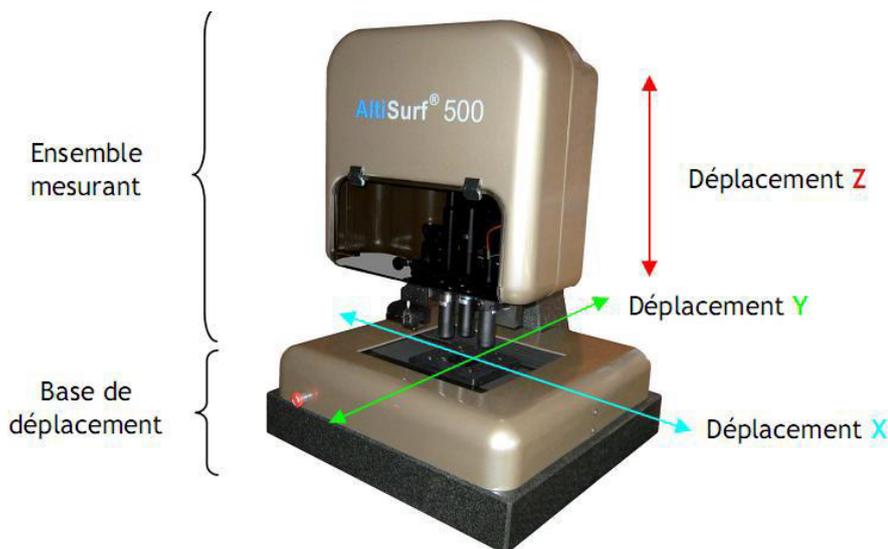
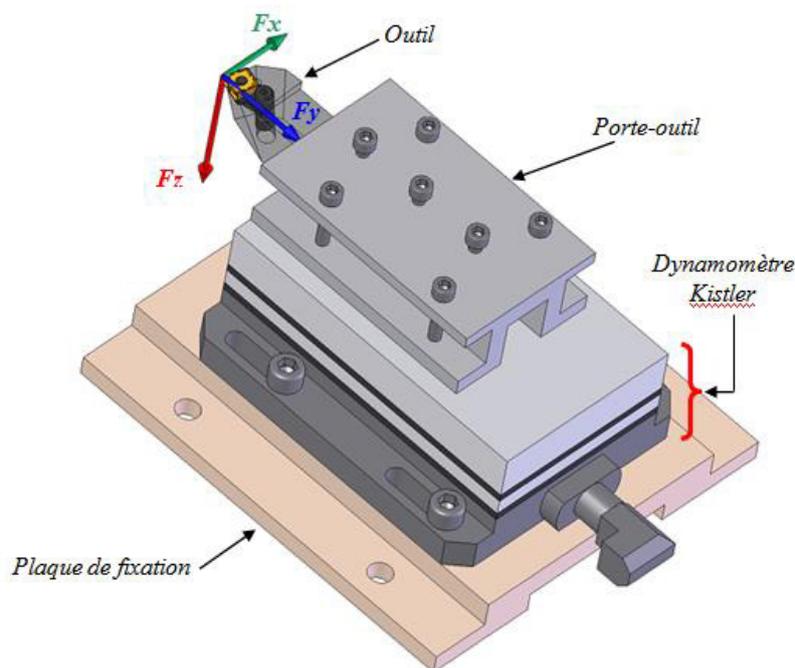


Figure II-7: Station de métrologie optique Altisurf 500

### II.2.5.3 Mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (**KISTLER 9257 B**), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe.

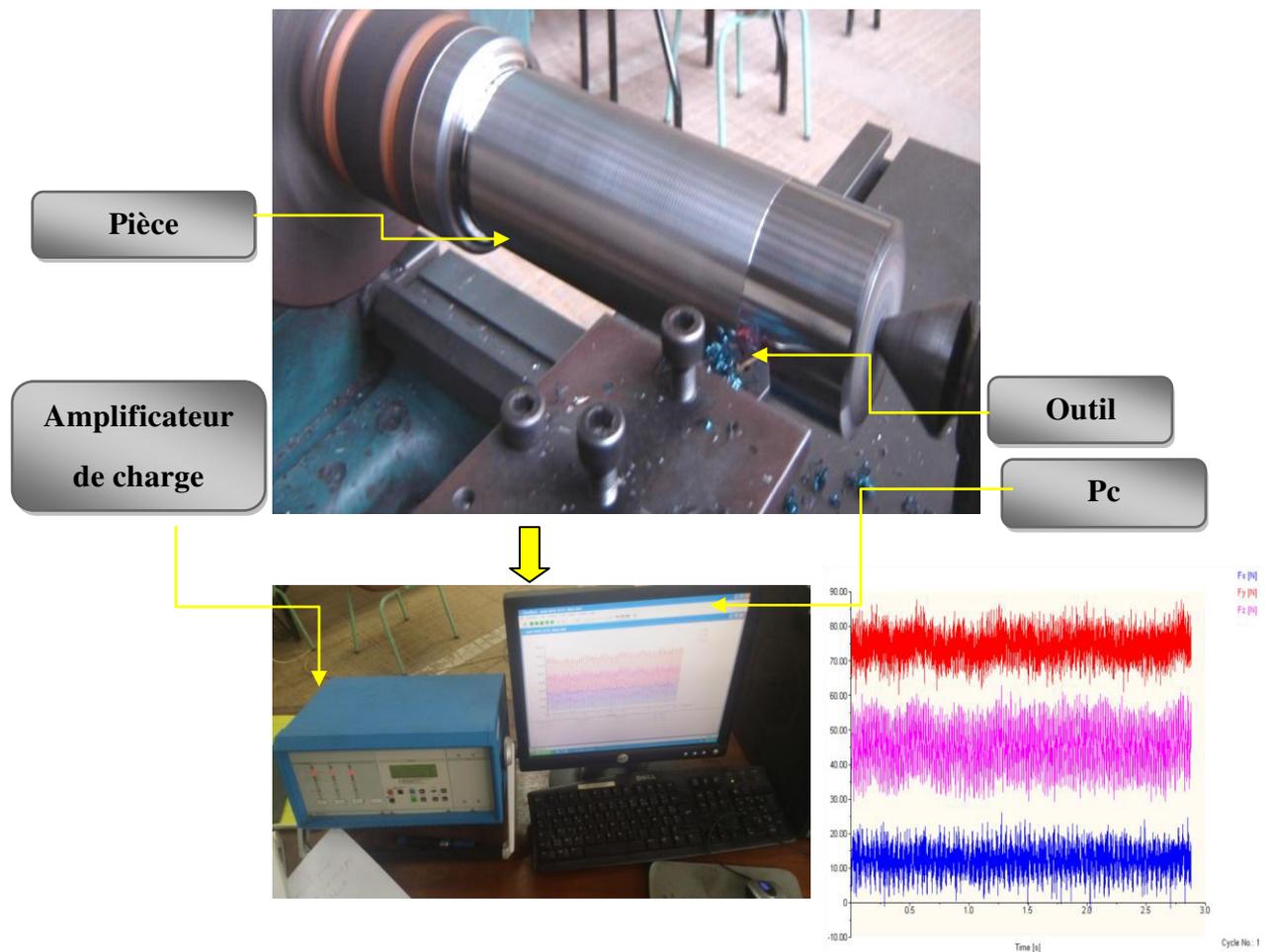
Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel (**DYNOWARE**). Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est animé du mouvement d'avance. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (figure **II.8**).



**Figure II.8** Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties par les capteurs piézo-électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

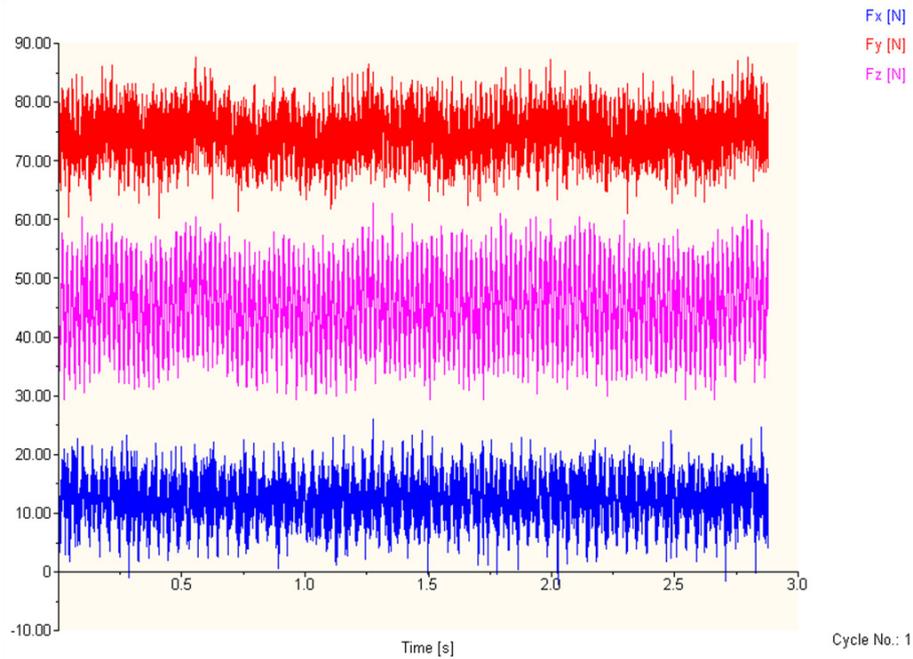
Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (**DYNOWARE**) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimé en trois composantes (figure **II.9**).



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

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (*DYNOWARE*) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes.

La figure **II.10** présente un exemple d'acquisition qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (*Effort axiale :  $F_x$ , Effort radial :  $F_y$  et Effort tangentiel :  $F_z$* ).



**Figure II.10** Exemple d'acquisition du logiciel « *DYNOWARE* ».

#### II.2.4.4 Microscope pour la mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (*VB*) et entaille (*VN*) est un dispositif binoculaire de marque (*Visual Gage 250*), avec un ordinateur équipé d'un logiciel *Visual Gage 2.2.0*. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figure **II.11**).

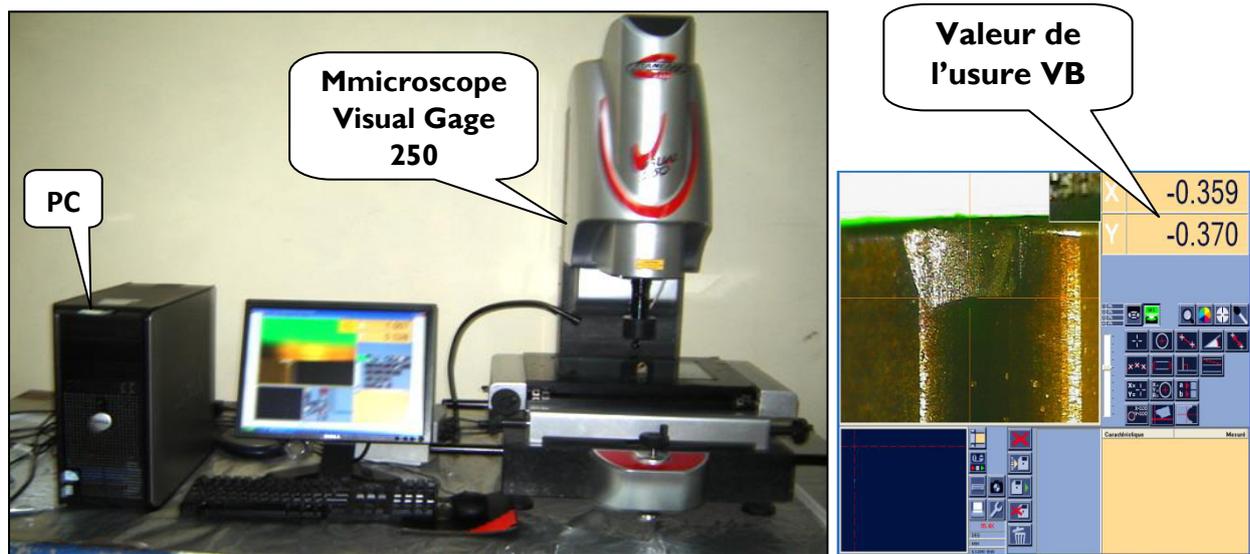


Figure II.11 Microscope pour la mesure de l'usure (Visual Gage 250).

### II.3. Plan d'expérience

#### II.3.1 Essais paramétriques (Méthode unifactorielle)

On fait appel à cette méthode pour évaluer l'action d'un seul facteur  $X$  sur un paramètre  $Y$ . L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné  $X$  [ $X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$ ], tout en maintenant tous les autres facteurs constants (tableau II.5).

Pour chaque  $X = X_i$ , on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de  $Y_i$ , ( $i = 1 \div N$ ). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation  $Y = f(X)$ .

**Tableau II.5** Réalisation d'essais d'après la méthode unifactorielle.

N°	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	X	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	-	Y <sub>g</sub>	-	Y <sub>n</sub>	Y <sub>moy</sub>
1	X <sub>1</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>	-	Y <sub>g1</sub>	-	Y <sub>n1</sub>	Y <sub>moy1</sub>
2	X <sub>2</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>22</sub>	-	Y <sub>g2</sub>	-	Y <sub>n2</sub>	Y <sub>moy2</sub>
3	X <sub>3</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>23</sub>	-	Y <sub>g3</sub>	-	Y <sub>n3</sub>	Y <sub>moy3</sub>
i	X <sub>i</sub>	Y <sub>1i</sub>	Y <sub>2i</sub>	-	Y <sub>gi</sub>	-	Y <sub>ni</sub>	Y <sub>moyi</sub>
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X <sub>N</sub>	Y <sub>1N</sub>	Y <sub>2N</sub>	-	Y <sub>gN</sub>	-	Y <sub>nN</sub>	Y <sub>moyN</sub>

### II.3.2 Méthode multifactorielle

Cette méthode de recherche expérimentale consiste à déterminer avant tout le nombre d'essais nécessaires. Ce nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (*facteurs d'entrées*) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans cette étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (*Vc, f et Tm*) sur les diverses fonctions d'optimisation (*Usure, rugosité et efforts de coupe*).

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre. Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

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

Où :

N : Nombre d'essais

q : Nombre de niveaux de variations des facteurs de base.

k : Nombre de facteurs de base.

Dans le premier cas nous avons deux facteurs de base ( $k = 2$ ) et chaque facteur à trois niveaux, ce qui nous donne un plan de 09 essais.

Nous nous servirons des plans d'expérience pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage (usure, rugosité, effort de coupe, tenue, puissance de coupe et volume de copeau enlevé).

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau **II.6**.

**Tableau II. 6** Matrice de planification pour un plan  $3^2$ .

N° d'essai	Facteurs			
	Valeurs codifiées des facteurs		Valeurs réelles	
	$X_1$	$X_2$	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)
1	-1	-1	80	0,08
2	-1	0	80	0,11
3	-1	+1	80	0,14
4	0	-1	110	0,08
5	0	0	110	0,11
6	0	+1	110	0,14
7	+1	-1	140	0,08
8	+1	0	140	0,11
9	+1	+1	110	0,14

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

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

Les essais sont numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. Les niveaux de paramètre ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company). La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau **II.7**.

**Tableau II.7** Matrice de planification pour un plan  $3^3$ .

N° d'essai	Facteurs					
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Tm (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Tm (min)
	Valeurs codifiées des facteurs			Valeurs réelles		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	80	0,08	4
1	-1	-1	-1	80	0,08	8
2	-1	-1	0	80	0,08	12
3	-1	-1	+1	80	0,11	4
4	-1	0	-1	80	0,11	8
5	-1	0	0	80	0,11	12
6	-1	0	+1	80	0,14	4
7	-1	+1	-1	80	0,14	8
8	-1	+1	0	80	0,14	12
9	-1	+1	+1	110	0,08	4
10	0	-1	-1	110	0,08	8
11	0	-1	0	110	0,08	12
12	0	-1	+1	110	0,11	4
13	0	0	-1	110	0,11	8
14	0	0	0	110	0,11	12
15	0	0	+1	110	0,14	4
16	0	+1	-1	110	0,14	8
17	0	+1	0	110	0,14	12
18	0	+1	+1	140	0,08	4
19	+1	-1	-1	140	0,08	8
20	+1	-1	0	140	0,08	12
21	+1	-1	+1	140	0,11	4
22	+1	0	-1	140	0,11	8
23	+1	0	0	140	0,11	12
24	+1	0	+1	140	0,14	4
25	+1	+1	-1	140	0,14	8
26	+1	+1	0	140	0,14	12
27	+1	+1	+1	80	0,08	4

Toute la planification des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel Design-Expert (version 10).

C'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse des expériences. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- établissement du but et des objectifs des essais ;
- sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
- choix du type de plan d'expérience ;
- conduite des essais ;
- détermination des facteurs influents ;
- modélisation rapide des réponses ;
- recherche des paramètres optimaux ;
- validation des résultats.

#### II.4 Conditions de coupe

Les essais de tournage ont été réalisés sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées dans les tableaux (II.8, II.9 et II.10) :

**Tableau II.8** Conditions de coupe pour les essais unifactorielle

Niveau	Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	Avance $f$ (mm/tr)	Profondeur de passe $a_p$ (mm)
1	72	0,08	0,1
2	90	0,12	0,2
3	120	0,14	0,3
4	170	0,18	0,4
5	230	0,2	0,5

A la fin de chaque opération d'usinage, on mesure:  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ .

Les essais sont effectués en tournage. La pièce est maintenue en montage mixte.

\* 1<sup>ère</sup> cas (plan 9 essais). L'usure admissible [VB] = 0,3mm.

**Tableau II.9** Conditions de coupe de la matrice de planification pour un plan de 9 essais  
(Essais multifactoriels)

Les Paramètres constant	Valeur	Les paramètres variables	Valeurs
$a_p(mm)$	0,2	$V_c (m/min)$	80; 110 ;140
		$f (mm/tr)$	0,08; 0,11; 0,14

A la fin de chaque opération d'usinage, on mesure:  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ .

\* 2<sup>ème</sup> cas (plan 27 essais).

**Tableau II.10** Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 27 essais  
(Essais multifactorielles)

Niveau	Vitesse de coupe $V_c (m/min)$	Avance $f (mm/tr)$	Le temps de coupe $T_m (min)$	La profondeur de passe $a_p (mm)$
1	80	0,08	4	0,2
2	110	0,12	8	
3	140	0,14	12	

A la fin de chaque opération d'usinage, on mesure:  $VB$ ,  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ .

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé (machine-outil, éprouvettes, plaquette de coupe, porte-outil, rugosimètre .....). La planification des expériences et les conditions de coupe ont été établies. Dans le chapitre qui suit, nous présentons les résultats trouvés ainsi que le traitement et l'analyse des résultats.

## Chapitre III

***Usinabilité de l'acier fortement allié  
X210Cr12 et modélisation du  
processus***

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'étude de l'usinabilité de l'acier fortement allié X210Cr12 (54 HRC) avec l'outil en céramique mixte revêtue (CC6050). Les critères de l'usinabilité sont traités en termes de l'effort de coupe, la pression spécifique de coupe, la puissance de coupe, la rugosité de surface et l'usure, et cela en fonction de l'évolution des éléments du régime de coupe (avance par tour, vitesse de coupe et profondeur de passe).

Nous présentons aussi les résultats pour un plan de factoriel ( $L_9$ ), de la modélisation des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe ( $V_c$  et  $f$ ) et les paramètres technologiques d'usinage étudiés (effort de coupe, rugosité de surface, tenue, puissance et volume de copeau enlevé). Le logiciel statistique *Design-Expert 10* est utilisé afin de faire l'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse. L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés et de proposer des modèles mathématiques de prédiction pour chaque phénomène étudié.

### III.2 Etude de l'usinabilité

#### III.2.1 Rugosité de surface

La figure III.1 expose les résultats des essais unifactoriels de l'évolution des trois critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) en fonction de ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ). La figure III.1(a) montre les résultats de l'évolution des critères de rugosité en fonction de ( $V_c$ ) tout en gardant l'avance et la profondeur de passe constantes ( $f=0,08$  mm/tr et  $a_p= 0,2$ mm). On observe qu'il y a une diminution des critères de la rugosité de surface pour les trois paramètres avec l'augmentation de la vitesse de coupe. A la vitesse de 72 m/min la rugosité de surface est à son maximum, au-delà de cette valeur, l'état de surface devient meilleur aux vitesses de coupe élevées. Lorsque la vitesse augmente de 72 à 230m/min, on enregistre une diminution des critères de la rugosité de 48,12% pour ( $R_a$ ), 17,03% pour ( $R_z$ ) et 11,26% pour ( $R_t$ ).

L'analyse des résultats de la figure III.1(b), montre que les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) sont minimaux pour la plus faible avance. Ils augmentent avec l'élévation de celle-ci, l'augmentation de ( $R_a$ ) est moins faible que l'augmentation de ( $R_z$ ) et ( $R_t$ ). On remarque aussi que jusqu'à la valeur de  $f=0,16$ mm/tr, la valeur de la rugosité ( $R_a$ ) ne dépasse pas le

01micron. L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,2 mm/tr fait augmenter d'environ 4,31 fois la valeur de ( $Ra$ ), 3,24 fois la valeur de ( $Rz$ ) et 3,12 fois la valeur de ( $Rt$ ). Cette augmentation des critères de rugosité en fonction de l'avance est liée à la cinétique de la coupe en tournage. La combinaison du mouvement de rotation de la pièce avec l'avance rectiligne de l'outil de coupe génère des sillons hélicoïdaux. Plus l'avance ( $f$ ) est élevée plus les sillons sont profonds et dégradent l'état de surface.

La figure **III.1(c)** présente l'évolution des critères de rugosité en fonction de la profondeur de passe. Il est clair que l'augmentation de ( $ap$ ), induit une augmentation des trois critères, mais cette augmentation est moins importante que l'avance ( $f$ ).

Avec l'augmentation de la profondeur de passe, le volume de copeau enlevé devient important ce qui induit plus d'arrachement de la matière et cela dégrade la surface usinée et fait augmenter la rugosité de surface [59]. La valeur maximale de la rugosité ( $Rt$ ) n'a pas dépassée la valeur de  $4\mu\text{m}$ , contrairement à la valeur maximale de ( $Rt$ ) en fonction de l'avance qui a presque atteint la valeur de  $7\mu\text{m}$ . Cela prouve que l'influence de ( $f$ ) est prédominante par rapport à ( $ap$ ). Pour les valeurs de profondeur de passe prises de 0,1 à 0,5mm, on enregistre une augmentation des critères de rugosité ( $Ra$ ,  $Rz$  et  $Rt$ ) de (70,47 ; 51,72 et 43,82) %.

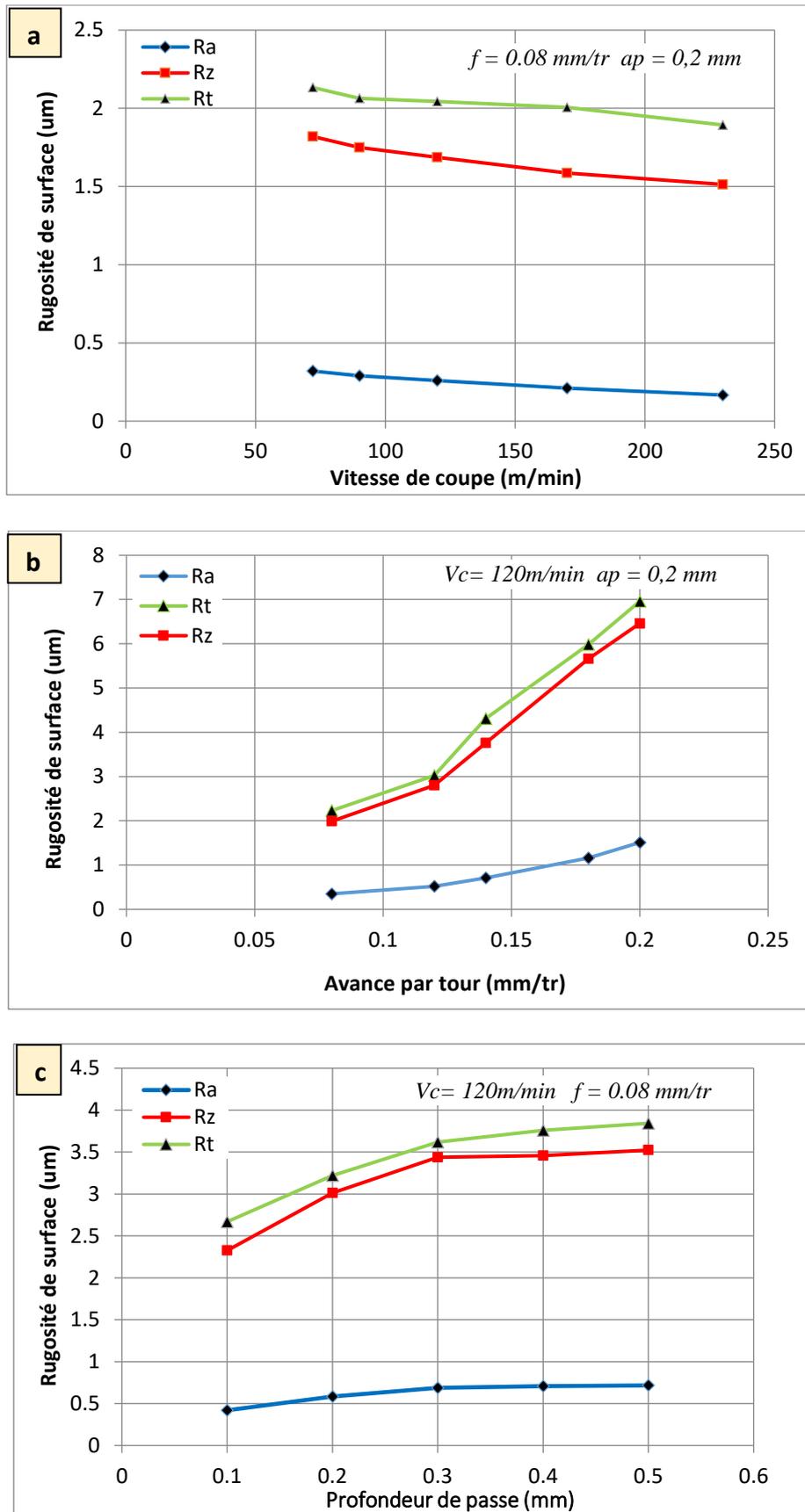


Figure III.1 Evolution des critères de la rugosité ( $Ra$ ,  $Rz$  et  $Rt$ ) en fonction de :  
 a) vitesse de coupe b) avance par tour c) profondeur de passe

## III.2.2 Efforts de coupe et pressions spécifiques de coupe

### III.2.2.1 Efforts de coupe

La figure **III.2** illustre l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) en fonction des paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ). La figure **III.2(a)** montre les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe. L'analyse des résultats montre que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) n'a pas une influence significative sur les efforts de coupe, on observe une légère diminution des trois composantes. Cette diminution est due à l'augmentation de la température dans la zone de coupe, rendant le métal plus malléable et facile à usiner et s'écoule rapidement sur la surface d'attaque de l'outil [28]. L'augmentation de la vitesse de coupe de 72 à 230 m/min, conduit à une diminution des trois composantes de l'effort ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) de (25,61; 23,86; 25,60)% respectivement.

La figure **III.2(b)** présente l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe en fonction de l'avance par tour. L'analyse des résultats montre que les efforts de coupe sont minimaux pour la plus faible avance (0,08mm/tr). On remarque une petite augmentation avec l'élévation de celle-ci. Avec l'augmentation de l'avance, la section du copeau cisailé accroît et le volume de copeau devient important et par conséquent la force demandée pour l'enlèvement de la matière s'accroît, d'où le métal résiste plus à la rupture et nécessite des efforts plus grands pour l'enlèvement du copeau. L'analyse des résultats montre que l'effort radial est prépondérant par rapport à l'effort tangentiel et axial et cela montre clairement que nous sommes dans le contexte de l'usinage dur. Pour une augmentation de l'avance de 0,08 à 0,2 mm/tr, on enregistre une élévation de (20,01; 30,79 et 36,57) % de ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) respectivement.

La figure **III.2(c)** expose les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. On observe une augmentation sévère des trois composantes de l'effort comparativement à l'augmentation de l'avance par tour. Il est clair que les efforts de coupe sont plus sensibles à l'augmentation de la profondeur de passe. L'accroissement des efforts de coupe est causé par l'augmentation de la quantité de matière à enlever. Avec l'augmentation de la profondeur de passe de (0,1 à 0,5) mm, cela conduit à une élévation des trois composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) successivement de (1776,35 ; 289,31 et 375,37)%. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Poulachon [60] lors de l'usinage des aciers durs (figure **III.3**).

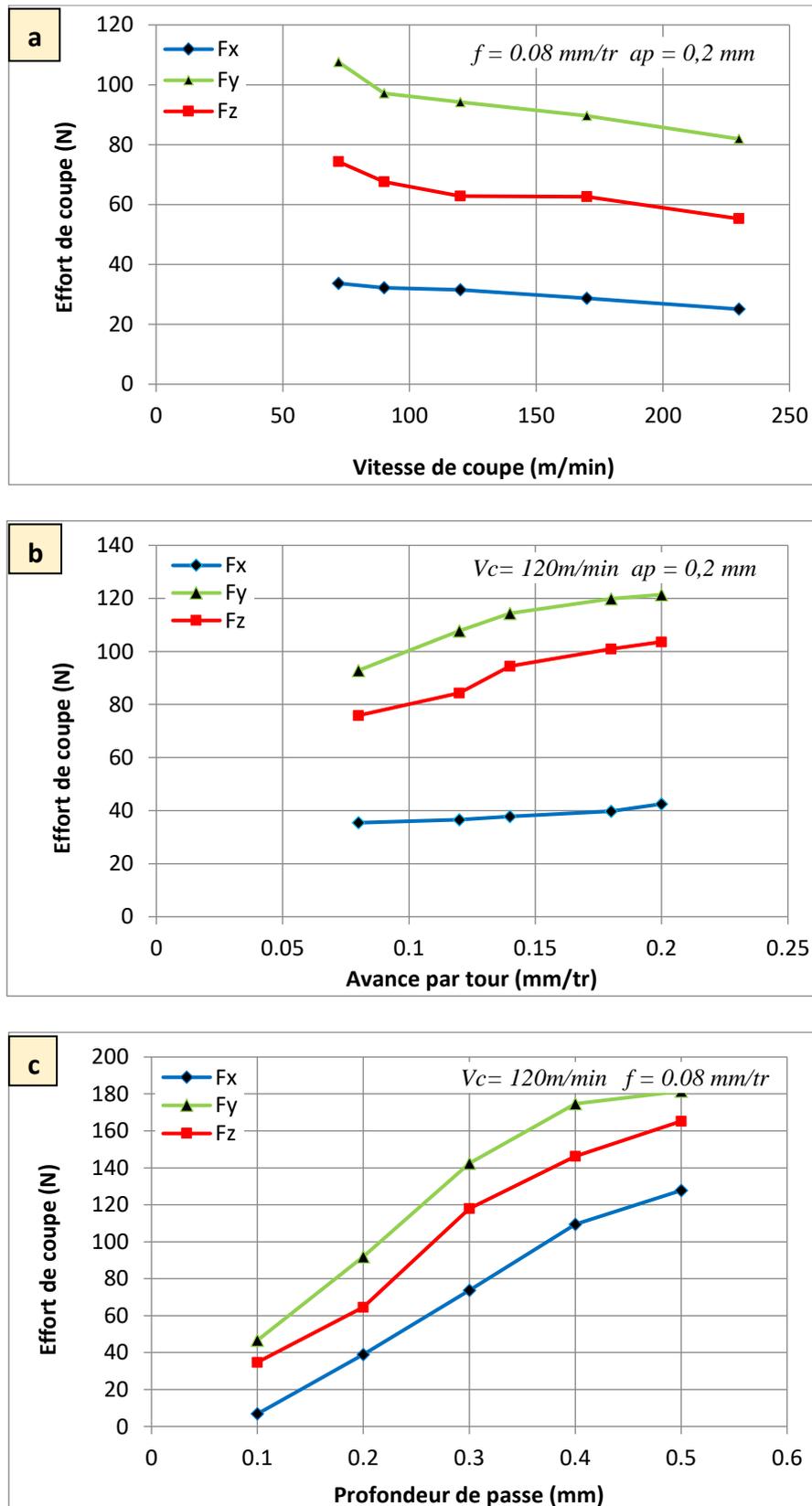
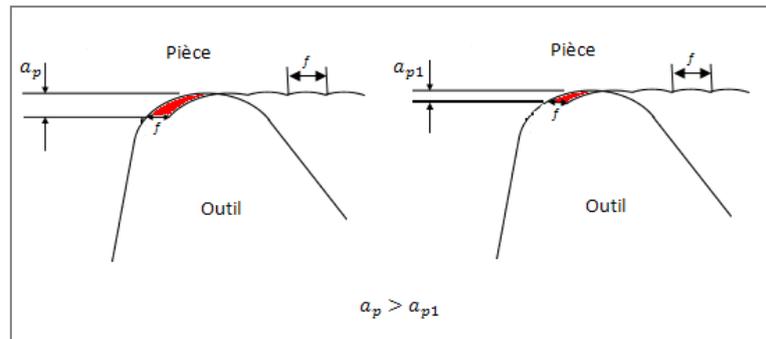


Figure III.2 Evolution des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) en fonction de :  
 a) vitesse de coupe b) avance par tour c) profondeur de passe

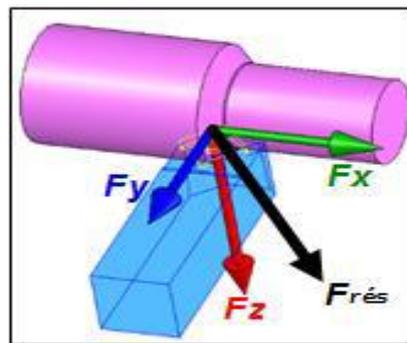


**Figure III.3** Section du copeau à deux profondeurs de passes différentes [60].

### III.2.2.2 Effort résultant

L'effort résultant est la racine des trois composantes des efforts de coupe au carrée, l'effort résultant s'exprime par la formule suivante :

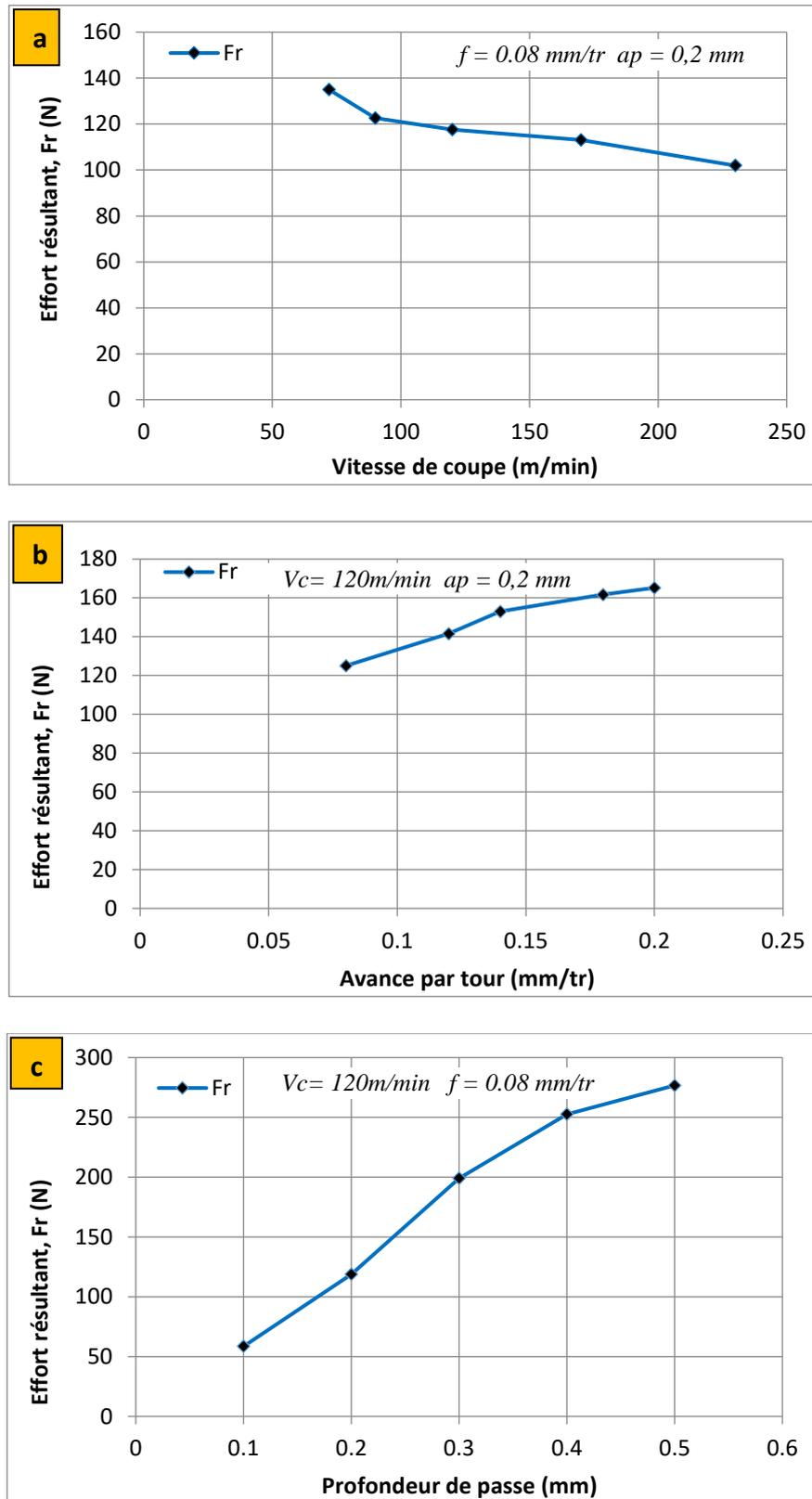
$$F = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad \text{(III.1)}$$



**Figure III.4** Effort résultant.

La figure **III.5** présente l'évolution de l'effort résultant en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ). L'analyse des résultats (Figure **III.5(a)**) montre une décroissance de l'effort résultant avec l'augmentation de vitesse de coupe. On remarque qu'à la vitesse  $V_c=72$  m/min l'effort résultant est à son maximum et prend la valeur 135N, tandis qu'à la vitesse 230m/min l'effort résultant est à son bas niveau prenant ainsi la valeur de 101,93N, c à d une diminution de 24,49%. Les résultats présentés sur les figures (**III.5(b)** et **III.5(c)**) illustrent l'évolution de l'effort résultant en fonction de l'avance et la profondeur de passe. L'analyse des résultats montre une croissance nette de l'effort résultant pour une augmentation de la profondeur de passe comparativement à l'avance. Avec l'augmentation de ( $a_p$ ) de (0,1 à 0,5) mm de, l'effort

résultant augmente énormément avec 372,62%, d'autre part, cette augmentation atteint 32,13%, lorsque l'avance passe de (0,08 à 0,2) mm/tr.



**Figure III .5** Evolution de l'effort résultant en fonction de :  
 a) vitesse de coupe b) avance par tour c) profondeur de passe.

### III.2.2.3 Pression spécifique

Pour définir la pression spécifique de coupe, on admet que l'énergie nécessaire à l'enlèvement d'un volume donné de copeau est proportionnelle à ce volume. Des lors, nous avons :

$$Ki = \frac{Fz}{f.ap} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{III.2})$$

$Fz$       effort tangentiel (N) ;  
 $f$         avance (mm/tr) ;  
 $ap$       profondeur de passe (mm).

La figure III.6 présente l'évolution de la pression de coupe en fonction de paramètres de coupe ( $Vc$ ,  $f$ ,  $ap$ ). Les résultats montrent une décroissance lorsque l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de passe varie de (0,08 à 0,2 mm/tr), (72 à 230 m/min) et (0,1 à 0,5mm) respectivement.

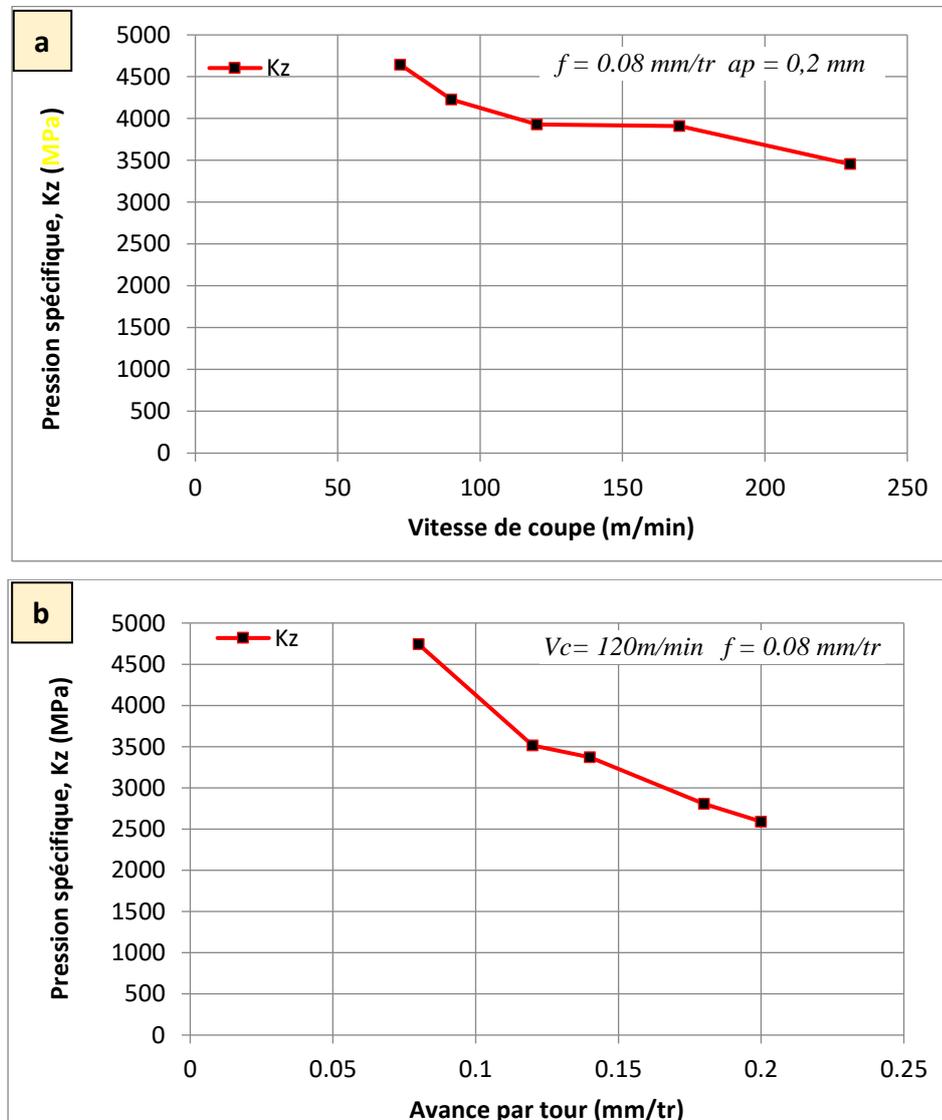
La figure III.6(a) illustre l'évolution de pression de coupe ( $Kz$ ) en fonction de la vitesse de coupe à  $f = 0,08$  mm/tr et  $ap = 0,20$  mm. L'analyse de cette figure montre que la pression de coupe diminue lorsque la vitesse de coupe augmente, ces résultats sont en accord avec les travaux de [61]. Cela peut être expliqué par les frottements élevés sur la pointe de l'outil de coupe à des faibles vitesses de coupe, ce qui induit des pressions importantes,

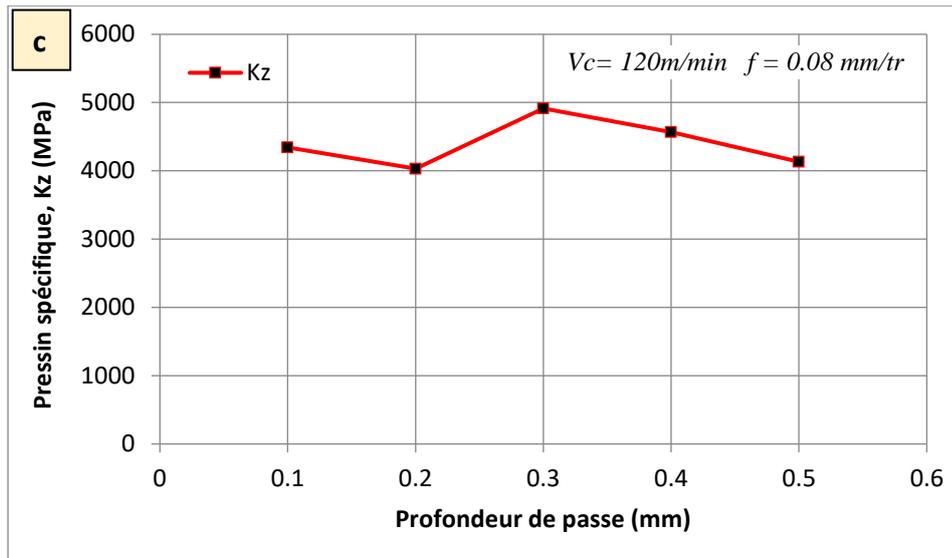
La première période (zone I) [ $Vc = 72$  à  $120$ ] m/min est caractérisée par une diminution importante de l'effort spécifique qui correspond à un chargement important de l'arête de coupe. La pression enregistrée dans cette zone est élevée, comme par exemple, à  $Vc = 72$  m/min, la pression tangentielle ( $Kz$ ) atteint la valeur (4643,12) N/mm<sup>2</sup>. La fin de cette période (zone I) conduit à la détermination de la vitesse minimale du domaine d'utilisation du couple Outil-Matière [62].

La deuxième période (zone II) [ $Vc = 120$  à  $170$ ] m/min est caractérisée par une plage où la pression de coupe ( $Kz$ ) se stabilise un peu (chute moins importante) et où le décrochage se fait à partir de  $Vc = 120$  m/min. En pratique cette zone constitue la plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe, qui se termine par la détermination de la vitesse de coupe maximale. A  $Vc = 230$  m/min, la pression spécifique arrive à son niveau bas (3454,37) N/mm<sup>2</sup>, ce qui est préférable à l'outil. Cela a pour effet de minimiser les contraintes qui provoquent la rupture brusque de l'arête de coupe. Mais à ce stade, il faut faire un compromis entre les pressions basses à grande vitesse de coupe et aussi l'usure de l'outil aux vitesses de coupe élevées.

On remarque d'après la figure **III.6(b)** qu'avec l'augmentation de l'avance la pression de coupe a un comportement décroissant. Pour une faible avance ( $f=0,08$ ) mm/tr, on enregistre une pression extrêmement élevée  $K_z = 4741,87\text{N/mm}^2$ . Alors une chute de pression de 45,37% mm/tr est observée lorsque ( $f$ ) passe de 0,08 mm/tr à 0,2 mm/tr. Des résultats semblables ont été trouvés par yallese et Bouchelaghem [27], [31] lors du tournage dur de l'acier AISI D3 par le CBN et la céramique CC6050.

L'évolution de pression de coupe ( $K_z$ ) en fonction de la profondeur de passe est présentée à la figure **III.6(c)**. Ainsi l'élévation de la profondeur de passe de 0,2 à 0,3 mm conduit à une élévation de la pression spécifique de 21,87%, suivie par une diminution entre l'intervalle (0,3 et 0,5 mm) de 15,93% [40]. Cet intervalle de la variation de la profondeur de passe sera idéal pour le bon fonctionnement de l'outil car les pressions spécifiques sont faibles.





**Figure III.6** Evolution de la pression spécifique en fonction de :  
 a) vitesse de coupe b) avance par tour c) profondeur de passe

### III.2.3 Puissance de coupe

L'étude et l'évaluation des forces de coupe générées en usinage permet principalement de dimensionner les outils et les éléments de la machine - outil (porte-pièce, etc) et aussi pour évaluer la puissance de coupe et permettre le choix rationnel de la machine.

La puissance de coupe est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{F_z \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}, \quad \text{W} \quad \text{(III.3)}$$

$P$  : puissance de coupe (W),  $F_z$  : effort principal de coupe (N),  $V_c$  : vitesse de coupe (m/min).

La figure III.7 présente l'évolution de la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction des paramètres d'usinage ( $V_c, f, ap$ ). L'analyse des résultats montre une croissance de la puissance de coupe pour les trois facteurs, ces résultats sont similaires aux résultats de [40] et [63]. Pour une augmentation de la vitesse de coupe de 72 à 230, on enregistre une élévation importante de la puissance jusqu'à 0,211 (KW), ce qui représente une augmentation de 137,65% (Figure III.7(a)). De la même manière l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,20mm/tr, conduit à une élévation de la puissance de coupe de 36,57% (Figure III.7(b)). Aussi, l'élévation de la profondeur de passe de 0,1 à 0,5 mm conduit à une élévation de la puissance de coupe de 375,37% (Figure III.7(c)). Cette augmentation est la plus grande par rapport aux autres facteurs ( $P=0,33KW$ ).

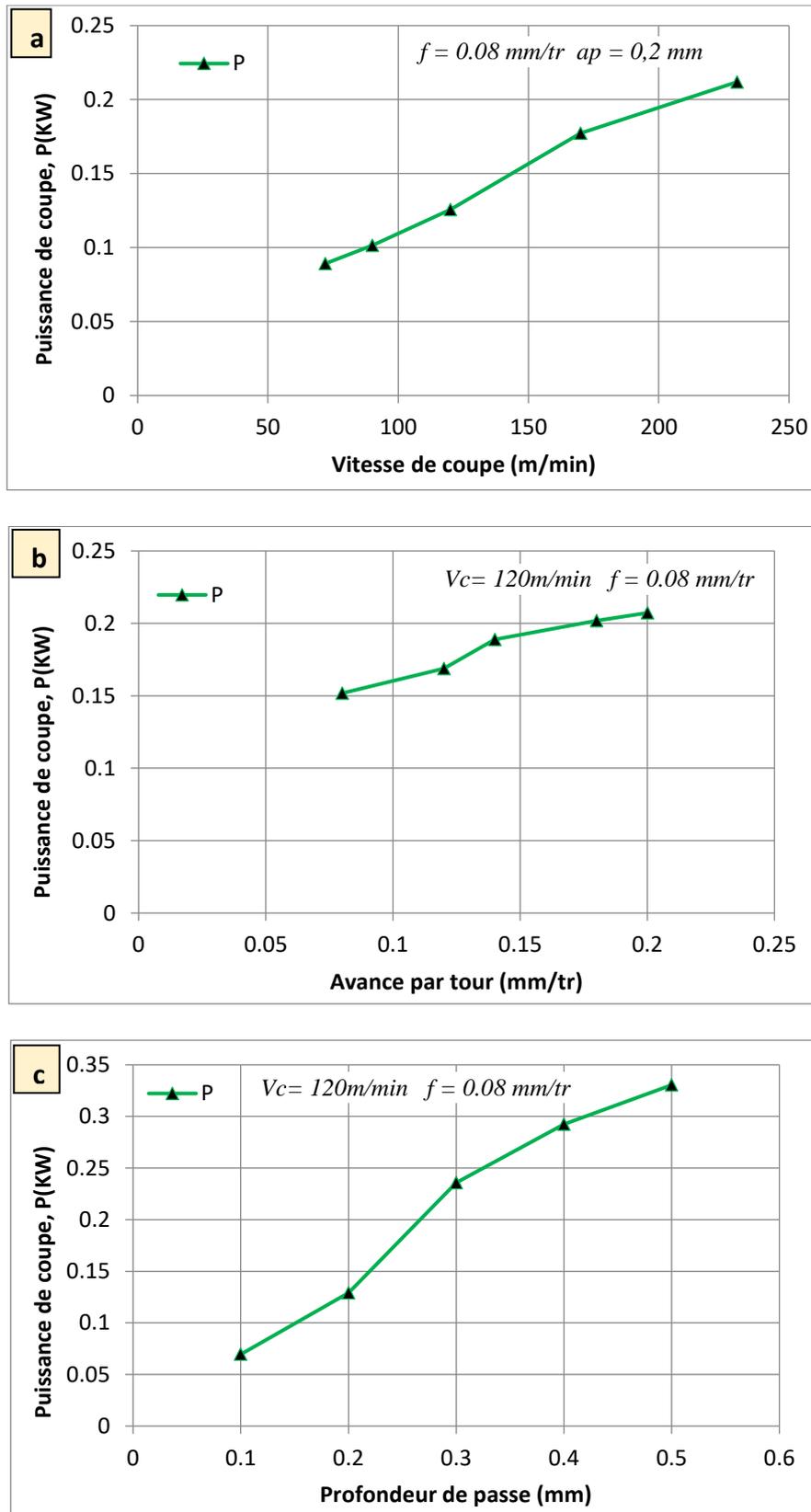


Figure III.7 Evolution de la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction de:

a) Vitesse de coupe b) avance par tour c) Profondeur de passe

### III.2.4 Quantité de copeau enlevé

La quantité de copeau enlevée (débit de copeau enlevé) est le produit des valeurs de la vitesse de coupe avec l'avance par tour et la profondeur de passe. Il est donné par l'équation III.4 suivante :

$$MRR = 1000 \times Vc \times f \times ap \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (\text{III.4})$$

La figure **III .8** présente l'évolution de la quantité de copeau enlevée ( $MRR$ ) en fonction des paramètres de coupe ( $Vc, f, ap$ ). L'analyse des résultats montre une nette augmentation de la quantité de copeau enlevée avec l'augmentation des trois paramètres d'usinage ( $Vc, f$  et  $ap$ ) et que l'allure des courbes est presque linéaire. Une élévation de la vitesse de coupe de 72 à 230m/min (figure **III.8(a)**) conduit à une élévation de la quantité de copeau enlevée de 219,44%. De la même manière l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,20mm/tr (figure **III.8(b)**), conduit à une élévation de la quantité de copeau enlevée de 150%. Aussi, l'élévation de la profondeur de passe de 0,1 à 0,5mm conduit à une élévation de 400% (figure **III.8(c)**). Sur le plan pratique, l'augmentation de chacun des paramètres d'usinage contribue à une augmentation du débit de copeau. A titre d'exemple, si on a une contrainte de rugosité à respecter, dans ce cas l'augmentation de l'avance est limitée, ce qui nous pousse à varier les deux autres paramètres ( $Vc$  et  $ap$ ). D'autres parts, si on a une contrainte de l'usure, dans ce cas l'élévation de la vitesse de coupe est limitée, ce qui nous oblige de varier les deux autres paramètres ( $ap$  et  $f$ ).

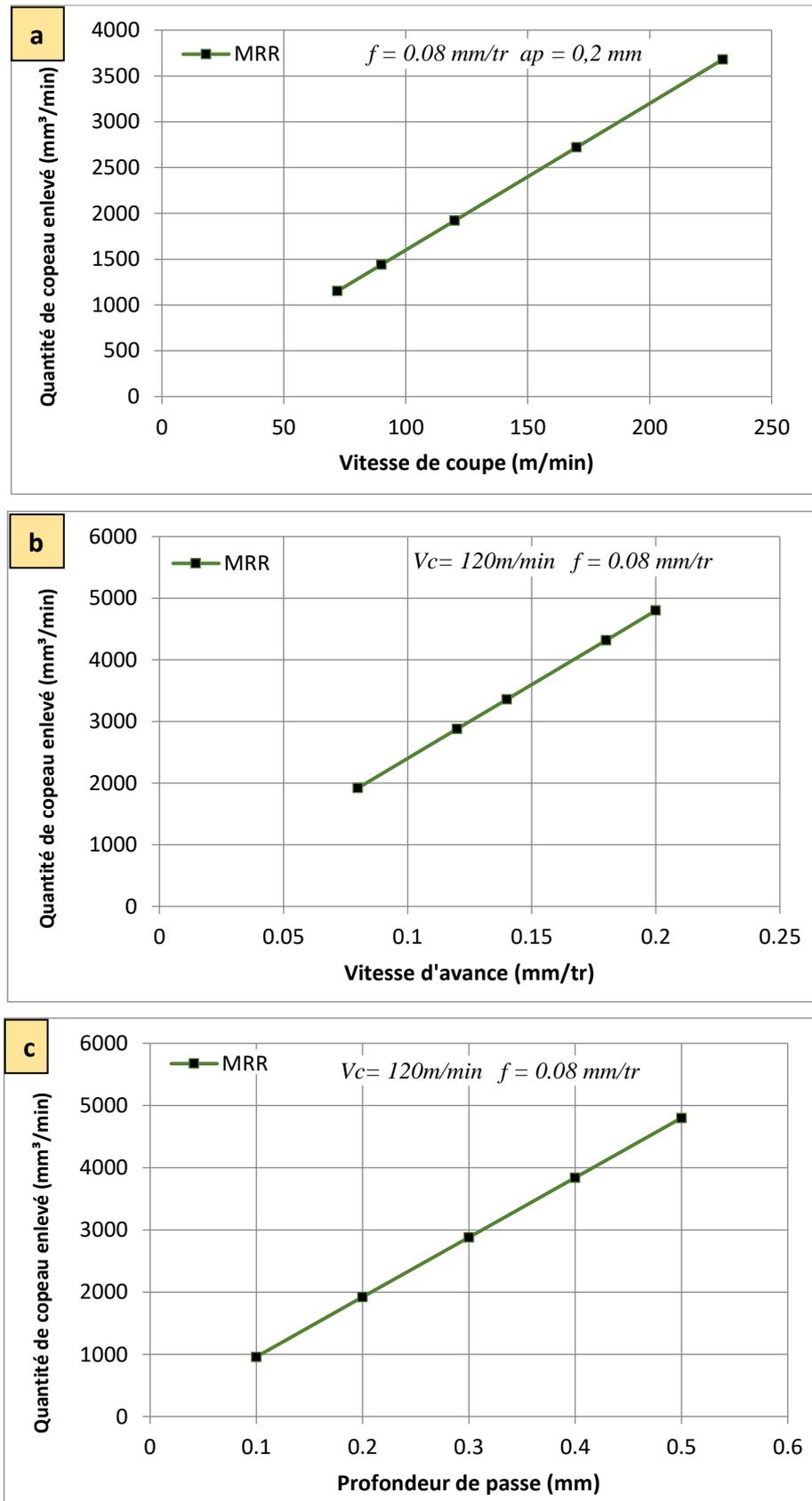


Figure III .8 Evolution de la quantité du copeau enlevé (MRR) en fonction de :  
 a) Vitesse de coupe b) avance par tour c) Profondeur de passe

### III.2.5 Usure de la céramique mixte (CC6050)

Les essais réalisés en tournage sont ceux d'usure de longue durée et cela dans le but de déterminer les courbes d'usure en fonction du temps d'usinage et par conséquent la tenue de l'outil en céramique utilisé en se basant sur le critère d'usure admissible  $[VB]=0,3$ .

La figure **III.9** expose les résultats de l'évolution de l'usure en dépouille ( $VB$ ) en fonction du temps d'usinage à différents vitesses de coupe (80; 110 et 140) m/min et différentes avances (0,08; 0,12 et 0,14) mm/tr. L'analyse de cette figure montre que l'allure de l'usure ( $VB$ ) obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique. Autrement dit, cette évolution se caractérise par trois périodes principales. La première période correspond aux premières secondes de travail, qui se distingue par une usure intensive appelée souvent « usure initiale ou rodage ». La grande vitesse d'accroissement de l'usure dans cette période s'explique par l'élimination des aspérités au niveau de l'arête de coupe ou à son voisinage. Au court de la deuxième phase qui dépasse la période de rodage, l'usure évolue avec une vitesse relativement plus lente et devient plus au moins linéaire, cette période est connue dans la littérature par « l'usure progressive ou normale », elle se distinguait par une grande résistance à l'usure. Au fur et à mesure que l'outil travaille, la température à l'interface Outil/Pièce et Outil/Copeau s'élèvent favorisant l'apparition de la troisième période qui s'appelle « l'usure catastrophique ». L'élévation de la température dans les zones de contact de la partie active de l'outil conduit à l'accélération des mécanismes d'usure par abrasion et par diffusion [ ]. Logiquement, l'usure augmente brusquement durant cette période et l'outil perd ses qualités de coupe en affectant la rugosité et la précision dimensionnelle ce qui explique la limite de la durée de vie de l'outil.

La définition de la durée de vie ( $T$ ) d'un outil selon la norme ISO 3685 : « C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique » [64]. Dans notre cas les tenues des différents matériaux sont déterminées graphiquement sur la figure **III.9**. L'usure admissible  $[VB]=0,3$  mm est adoptée comme critère d'usure principale.

La tenue la plus élevée de la céramique revêtue CC6050 est de 68 min au bas régime de coupe ( $V_c = 80$  m/min ;  $f = 0,08$  mm/tr et  $ap = 0,2$ mm). Par contre, la tenue la plus faible est de 12 min, elle est enregistrée avec le régime de coupe ( $V_c = 140$  m/min ;  $f = 0,14$  mm/tr et  $ap = 0,2$ mm). Les autres tenues sont mentionnées sur la figure **III.9** (a, b et c).

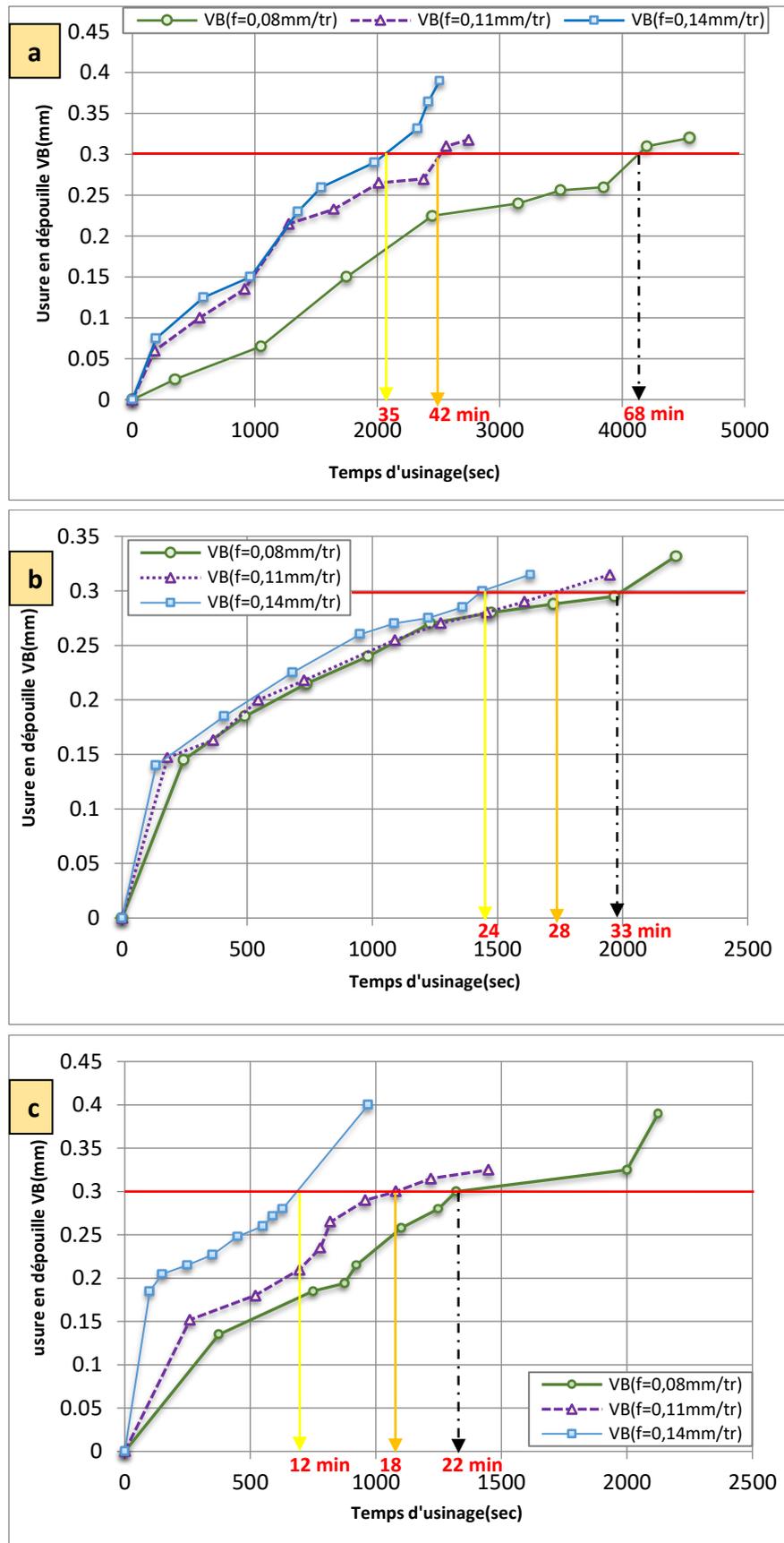


Figure III.9: Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage à trois avances pour : (a)  $V_c = 80 \text{ m/min}$ , (b)  $V_c = 110 \text{ m/min}$  et (c)  $V_c = 140 \text{ m/min}$

### III.3. Analyse de variance ANOVA et Modélisation

#### III.3.1 Introduction

L'analyse de la variance ANOVA est un outil utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le processus d'usinage et elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie [65]. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par "*P-value*" et "*F-value*" d'ANOVA.

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

- Si  $P > 0,05$ , le paramètre est non-signifiant
- Si  $P < 0,05$ , le paramètre est signifiant

A partir du traitement statistique de l'ANOVA, des modèles mathématiques sont déduits, décrivant la relation qualitative et quantitative entre les paramètres de coupe considérés et les paramètres technologiques étudiés.

Le tableau **III.1** expose les résultats du plan d'expérience  $3^2$  de la tenue ( $T$ ), la rugosité de surface ( $Ra$ ), l'effort de coupe tangentiel ( $Fz$ ), la puissance de coupe ( $P$ ) et le volume du copeau enlevé ( $V_{chip}$ ), en fonction de la vitesse de coupe ( $Vc$ ), l'avance ( $f$ ) et la profondeur de passe est maintenue constante avec une valeur  $ap= 0,2\text{mm}$ . Notons ici que les tenues sont déterminées à partir des graphes de la figure **III.8** et que la rugosité ( $Ra$ ) et l'effort ( $Fz$ ) sont enregistrés lorsque la tenue ( $T$ ) est atteinte pour chacun des neuf régimes utilisés.

L'analyse des résultats du tableau **III.1** montre que la rugosité de surface ( $Ra$ ) varie de 0,7 à 1,14  $\mu\text{m}$ , la tenue de l'outil varie de 12 à 68 min, l'effort de coupe ( $Fz$ ) varie de 109,29 à 181,04 N, la puissance de coupe varie de 0,14242 à 0,34384KW et le volume de copeau enlevé varie de 47,04 à 87,04  $\text{cm}^3$ .

**Tableau III.1** plan d'expérience L9.

Essai	$V_c$ m/min	$f$ mm/tr	$R_a$ , $\mu\text{m}$	$T$ , min	$F_z$ N	$P$ , KW	$V_{chip}$ , $\text{cm}^3$
1	80	0,08	0,7	68	106,82	0,14242667	87,04
2	80	0,11	0,88	42	158,3	0,21106667	73,92
3	80	0,14	1,03	35	181,04	0,24138667	78,4
4	110	0,08	0,85	33	109,29	0,200365	58,08
5	110	0,11	1,01	28	139,47	0,255695	67,76
6	110	0,14	1,12	24	162,52	0,29795333	73,92
7	140	0,08	1,14	22	112,21	0,26182333	49,28
8	140	0,11	1,09	18	122,74	0,28639333	55,44
9	140	0,14	1,01	12	147,36	0,34384	47,04

### III.3.2 ANOVA et modélisation de la rugosité ( $R_a$ )

Les résultats expérimentaux correspondants au critère de rugosité ( $R_a$ ) présentés dans le **tableau III.1**, ont été obtenus suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe, vitesse de coupe ( $V_c$ ) et avance par tour ( $f$ ). Le **tableau III.2** montre les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour ( $R_a$ ). Cette analyse a été faite pour les valeurs de P inférieure à 0,05 (ou 95% de confiance). Les résultats montrent que le facteur le plus important qui affecte la rugosité ( $R_a$ ) est la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec une contribution de (38,84 %). Par contre l'avance ( $f$ ) a une contribution de (21,79 %). L'interaction entre ( $V_c \times f$ ) est significative avec une contribution de (31,16%). Les autres termes carrés ont une contribution inférieure à 1%.

**Tableau III.2** Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité ( $R_a$ ).

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	0,16	5	0,031	9,75	0,0450		
A- $V_c$	0,066	1	0,066	20,51	0,0201	38,84	Signifiant
B- $f$	0,037	1	0,037	11,41	0,0431	21,79	Signifiant
AB	0,053	1	0,053	16,40	0,0271	31,16	signifiant
$A^2$	6,722E-004	1	6,722E-004	0,21	0,6791	0,395	Non signifiant
$B^2$	6,722E-004	1	6,722E-004	0,21	0,6791	0,395	Non signifiant
Residual	9,678E-003	3	3,226E-003			5,69	
Cor Total	0,17	8				100	

Le graphique des effets principaux et les interactions pour la rugosité ( $R_a$ ) est présenté dans la figure **III.10** à partir de cette figure, il apparaît clairement que la vitesse ( $V_c$ ) affecte

fortement la rugosité ( $Ra$ ) car elle possède la plus grande pente, l'avance par tour ( $f$ ) a un effet moins important que ( $Vc$ ) sur l'évolution de rugosité ( $Ra$ ). On remarque qu'il existe une interaction entre ( $Vc$ ) et ( $f$ ), car les deux courbes se croisent.

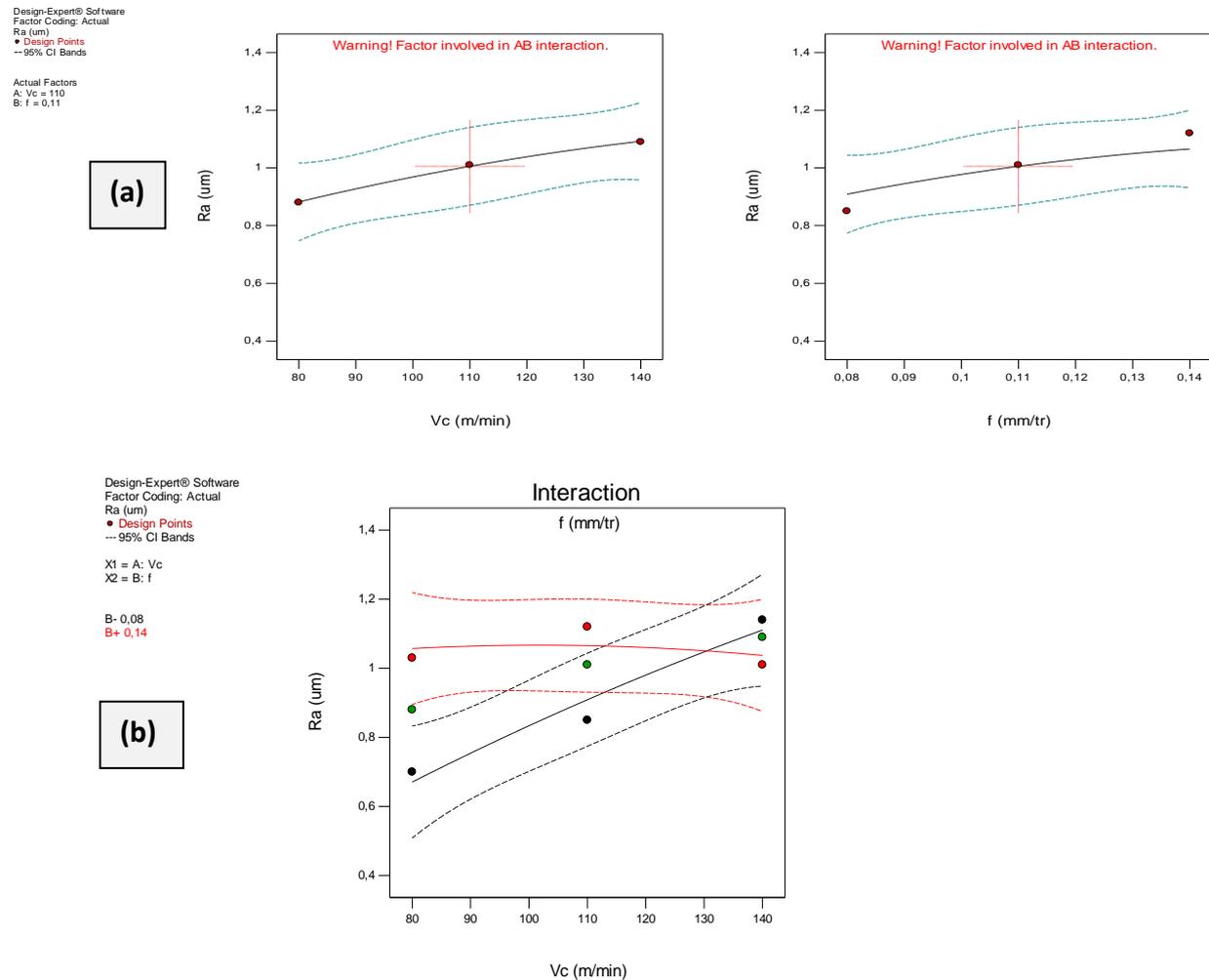


Figure III.10 Graphique des effets pour ( $Ra$ ) a) effets principaux, b) interaction.

La relation entre les *facteurs* d'entrées et la *rugosité* ( $Ra$ ) a été modélisées par une équation de régression quadratique. Le Modèle obtenu de ( $Ra$ ) est donné par l'équation (III.4) avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 94,20\%$ ).

$$Ra(\mu m) = -1,70574 + 0,022037Vc + 21,14815f - 0,12778Vc \times f - 2,03704E-005Vc^2 - 20,37037f^2 \tag{III.4}$$

Pour étudier l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe et l'avance par tour) sur le critère de rugosité ( $Ra$ ), la surface de réponse (3D) est tracée dans la figure III.11. On observe que ( $Ra$ ) augmente d'une manière significative avec l'augmentation de ( $Vc$ ). Cependant,

l'avance par tour ( $f$ ) a une influence moins importante sur ( $Ra$ ), car sa pente est faible par rapport à la pente de ( $Vc$ ). Une rugosité minimale est donnée avec une ( $Vc$ ) faible et une avance faible aussi. Dans notre cas la valeur minimale enregistrée de ( $Ra$ ) n'a pas dépassée  $0,7\mu\text{m}$  pour un temps de coupe de 68 min,  $Vc=80$  m/min et  $f=0,08\text{mm/tr}$ . Par contre la valeur maximale enregistrée de ( $Ra$ ) après 22 min d'usinage n'a pas dépassée  $1,14\mu\text{m}$  pour  $Vc=140\text{m/min}$  et  $f=0,08\text{mm/tr}$ . La figure III.12 montre le graphe de contour de la rugosité ( $Ra$ ) en fonction de ( $Vc$ ) et ( $f$ ).

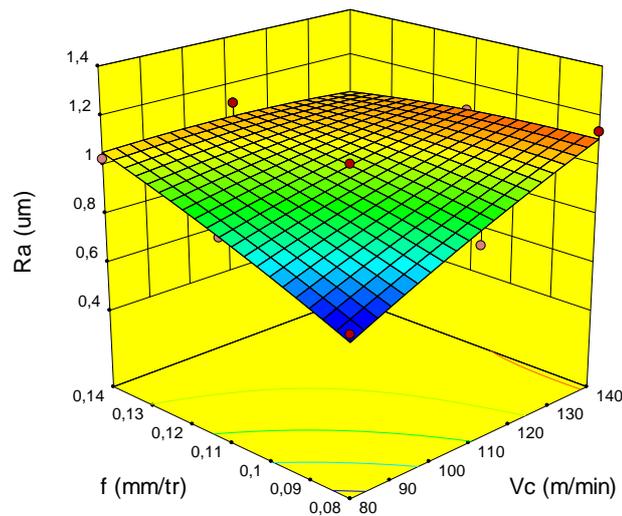


Figure III.11 Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité ( $Ra$ ).

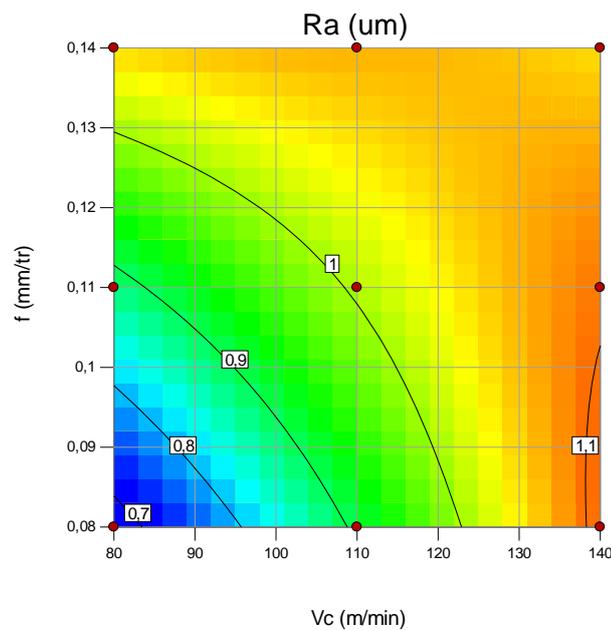


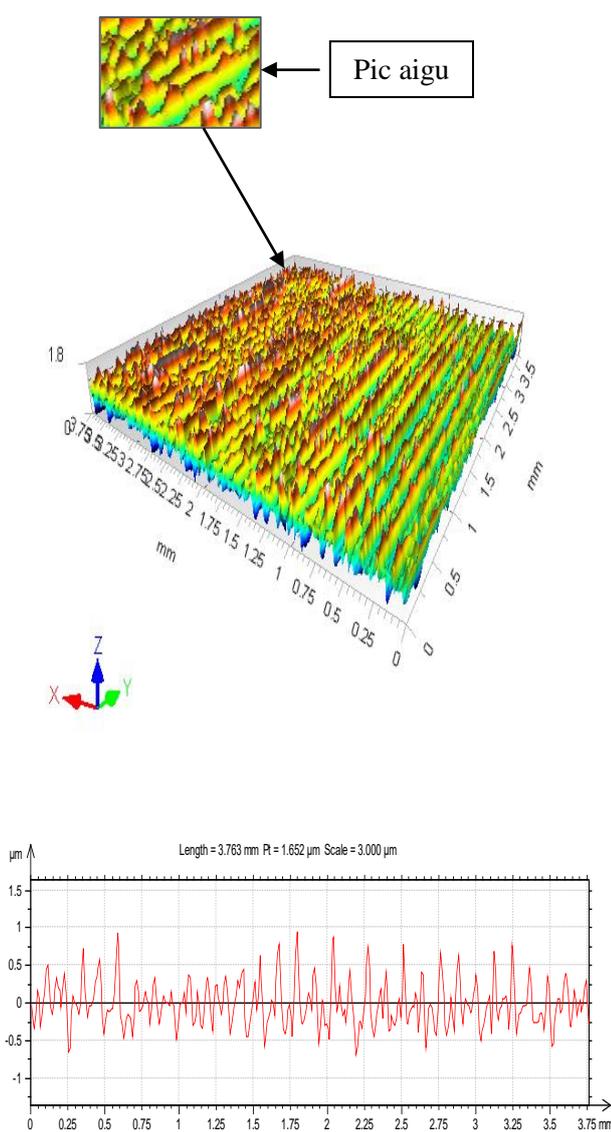
Figure III.12 Graphe de contour de la rugosité ( $Ra$ ).

### III.3.2 .1 Effet de l'usure sur la Topographie 2D et 3D de surface usinée

Afin de mettre en évidence l'effet de l'emploi d'un critère d'usure admissible préalable, c.à.d. ( $VB=0,3$  mm). On a fait deux essais avec les mêmes conditions de coupe, ou on utilisant deux arêtes de coupe différentes, l'une est usée et l'autre neuve et cela dans le but de comparer les deux topographies de surface obtenues. Les topographies (3D) illustrées aux figures (III.13 et III.14) présentent les surfaces usinées obtenues par deux valeurs d'usure : ( $VB=0$ mm) arête neuve et ( $VB=0,3$ )mm arête usée avec une vitesse de coupe (120) m/min, avance (0,2) mm/tr et une profondeur de passe égale 0,2 mm. Les deux figures montrent deux topographies différentes. En utilisant une plaquette en céramique conventionnelle CC6050 neuve, l'arête de coupe est bien affûtée, ce qui a pour effet de générer une topographie avec plus d'arrachement de matière mais la hauteur des pics est faible. Avec l'utilisation de la plaquette avec une usure de 0,3mm, l'arête de coupe est usée, la fréquence des arrachements est moins accentuée mais les pics ont une hauteur élevée par rapport à ceux de l'arête neuve.

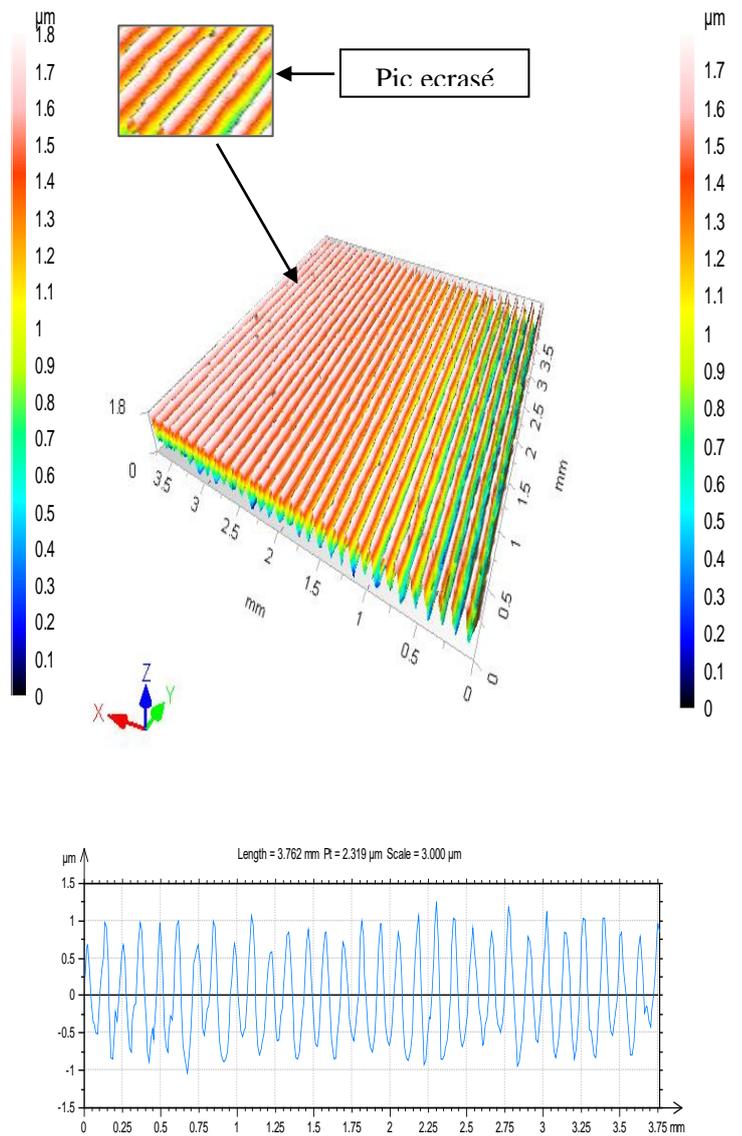
On constate aussi qu'il ya une nette augmentation au niveau des différents valeurs des critères de la rugosité, à titre d'exemple la rugosité ( $Ra$ ), prend la valeur  $Ra=0,233\mu\text{m}$  par une arête neuve et double de valeur  $Ra=0,500\mu\text{m}$  pour une arête qui à une usure égale  $VB=0,3$  mm. Ceci confirme les résultats de l'augmentation de la rugosité en fonction de l'augmentation de temps d'usinage (figure III.1).

Les figures III-13 et III-14 montrent les profils de surface en 2D usinées suivant la direction de l'avance. L'analyse des résultats des profils en 2D selon la longueur de la direction d'avance pendant l'usinage par la céramique CC6050 présente des formes cycliques de crêtes et de creux.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Ra	0.233	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	1.308	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rt	1.514	µm	Gaussian filter, 0.8 mm

**Figure III.13** Topographie en 3D et Profil en 2D de surface usinée  $VB=0$  (arête neuve),  $V_c=120\text{m/min}$ ,  $f=0,12\text{ mm/tr}$  et  $a_p=0,2\text{mm}$



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Ra	0.500	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	1.964	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rt	2.126	µm	Gaussian filter, 0.8 mm

**Figure III.14** Topographie en 3D et Profil en 2D de surface usinée  $VB=0,3\text{ mm}$ ,  $V_c=120\text{m/min}$ ,  $f=0,12\text{ mm/tr}$  et  $a_p=0,2\text{mm}$

### III.3.3 ANOVA et modélisation de la tenue ( $T$ )

Le tableau **III.3** illustre les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour la tenue ( $T$ ). L'analyse des résultats montre que le facteur le plus important qui affecte la tenue ( $T$ ) est la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec une contribution de (66,18 %). Par contre l'avance ( $f$ ) a une contribution de (20,69 %). L'interaction entre ( $V_c \times f$ ) et les termes carrés ( $V_c^2$  et  $f^2$ ) sont non significatifs avec des contributions de (6,07 ; 1,86 ; 4,36)% respectivement. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par d'autres chercheurs [66] [67]. Ces recherches indiquent clairement que la vitesse de coupe est le facteur principal qui affecte la tenue de l'outil.

**Tableau III.3** Analyse de la variance (ANOVA) pour la tenue ( $T$ ).

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	2082,92	5	416,58	13,14	0,0298		
A- $V_c$	1441,50	1	1441,50	45,48	0,0067	66,18	Signifiant
B- $f$	450,67	1	450,67	14,22	0,0326	20,69	Signifiant
AB	132,25	1	132,25	4,17	0,1337	6,07	Non signifiant
A <sup>2</sup>	40,50	1	40,50	1,28	0,3405	1,86	Non signifiant
B <sup>2</sup>	18,00	1	18,00	0,57	0,5058	0,82	Non signifiant
Residual	95,08	3	31,69			4,36	
Cor Total	2178,00	8				100	

La figure **III.15** présente Le graphique des effets principaux et les interactions pour la tenue ( $T$ ). A partir de cette figure **III.15(a)**, il apparaît clairement que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) affecte fortement la tenue, par contre l'avance par tour ( $f$ ) à un effet moins important sur l'évolution de tenue. D'après l'allure des courbes figure **III.15(b)**, qu'il y'a une interaction entre les deux variables ( $V_c$ ) et ( $f$ ), Ce dernier indique que cette interaction est significative, mais avec une faible contribution (inférieur à 7%) ce qui est en accords avec les résultats de l'ANOVA du tableau (**III.3**).

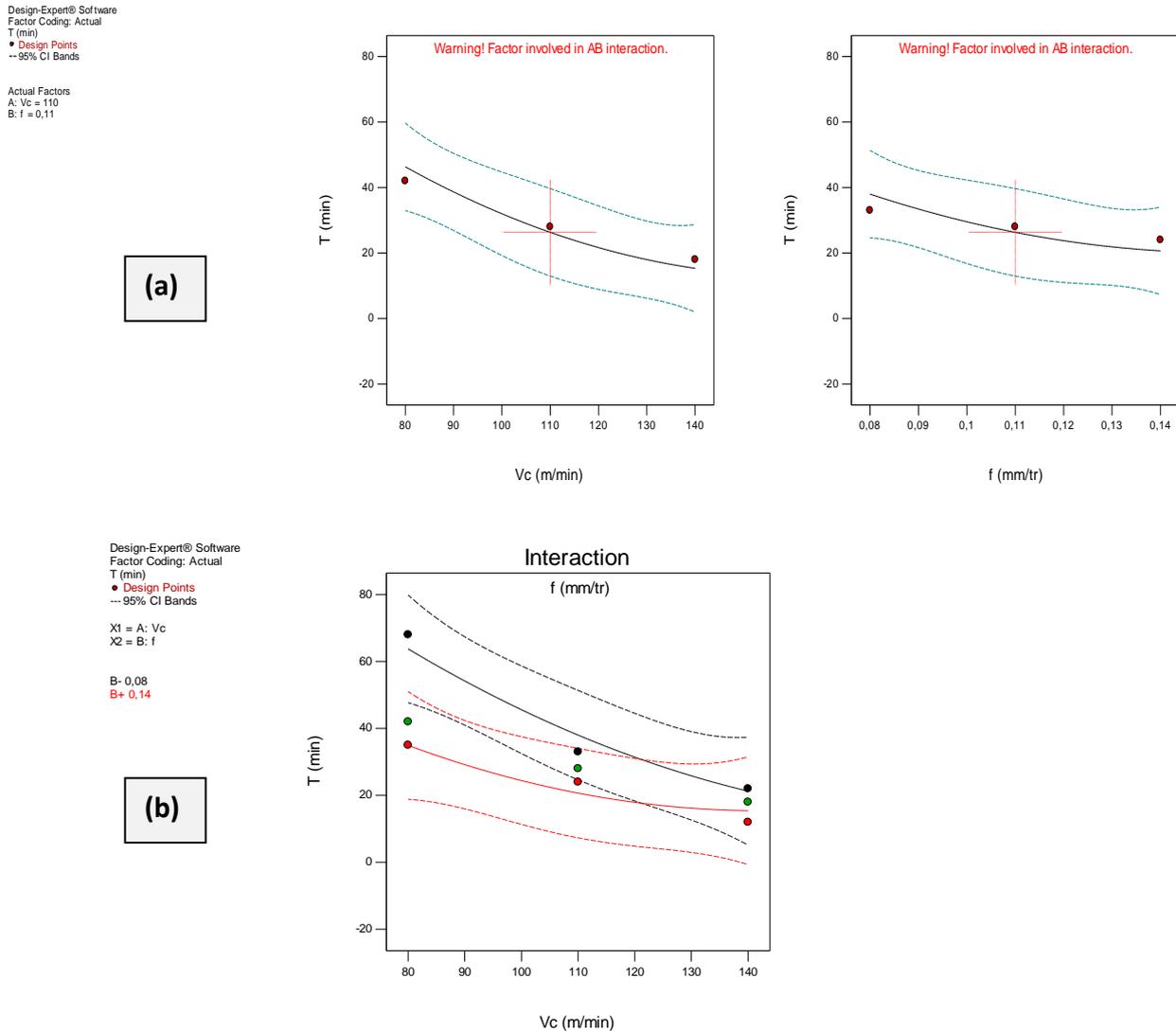


Figure III.15 Graphique des effets pour (T) a) effets principaux, b) interaction.

Le Modèle obtenu de la tenue (T) est donné par l'équation quadratique (III.5) avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 95,63\%$ ).

$$T(\text{min}) = + 293,08333 - 2,31944 Vc - 1725,00 f + 6,38889 Vc \times f + 5,00E-003 Vc^2 + 3333,33 f^2 \quad (\text{III.5})$$

La surface de réponse (3D) est tracée dans la figure III.16. On remarque que l'avance par tour (f) a une pente faible par rapport à la pente de (Vc), ce qui indique que (T) augmente d'une manière significative avec l'augmentation de (Vc) et une augmentation faible par rapport à (f). La figure III.17 expose le graphe de contour pour la tenue (T) en fonction de (Vc) et (f). À partir de ce graphe on peut visualiser la surface de réponse (T) et établir sa valeur et les conditions d'exploitation souhaitables.

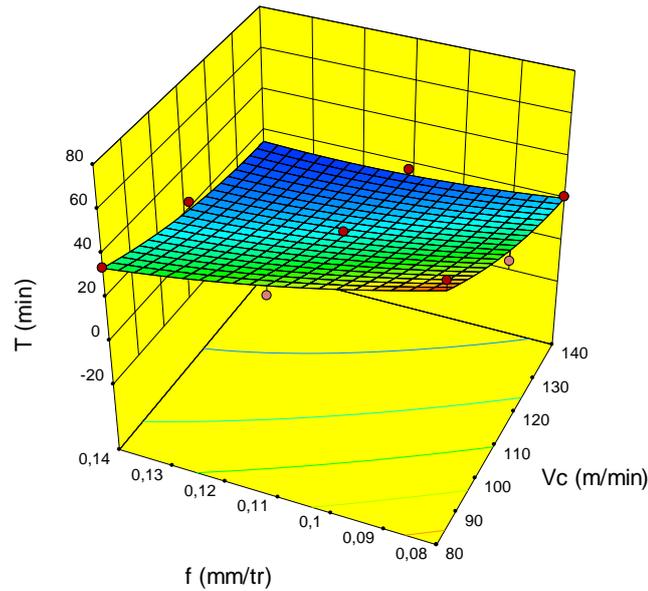


Figure III.16 Effet des paramètres de régime de coupe sur la tenue ( $T$ )

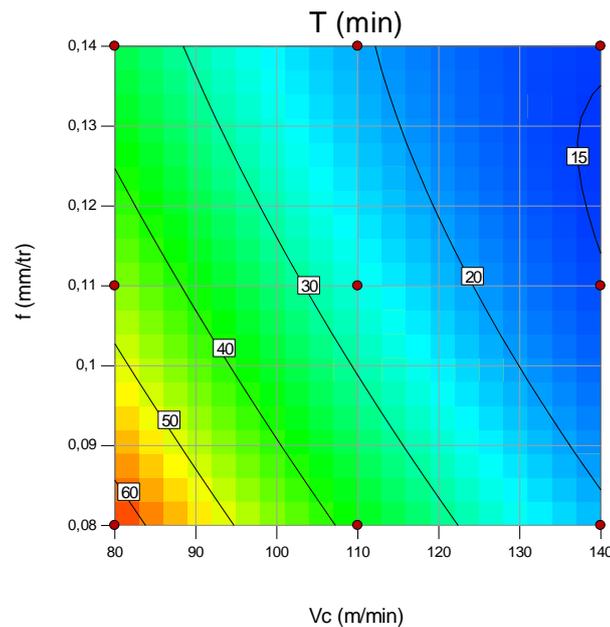


Figure III.17 Graphe de contour de la tenue ( $T$ )  
 $a_p=0,08$  mm/tr

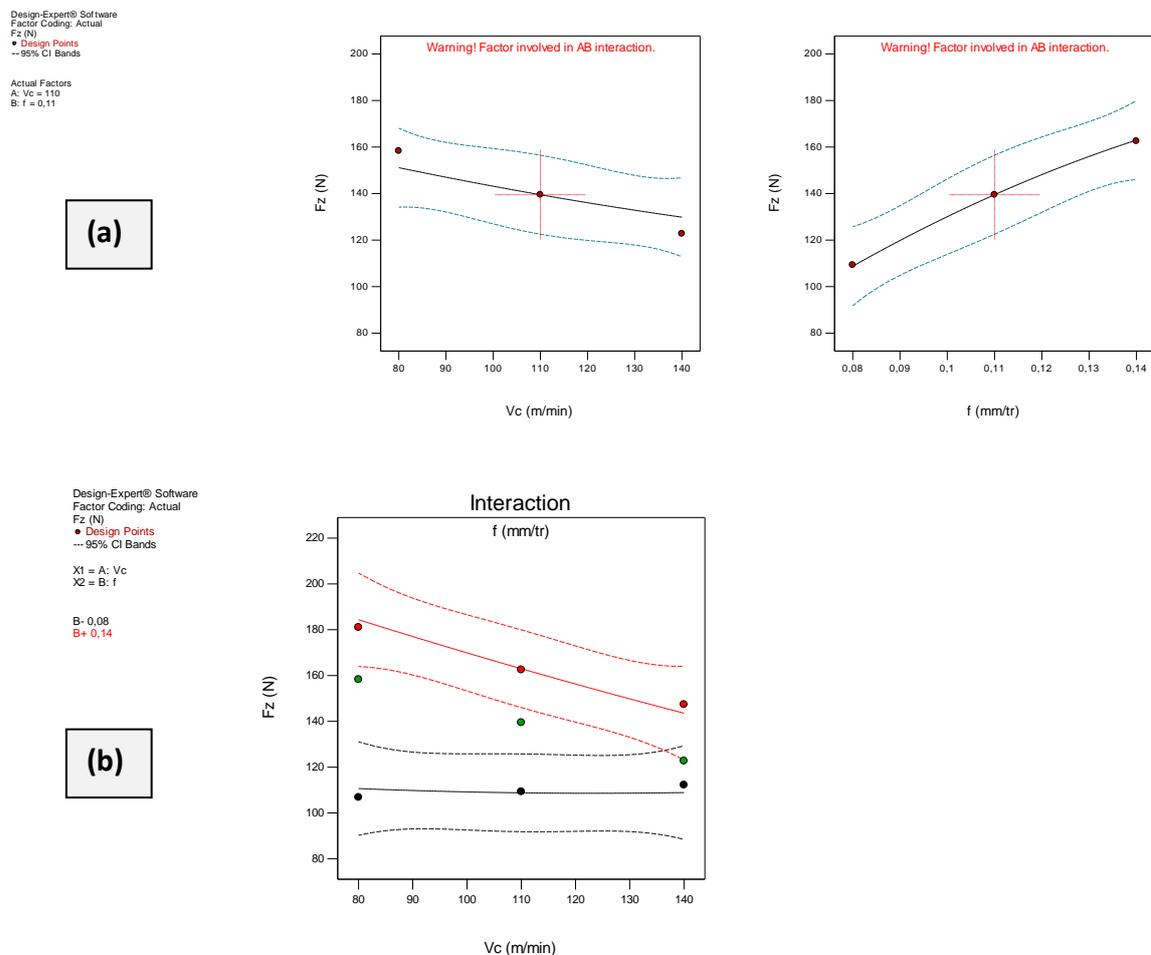
### III.3.4 ANOVA et modélisation de l'effort de coupe ( $F_z$ )

Le tableau III.4 montre les résultats de l'analyse de la variance pour l'effort tangentiel ( $F_z$ ). Les résultats indiquent que l'avance ( $f$ ) est le facteur le plus important affectant l'effort tangentiel ( $F_z$ ) avec une contribution de (77,99%) suivie par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec une contribution de 12,027%, l'interaction ( $V_c \times f$ ) et les termes carrés ( $V_c^2$ ,  $f^2$ ) ne sont pas significatives, leurs contributions sont (12,027 ; 6,75 ; 0,034 et 0,46) % respectivement.

**Tableau III.4** Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe ( $F_z$ ).

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	5495,84	5	1099,17	21,47	0,0148		
A-Vc	679,47	1	679,47	13,27	0,0357	12,027	Signifiant
B-f	4406,46	1	4406,46	86,08	0,0027	77,99	Signifiant
AB	381,62	1	381,62	7,45	0,0719	6,75	Non signifiant
A <sup>2</sup>	1,94	1	1,94	0,038	0,8581	0,034	Non signifiant
B <sup>2</sup>	26,35	1	26,35	0,51	0,5249	0,46	Non signifiant
Residual	153,58	3	51,19			2,72	
Cor Total	5649,42	8				100	

Le graphique des effets principaux et les interactions pour l'effort tangentiel ( $F_z$ ) sont présentés dans la figure III.18. On peut voir que l'avance ( $f$ ) affecte fortement l'effort de coupe ( $F_z$ ) figure III.18(a) et qu'il existe d'interaction entre la vitesse de coupe et l'avance (figure III.18(b)).



**Figure III.18** Graphique des effets pour ( $F_z$ ) **a**) effets principaux, **b**) interaction.

Le Modèle obtenue de ( $F_z$ ) est donné par l'équation quadratique (III.6) avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 97,28\%$ ).

$$F_z (N) = -87,71306 + 0,59831 V_c + 2984,47222 f - 10,85278 V_c \times f + 1,09444E-003 V_c^2 - 4033,33333 f^2 \quad (\text{III.6})$$

La surface de réponse 3D (figure III.19) montre la variation de l'effort de coupe ( $F_z$ ) avec la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance ( $f$ ). On remarque que l'avance influe d'une manière significative sur l'effort de coupe car elle possède la plus grande pente, suivie par la vitesse de coupe. Ces résultats sont en accord avec l'analyse de la variance ANOVA (tableau III.4). Afin d'avoir un effort de coupe minimale, il faut que l'avance soit faible et la vitesse de coupe soit élevée. La figure III.20 montre le graphe de contour pour l'effort de coupe ( $F_z$ ) en fonction de ( $V_c$ ) et ( $f$ ) diagramme, ce qui permet de trouver rapidement la valeur de l'effort de coupe en fonction de la variation de la vitesse de coupe et l'avance.

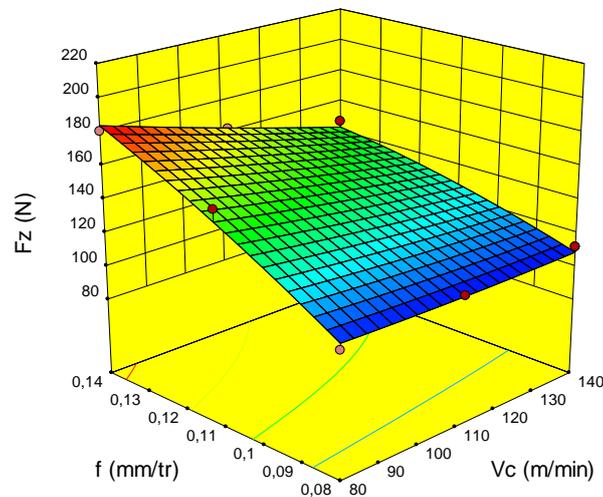


Figure III.19 Effet des paramètres de régime de coupe sur l'effort de coupe ( $F_z$ ).

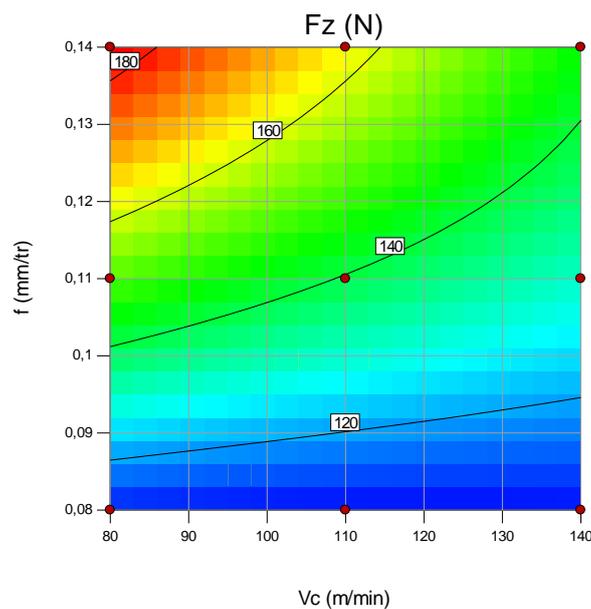


Figure III.20 Graphe de contour de l'effort de coupe ( $F_z$ ),  $a_p=0,08$  mm/tr

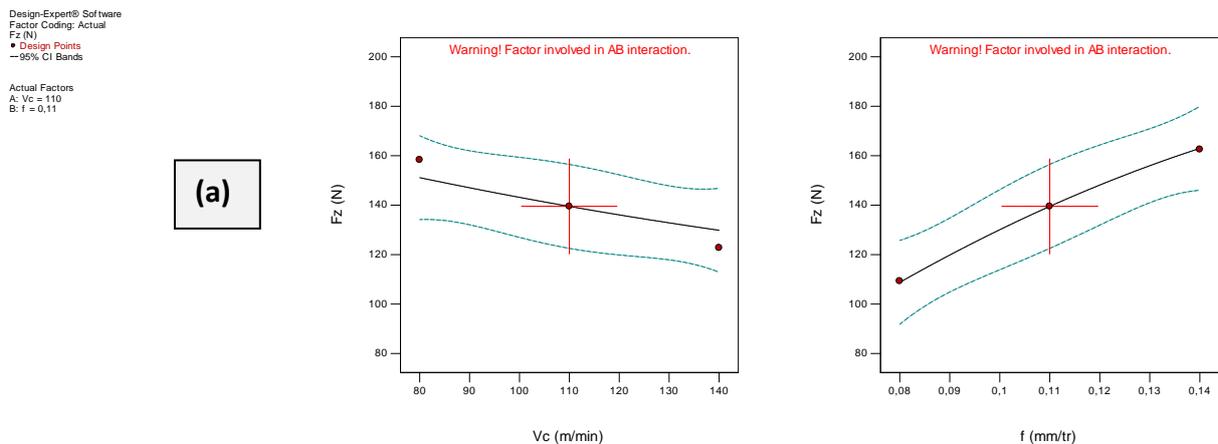
### III.3.5 ANOVA et modélisation de la puissance (P)

Le tableau III.5 montre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour la puissance (P). L'analyse des résultats montre que la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) sont les facteurs les plus importants qui affectent (P) avec des contributions de (53,57 et 46,43)% respectivement. L'interaction entre (Vc) et (f) et les termes carrés (Vc<sup>2</sup> et f<sup>2</sup>) sont non significatifs avec des contributions de (0,25 ; 0,088 ; 0,068)% respectivement.

Tableau III.5 Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance (P)

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	0,028	5	5,554E-003	36,93	0,0068		
A-Vc	0,015	1	0,015	97,88	0,0022	53,57	Signifiant
B-f	0,013	1	0,013	86,01	0,0027	46,43	Signifiant
AB	7,177E-005	1	7,177E-005	0,48	0,5393	0,25	Non signifiant
A <sup>2</sup>	2,471E-005	1	2,471E-005	0,16	0,7124	0,088	Non signifiant
B <sup>2</sup>	1,904E-005	1	1,904E-005	0,13	0,7455	0,068	Non signifiant
Residual	4,511E-004	3	1,504E-004			1,61	
Cor Total	0,028	8				100	

La figure III.21 illustre le graphique des effets principaux et les interactions pour la puissance de coupe (P). On observe clairement que l'avance (f) affecte fortement la puissance de coupe suivie par la vitesse de coupe (Vc) (figure III.21(a)). Aussi il apparaît que les deux courbes sont deux droites qui ne se croisent jamais (figure III.21(b)), ce qui signifie qu'il n'y a pas d'interaction entre les deux paramètres de coupe.



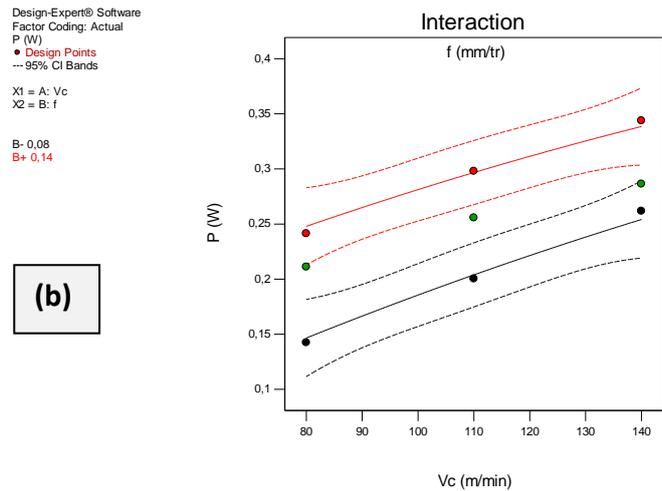


Figure III.21 Graphique des effets pour (P) a) effets principaux, b) interaction.

Le traitement statistique des résultats de la puissance de coupe a permis la détermination du modèle de (P) sous forme d'équation quadratique (III.7) avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 98,40\%$ ).

$$P(W) = -0,24414 + 3,02792E-003Vc + 2,81961f - 4,70648E-003Vc \times f - 3,90556E-006Vc^2 - 3,42870f^2 \quad (III.7)$$

La surface de réponse (3D) est tracée dans la figure III.22. On observe que (P) augmente d'une manière significative avec l'augmentation de (Vc) et de (f). Une puissance minimale est donnée avec une faible vitesse de coupe (Vc) et une faible avance par tour (f). Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par [63].

La figure III.223 montre le graphe de contour de la puissance de coupe (P) en fonction de (Vc) et (f). Ce graphe permet de déterminer la puissance de coupe en fonction de la variation de la vitesse de coupe et de l'avance et cela dans l'intervalle des conditions de coupe.

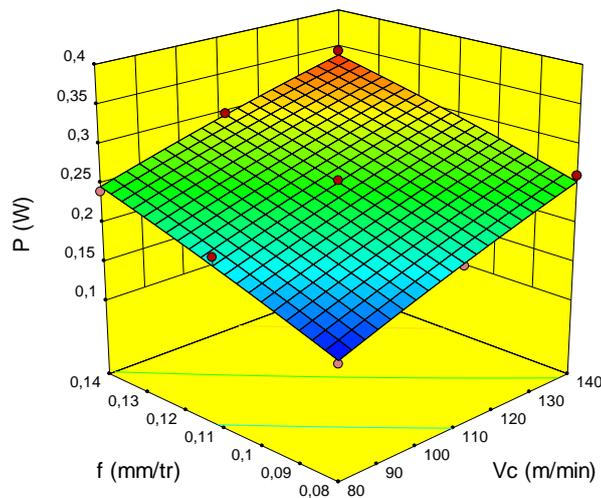


Figure III.22 Effet des paramètres de régime de coupe sur la puissance (P)

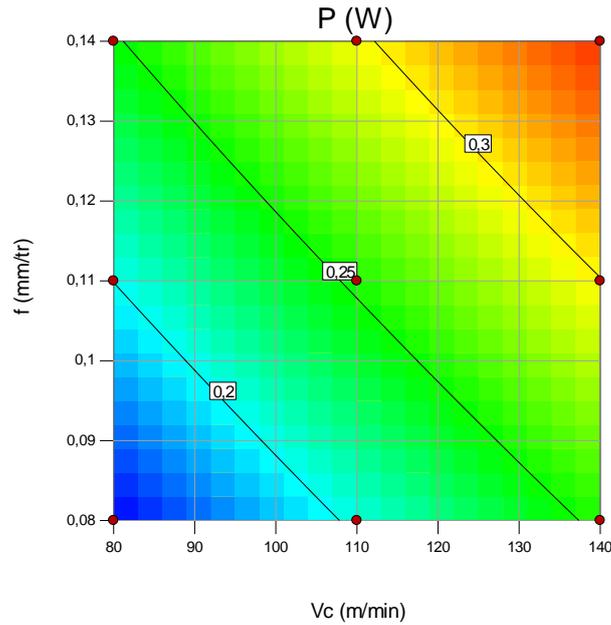


Figure III.23 Graphe de contour de la puissance ( $P$ )

### III.3.6 ANOVA et modélisation du volume de copeau ( $V_{chip}$ )

Le tableau III.6 illustre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ). L'analyse des résultats de ce tableau montre que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus important affectant le volume de copeau ( $V_{chip}$ ) avec une grande contribution de (83,20%). D'autre part l'avance ( $f$ ), l'interaction ( $V_c \times f$ ) et le terme carré ( $V_c^2$ ) ont des faibles contributions qui ne dépassent pas le 1%.

Tableau III.6 Analyse de la variance (ANOVA) pour le volume de copeau ( $V_{chip}$ )

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	1297,23	5	259,45	3,24	0,1808		
A- $V_c$	1278,96	1	1278,96	15,99	0,0280	83,20	Signifiant
B- $f$	4,10	1	4,10	0,051	0,8354	0,26	Non signifiant
AB	10,24	1	10,24	0,13	0,7442	0,66	Non signifiant
$A^2$	3,92	1	3,92	0,049	0,8390	0,25	Non signifiant
$B^2$	0,013	1	0,013	1,600E-004	0,9907	0,0008	Non signifiant
Residual	239,96	3	79,99			15,61	
Cor Total	1537,19	8				100	

La figure III.24 présente le graphique des effets principaux et les interactions pour ( $V_{chip}$ ), il apparaît clairement une décroissance nette du volume de copeau en fonction de la vitesse de coupe (figure III.24(a)) et qu'il n'existe pas d'interaction entre ( $V_c$ ) et ( $f$ ) (figure III.24(b)).

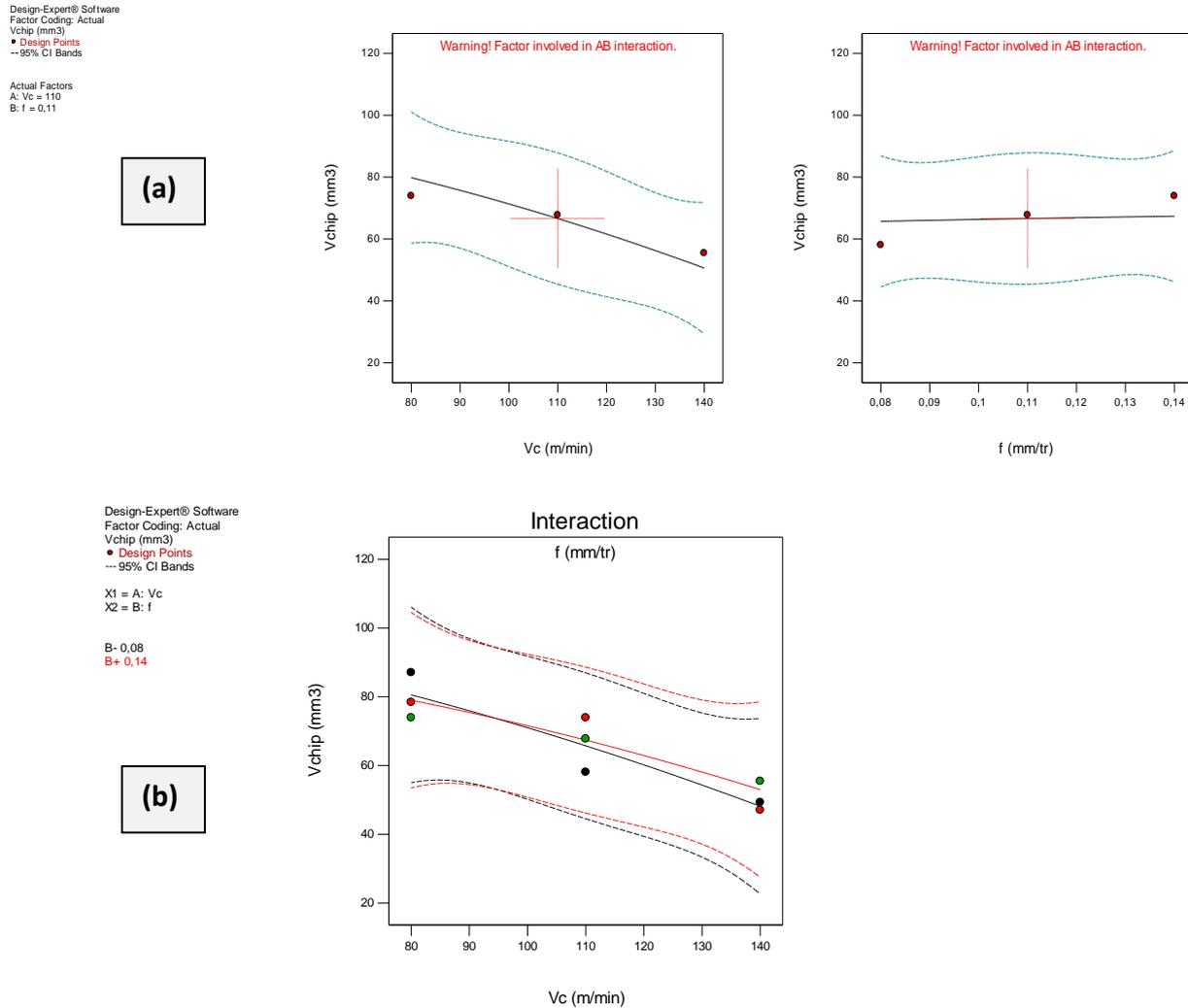


Figure III.24 Graphique des effets pour ( $V_{chip}$ ) a) effets principaux, b) interaction.

Le Modèle obtenue de ( $T$ ) est donné par l'équation quadratique (III.8) avec un coefficient de détermination ( $R^2 = 84,39\%$ ).

$$V_{chip} (cm^3) = + 118,75556 - 0,34V_c - 148,44444 f + 1,77778 V_c \times f - 1,55556E-003 V_c^2 - 88,88889 f^2 \quad (III.8)$$

La surface de réponse (3D) est tracée dans la figure III.25. On observe clairement que ( $V_{chip}$ ) augmente d'une manière significative avec l'augmentation de ( $V_c$ ), cela est justifié par la valeur de sa contribution de 83,20% (tableau III.6). L'avance par tour ( $f$ ) presque n'a aucun effet sur ( $V_{chip}$ ) puisque sa pente est très faible. La figure III.26 montre le graphe de contour pour le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) en fonction de ( $V_c$ ) et ( $f$ ). Il est claire que le plus

grand volume de copeau enlevé est atteint à la vitesse de coupe la plus basse ainsi que la valeur de l'avance la plus élevée.

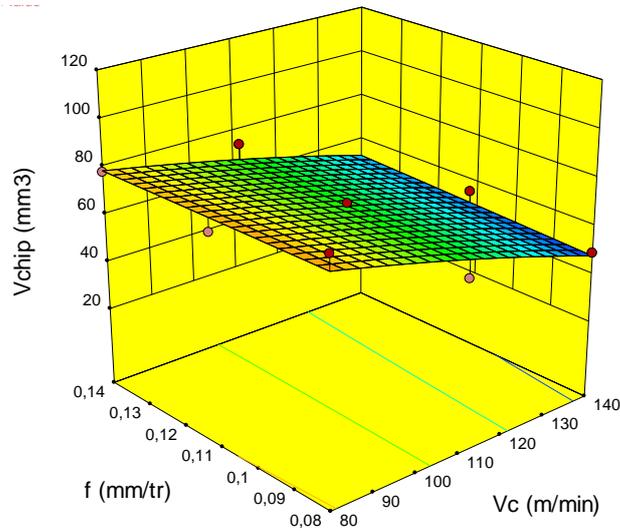


Figure III.25 Effet des paramètres de régime de coupe sur le volume de copeau ( $V_{chip}$ )

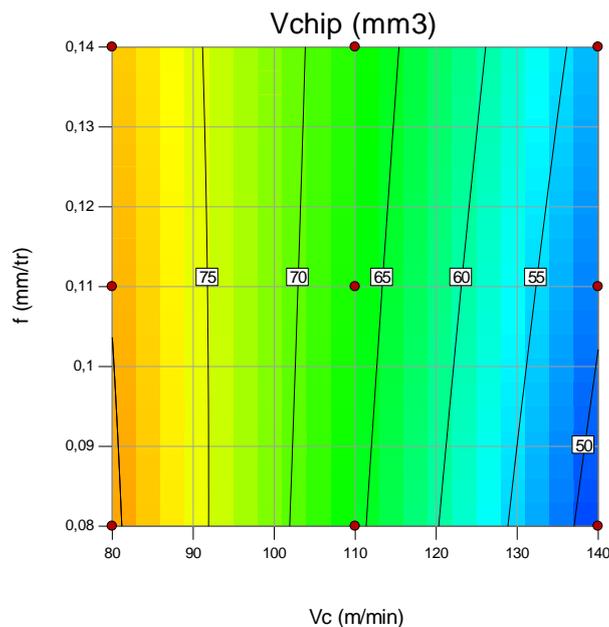
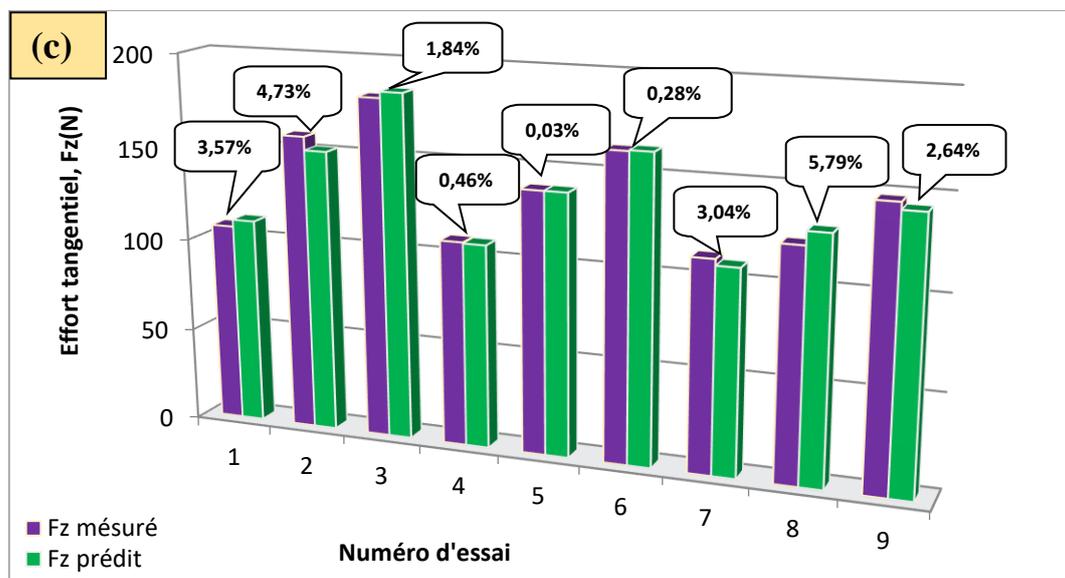
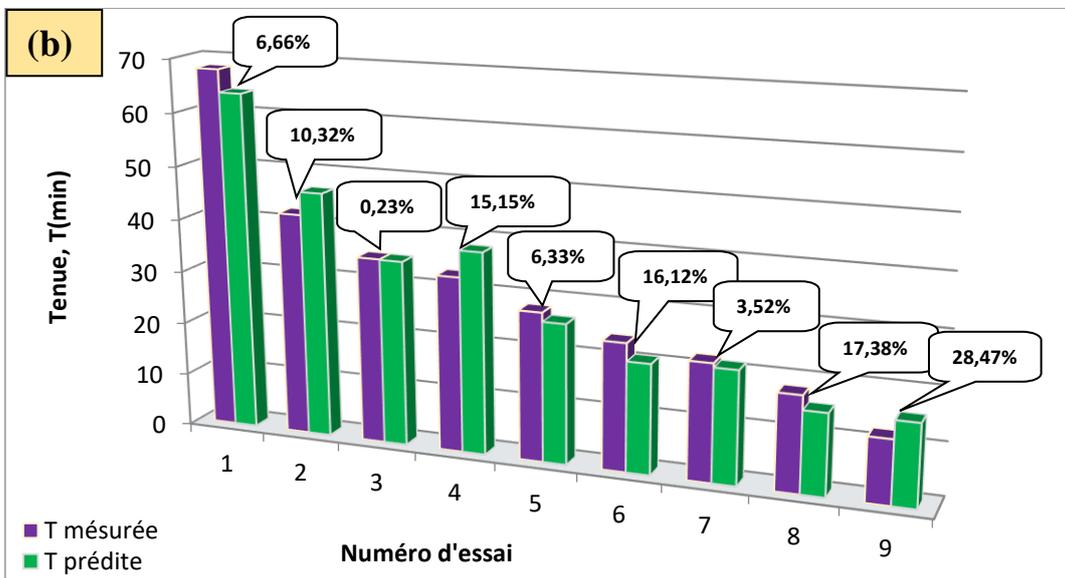
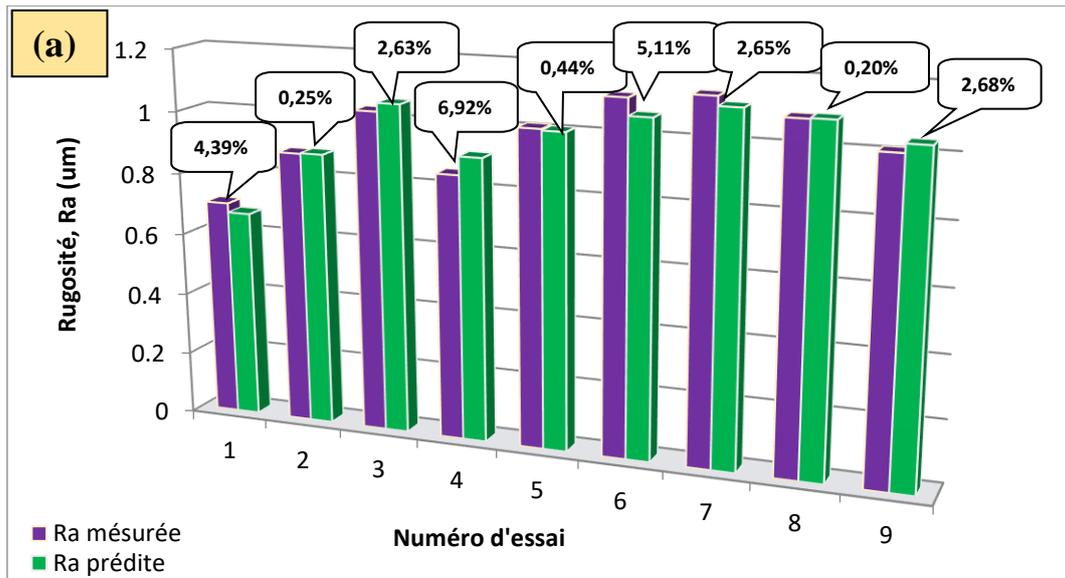


Figure III.26 Graphe de contour de volume de copeau ( $V_{chip}$ )

### III.3.7 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées

Les figures (III.27 a, b, c, d et e) expriment une comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité ( $Ra$ ), la tenue ( $T$ ), l'effort de coupe ( $Fz$ ), la puissance ( $P$ ) et le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) respectivement on se basant sur les erreurs absolues. On remarque que les valeurs prédites de tous les paramètres de sortie sont proches de ceux enregistrés expérimentalement. .



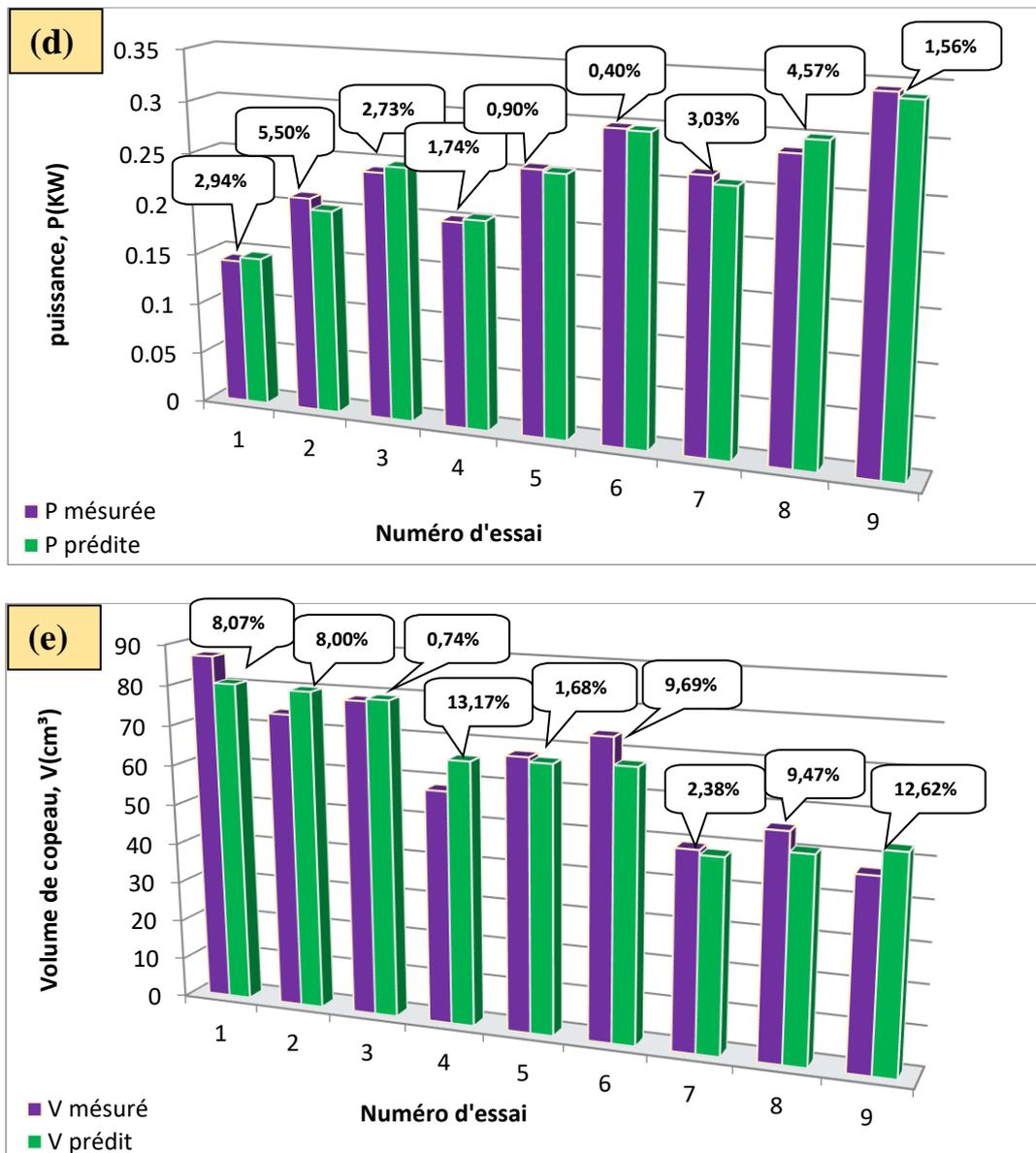


Figure III.27 Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites

(a) Rugosité ( $R_a$ ), (b) tenue ( $T$ ), (c) effort ( $F_z$ )

(d) puissance ( $P$ ), (e) volume de copeau ( $V_{chip}$ )

### III.4 Conclusion

L'étude expérimentale réalisée dans ce chapitre qui concerne le tournage dur de l'acier fortement allié X210Cr12 (54HRC) avec une céramique mixte revêtue CC6050 a permis d'identifier l'usinabilité de cet acier en termes de rugosité de surface, l'usure de l'outil de coupe, l'effort de coupe, le débit de copeau et la puissance de coupe. Elle a permis aussi de modéliser le processus d'usinage en tournage dur du couple outil/matière (CC6050/X210Cr12). Les différents modèles proposés peuvent servir à la prédiction des paramètres technologique d'usinage et aussi à l'optimisation des conditions de coupe.

## Chapitre IV

***Modélisation des performances  
d'usinage en utilisant les  
méthodes RSM et ANN***

## IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de la modélisation des différents phénomènes physiques liés à la coupe. Cette modélisation permet de mettre en évidence la relation entre les éléments du régime de coupe à savoir (la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ) et le temps d'usinage ( $T_m$ ) et les réponses étudiées (l'usure en dépouille ( $VB$ ), la rugosité ( $Ra$ ), les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P$ ) et le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ )). Pour atteindre cet objectif, on a fait appel à deux techniques de modélisation à savoir, la méthodologie de surface de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). L'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée afin de déterminer le pourcentage de contribution de chaque paramètre sur la réponse. Pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (SR), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «**Design Expert 10**». Aussi pour la détermination des modèles avec l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «**JMP Pro 11**». Les deux méthodes de modélisation utilisées sont comparées en utilisant le coefficient de détermination ( $R^2$ ), l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**) et l'erreur prédictive du modèle (**MPE**) afin de déterminer la méthode la plus efficace et précise.

## IV.2 Résultats des expériences

Les valeurs des paramètres de réponse considérés sont présentées dans le tableau (IV.1), Ces résultats sont obtenus suivant le plan d'expérience de Taguchi ( $L_{27}$ ) à 27 essais avec 3 facteurs et 3 niveaux. Les facteurs d'entrée sont la vitesse de coupe ( $V_c$ ) l'avance ( $f$ ) et le temps de coupe ( $T_m$ ) et les facteurs de sortie sont : l'usure en dépouille ( $VB$ ), la rugosité de surface ( $Ra$ ), les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P$ ) et le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ). Les deux derniers paramètres ( $P$  et  $V_{chip}$ ) sont calculés suivant les relations suivantes :

$$P_c = \frac{F_z \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}, \text{ kW} \quad (\text{IV.1})$$

$F_z$  : effort principal de coupe (N) ;  $V_c$  : vitesse de coupe (m/min).

$$V_{chip} = V_c \times f \times ap \times T_m \quad (\text{IV.2})$$

$f$  : profondeur de passe (mm/tr) ;  $T_m$  : temps de coupe (min)

Où la profondeur de passe ( $ap$ ) égale 0,2 mm.

L'analyse des résultats du tableau IV.1 montre que l'usure en dépouille est obtenue dans la plage de (0,021 à 0,29) mm, la rugosité moyenne arithmétique est enregistrée dans l'intervalle des valeurs comprise entre (0,32 et 1,27 $\mu$ m). Le reste des autres paramètres tel que ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $P$  et  $V_{chip}$ ) leurs variations sont comprises entre (14,01 à 94,04N), (45,16 à 236,01 N), (40,96 à 160,93N), (54,67 à 352,87 W) et (5,12 à 47,04  $cm^3$ ) respectivement.

**Tableau IV.1** Résultats expérimentaux des paramètres de sortie suivant le plan  $L_{27}$

Valeurs d'entrée			Valeurs de sortie						
$V_c$ , m/min	$f$ , mm/tr	$T_m$ , min	$VB$ , mm	$R_a$ , $\mu$ m	$F_x$ , N	$F_y$ , N	$F_z$ , N	$P$ , W	$V_{chip}$ , $cm^3$
80	0,08	4	0,021	0,32	14,01	65,22	41	54,67	5,12
80	0,08	8	0,032	0,36	46,34	100,91	81,19	108,25	10,24
80	0,08	12	0,047	0,4	76,09	140	110	146,67	15,36
80	0,11	4	0,071	0,44	22,85	66,72	62,26	83,01	7,04
80	0,11	8	0,092	0,47	47,17	119,65	97,04	129,39	14,08
80	0,11	12	0,126	0,52	92,27	189,1	139,64	186,19	21,12
80	0,14	4	0,087	0,66	29,78	100,59	77,78	103,71	8,96
80	0,14	8	0,114	0,69	62,02	154,73	127,5	170	17,92
80	0,14	12	0,135	0,76	98,04	234,11	160,93	214,57	26,88
110	0,08	4	0,08	0,37	14,25	45,16	47,88	87,78	7,04
110	0,08	8	0,11	0,68	44,1	99,43	82,88	151,95	14,08
110	0,08	12	0,14	0,82	73,48	132,01	114,55	210,01	21,12
110	0,11	4	0,152	0,78	25,72	68,71	60,66	111,21	9,68
110	0,11	8	0,186	0,91	52,44	138,13	108,4	198,73	19,36
110	0,11	12	0,22	1,02	86,93	188,08	131,31	240,74	29,04
110	0,14	4	0,155	0,75	27,21	83,06	77,47	142,03	12,32
110	0,14	8	0,196	1,1	64,09	149,4	117,2	214,87	24,64
110	0,14	12	0,24	1,27	94,14	227,44	151,27	277,33	36,96
140	0,08	4	0,088	0,33	18,04	50,2	40,96	95,57	8,96
140	0,08	8	0,14	0,58	41	88,3	77,53	180,9	17,92
140	0,08	12	0,152	0,88	70,64	129,46	109,73	256,04	26,88
140	0,11	4	0,142	0,51	22,23	58,46	66,68	155,59	12,32
140	0,11	8	0,175	0,62	50,65	123,47	95,72	223,35	24,64
140	0,11	12	0,2	0,85	82,08	174,92	130,7	304,97	36,96
140	0,14	4	0,215	0,71	35,34	92,36	79,06	184,47	15,68
140	0,14	8	0,25	0,86	54,75	146,02	116,39	271,58	31,36
140	0,14	12	0,29	1,01	92,91	236,01	151,23	352,87	47,04

### IV.3 Modélisation par la Méthodologie des Surfaces de Réponse (RSM)

La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) appliquée dans cette étude est une technique statistique empirique (expérimentale) utilisée pour l'analyse de régression multiple des données quantitatives obtenues à partir des expériences statistiquement conçues en résolvant les équations multi-variables simultanément. La représentation graphique de ces équations s'appelle surfaces de réponse, elle permet de décrire l'effet individuel et cumulatif des variables d'essai sur la réponse et de déterminer l'interaction mutuelle entre les variables d'essai et leur effet sur la réponse [68] et [69]. La méthodologie de surface de réponse est une procédure visant à déterminer une relation entre les paramètres indépendants du processus d'entrée et les données de sortie (réponse du procédé). Cette procédure comprend six étapes [70] et qui sont citées ci-dessous :

1. définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées,
2. adopter un plan de conception expérimentale,
3. effectuer une analyse de régression avec le modèle choisi,
4. effectuer une analyse statistique de la variance ANOVA des variables d'entrées indépendantes afin de trouver les paramètres les plus significatifs qui affectent la réponse,
5. déterminer le modèle avec le maximum de précision possible,
6. Optimiser les variables d'entrée et vérifier les paramètres de sortie prédits.

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante  $Y$ , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs),  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. Dans la présente étude, la relation entre les paramètres d'entrées (conditions de coupe) à savoir la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance par tour ( $f$ ) et le temps d'usinage ( $T_m$ ) et les paramètres de sorties [l'usure ( $VB$ ), la rugosité ( $R_a$ ), les composantes de l'effort de coupe ( $F_x, F_y$  et  $F_z$ ), la puissance de coupe ( $P$ ) et le volume du copeau enlevé ( $V_{chip}$ )], sont donnés par l'équation notée ci-dessous [71]:

$$y = \varphi(V_c, f, T_m) \quad (\text{IV.3})$$

Où :

$y =$  paramètres de sortie (usure, rugosité arithmétique, efforts de coupe, ...)

On peut ainsi écrire le modèle mathématique du second ordre, basé sur la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour une réponse donnée ( $y$ ) sous la forme suivante [70] :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (\text{IV.4})$$

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

Les variables codées  $X_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  sont obtenues à partir des équations de transformation suivantes [70]:

$$X_1 = \frac{V_c - V_{c_0}}{\Delta V_c} \quad (\text{IV.5})$$

$$X_2 = \frac{f - f_0}{\Delta f} \quad (\text{IV.6})$$

$$X_3 = \frac{T_m - T_{m_0}}{\Delta T_m} \quad (\text{IV.7})$$

Où  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$  sont les valeurs codées des paramètres  $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$  respectivement.  $V_{c_0}$ ,  $f_0$  et  $T_{m_0}$  au niveau zéro.  $\Delta V_c$ ,  $\Delta f$  et  $\Delta T_m$  sont les valeurs de  $V_c$ ,  $f$ , et  $T_m$ , respectivement.

- $a_0$ ,  $a_i$ ,  $a_{ij}$ ,  $a_{ii}$  représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.
- $\varepsilon$  représente l'erreur expérimentale aléatoire.

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance **ANOVA** : est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de

coupe. Comme les facteurs sont en général exprimés dans des unités différentes, leurs effets ne soient comparables que s'ils sont codés.

- Coefficients d'ajustement des modèles : Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression. Le coefficient ( $R^2$ ) peut s'interpréter comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, d'où ( $R^2$ ) varie entre 0 et 1. Une valeur de ( $R^2$ ) proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression ( $R^2$ ) est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (Equation IV.8) [69].

$$R^2 = 1 - \frac{SSErreur}{SStotal} \quad (IV.8)$$

### IV.3.1 ANOVA de l'usure en dépouillé (VB) et modélisation

Le tableau (IV.2) illustre l'analyse de la variance ANOVA de l'usure en dépouille (VB). Le niveau de signification est de 0,05 ce qui correspond à un niveau de confiance de 95 %. L'analyse des résultats indique que les paramètres significatifs sont ( $Vc$ ) avec une contribution de 39,96 %, suivie par l'avance ( $f$ ) et le temps d'usinage ( $Tm$ ) avec des contributions respectives de (35,36 et 13,51)%. L'interaction ( $Vcxf$ ) et le terme carré ( $Vc^2$ ) ont des faibles contributions respectives de 1,34 %, 5,23 %, par contre les autres interactions et termes carrés n'ont pas un impact significatif puisque leurs valeurs de la probabilité P est supérieur à 0,05. Des résultats similaires sont obtenus par Davim et figueira [41] lors du tournage dur de l'acier D2 avec des outils en céramique, et aussi Bouchelaghem [72] lors du tournage de l'acier fortement allié AISI D3 ayant une dureté de 60HRC. Les  $R^2 Prédit=0,9225$  et  $R^2 Adjusté=0,9519$  sont très proches; la différence est inférieure à 0,2. Par conséquent, le modèle est considéré comme adéquat et peut prédire avec précision le paramètre de sortie (pour ce cas VB) dans la gamme des conditions de coupe utilisées.

Tableau IV.2 ANOVA pour l'usure en dépouille (VB)

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarques
Model	0,115698	9	0,0128553	58,1828	<0,0001		
A-Vc	0,047740	1	0,0052465	23,7455	<0,0001	39,96	Signifiant
B-f	0,042244	1	0,0008162	3,6942	<0,0001	35,36	Signifiant
C-Tm	0,016140	1	0,0000009	0,0041	<0,0001	13,51	Signifiant
AB	0,001610	1	0,0016101	7,2872	0,0152	1,34	Signifiant
AC	0,000385	1	0,0003853	1,7440	0,2041	0,32	Non signifiant
BC	0,000280	1	0,0002803	1,2688	0,2756	0,23	Non signifiant
A <sup>2</sup>	0,006251	1	0,0062511	28,2924	<0,0001	5,23	Signifiant
B <sup>2</sup>	0,001031	1	0,0010314	4,6681	0,0453	0,86	Signifiant
C <sup>2</sup>	0,000016	1	0,0000156	0,0705	0,7938	0,01	Non signifiant
Residual	0,0037561	17	0,0002209			3,14	
Cor Total	0,1194540	26				100	

La figure (IV.1) montre les graphiques des effets principaux des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille (VB). On remarque que la vitesse de coupe (Vc) est le premier facteur qui affecte l'usure, suivie par l'avance (f) et en dernier lieu le temps de coupe (Tm).

Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual  
VB (mm)  
● Design Points  
--- 95% CI Bands

Actual Factors  
A: VC = 110  
B: f = 0,11  
C: t = 8

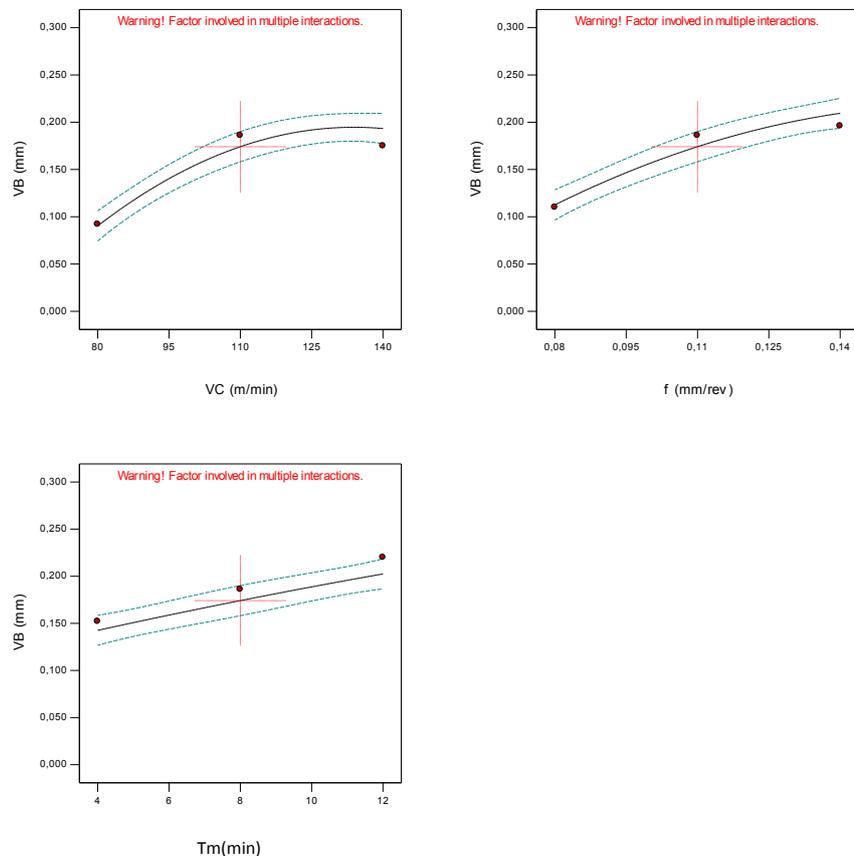


Figure IV.1 Graphique des effets principaux de l'usure en dépouille (VB)

- **Équation de régression pour (VB)**

L'analyse de régression de l'usure (VB) en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$  donne l'équation du modèle complet (IV.9) avec un coefficient de corrélation ( $R^2 = 96,86\%$ ).

$$VB(mm) = -0,6361 + 7,8132E-003V_c + 3,0818f - 5,2777E-004T_m + 0,0128V_cxf + 4,7222E-005V_cxT_m + 0,0402fxT_m - 3,5864E-005V_c^2 - 14,5679f^2 - 1,0069E-004T_m^2 \quad (IV.9)$$

$$R^2 = 0,9686, R^2 \text{ Adjusté} = 0,9519, R^2 \text{ Prédit} = 0,9225$$

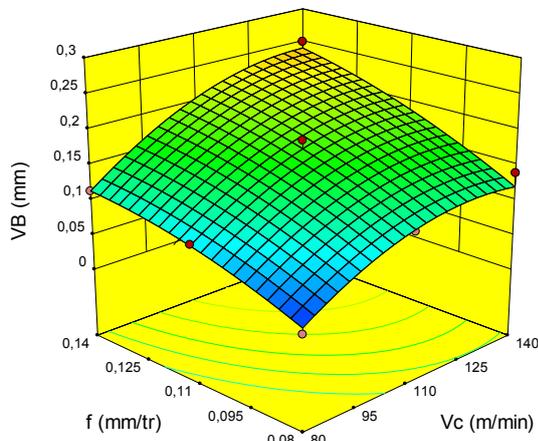
L'examen des résultats de l'ANOVA (tableau IV.2) permet de considérer seulement les facteurs qui ont un effet significatif, d'où nous présentons un modèle (équation IV.10) dit « réduit » en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif sur la réponse.

$$VB(mm) = -0,7077 + 8,1910E-003V_c + 3,4040f + 7,4861E-003T_m + 0,0128V_cxf - 3,5864E-005V_c^2 - 4,5679f^2 \quad (IV.10)$$

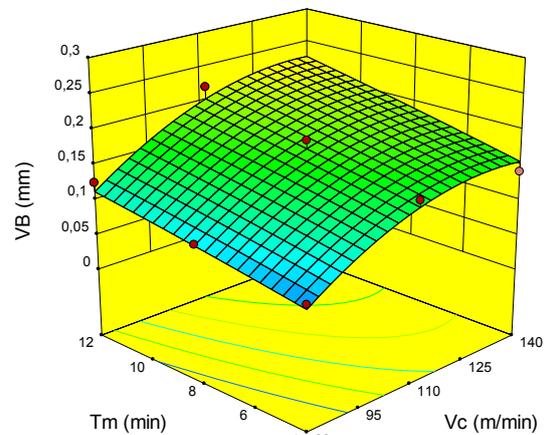
$$R^2 = 0,9629 ; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9517 ; R^2 \text{ Prédit} = 0,9316$$

- **Diagrammes de surface 3D de (VB) et graphique de contour**

La figure (IV.2) présente les diagrammes (3D) de l'usure en dépouille (VB) en fonction des paramètres du régime de coupe. Les figures (IV.2 a) et (IV.2 b) permet d'évaluer l'influence simultanée de ( $V_c ; f$ ), ( $V_c ; T_m$ ) sur l'usure en dépouille (VB). On remarque que la pente de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance ( $f$ ) sont plus importantes par rapport la pente du temps d'usinage ( $T_m$ ). La valeur de l'usure en dépouille (VB) la plus basse est obtenue avec la plus petite vitesse de coupe ( $V_c$ ), la plus petite avance ( $f$ ) et le temps d'usinage le plus bas. Le graphe de contour montre la relation entre la variable de réponse (VB) et les trois facteurs à partir d'un modèle d'équation (figures (IV.2c) et (IV.2d)).



(a) pour  $T_m=8 \text{ min}$



(b) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$

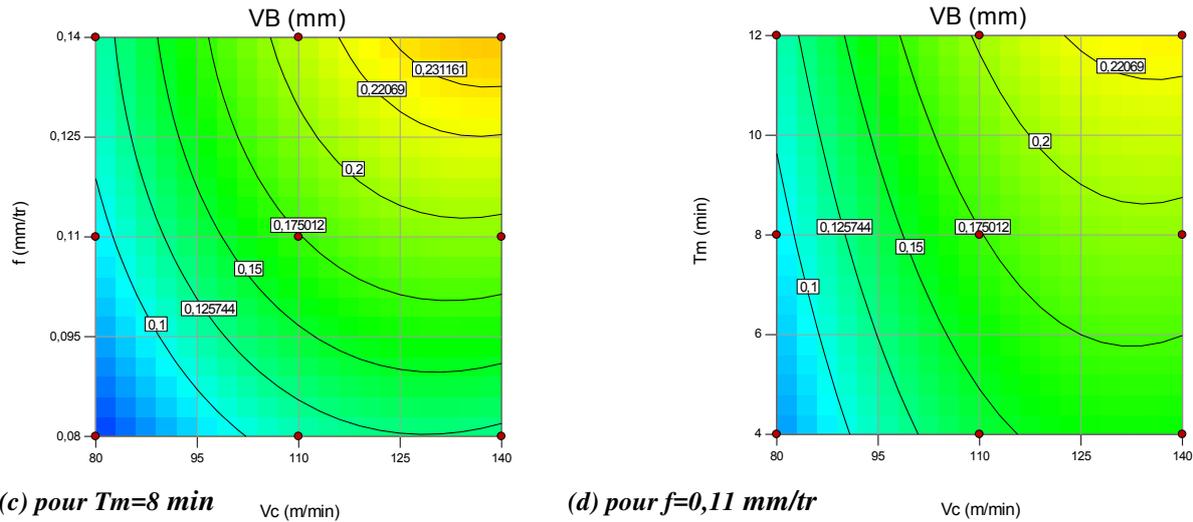


Figure IV.2 Diagrammes (3D) et graphes de contour de l'usure (VB) en fonction de  $V_c, f, T_m$ .

La figure IV.3 montre l'évolution de l'usure (VB) en fonction de ( $f$ ) et ( $T_m$ ) pour cinq valeurs de la vitesse de coupe (80, 95, 110, 125 et 140) m/min. La tendance des courbes montre clairement que l'accroissement des facteurs ( $f, T_m$  et  $V_c$ ) induit une augmentation de la valeur de l'usure (VB). Dans le cas de l'évolution de ( $V_c$ ) cette augmentation est plus significative pour les faibles vitesses de coupe. La valeur maximale de (VB)= 0,25 mm, est enregistrée lorsque les facteurs de coupe ( $f, T_m$  et  $V_c$ ) sont à leurs niveaux supérieurs. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par [28]et [40].

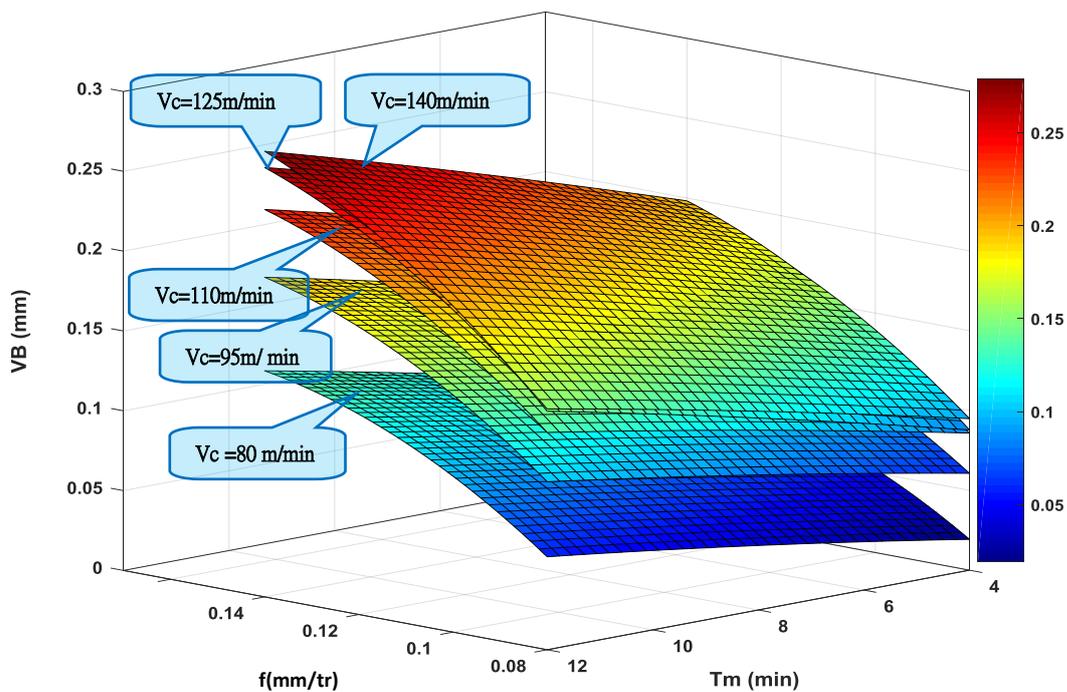
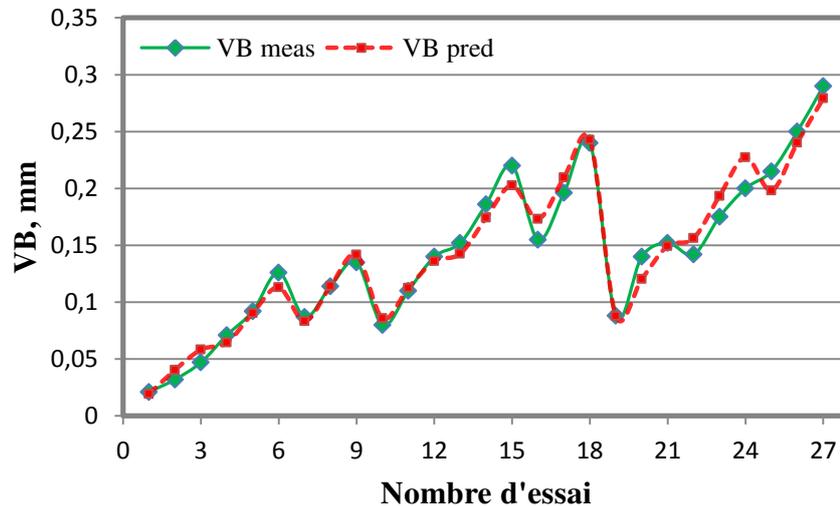


Figure IV.3 Surface 3D pour l'usure (VB) en fonction de  $V_c, f$  et  $T_m$ .

- **Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites**

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'usure en dépouille ( $VB$ ) et celles prédites par le modèle mathématique (quadratique) obtenu par l'analyse de régression est présentée graphiquement sur la figure IV.4. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches sauf pour quelques points.



**Figure IV.4** Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'usure ( $VB$ )

### IV.3.2 ANOVA de la rugosité ( $Ra$ ) et modélisation

L'analyse de la variance ANOVA du critère de rugosité ( $Ra$ ) est présentée dans le tableau IV.3. Les valeurs de " $Prob>F$ " inférieures à 0,05 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, l'avance ( $f$ ) est le facteur principal qui influe sur ( $Ra$ ) avec une contribution de 31,71%, suivi par le temps de coupe ( $Tm$ ) avec une contribution de 23,78% et enfin la vitesse de coupe ( $Vc$ ) a une faible influence avec 10,31%. L'interaction ( $Vc \times Tm$ ) et le terme ( $Vc^2$ ) ont également des effets significatifs avec des contributions de 4,39% et 21,95% respectivement. Des résultats similaires ont été rapportés par Aouici [73] et Yallese [74] lors du tournage dur des aciers AISI H11 et X200cr12 à l'aide d'outils en CBN. Aussi les résultats de Suresh [75] et Fnides [76] lors du tournage des aciers trempés AISI H13 et X38CrMoV5-1 à l'aide d'outils en céramiques, sans oublier Figueira [41] pendant le tournage dur de l'acier de travail à froid (D2) par des outils en céramique et aussi bouacha [77]. L'influence de ( $f$ ) sur ( $Ra$ ) s'explique physiquement par l'apparition des rainures hélicoïdales sur la surface de la pièce. Celles-ci sont générées par le mouvement rectiligne de l'outil et le mouvement de rotation de la pièce. L'augmentation de ( $f$ ) alors produit des rainures larges et profondes, conduisant à une dégradation de la qualité de surface de la pièce usinée [77].

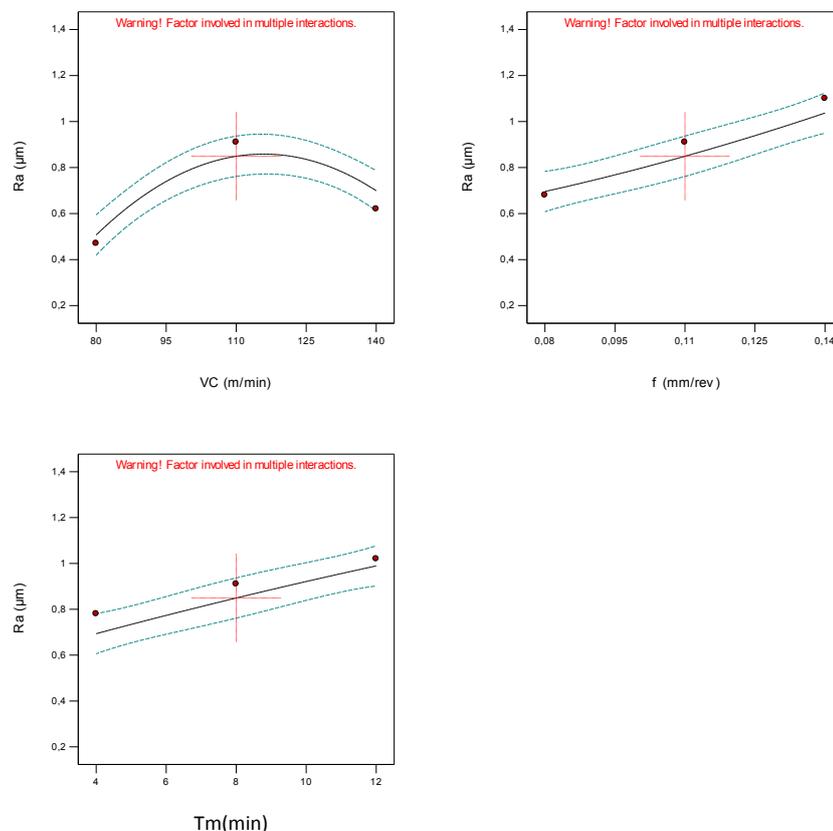
Tableau IV.3 ANOVA pour la rugosité de surface ( $Ra$ )

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarques
Model	1,53	9	0,17	25,49	< 0,0001		
A-Vc	0,17	1	0,17	24,97	<0,0001	10,37	Signifiant
B-f	0,52	1	0,52	78,63	< 0,0001	31,71	Signifiant
C-Tm	0,39	1	0,39	59,03	< 0,0001	23,78	Signifiant
AB	4,80E-03	1	4,80E-03	0,72	0,4077	0,29	Non signifiant
AC	0,072	1	0,072	10,82	<0,0043	4,39	Signifiant
BC	2,13E-03	1	2,13E-03	0,32	0,5788	0,13	Non signifiant
A <sup>2</sup>	0,36	1	0,36	54,58	< 0,0001	21,95	Signifiant
B <sup>2</sup>	1,78E-03	1	1,78E-03	0,27	0,6118	0,11	Non signifiant
C <sup>2</sup>	3,63E-04	1	3,63E-04	0,055	0,8182	0,02	Non signifiant
Residual	0,11	17	6,66E-03			6,71	
Cor Total	1,64	26				100	

La figure IV.5 montre les effets principaux des facteurs considérés ; la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage sur la rugosité de surface ( $Ra$ ). À partir de cette figure, il apparaît clairement que l'avance par tour ( $f$ ) affecte la rugosité ( $Ra$ ) car elle a la plus grande pente, suivie par le temps de coupe ( $Tm$ ), tandis que la vitesse de coupe a un faible effet sur l'évolution de rugosité ( $Ra$ ).

Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual  
Ra ( $\mu\text{m}$ )  
● Design Points  
--- 95% CI Bands

Actual Factors  
A: VC = 110  
B: f = 0,11  
C: t = 8

Figure IV.5 Graphe des effets principaux de la rugosité ( $Ra$ ).

- **Équation de régression pour ( $Ra$ )**

La relation entre les facteurs d'entrés et la sortie (*critère de rugosité  $Ra$* ) a été modélisée par l'équation quadratique de régression. Donc, le modèle de la rugosité moyenne arithmétique ( $Ra$ ) est donné par l'équation (IV.11), avec un coefficient de corrélation ( $R^2 = 93,10\%$ ).

$$Ra(\mu\text{m}) = -3,3308 + 0,0606Vc + 4,8086f - 0,0141Tm - 0,0222 Vc \times f + 6,4583E-004 Vc \times Tm - 0,1111 f \times Tm - 2,7345E-004Vc^2 + 19,1358 f^2 - 4,8611E-004Tm^2 \quad (\text{IV.11})$$

$$R^2 = 0,9310; R^2 \text{ Adjusté} = 0,8945; R^2 \text{ Prédit} = 0,8241$$

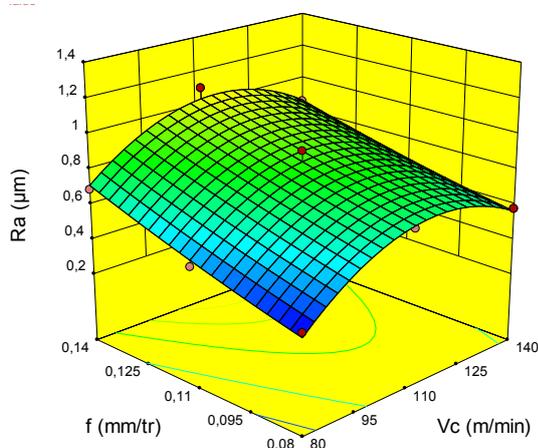
En introduisant seulement les termes significatifs dans le modèle, nous obtenons l'équation de régression suivante :

$$Ra(\mu\text{m}) = -3,1582 + 0,0582 Vc + 5,68519 f - 0,0341 Tm + 6,4583E-004 Vc \times Tm - 2,7345E-004Vc^2 \quad (\text{IV.12})$$

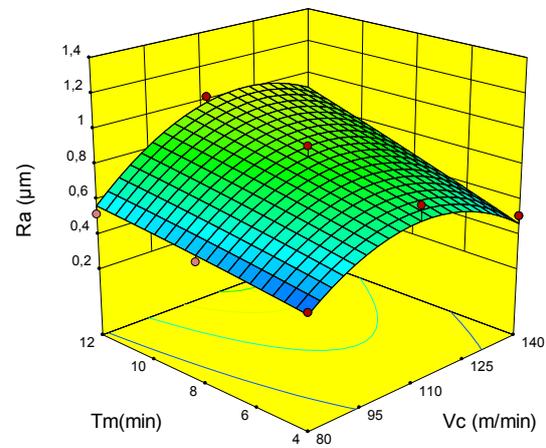
$$R^2 = 0,9255; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9077; R^2 \text{ Prédit} = 0,8726$$

- **Diagrammes de surface 3D de ( $Ra$ ) et graphiques de contours**

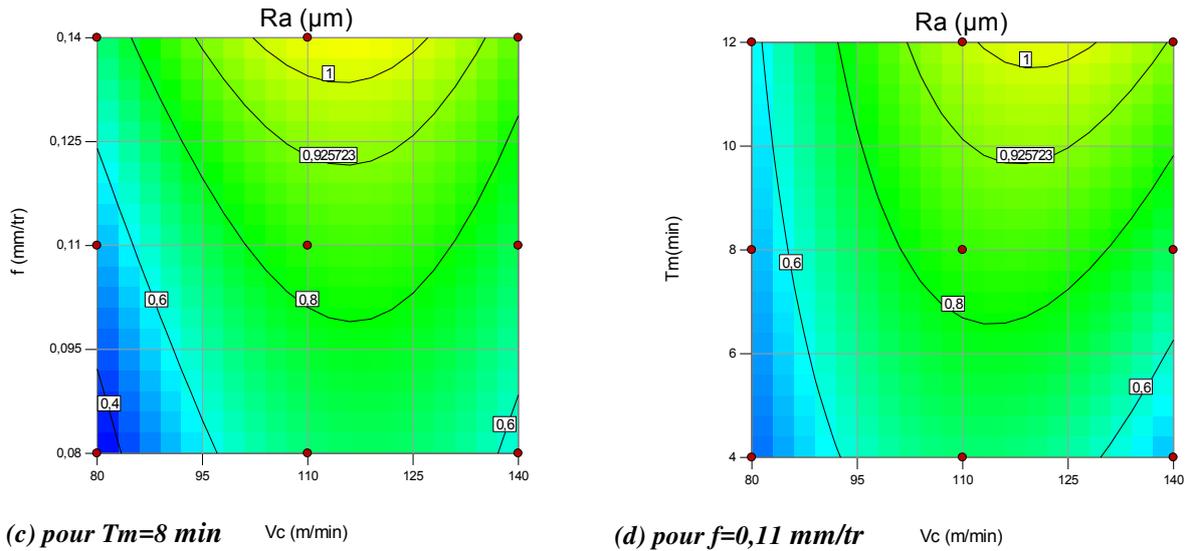
La figure IV.6.a et IV.6.b permet d'évaluer l'influence simultanée de ( $Vc ; f$ ), ( $Vc ; Tm$ ) sur le critère de rugosité de surface ( $Ra$ ). L'analyse des surfaces 3D indique que la pente de l'avance ( $f$ ) est la plus importante suivie par le temps d'usinage ( $Tm$ ). La meilleure rugosité de la surface usinée est obtenue avec la combinaison de la plus petite valeur de la vitesse de coupe ( $Vc$ ), la plus petite valeur de l'avance par tour ( $f$ ) et la plus petite valeur du temps d'usinage ( $Tm$ ).



(a) pour  $Tm=8 \text{ min}$



(b) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$

(c) pour  $Tm=8$  min  $Vc$  (m/min)(d) pour  $f=0,11$  mm/tr  $Vc$  (m/min)

**Figure IV.6** Diagrammes (3D) et graphes de contour de la rugosité ( $Ra$ ) en fonction de  $Vc, f, Tm$

Les graphes de contour (figure IV.6.c et IV.6.d) permettent de visualiser la surface de réponse (dans notre cas  $Ra$ ) et aussi la relation entre une valeur de réponse et les facteurs ( $Vc, f$  et  $Tm$ ) à partir d'un modèle d'équation. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

La figure IV.7 montre la variation de la rugosité de surface ( $Ra$ ) en fonction de la vitesse ( $Vc$ ), le temps ( $Tm$ ) et l'avance ( $f$ ). L'analyse des résultats montre que l'augmentation de l'avance ( $f$ ) et le temps d'usinage ( $Tm$ ) dégrade la qualité de la surface usinée et font augmenter la rugosité ( $Ra$ ). Ces résultats sont en accord avec les travaux de [29] et [30]. Par contre, l'évolution de ( $Ra$ ) en fonction de ( $Vc$ ) présente un maximum pour une valeur moyenne de ( $Vc=110$  m/min). En effet, dans l'intervalle de vitesse [80 -110] m/min, l'augmentation des valeurs de ( $Ra$ ) est due à l'augmentation relativement importante de l'usure ( $VB$ ).

Dans l'intervalle de vitesse [110 -140] m/min, le taux d'évolution de l'usure ( $VB$ ) diminue, ce qui conduit à la diminution de la rugosité ( $Ra$ ). Des résultats similaires ont été reportés par [30].

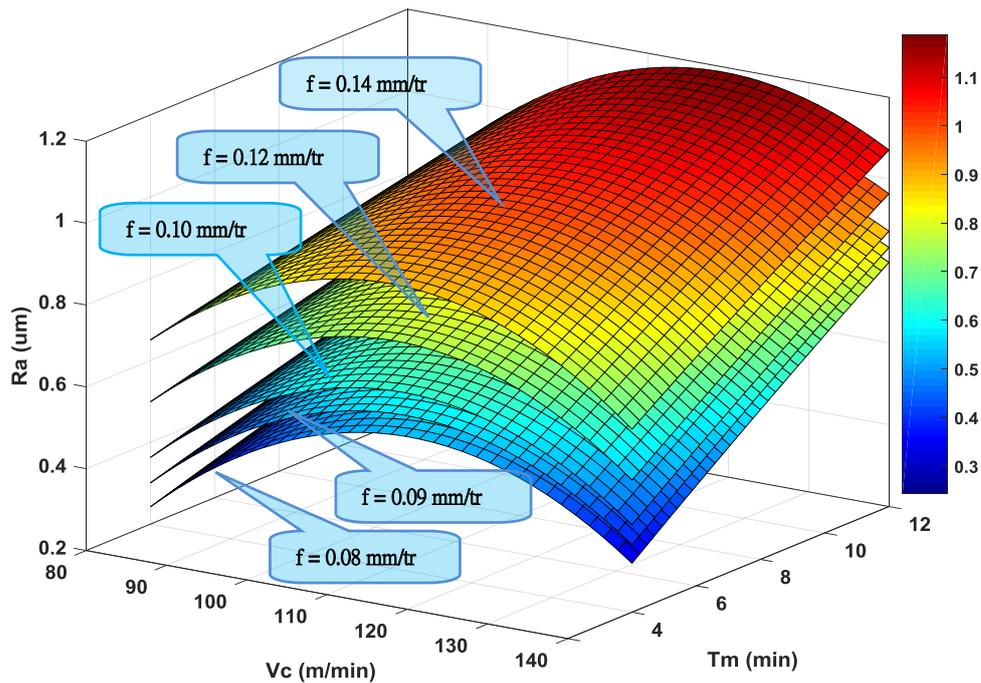


Figure IV.7 Surface 3D pour la rugosité ( $Ra$ ) en fonction de  $Vc$ ,  $f$  et  $Tm$ .

- **Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées**

La figure IV.8 montre la comparaison entre les valeurs prédites et mesurées du critère de rugosité de surface ( $Ra$ ). Les valeurs prédites du critère ( $Ra$ ) sont plus proches de ceux enregistrés expérimentalement. Par conséquent, le modèle quadratique obtenu par l'analyse de régression peut être utilisé pour prédire les valeurs de rugosité de surface pour toute combinaison de la vitesse de coupe ( $Vc$ ), la vitesse d'avance ( $f$ ), et le temps de coupe ( $Tm$ ) dans la plage de l'expérimentation effectuée.

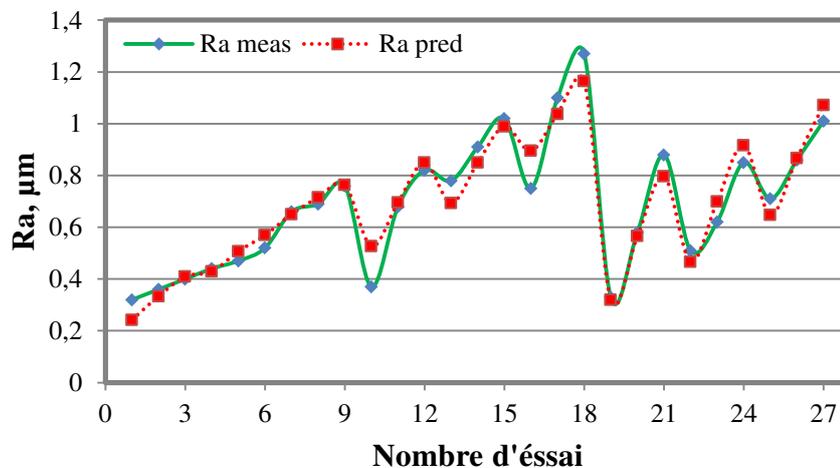


Figure IV.8 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de la rugosité ( $Ra$ )

### IV.3.3 ANOVA des efforts de coupe ( $F_x$ , $F_y$ et $F_z$ ) et modélisation

Les tableaux IV.4 à IV.6 présentent les résultats d'analyse de la variance (ANOVA) respectivement, pour les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ). Cette analyse était faite pour les valeurs de P inférieure à 0,05 (ou 95% de confiance).

Le tableau IV.4 résume les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour l'effort axial ( $F_x$ ). On remarque clairement que le temps de coupe ( $T_m$ ) a une grande influence sur l'effort ( $F_x$ ) avec une contribution de 91,47%, suivi par l'avance ( $f$ ) avec une légère contribution de 7,57%. L'interaction ( $V_c \times f$ ) a aussi un effet significatif avec une faible contribution de 0,390%. La vitesse de coupe ( $V_c$ ), les interactions ( $V_c \times f$  et  $f \times T_m$ ) et les termes carrés ( $V_c^2$  et  $f^2$ ) restent insignifiantes avec des contributions très faibles.

**Tableau IV.4 ANOVA pour la composante de l'effort axial ( $F_x$ )**

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarques
Model	18851,71	9	2094,63	258,38	< 0,0001		
A-Vc	24,34	1	24,34	3,00	0,1013	0,129	Non Signifiant
B-f	1428,09	1	1428,09	176,16	< 0,0001	7,57	Signifiant
C-Tm	17245,34	1	17245,34	2127,26	< 0,0001	91,47	Signifiant
AB	5,333E-004	1	5,333E-004	6,579E-005	0,9936	0,007	Non signifiant
AC	73,71	1	73,1	9,09	0,0078	0,390	Signifiant
BC	29,61	1	29,61	3,65	0,0730	0,157	Non signifiant
A <sup>2</sup>	1,34	1	1,34	0,17	0,6893	0,007	Non signifiant
B <sup>2</sup>	1,32	1	1,32	0,16	0,6913	0,007	Non signifiant
C <sup>2</sup>	47,96	1	47,96	5,92	0,0263	0,254	signifiant
Résiduel	137,82	17	8,11			0,731	
Cor Total	18989,53	26				100	

Le tableau IV.5 expose les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour déterminer l'influence des différents facteurs sur l'effort radial ( $F_y$ ). Le temps de coupe ( $T_m$ ) a aussi une influence majeure sur l'effort radial avec une contribution de (73,06%), suivi par l'avance par tour avec une contribution de (23,029%). L'interaction de l'avance avec le temps d'usinage ( $f \times T_m$ ) est la seule interaction qui a un effet significatif avec une contribution de 3,43%. Les autres termes n'ont pas un effet significatif.

**Tableau IV.5** ANOVA pour la composante de l'effort radial ( $F_y$ )

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarques
Model	79213,76	9	8801,53	147,05	< 0,0001		
A-Vc	286,64	1	286,64	4,79	0,0429	0,361	Signifiant
B-f	18242,41	1	18242,41	304,79	< 0,0001	23,029	Signifiant
C-Tm	57873,69	1	57873,69	966,93	< 0,0001	73,06	Signifiant
AB	44,58	1	44,58	0,74	0,4001	0,056	Non signifiant
AC	6,29	1	6,29	0,11	0,7497	0,007	Non Signifiant
BC	2719,84	1	2719,84	45,44	< 0,0001	3,43	signifiant
A <sup>2</sup>	1,01	1	1,01	0,017	0,8981	0,001	Non signifiant
B <sup>2</sup>	7,36	1	7,36	0,12	0,7302	0,009	Non signifiant
C <sup>2</sup>	31,94	1	31,94	0,53	0,4750	0,040	Non signifiant
Résiduel	1017,50	17	59,85			1,284	
Cor Total	80231,26	26				100	

Le tableau **IV.6** présente les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour l'effort tangentiel ( $F_z$ ). L'analyse des résultats montre que le temps de coupe reste toujours le facteur qui a l'effet le plus significatif sur la réponse avec une contribution de (75,74%). En deuxième lieu l'avance par tour avec (22,66%). Tandis que les autres termes ont des effets non significatifs [77].

**Tableau IV.6** ANOVA pour la composante de l'effort tangentiel ( $F_z$ )

Source	SS	DF	MS	F-Value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	30321,07	9	3369,01	227,46	< 0,0001		
A-Vc	47,82	1	47,82	3,23	0,0901	0,16	Non Signifiant
B-f	6927,04	1	6927,04	467,69	< 0,0001	22,66	Signifiant
C-Tm	23156,24	1	23156,24	1563,42	< 0,0001	75,74	Signifiant
AB	20,18	1	20,18	1,36	0,2593	0,07	Non signifiant
AC	50,31	1	50,31	3,4	0,0828	0,16	Non Signifiant
BC	50,76	1	50,76	3,43	0,0816	0,17	Non signifiant
A <sup>2</sup>	5,93	1	5,93	0,4	0,5352	0,02	Non signifiant
B <sup>2</sup>	7,61	1	7,61	0,51	0,4833	0,02	Non signifiant
C <sup>2</sup>	55,19	1	55,19	3,73	0,0704	0,18	Non signifiant
Residual	251,79	17	14,81			0,82	
Cor Total	30572,86	26				100	

- **Équations de régression pour ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ )**

Les modèles complets des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) en fonction de Vc, f et Tm sont donnés par les équations (IV.13), (IV.14) (IV.15) avec des coefficients de corrélation (99,27, 98,73 et 99,18) % respectivement.

$$F_x(N) = -46,3815 + 0,2428V_c + 307,7531f + 5,7428T_m - 7,4074E-003V_c x f - 0,0206V_c x T_m + 13,0903 f x T_m - 5,2531E-004V_c^2 - 521,6049 f^2 + 0,1767T_m^2 \quad (IV.13)$$

$$R^2 = 0,9927; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9889; R^2 \text{ Prédit} = 0,9824$$

$$F_y(N) = 79,19781 - 0,5172V_c - 448,7376f - 2,5957T_m + 2,1416 V_c x f + 6,0347E-003V_c x T_m + 125,4583 f x T_m + 4,5617E-004V_c^2 + 1230,2469f^2 + 0,1442T_m^2 \quad (IV.14)$$

$$R^2 = 0,9873; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9806; R^2 \text{ Prédit} = 0,9673$$

$$F_z(N) = -93,8526 + 0,4837V_c + 950,5493 f + 11,9912 T_m - 1,4407 V_c x f - 0,0170 V_c x T_m + 17,1388 f x T_m - 1,1049E-003V_c^2 - 1251,2345 f^2 - 0,1895 T_m^2 \quad (IV.15)$$

$$R^2 = 0,9918; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9874; R^2 \text{ Prédit} = 0,9804$$

Les modèles réduits sont donnée par les équations suivantes:

$$F_x(N) = -45,7718 + 0,1264 V_c + 296,9074 f + 7,1827T_m - 0,0206V_c x T_m + 0,1767 T_m^2 \quad (IV.16)$$

$$R^2 = 0,9910; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9889; R^2 \text{ Prédit} = 0,9854$$

$$F_y(N) = +20,8885 - 0,1330V_c + 57,5000 f + 0,3753T_m + 125,4583 f x T_m \quad (IV.17)$$

$$R^2 = 0,9862; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9837; R^2 \text{ Prédit} = 0,9787$$

$$F_z(N) = -39,2816 - 0,0543V_c + 653,9074f + 8,9668T_m \quad (IV.18)$$

$$R^2 = 0,9856; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9837; R^2 \text{ Prédit} = 0,9804$$

Les figures (IV.9), (IV.10) et (IV.11) montrent les effets principaux des facteurs considérés : ( $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ ) sur les efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) successivement. À partir de ces figures, on remarque que le temps de coupe ( $T_m$ ) est le facteur le plus influent sur tous les composantes de l'effort de coupe car il a la plus grande pente, suivi par l'avance par tour ( $f$ ) avec un faible effet. D'autre part, une variation très légère a été observée sur les trois composantes de l'effort en fonction de la variation de la vitesse de coupe ( $V_c$ ).

Design-Expert® Software  
 Factor Coding: Actual  
 Fx (N)  
 ● Design Points  
 --- 95% CI Bands

Actual Factors  
 A: VC = 110  
 B: f = 0,11  
 C: Tm = 8

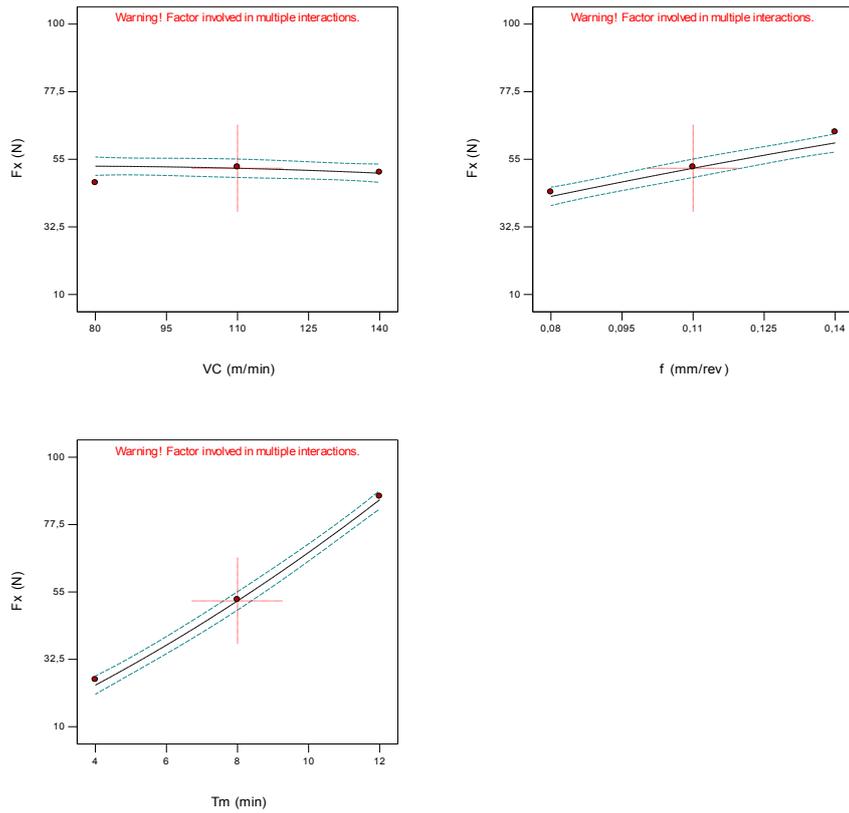


Figure IV.9 Graphe des effets principaux de l'effort axial (Fx).

Design-Expert® Software  
 Factor Coding: Actual  
 Fy (N)  
 ● Design Points  
 --- 95% CI Bands

Actual Factors  
 A: VC = 110  
 B: f = 0,11  
 C: Tm = 8

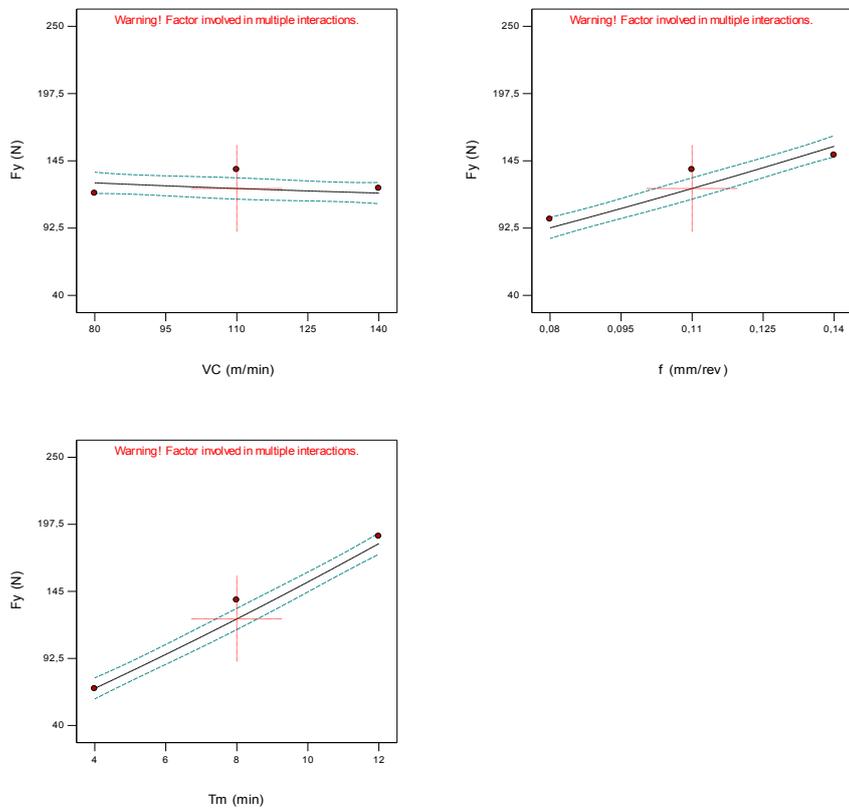


Figure IV.10 Graphe des effets principaux de l'effort radial (Fy)

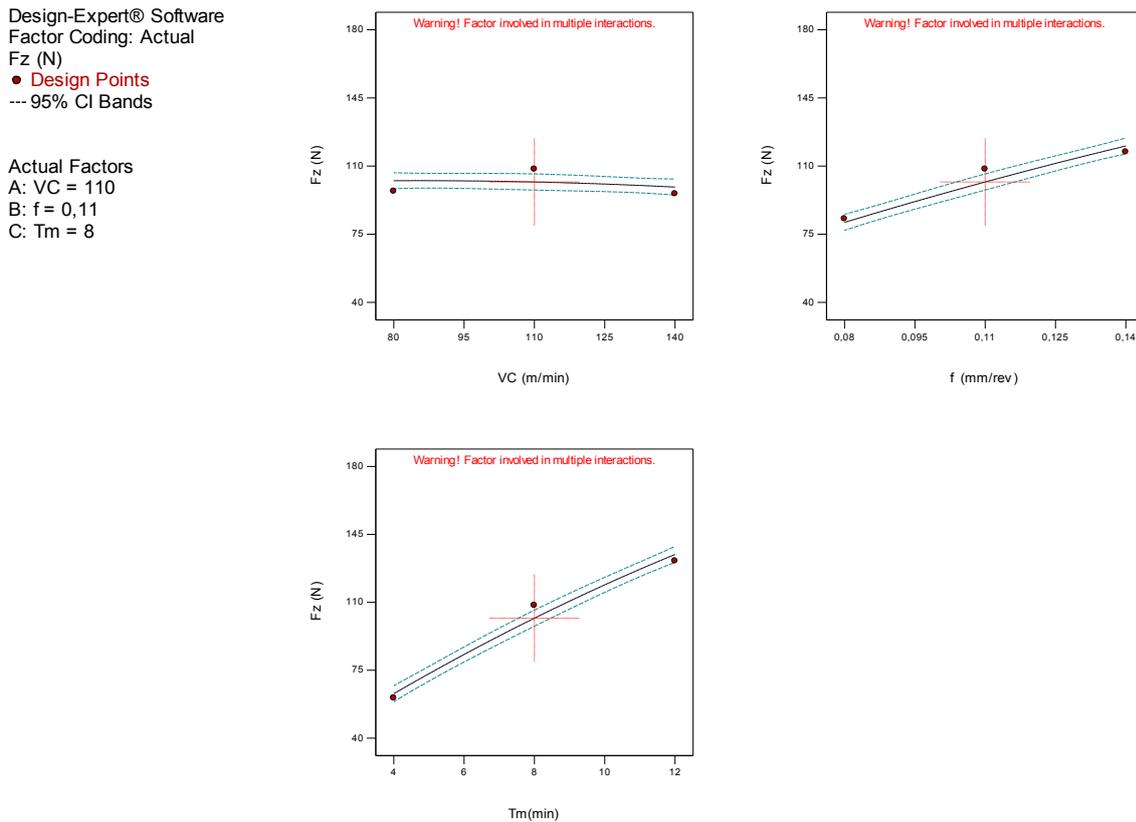
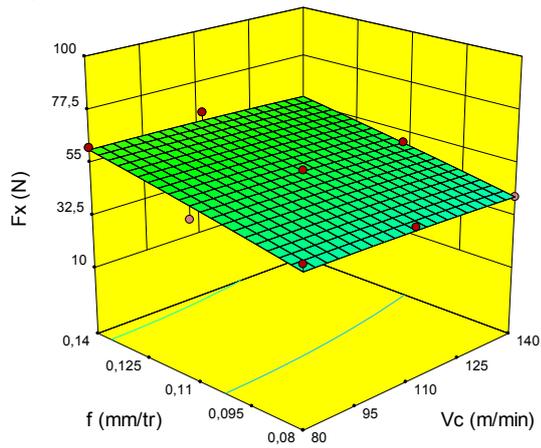


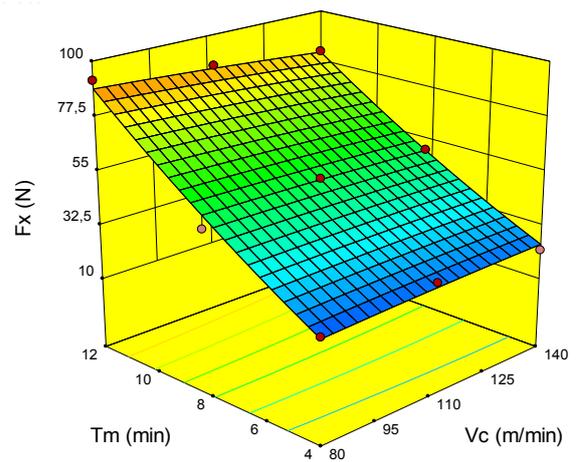
Figure IV.11 Graphe des effets principaux de l'effort tangentiel ( $F_z$ ).

- Diagrammes de surface 3D de ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) et graphiques de contours

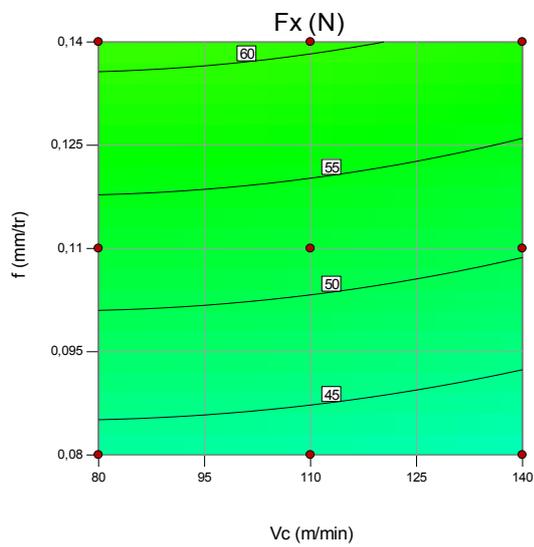
Les figures (IV.12), (IV.13) et (IV.14) illustrent la variation des efforts de coupe en fonction des paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ ). Ces figures montrent que l'augmentation du temps de coupe fait augmenter toutes les composantes de l'effort de coupe considérablement. Donc il est clair que le temps d'usinage ( $T_m$ ) est le facteur prédominant sur les composantes de l'effort de coupe. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de l'usure en fonction du temps d'usinage. Cette augmentation de l'usure conduit d'une part à une augmentation de la surface de contact entre l'outil et la pièce, ce qui induit une augmentation des forces de frottement. D'autre part, cette usure entraînera également une perte de l'acuité de l'arête de coupe et par conséquent, une augmentation des forces de coupe. Bouacha [77] et Aouici [78] ont rapporté des résultats similaires lors du tournage de l'acier AISI 52100 (64 HRC) et de l'acier AISI H11 en utilisant respectivement l'outil CBN 7020, sans oublier Gaitonde [40] pendant le tournage dur de l'acier D2 avec des outils en céramique.



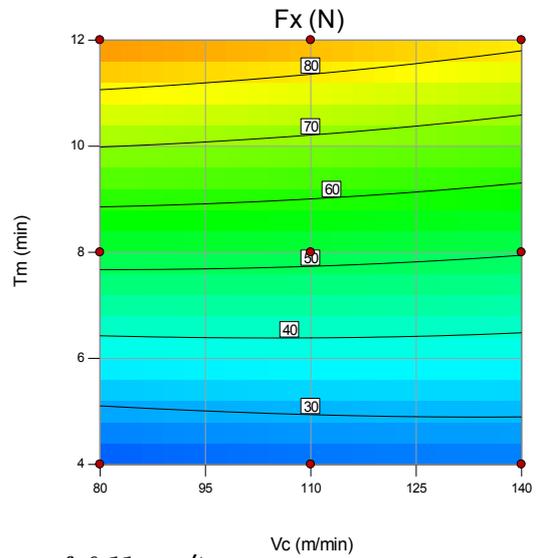
(a) pour  $T_m=8 \text{ min}$



(b) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$

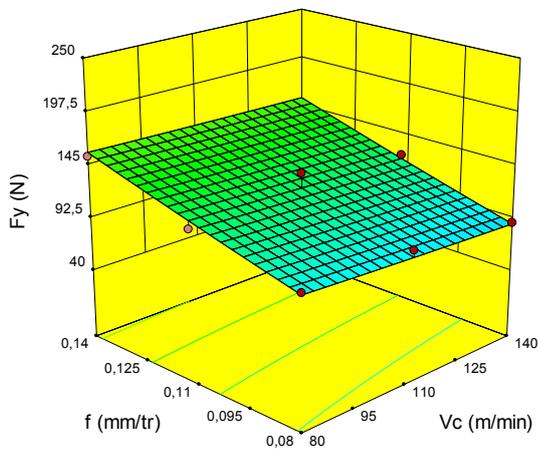


(c) pour  $T_m=8 \text{ min}$

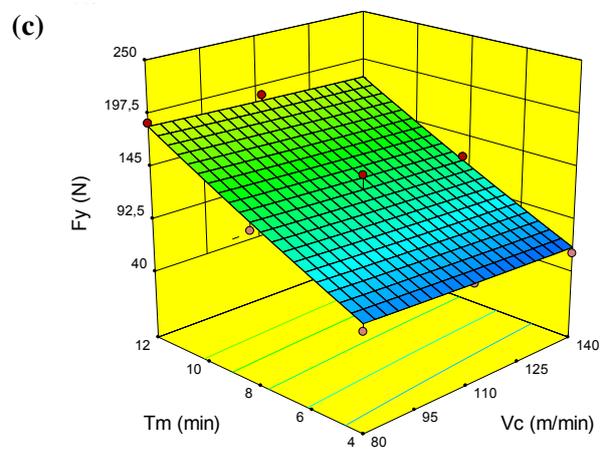


(d) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$

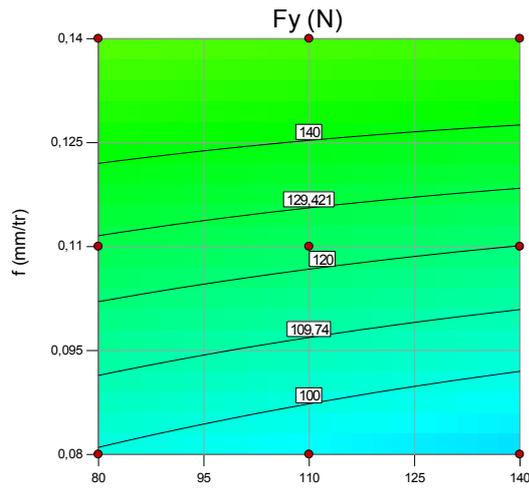
Figure IV.12 Diagrammes (3D) et graphes de contour de ( $F_x$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$



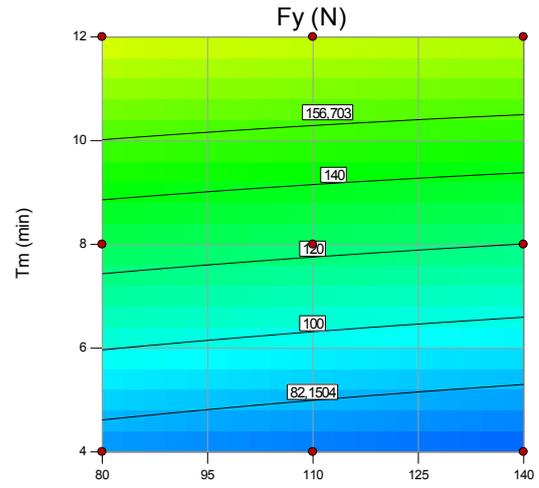
(a) pour  $T_m=8 \text{ min}$



(b) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$

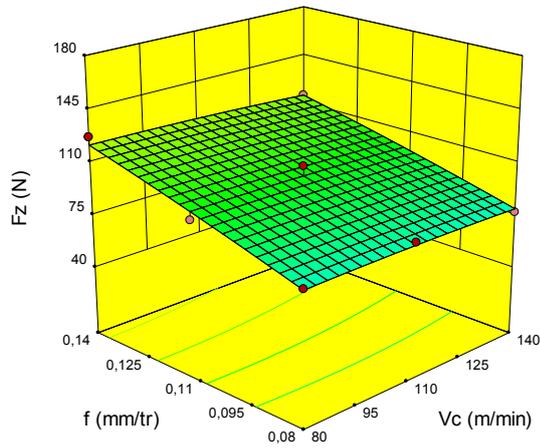


(c) pour  $T_m=8 \text{ min}$   $V_c$  (m/min)

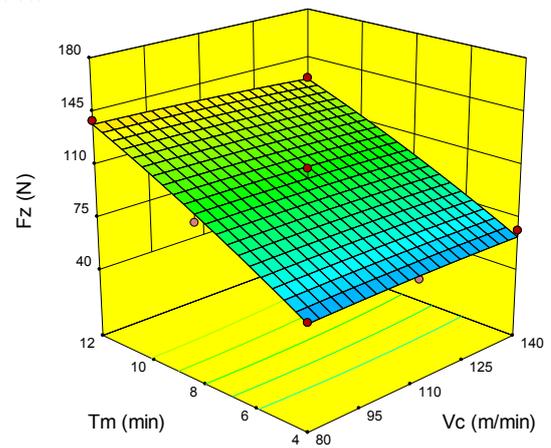


(d) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$   $V_c$  (m/min)

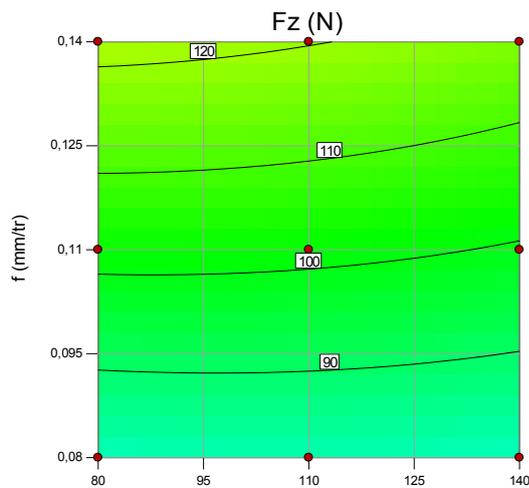
Figure IV.13 Diagrammes (3D) et graphes de contour de ( $F_y$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ .



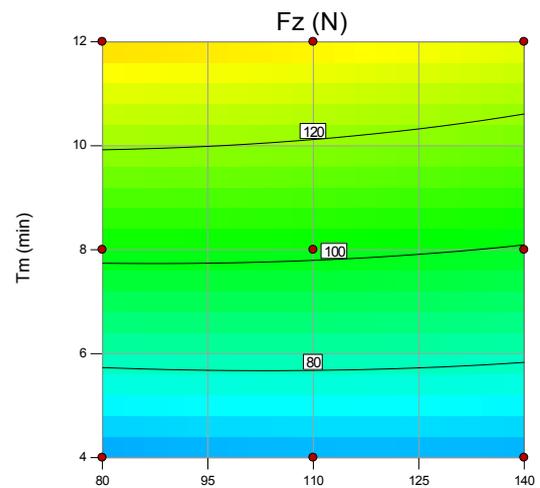
(a) pour  $T_m=8 \text{ min}$



(b) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$



(c) pour  $T_m=8 \text{ min}$   $V_c$  (m/min)



(d) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$   $V_c$  (m/min)

Figure IV.14 Diagrammes (3D) et graphes de contour de ( $F_z$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ .

La figure IV.15 présente les courbes 3D de l'effort de coupe ( $F_z$ ) en fonction de ( $V_c$ ) et ( $f$ ) pour cinq valeurs de temps d'usinage (4, 6, 8, 10 et 12) min. On remarque que l'effort de coupe augmente avec l'augmentation de ( $f$ ) et du ( $T_m$ ), par contre l'effort de coupe ne subit presque pas de changement avec la variation de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) dans cet intervalle. Ainsi, on peut conclure que les faibles valeurs de ( $F_z$ ) (moindre effort fourni), sont obtenues avec une faible valeur de ( $f$ ) et un temps de coupe ( $T_m$ ) minimal. Des résultats similaires ont été mentionnés par [30] et [72].

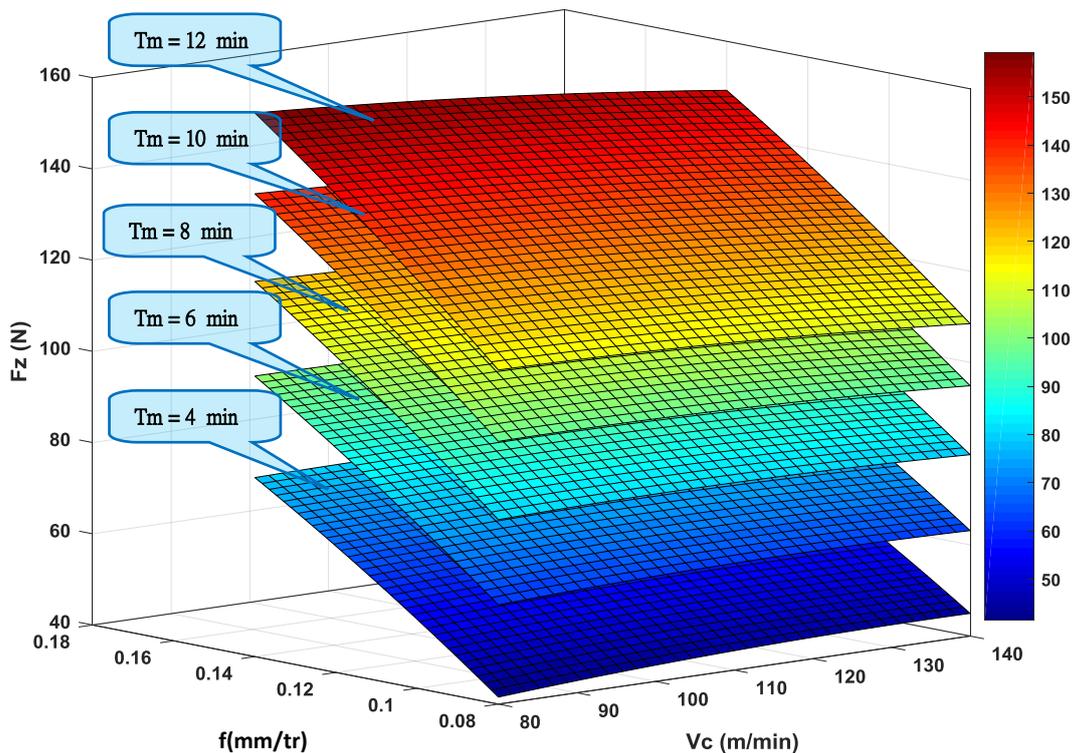


Figure IV.15 Surface 3D pour l'effort tangentiel ( $F_z$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ .

- **Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées**

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des composantes des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_t$ ) pour et celles estimées par les modèles mathématiques (quadratique) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (RSM), est présentée graphiquement sur les figures IV.16, IV.17 et IV.18 respectivement. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

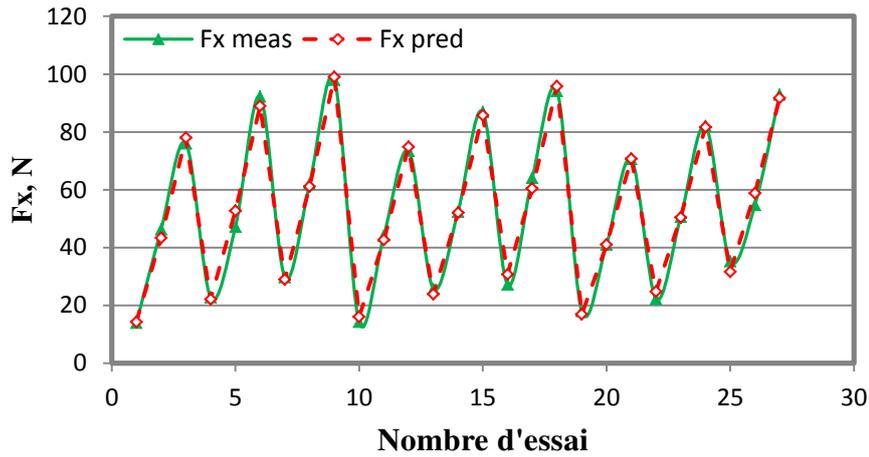


Figure IV.16 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'effort ( $F_x$ )

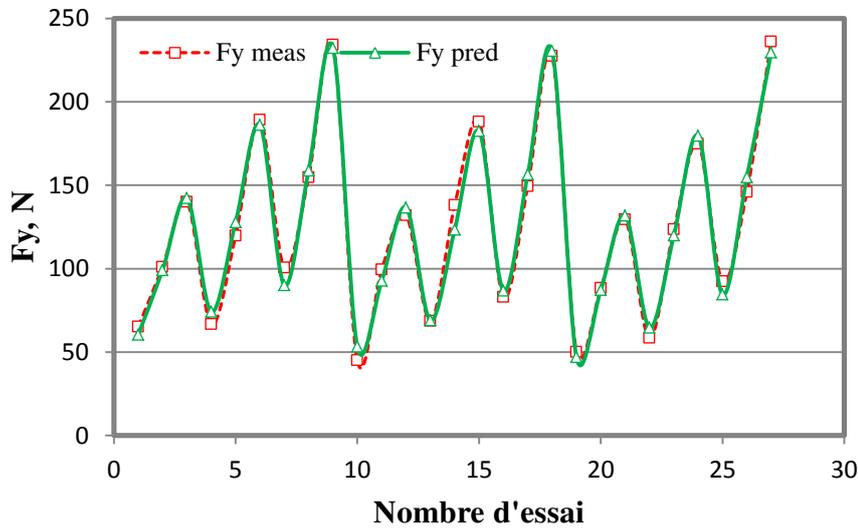


Figure IV.17 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'effort ( $F_y$ )

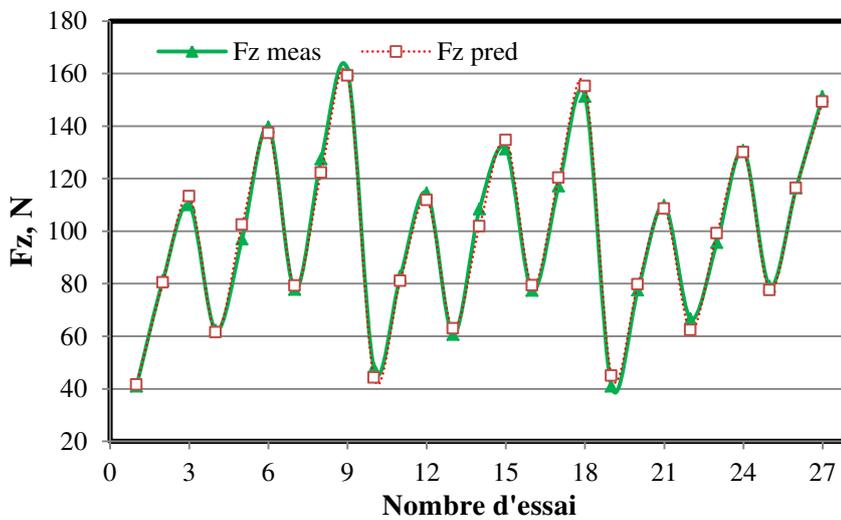


Figure IV.18 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de l'effort ( $F_z$ )

#### IV.3.4 ANOVA de la Puissance de coupe ( $P$ ) et modélisation

Le tableau (IV.7) présente l'analyse de la variance ANOVA de la puissance de coupe ( $P$ ). D'après ce tableau, on peut voir qu'apparemment le temps de coupe ( $T_m$ ) est le facteur le plus important qui affecte la puissance de coupe ( $P$ ) avec une contribution de 54,17%, suivi par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et l'avance ( $f$ ) avec des pourcentages de contribution égales à 27,12% et 16,15% respectivement. Les interactions ( $V_c f$ ) et ( $V_c T_m$ ) sont significatives mais avec une faible contribution inférieure à 2%. Les autres termes n'ont pas d'influence significative.

Tableau IV.7 ANOVA pour la puissance de coupe ( $P$ )

Source	SS	DF	Ms	F-Value	P-value	Cont.%	Remarque
Model	1,407E+005	9	15638,75	364,65	< 0,0001		
A- $V_c$	38169,00	1	38169,00	890,00	< 0,0001	27,127	Signifiant
B- $f$	22726,41	1	22726,41	529,92	< 0,0001	16,15	Signifiant
C- $T_m$	76225,60	1	76225,60	1777,38	< 0,0001	54,17	Signifiant
AB	795,77	1	795,77	18,56	0,0005	0,56	Signifiant
AC	2471,36	1	2471,36	57,63	< 0,0001	1,75	Signifiant
BC	132,40	1	132,40	3,09	0,0969	0,094	Non signifiant
A <sup>2</sup>	41,78	1	41,78	0,97	0,3375	0,029	Non signifiant
B <sup>2</sup>	34,38	1	34,38	0,80	0,3831	0,024	Non signifiant
C <sup>2</sup>	152,04	1	152,04	3,55	0,0769	0,108	Non signifiant
Résiduel	729,07	17	42,89			0,518	
Cor Total	1,415E+005	26				100	

La figure (IV.19) illustre les effets principaux des paramètres de coupe sur la puissance de coupe ( $P$ ). On remarque que le facteur qui a la plus grande influence sur la puissance de coupe ( $P$ ) est le temps de coupe ( $T_m$ ) puisqu'il a la plus grande pente, il est suivi par la vitesse de coupe ( $V_c$ ) et en dernier lieu par l'avance ( $f$ ) avec des pentes proche l'une de l'autre. C'est logique puisque la puissance ( $P$ ) dépend de la vitesse de coupe et de l'effort de coupe, et ce dernier est influé par la section du copeau. Des résultats similaires sont rapportés par [40].

Design-Expert® Software  
 Factor Coding: Actual  
 P (W)  
 ● Design Points  
 --- 95% CI Bands

Actual Factors  
 A: VC = 110  
 B: f = 0,11  
 C: t = 8

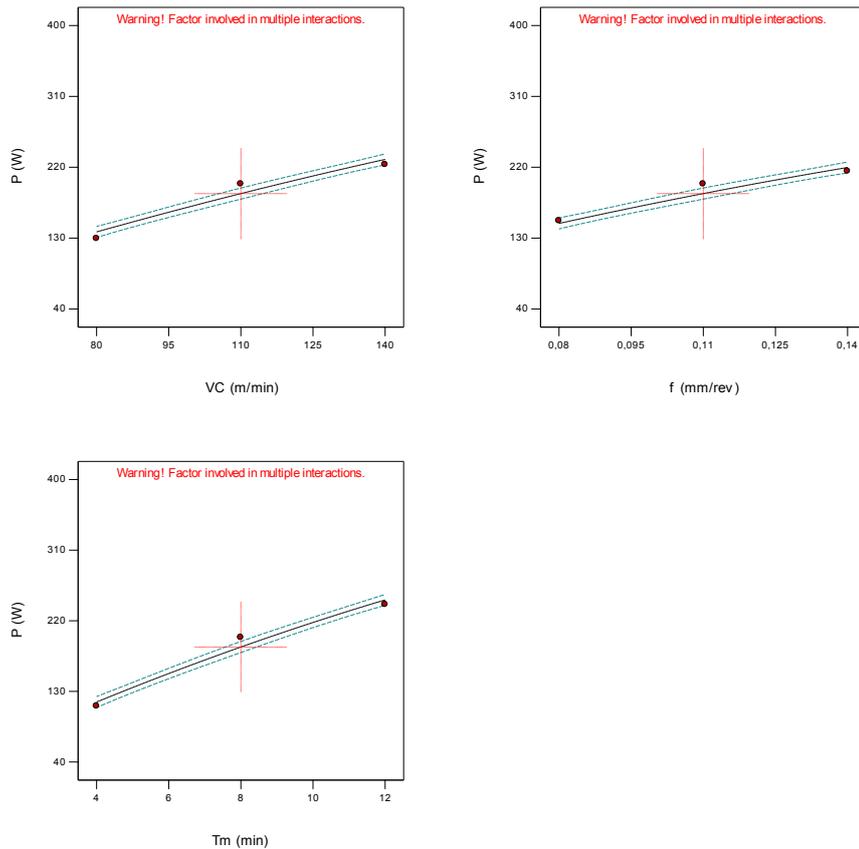


Figure IV.19 Graphe des effets principaux de la puissance de coupe (P).

● **Equation de régression pour la puissance de coupe (P)**

Le modèle de la puissance de coupe (P) est donné par l'équation (IV.19) ci-après. Son coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) est de 99,48%.

$$P(W) = -91,42068 + 0,22801Vc + 552,85802 f + 5,10285 Tm + 9,04815 Vc \times f + 0,11959Vc \times Tm + 27,68056 f \times Tm - 2,93210E-003Vc^2 - 2659,87654 f^2 - 0,31462 Tm^2 \quad (IV.19)$$

$$R^2 = 0,9948; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9921 \text{ et } R^2 \text{ Prédit} = 0,9881$$

Le modèle réduit ou en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif est comme suite :

$$P(W) = -34,69222 - 0,41706Vc + 189,12963 f + 3,11382Tm + 9,04815Vc \times f + 0,11959Vc \times Tm \quad (IV.20)$$

$$R^2 = 0,9923, R^2 \text{ Adjusté} = 0,9905, R^2 \text{ Prédit} = 0,9875$$

- **Diagrammes de surfaces 3D et graphiques de contours**

Les graphiques (3D) des surfaces de réponse de la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction des facteurs d'entrée sont représentés dans la figure (IV.20). La figure (IV.20 a) expose le diagramme (3D) de la puissance ( $P$ ) en fonction de ( $V_c$  et  $f$ ). On constate que l'augmentation de l'avance ( $f$ ) et la vitesse de coupe induisent une augmentation de la puissance ( $P$ ). La figure (IV.20 b) représente le diagramme de ( $P$ ) en fonction de ( $V_c$  et  $T_m$ ). On remarque que l'augmentation du temps de coupe ( $T_m$ ) fait augmenter la puissance de coupe ( $P$ ) d'une manière claire, cela est justifié par la valeur de sa contribution de 54,17% (tableau IV.7).

Les graphes de contour représentés dans les figures (IV.20 c) et (IV.20 d) permettent de visualiser la surface de réponse ( $P$ ). Ils permettent aussi de prédire les valeurs de la réponse ( $P$ ) dans n'importe quelle zone du domaine expérimental. Évidemment, on remarque que la plus grande puissance ( $P$ ) est obtenue en appliquant une grande vitesse de coupe et une grande avance avec un temps de coupe ( $T_m$ ) élevé.

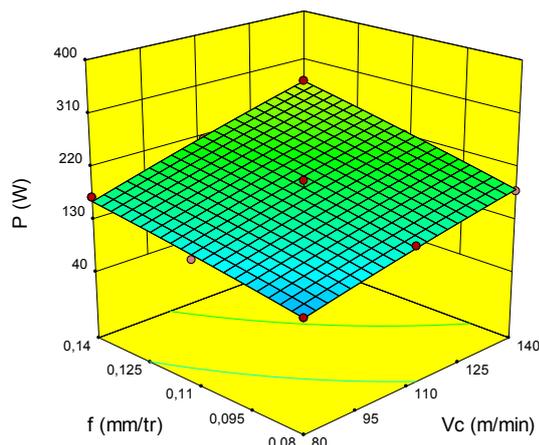
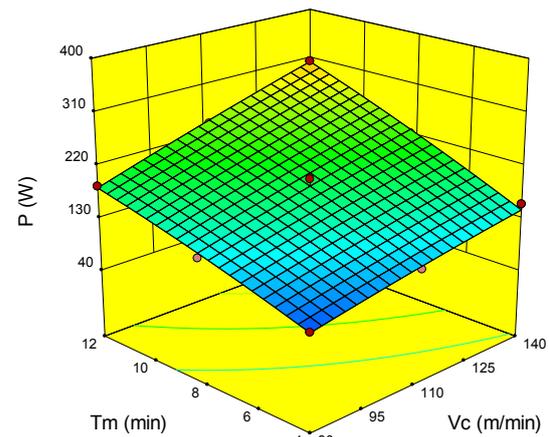
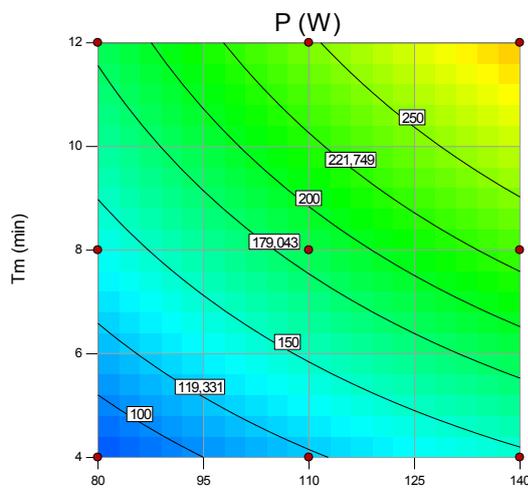
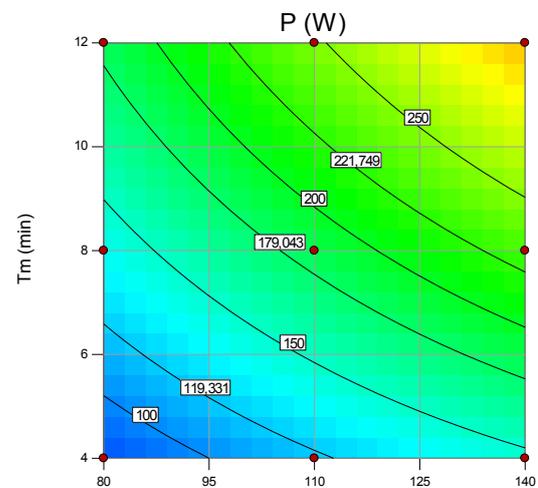
(a) pour  $T_m=8$  min(b) pour  $f=0,11$  mm/tr(c) pour  $T_m=8$  min(d) pour  $f=0,11$  mm/tr

Figure IV.20 Diagrammes (3D) et graphes de contour de ( $P$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ .

La figure IV.21 illustre la variation de la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction de ( $V_c$  et  $f$ ) pour cinq valeurs de temps d'usinage (4, 6, 8, 10 et 12) min. La tendance des courbes montre d'une manière claire que l'augmentation de ( $V_c$  et  $f$ ) entraîne une augmentation de ( $P$ ). On constate aussi que plus le temps de coupe ( $T_m$ ) augmente, plus la puissance ( $P$ ) gagne en grandeur. La valeur maximale de  $P=350$  W, est enregistrée lorsque les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ ) sont à leurs niveaux supérieurs.

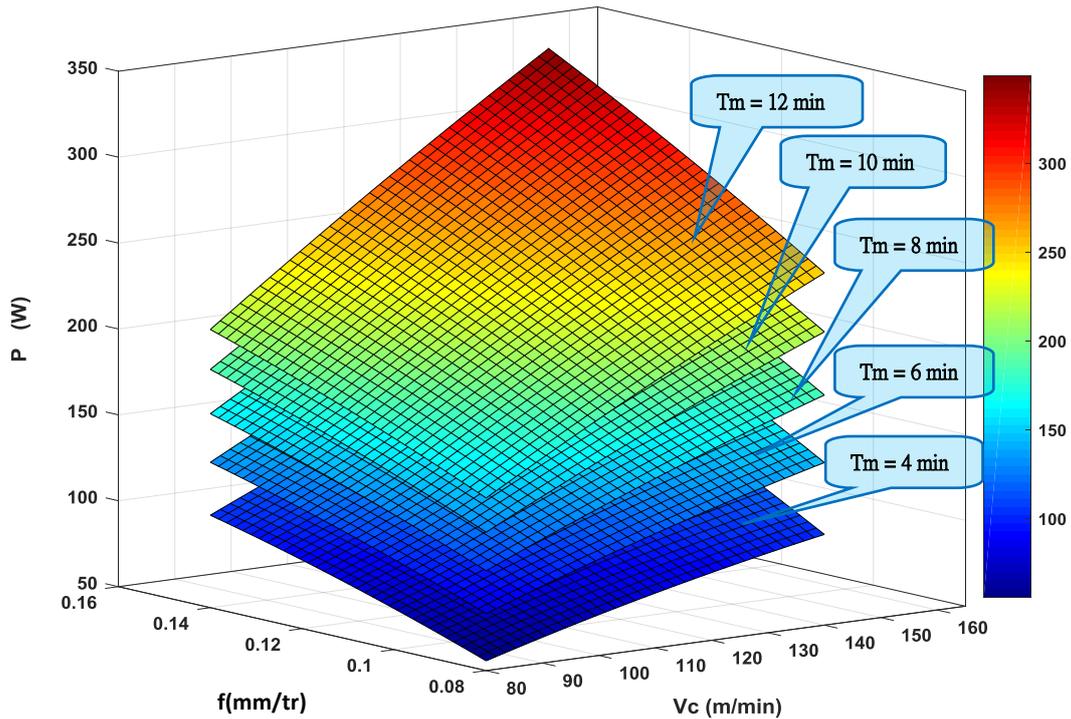


Figure IV.21 Surface 3D pour la puissance de coupe ( $P$ ) en fonction  $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ .

- **Comparaison entre les valeurs calculées et estimées**

La comparaison entre les valeurs calculées de la puissance de coupe ( $P$ ) (suivant la mesure de l'effort) et celles prédites par le modèle mathématique (quadratique) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (RSM), est présentée graphiquement sur la figure IV.22. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs prédites sont très proches et presque confondues.

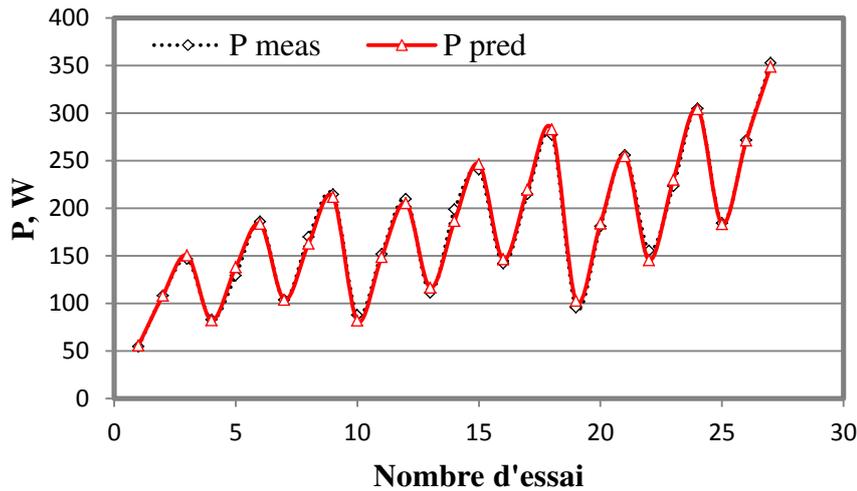


Figure IV.22 Comparaison entre les valeurs calculées et prédites de la puissance ( $P$ )

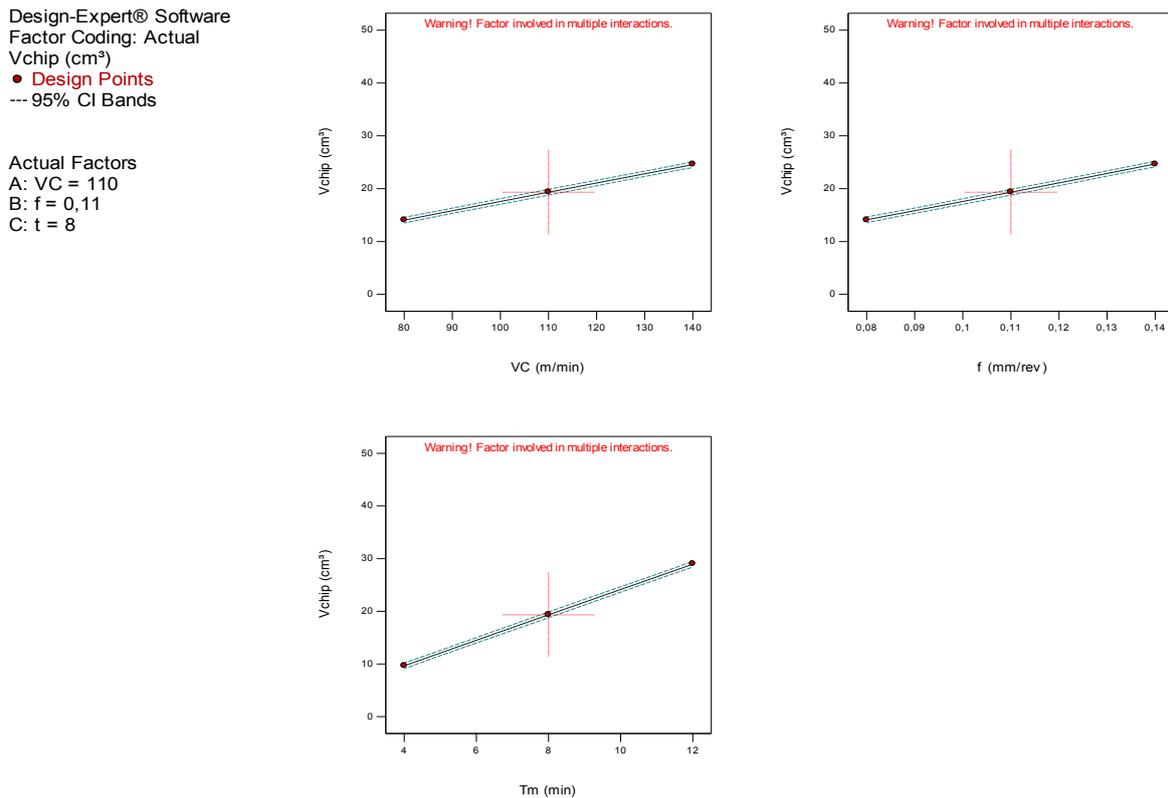
### IV.3.5 ANOVA du volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) et modélisation

Le tableau IV.8 présente les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ). L'analyse des résultats montre au premier lieu que le temps de coupe ( $T_m$ ) a une influence statistiquement importante sur ( $V_{chip}$ ) avec une contribution de (58,45%). En deuxième lieu viennent la vitesse de coupe et l'avance avec presque la même contribution de (17,29 % et 17,51%). Alors que les interactions ( $V_c \times T_m$ ) et ( $f \times T_m$ ) sont moins importantes avec des faibles contributions qui ne dépassent pas le 3%. Le reste des termes carrés ne présentent aucun effet significatif.

Tableau IV.8 ANOVA pour le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ )

Source	SS	Df	MS	F-value	P-value	Cont. %	Remarques
Model	2861,41	9	317,93	1232,90	< 0,0001		
A- $V_c$	495,50	1	495,50	1921,46	< 0,0001	17,29	Signifiant
B- $f$	501,81	1	501,81	1945,95	< 0,0001	17,51	Signifiant
C- $T_m$	1675,05	1	1675,05	6495,59	< 0,0001	58,45	Signifiant
AB	24,88	1	24,88	96,49	< 0,0001	0,868	Signifiant
AC	80,50	1	80,50	312,16	< 0,0001	2,808	Signifiant
BC	83,64	1	83,64	324,33	< 0,0001	2,918	Signifiant
A <sup>2</sup>	6,667E-003	1	6,667E-003	0,026	0,8742	0,006	Non signifiant
B <sup>2</sup>	0,027	1	0,027	0,10	0,7517	9,42E-4	Non signifiant
C <sup>2</sup>	6,667E-003	1	6,667E-003	0,026	0,8742	0,006	Non signifiant
Résiduel	4,38	17	0,26			0,15	
Cor Total	2865,79	26				100	

La figure (IV.23) illustre les effets principaux des paramètres de coupe sur le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ). D'après cette figure le temps de coupe est le facteur dominant, vu sa pente élevée. Les autres facteurs ( $V_c$  et  $f$ ) ont presque la même pente puisqu'ils ont presque la même contribution d'après les résultats de l'ANOVA (tableau IV.8). En effet l'augmentation du temps d'usinage mène à produire une importante quantité du copeau enlevé. Des résultats similaires sont rapportés par bouacha et autres [77].



**Figure IV.23** Graphe des effets principaux sur le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ).

- **Equation de régression pour le volume de copeau enlevée ( $V_{chip}$ )**

Le modèle du volume de copeau enlevée ( $V_{chip}$ ) est donné par l'équation (IV.22) avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) est de 99,85%.

$$V_{chip}(cm^3) = 19,4748 - 0,1656V_c - 192,2963f - 2,3491 T_m + 1,6000V_cxf + 0,02158 V_cxT_m + 22,0000fx T_m - 3,7037E-005 V_c^2 - 2,0833E-003f^2 - 2,0833E-003 T_m^2 \quad (IV.21)$$

$$R^2 = 0,9985; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9977 \text{ et } R^2 \text{ Prédit} = 0,9938$$

Le modèle réduit ou en introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif est comme suite :

$$V_{chip}(cm^3) = 19,16000 - 0,173786Vc - 176,000f - 2,38250Tm + 1,60000Vcxf + 0,021583VcxTm + 22,00000fxTm \quad (IV.22)$$

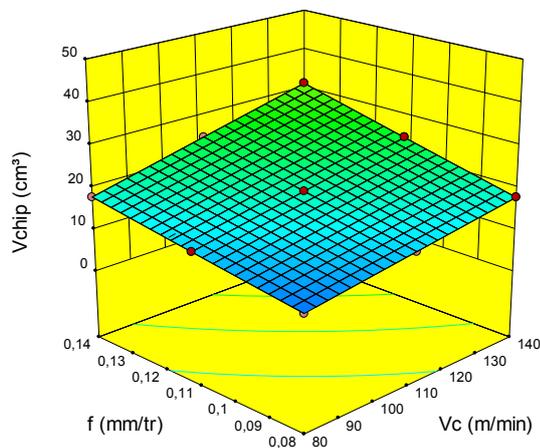
$$R^2 = 0,9985; R^2 \text{ Adjusté} = 0,9980 \text{ et } R^2 \text{ Prédit} = 0,9950$$

- **Diagrammes de surfaces 3D et graphiques de contours**

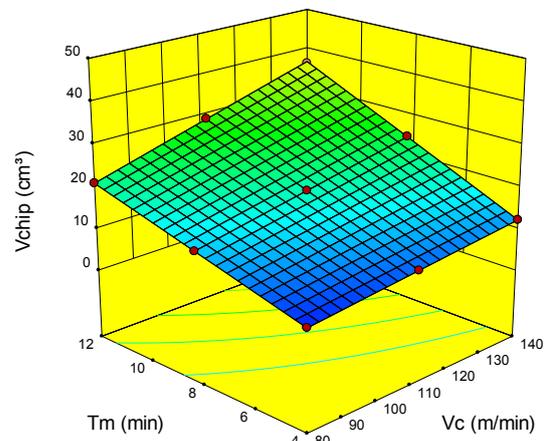
Les graphiques (3D) du volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) en fonction des paramètres d'usinage ( $Vc$ ,  $f$  et  $Tm$ ) sont représentés dans la figure (IV.24).

Cette figure montre que la pente du temps de coupe est supérieure par rapport aux autres facteurs, ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur ( $V_{chip}$ ).

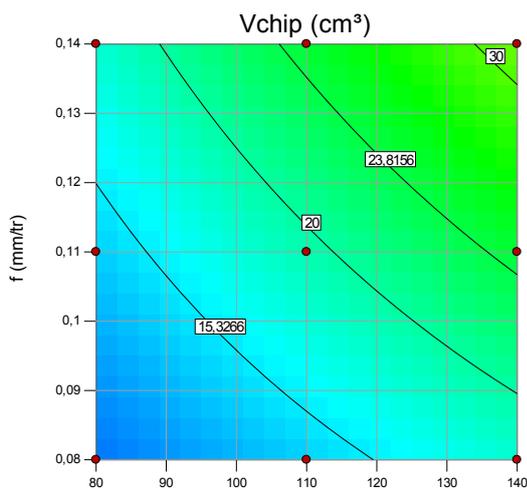
Les graphes de contour (figures (IV.14 c) et (IV.14 d)) montre la relation entre la variable de réponse du volume de copeau ( $V_{chip}$ ) et les trois facteurs à partir d'un modèle d'équation.



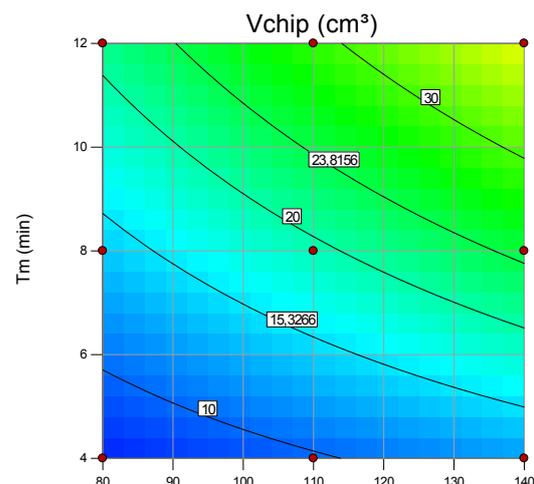
(a) pour  $Tm=8 \text{ min}$



(b) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$



(c) pour  $Tm=8 \text{ min}$



(d) pour  $f=0,11 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.24** Diagrammes (3D) et graphes de contour du volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) en fonction de  $Vc$ ,  $f$  et  $Tm$ .

La figure IV.25 expose les résultats de l'évolution du volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) en fonction de l'avance ( $f$ ) et la vitesse ( $V_c$ ) pour cinq valeurs du temps d'usinage (4, 6, 8, 10 et 12) min. l'analyse des courbes 3D révèle que l'augmentation des trois paramètres ( $V_c$ ,  $f$  et  $T_m$ ) conduit à une nette augmentation du volume de copeau ( $V_{chip}$ ) conformément à l'équation (IV.2). Notons que le maximum de ( $V_{chip}$ ) est obtenu aux niveaux les plus élevés des paramètres de coupe ( $V_c = 140$  m/min,  $f = 0.14$  mm/tr et  $T_m = 12$  min).

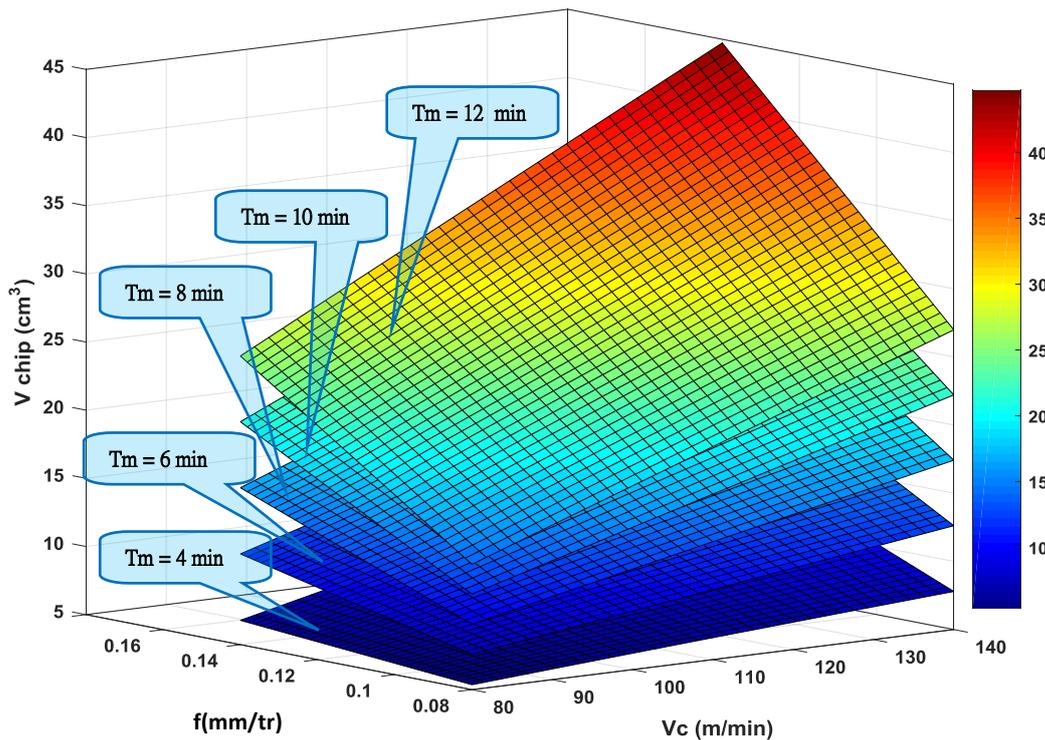
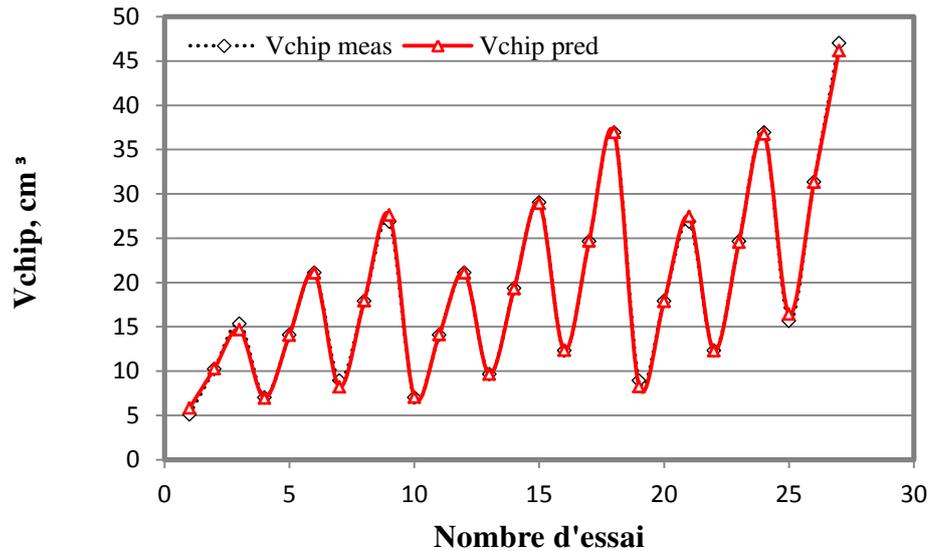


Figure IV.25 Surface 3D pour le volume de copeau ( $V_{chip}$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et ( $T_m$ ).

- **Comparaison entre les valeurs calculées et estimées**

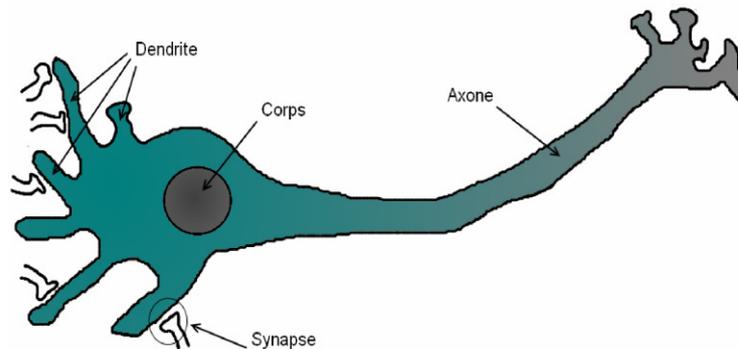
La comparaison entre les valeurs calculées du volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) et celles prédites par le modèle mathématique (quadratique) obtenu par la méthodologie de surface de réponse (RSM) est présentée graphiquement sur la figure IV-26. L'analyse des résultats montre d'une manière claire que les valeurs calculées et les valeurs prédites sont presque confondues.



**Figure IV.26** Comparaison entre les valeurs calculées et prédites du volume de copeau ( $V_{chip}$ )

#### IV. 4 Méthodologie de la modélisation par les réseaux de neurones artificiels (ANN)

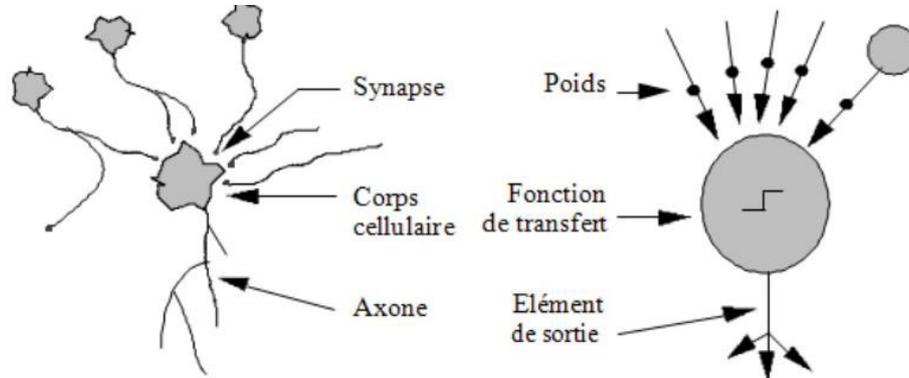
Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones naturels (humains ou animal) (figure IV.27)



**Figure IV.27** neurone naturel [79].

Aujourd'hui, les réseaux de neurones artificiels ont de nombreuses applications dans des secteurs très variés. Un neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance des neurones amont. A chacune des entrées est associé un poids  $w$  (*Wight*) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire

comprend une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals [80].



**Figure IV.28** Mise en correspondance neurone biologique/neurone artificiel [81].

Il existe plusieurs modèles de réseaux de neurones, le perceptron à une couche et le perceptron multicouche. Les réseaux à une couche sont assez limités car ils n'utilisent que des relations linéaires avec une seule couche de transfert des informations. Pour faire des calculs plus complexes, les réseaux les plus utilisés sont les réseaux multicouches (figure IV.28). Ce domaine de recherche connaît depuis quelques années un regain d'intérêt, et les réseaux de neurones sont actuellement d'usage courant en plusieurs domaines scientifiques et industriels [82] et [83].

Les ANN sont alors des modèles mathématiques non linéaires capables d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie. Ils ont de nombreux avantages, mais l'un des plus reconnus est le fait qu'il peut vraiment apprendre en observant des ensembles de données. ANN est un outil puissant utilisé pour l'approximation de fonctions aléatoires afin de prédire les paramètres d'usinage. Ces types d'outils permettent d'approximer les fonctions de réponse et d'arriver à des solutions tout en définissant des fonctions de calcul ou des distributions. Les ANN sont considérées comme des modèles mathématiques simples et justes pour améliorer les technologies d'analyse de données existantes [84]. ANN est potentiellement plus précise et peut être utilisé comme alternative à l'outil de modélisation basée sur la régression polynomiale, qui offre la modélisation de relations non linéaires complexes [85], [86].

Un neurone artificiel est donc composé de (figure IV.29) :

- Un ensemble de **valeurs d'entrée**  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  discrètes  $\{0, 1\}$  ou réelles  $[-1, 1]$ .
- Un ensemble de **poids** réels  $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$  entre les neurones.

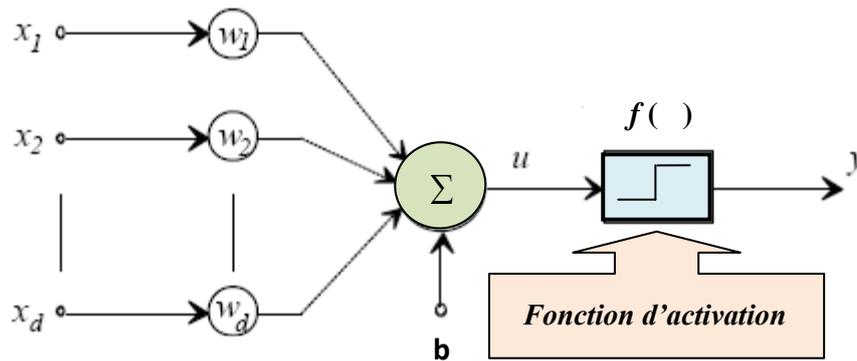
- Une fonction de sommation  $\Sigma$  qui calcule la **somme pondérée** (sous-entendu pondérée par les poids) des entrées :

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

Un biais  $b$  associé au neurone.

- Une fonction d'activation  $f$  qui calcule l'activité / l'état du neurone à partir de cette somme :  $f(x)$

- et enfin une sortie  $Y$ .



**Figure IV.29** Arrangement logique d'un neurone [87].

Pour le neurone de la figure IV.29, nous avons :

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_R]^T \text{ et } \mathbf{W} = [w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}]$$

$$w_{1,1}x_1 + w_{1,2}x_2 + \dots + w_{1,j}x_R + b = \mathbf{Wx} + b$$

La sortie  $Y$  est alors de la forme :

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{Wx} + b) \quad (\text{IV.23})$$

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

\* **1ère 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 est ici déjà déterminé et fixe.

\* **2ème phase** : À partir de la valeur obtenue, une fonction d'activation ou de transfert va calculer la valeur de l'état du neurone. Le neurone compare la somme pondérée des entrées à une valeur de seuil et fournit alors une réponse en sortie.

Une couche de neurones peut être représentée par le schéma et la relation de la figure IV.30 ci-dessous :

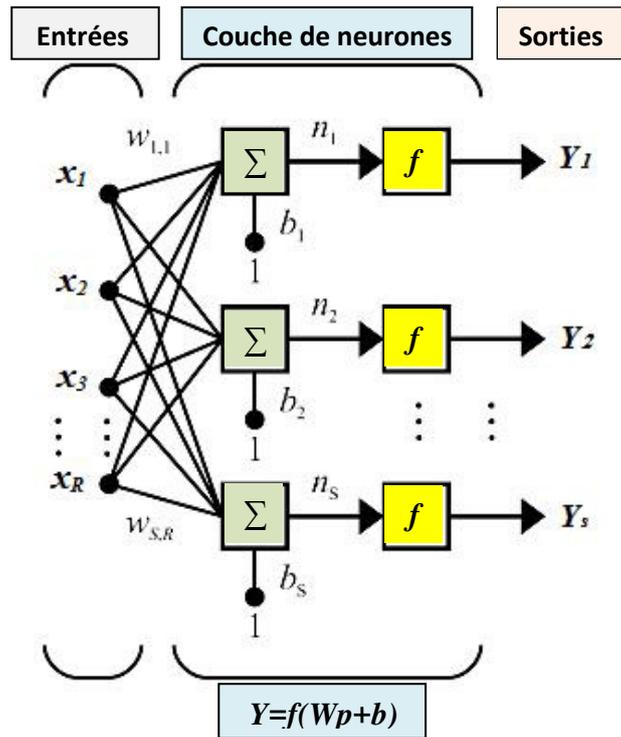


Figure IV.30 Schéma d'une couche de neurones [88].

Les fonctions de transfert (fonction d'activation) déterminent la valeur de l'état du neurone qui sera transmise aux neurones avants. Il existe de nombreuses fonctions de transfert possibles [80], les plus utilisées sont présentées sur la figure IV.31. Elles peuvent prendre une infinité de valeurs comprises dans l'intervalle  $[-1 ; +1]$ .

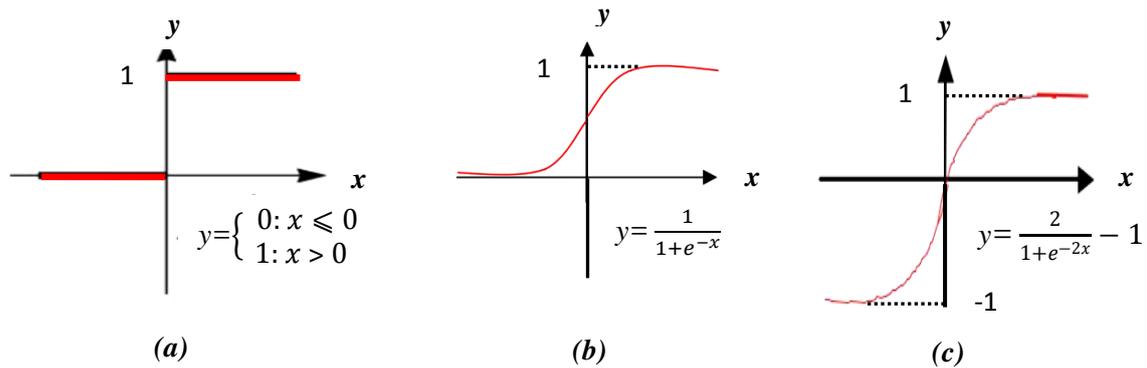


Figure IV.31 Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones (a) fonction seuil, (b) tangente sigmoïde, (c) tangente hyperbolique [89].

Au cours de cette étude, ( $VB$ ,  $Ra$  et  $Fz$ ) sont modélisés séparément, avec un nombre différent de neurones cachés (Nodes) pour chacun. Le nombre de neurones dans la couche d'entrée est prédéterminé comme trois neurones (vitesse de coupe, vitesse d'avance et temps de coupe). La

fonction d'activation utilisée dans cette étude est une tangente hyperbolique (**TanH**) qui est une fonction sigmoïde (équation **IV.24**), qui transforme les valeurs entre -1 et 1.  $\mathbf{x}$  est la combinaison linéaire des variables X [54].

$$\text{TanH} = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1} \quad (\text{IV.24})$$

#### IV.4.1 Méthodologie de comparaison entre l'approche RSM et ANN

Trois prédicateurs, à savoir les coefficients de détermination ( $\mathbf{R}^2$ ) (équation **IV. 25**), l'erreur quadratique moyenne **RMSE** (équation **IV.26**) et l'erreur prédictive du modèle (**MPE**) (équation **IV.27**) ont été utilisés pour évaluer l'ajustement et la précision des modèles obtenus qui sont construit par la méthodologie de surface de réponse (RSM) et les réseaux de neurones (ANN). Ramezani [90], Rajendra [91] et Gimeno [92].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,p} - y_{i,e})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,p} - y_{\text{Moyenne}})^2} \quad (\text{IV. 25})$$

$$\text{RMSE} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i,e} - y_{i,p})^2}}{n} \quad (\text{IV. 26})$$

$$\text{MPE} (\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(y_{i,e} - y_{i,p})}{y_{i,p}} \right| \quad (\text{IV. 27})$$

Où  $n$ , est le nombre des essais,  $y_{i,e}$  est la valeur du  $i^{\text{ème}}$  essai,  $y_{i,p}$  est la valeur prédite du  $i^{\text{ème}}$  essai qui est calculée au moyen du modèle RSM ou ANN,  $y_{\text{moyenne}}$  représente la valeur moyenne des résultats obtenues expérimentalement. Les valeurs prédites de ( $VB$ ,  $Ra$  et  $Fz$ ) obtenus par les modèles RSM et ANN sont tracées par rapport aux valeurs expérimentales correspondantes ce qui nous permet de montrer leur capacité de plénitude de vérité et de savoir quel modèle peut prédire adéquatement et d'une manière précise [93].

- **Modèles basés sur les réseaux neuronaux artificiels**

Pour proposer un modèle ANN, il faut d'abord choisir l'architecture du réseau neuronal (**3. H. I**). L'objectif est d'obtenir un modèle ANN avec une taille et des erreurs minimales pendant la période d'apprentissage et de validation [94]. En effet, cette étape consiste à choisir le nombre optimal de neurones dans la couche cachée unique ( $H$ ) en termes de meilleure corrélation ( $\mathbf{R}^2$ )

et de (RMSE), (MPE) minimales tout en variant le nombre d'itérations. Dans notre cas, nous avons utilisé un taux d'apprentissage de 0,01.

#### IV.4.2 Résultats et discussion

##### IV.4.2.1 Modèle d'usure (VB) de l'outil

La figure IV.32 indique l'architecture ANN du modèle de l'usure (VB). Le nombre optimal d'itérations selon cette architecture est de 500, cela a conduit à une meilleure corrélation ( $R^2$ ) et à des erreurs les plus faibles de (RMSE et MPE %). En effet, les paramètres de performance obtenus selon l'architecture ANN (3-4-8-1) sont de 0,99999 pour ( $R^2$ ), 0,0034197 pour (RMSE) et 1,411102 % pour (MPE). La validation de l'architecture ci-dessous fournit une ( $R^2$ ) et (RMSE) de 1 et 6.357 e-13 respectivement. La valeur (MPE) est d'environ 1,411102 %.

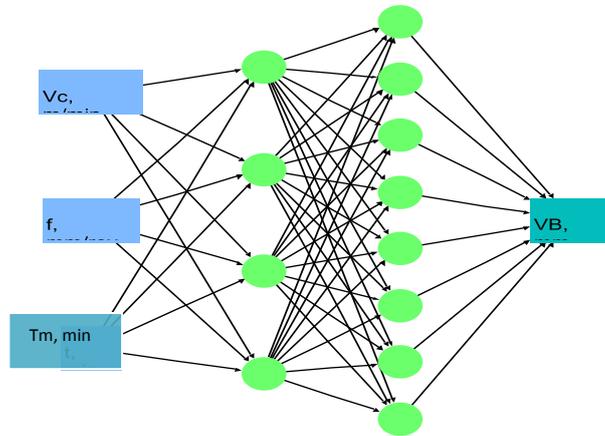


Figure IV.32 Architecture optimale (3-4-8-1) pour le modèle (VB)

Le tableau (IV.9) montre un coefficient de détermination de 0,9999922 pour l'apprentissage et 1 pour la validation. Dans ce cas 22 essais sont utilisés pour l'apprentissage et 05 essais pour la validation.

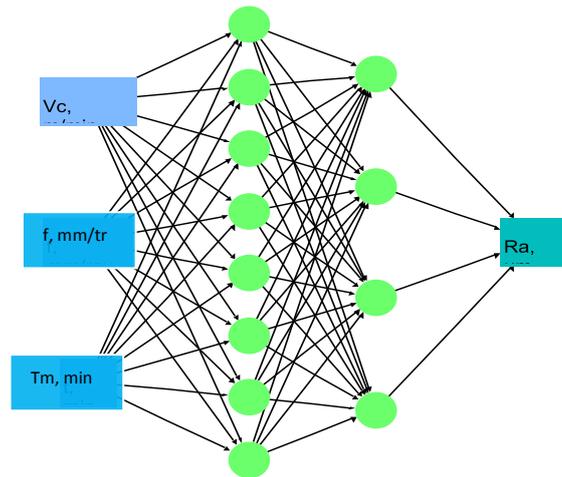
Tableau IV.9 Performance des structures ANN du modèle de (VB).

Apprentissage		Validation	
VB, mm	Mesures	VB, mm	Mesures
<i>R carré</i>	0,9999922	<i>R carré</i>	1
<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	0,0034197	<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	6,357e-13
<i>écart absolu moyen</i>	0,0024077	<i>écart absolu moyen</i>	4,506 e-13
<i>-Log-vraisemblance</i>	0,0603395	<i>-Log-vraisemblance</i>	9,012 e-13
<i>Somme fréquences</i>	25	<i>Somme fréquences</i>	02

L'équation du modèle mathématique de l'usure ( $VB$ ) obtenu par la méthode du réseau de neurones est présentée dans l'ANNEXE.  $H_1$  à  $H_4$  présentent les sorties de chaque neurone de la 1<sup>ère</sup> couche caché et  $HH_1$  à  $HH_8$  les sorties de chaque neurone de la 2<sup>ème</sup> couche caché (dans notre cas 25 neurones).

#### IV.4.2.2 Modèle de la rugosité de surface ( $Ra$ )

La figure IV.33 présente l'architecture ANN du modèle de rugosité moyenne arithmétique ( $Ra$ ). Le nombre optimal d'itérations selon cette architecture est de 500, cela a conduit à une meilleure corrélation ( $R^2$ ) et à des erreurs minimales (RMSE et MPE %). En effet, les paramètres de performance obtenus selon l'architecture ANN (3-8-4-1) sont 1 pour ( $R^2$ ),  $3,9613 \times 10^{-7}$  pour (RMSE) et 1,03057 % pour (MPE). La validation de l'architecture ci-dessus donne un ( $R^2$ ) et (RMSE) de 1 et  $3,9613 \times 10^{-7}$  respectivement. La valeur (MPE) correspondante pour le modèle de la rugosité de surface (ANN) est d'environ 1,03057 %.



**Figure IV.33** Architecture optimale (3-8-4-1) pour le modèle ( $Ra$ )

Le tableau (IV.10) montre un coefficient de détermination de 1 pour l'apprentissage et 1 pour la validation.

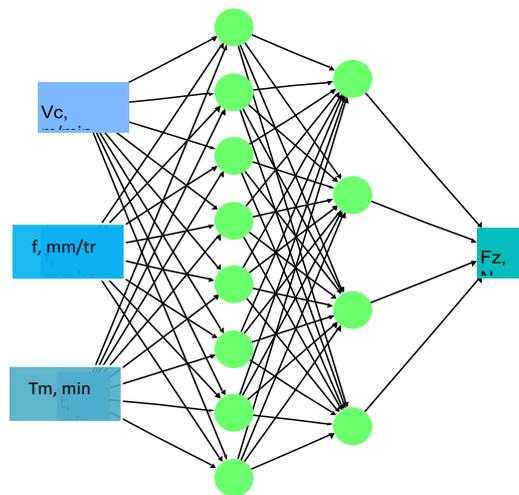
**Tableau IV.10** Performance des structures ANN du modèle de ( $R_a$ ).

<i>Apprentissage</i>		<i>Validation</i>	
<i>Ra, <math>\mu\text{m}</math></i>	<i>Mesures</i>	<i>Ra, <math>\mu\text{m}</math></i>	<i>Mesures</i>
<i>R carré</i>	<i>1</i>	<i>R carré</i>	<i>1</i>
<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	<i>3,9613 e-7</i>	<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	<i>3,9613 e-7</i>
<i>écart absolu moyen</i>	<i>1,2611 e-7</i>	<i>écart absolu moyen</i>	<i>1,2611 e-7</i>
<i>-Log-vraisemblance</i>	<i>3,405 e-6</i>	<i>-Log-vraisemblance</i>	<i>3,405 e-6</i>
<i>Somme fréquences</i>	<i>27</i>	<i>Somme fréquences</i>	<i>27</i>

L'équation du modèle mathématique de la rugosité ( $R_a$ ) obtenu par la méthode du réseau de neurones est présentée dans l'ANNEXE.  $H_1$  à  $H_8$  présentent les sorties de chaque neurone de la 1<sup>ère</sup> couche caché et  $HH_1$  à  $HH_4$  les sorties de chaque neurone de la 2<sup>ème</sup> couche caché (dans notre cas 27 neurones).

#### IV.4.2.3 Modèle de l'effort tangentiel ( $F_z$ )

La figure IV.34 montre l'architecture ANN du modèle de l'effort tangentielle ( $F_z$ ). Le nombre optimal d'itérations selon cette architecture est de 500, cela a conduit à une meilleure corrélation ( $R^2$ ) et à des erreurs minimales (RMSE et MPE %). En effet, les paramètres de performance obtenus selon l'architecture ANN (3-8-4-1) sont 1 pour ( $R^2$ ), 7,613 e-7 pour (RMSE) et 1,12117 % pour (MPE). La validation de l'architecture ci-dessus fournit une ( $R^2$ ) et (RMSE) de 1 et 7.613 e-7 respectivement. L'erreur prédictive du modèle obtenue selon le modèle ANN de l'effort tangentiel est d'environ 1,12117 %.

**Figure IV.34** Architecture optimale (3-8-4-1) pour le modèle ( $F_z$ )

L'équation du modèle mathématique de l'effort tangentiel ( $F_z$ ) obtenu par la méthode du réseau de neurones est présentée dans l'ANNEXE.  $H_1$  à  $H_8$  présentent les sorties de chaque neurone de la 1<sup>ère</sup> couche caché et  $HH_1$  à  $HH_4$  les sorties de chaque neurone de la 2<sup>ème</sup> couche caché (dans notre cas 27 neurones).

Le tableau (IV.11) montre un coefficient de détermination de 1 pour l'apprentissage et 1 pour la validation.

**Tableau IV.11** Performance des structures ANN du modèle de ( $F_z$ ).

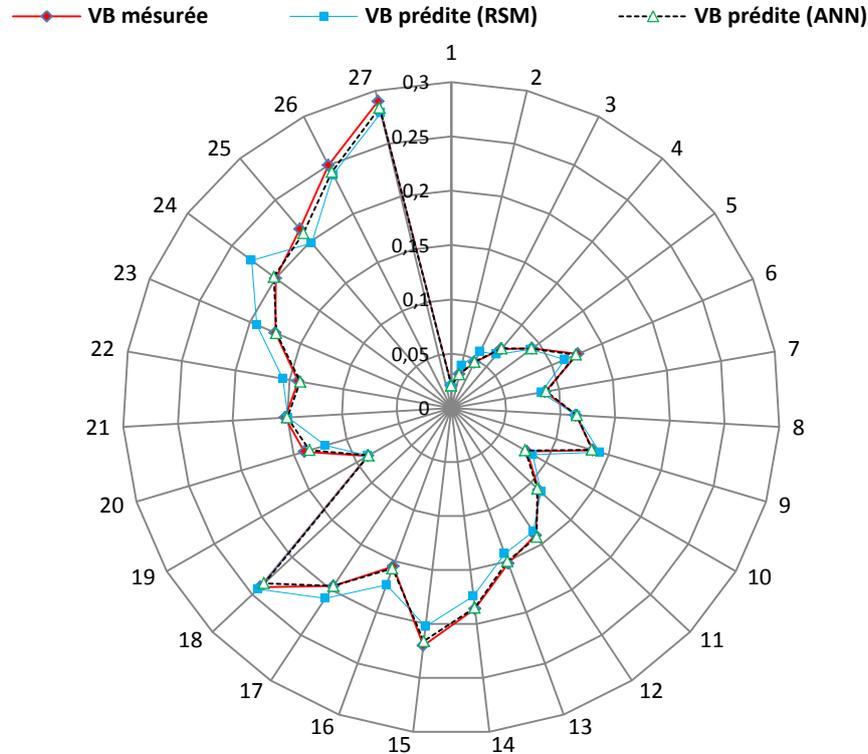
<i>Apprentissage</i>		<i>Validation</i>	
<i>Fz, N</i>	<i>Mesures</i>	<i>Fz, N</i>	<i>Mesures</i>
<i>R carré</i>	<i>1</i>	<i>R carré</i>	<i>1</i>
<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	<i>7,613 e-7</i>	<i>Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)</i>	<i>7,613 e-7</i>
<i>écart absolu moyen</i>	<i>3,149 e-7</i>	<i>écart absolu moyen</i>	<i>3,149 e-7</i>
<i>-Log-vraisemblance</i>	<i>8,5023 e-6</i>	<i>-Log-vraisemblance</i>	<i>8,5023 e-6</i>
<i>Somme fréquences</i>	<i>27</i>	<i>Somme fréquences</i>	<i>27</i>

#### IV.4.3 Comparaison des modèles (RSM) et (ANN)

Après la modélisation par les méthodes RSM et ANN, nous passons à l'étape de la comparaison entre les deux méthodes en termes de meilleure précision et de fiabilité maximale. A ce stade, des comparaisons qualifiées et quantifiées sont nécessaires pour montrer les différences entre les valeurs déterminées par les deux modèles (ANN et RSM) et les valeurs mesurées expérimentalement. Les performances des modèles des réponses ( $VB$ ,  $Ra$  et  $F_z$ ) ont été comparés en fonction des trois prédicateurs à savoir : le coefficient de détermination le plus élevé ( $R^2$ ) et les (RMSE) et (MPE) les plus bas. Dans ce contexte, beaucoup de recherches ont été réalisées sur la comparaison entre les méthodes de modélisation et spécialement entre la méthode RSM et l'approche ANN en termes de précision et performance [53], [54] [95].

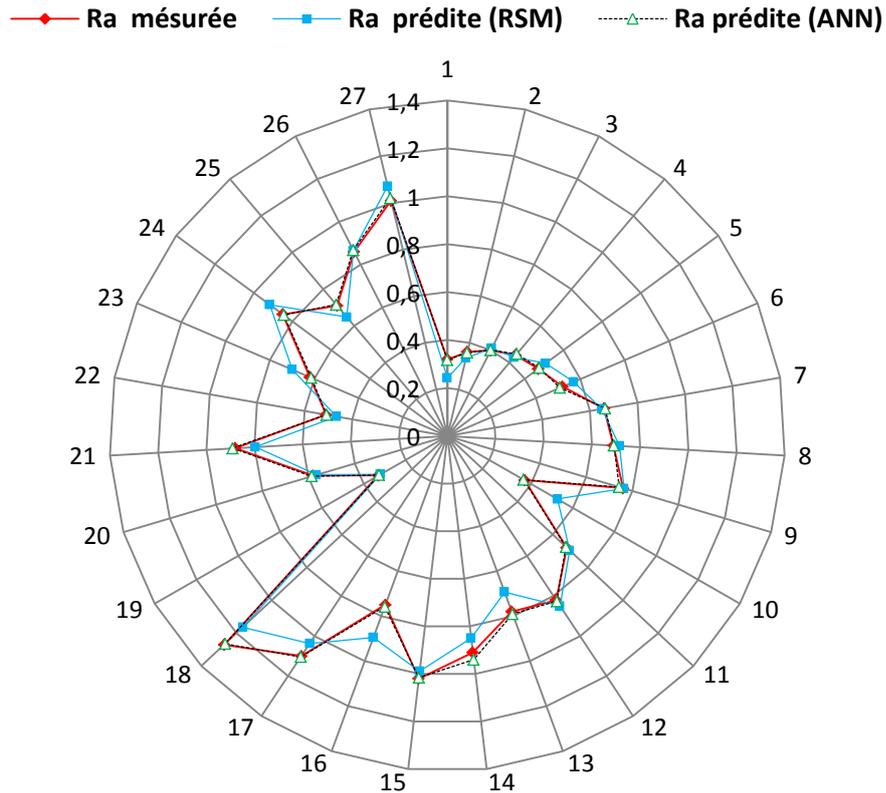
La figure IV.36 illustre le diagramme qui permet de montrer la différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites avec ANN et RSM pour la réponse ( $VB$ ). On observe que les écarts entre les valeurs prédites et expérimentales sont plus faibles pour le modèle ANN comparativement au modèle RSM. Cela est justifier par les valeurs des trois prédicateurs, le ( $R^2$ ), (RMSE) et (MPE %) qui sont pour le modèle RSM de 0,9686, 0,002269

et 7,35477 % respectivement, alors que pour le modèle ANN ils sont : 0,99999 pour ( $R^2$ ), 0,0034197 pour (RMSE) et 1,411102 % pour (MPE) (tableau IV.12).



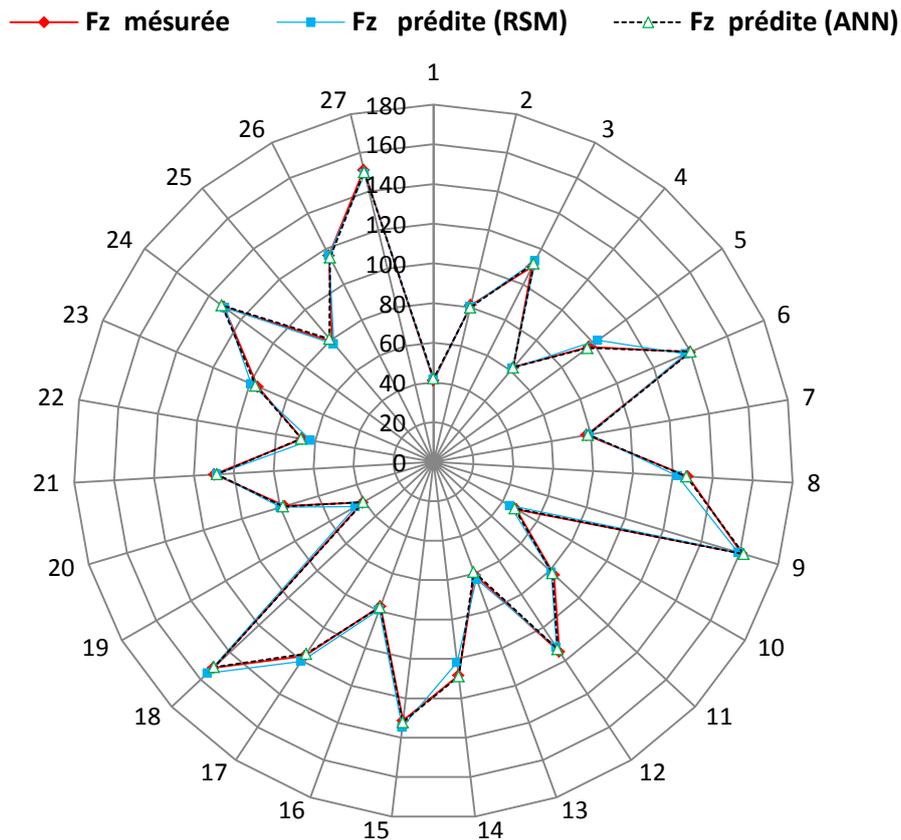
**Figure IV.35** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites par RSM et ANN pour le cas de (VB)

En ce qui concerne la rugosité de surface ( $Ra$ ), le diagramme qui compare les valeurs prédites par la méthodologie de surface de réponse RSM et les réseaux de neurones ANN par rapport aux résultats expérimentaux est illustré dans la figure IV.37. En effet, les valeurs du coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour le modèle de la rugosité moyenne arithmétique obtenues par RSM et ANN sont respectivement de 0,9310 et 1, cela montre clairement la précision du modèle ANN. De plus, le modèle ANN présente un bon (RMSE) et (MPE) par rapport au modèle RSM. En réalité, les valeurs (RMSE) et (MPE) sont de 0,012461 et de 8,00978 % pour le modèle RSM de la rugosité de surface. Leurs valeurs pour le modèle de prédiction ANN sont respectivement de 3,9613 e-7 et 1,03057% (Tableau IV.12).



**Figure IV.36** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites par RSM et ANN pour le cas de ( $R_a$ ).

En ce qui concerne l'effort de coupe ( $F_z$ ), la figure IV.38 présente le diagramme de comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par les méthodes RSM et ANN. Par conséquent, en se basant sur la discussion ci-dessus, les valeurs du coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour le cas du modèle de l'effort de coupe obtenu par RSM et ANN sont : 0,9918 et 1 respectivement. De plus, le modèle obtenu par les ANN présente une meilleure (RMSE) et (MPE) par rapport au modèle obtenu par la méthode RSM. En effet, les valeurs (RMSE) et (MPE) sont de 0,587701 et 2,985725% pour le modèle de l'effort de coupe trouvé par RSM, alors que les valeurs pour le modèle trouvé par les ANN sont de 7,613 e-7 et 1,12117 %. Cela montre la précision du modèle des réseaux de neurones (Tableau IV.12).



**Figure IV.37** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites par RSM et ANN pour le cas de ( $F_z$ ).

Le tableau IV.12 présente un récapitulatif des résultats de la comparaison entre deux approches choisies RSM et ANN, en termes de coefficient de détermination ( $R^2$ ), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur prédictive du modèle (MPE).

**Tableau IV.12** comparaison entre l'approche RSM et ANN

Parameters de sortie	RSM			ANN		
	$R^2$	RMSE	MPE	$R^2$	RMSE	MPE
VB	0,9686	0,002269	7,35477%	0,99999	0,0034197	1,411102 %
Ra	0,9310	0.012461	8,00978%	1	3,9613 e-7	1,03057 %
$F_z$	0,9918	0,587701	2,985725%	1	7,613 e-7	1,12117%

Les tableaux IV.13 et IV.14 présentent une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux estimés par les modèles RSM et ANN pour l'usure (VB), la rugosité de surface (Ra) et l'effort tangentiel ( $F_z$ ) pour les 27 essais.

On constate que l'erreur absolue entre le modèle ANN et les résultats expérimentaux est entre 0 à 03,70% pour (*VB*), 0,25 à 03,29% pour (*Ra*) et 0,32 à 02,81% pour (*Fz*), ce qui est nettement moins que les erreurs données par le modèle RSM. L'erreur peut être encore réduite si le nombre d'itération est augmenté. Le pourcentage d'erreur pour le modèle RSM se trouve entre 0,08 à 26,25% pour l'usure, 0,52 à 42,43% pour la rugosité de surface et 0,01 à 09,79% pour l'effort de coupe. Par conséquent, le modèle de prédiction ANN est jugée le meilleure par rapport au modèle RSM.

**Tableau IV.13** Comparaison des résultats expérimentaux et estimées de (*VB*) et (*Ra*) par RSM et ANN

N° Essai	Usure en dépouille ( <i>VB</i> )					Rugosité de surface ( <i>Ra</i> )				
	<i>VB</i> (mm) Expér	Préd (RSM)	Préd (ANN)	% erreur (RSM)	% erreur (ANN)	<i>Ra</i> ( $\mu$ m) Expér	Préd (RSM)	Préd (ANN)	% erreur (RSM)	% erreur (ANN)
1	0,021	0,019	0,0208	8,64	0,96	0,32	0,243	0,317	32,23	0,94
2	0,032	0,040	0,0317	26,25	0,94	0,36	0,333	0,358	8,1	0,55
3	0,047	0,058	0,0475	23,83	1,06	0,4	0,409	0,401	2,25	0,25
4	0,071	0,064	0,0716	10,24	0,84	0,44	0,429	0,447	2,56	1,59
5	0,092	0,090	0,0915	1,88	0,54	0,47	0,507	0,475	7,87	1,06
6	0,126	0,113	0,124	11,5	1,61	0,52	0,569	0,508	9,42	2,36
7	0,087	0,083	0,088	4,44	1,14	0,66	0,650	0,664	1,53	0,6
8	0,114	0,114	0,115	0,08	0,87	0,69	0,714	0,692	3,47	2,89
9	0,135	0,141	0,134	4,88	0,74	0,76	0,764	0,743	0,52	2,28
10	0,08	0,085	0,078	7,25	2,56	0,37	0,527	0,365	42,43	1,36
11	0,11	0,112	0,108	2,27	1,85	0,68	0,697	0,675	2,5	0,74
12	0,14	0,136	0,142	2,94	1,42	0,82	0,849	0,826	3,53	0,73
13	0,152	0,142	0,15	6,66	1,33	0,78	0,693	0,791	12,55	1,41
14	0,186	0,174	0,185	6,83	0,54	0,91	0,849	0,94	7,18	3,29
15	0,22	0,202	0,216	8,69	1,85	1,02	0,989	1,016	3,13	0,39
16	0,155	0,173	0,157	11,67	1,29	0,75	0,894	0,758	19,2	1,06
17	0,196	0,209	0,196	6,83	0	1,1	1,037	1,104	6,07	0,36
18	0,24	0,242	0,235	1,08	2,12	1,27	1,163	1,265	9,2	0,39
19	0,088	0,087	0,0871	0,22	1,03	0,33	0,319	0,326	3,44	1,22
20	0,14	0,120	0,135	16,47	3,7	0,58	0,566	0,586	2,47	1,03
21	0,152	0,149	0,15	1,74	1,33	0,88	0,796	0,891	10,55	1,25
22	0,142	0,156	0,14	9,92	1,42	0,51	0,466	0,508	9,44	0,39
23	0,175	0,193	0,174	10,45	0,57	0,62	0,699	0,614	12,74	0,97
24	0,2	0,227	0,202	13,65	1	0,85	0,916	0,845	7,76	0,59
25	0,215	0,198	0,21	4,08	2,38	0,71	0,647	0,716	9,73	0,84
26	0,25	0,240	0,243	4,07	2,88	0,86	0,867	0,868	0,81	0,93
27	0,29	0,279	0,284	3,9	2,11	1,01	1,071	1,021	6,03	1,08

**Tableau IV.14** Comparaison des résultats expérimentaux et estimés de ( $F_z$ ) par RSM et ANN

N° Essai	Effort tangential ( $F_z$ )				
	VB (mm) Expér	Préd (RSM)	Préd (ANN)	% erreur (RSM)	% erreur (ANN)
1	41	41,54	42,012	1,31	2,46
2	81,19	80,43	79,97	0,94	1,52
3	110	113,26	111,85	2,96	1,68
4	62,26	61,52	62,03	1,2	0,37
5	97,04	102,47	96,12	5,59	0,95
6	139,64	137,35	140,23	1,66	0,42
7	77,78	79,26	78,52	1,9	0,95
8	127,5	122,26	126,8	4,28	0,55
9	160,93	159,2	162	1,08	0,66
10	47,88	44,25	46,98	8,2	1,91
11	82,88	81,09	81,77	2,2	1,35
12	114,55	111,87	113,08	2,39	1,29
13	60,66	62,94	59	3,75	2,81
14	108,4	101,84	108,88	6,44	0,44
15	131,31	134,67	132,07	2,55	0,57
16	77,47	79,37	78	2,45	0,68
17	117,2	120,33	115,8	2,67	1,2
18	151,27	155,22	150,78	2,61	0,32
19	40,96	44,97	40,51	9,79	1,11
20	77,53	79,76	78,41	2,87	1,13
21	109,73	108,49	108,55	1,14	1,08
22	66,68	62,36	67,12	6,92	0,66
23	95,72	99,21	96,85	3,64	1,18
24	130,7	130,00	132	0,53	0,99
25	79,06	77,5	80,9	2,01	2,32
26	116,39	116,41	115,22	0,01	1,01
27	151,23	149,25	150,11	1,32	0,74

Les figures **IV.38(a)**, **IV.38(b)** et **IV.38(c)** montrent la variation des erreurs entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites obtenues par le modèle RSM et le modèle ANN en fonction du nombre d'essais pour l'usure ( $VB$ ), la rugosité de surface ( $Ra$ ) et l'effort tangential ( $F_z$ ). À partir de ces figures, on remarque qu'une nette différence entre les erreurs obtenues par ANN et RSM, ce qui confirme que le modèle obtenu par la méthode ANN est plus précis par rapport le modèle obtenu par RSM.

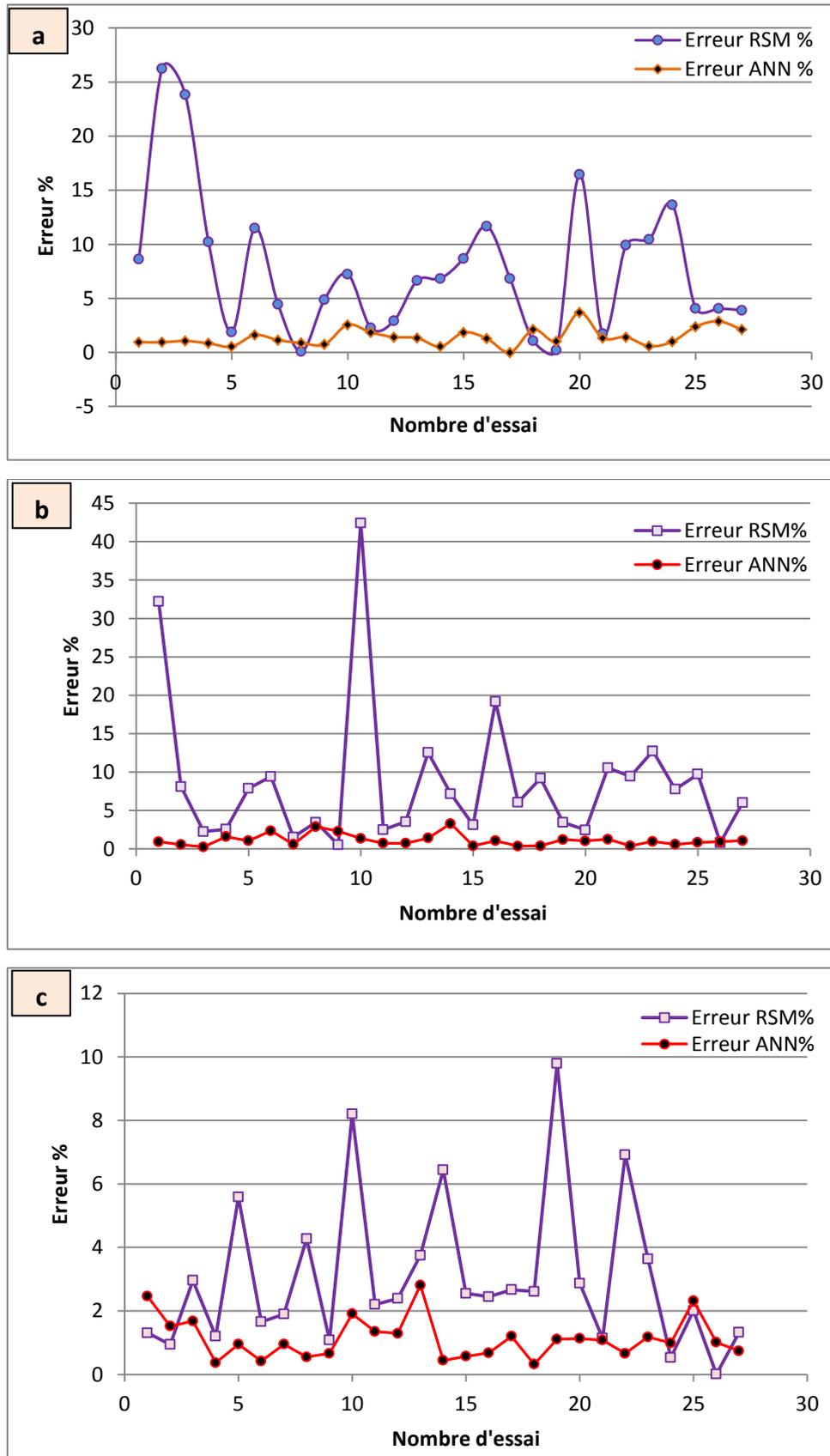


Figure IV.38 Comparaison entre les erreurs par RSM et ANN

a) Pour (VB) b) pour (Ra) c) pour (Fz)

## IV. 5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter l'application de la méthodologie de surface de réponse RSM et l'ANOVA, pour la détermination du degré d'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe ( $V_c$ ), avance par tour ( $f$ ) et temps d'usinage ( $T_m$ )) sur les critères de l'usure en dépouille ( $VB$ ), la rugosité de surface ( $Ra$ ), les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) et la puissance de coupe ( $P$ ) ainsi que le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ). Les modèles mathématiques obtenus par RSM, permettent de donner des prédictions qui sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales.

Dans un second temps, nous avons utilisé la méthode de Réseau de Neurones Artificiels (ANN), pour modéliser divers paramètres étudiés. L'étude comparative entre les deux approches RSM et ANN a été réalisée en se basant sur trois prédicteurs ( $R^2$ ), (RMSE) et (MPE). Les résultats trouvés nous ont permis de conclure que dans ce cas précis la méthode ANN a pu donner des modèles avec une grande précision par rapport à la méthodologie de la surface de réponse en termes de prédiction.

## Conclusion générale

Dans ce travail, une étude expérimentale a été menée afin de modéliser les paramètres de performances d'usinage (l'usure, la rugosité de surface, l'effort de coupe principale, la puissance de coupe et le volume de copeau enlevé) et optimiser les conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la temps de coupe) lors du tournage dur de l'acier fortement allié traité à 54HRC avec des plaquettes en céramique mixte revêtue CC6050. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

1) Les résultats des essais sur l'usinabilité de l'acier X210Cr12 traité thermiquement en termes de (rugosité de surface, effort de coupe, pression spécifique, puissance de coupe et l'usure, en fonction des conditions de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ) ont indiqué que :

- Une diminution de la rugosité de surface de 17,03% pour ( $R_a$ ), 17,03% pour ( $R_z$ ) et 11,26% pour ( $R_t$ ) lorsque ( $V_c$ ) augmente de 72 à 230 mm/min pour  $f = 0,08$  mm/tr et  $ap = 0,2$  mm. La rugosité de surface est à son maximum à la vitesse 72 m/min. La variation de l'avance entre 0,08 et 0,2mm/tr conduit à une augmentation d'environ 4,31 fois de la rugosité ( $R_a$ ), 3,24 fois de ( $R_z$ ) et 3,12 fois de ( $R_t$ ). D'autre part, l'augmentation de ( $ap$ ) entre 0,1 à 0,5 mm, mène à une augmentation des critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$  et  $R_t$ ) de (70,47 ; 51,72 et 43,82) % respectivement.

- Les efforts de coupe, l'effort résultant et la pression spécifique diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Par exemple, une élévation de la vitesse de 72 à 230 m/min, contribue à une diminution des trois composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) respectivement de (25,61 ; 23,86; 25,60)% respectivement, de l'effort résultant de 135 N à 101,93N et de la pression spécifique de 4643,12 N/mm<sup>2</sup> à 3454,37 N/mm<sup>2</sup>.

- L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,2 mm/tr mène à une élévation de (20,01 ; 30,79 et 36,57) % pour ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) respectivement, 32,13% pour l'effort résultant et une chute de 45,37% pour la pression ( $K_z$ ). L'augmentation de la profondeur de passe de (0,1 à 0,5) mm, engendre une élévation des trois composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) successivement avec (1776,35 ; 289,31 et 375,37)%, une énorme augmentation de 372,62% pour l'effort résultant et une diminution de pression ( $K_z$ ) de 15,93% lorsque ( $ap$ ) varié entre 0,3 et 0,5 mm.

-L'augmentation de la vitesse de coupe de 72 à 230m/min, conduit à une élévation importante de la puissance jusqu'à 137,65%. La variation de l'avance entre 0,08 et 0,20mm/tr, mène à une élévation de la puissance de coupe de 36,57%. Même chose pour la profondeur de passe qui varié entre 0,1 et 0,5 mm, cela conduit à une élévation

importante de la puissance de coupe de 375,37%, cette augmentation est la plus grande par rapport aux autres facteurs.

- L'élévation de la vitesse de coupe de 72 à 230m/min, l'avance de 0,08 à 0,20mm/tr et la profondeur de passe de 0,1 à 0,5 mm mène à une augmentation du volume de copeau enlevé de 219,44%, 150% et 400% successivement.

- Nous avons présenté une exploitation des résultats trouvés de l'usure en termes de durée de vie.

-L'usure des outils en céramique mixte testés est abordée en termes d'usure en dépouille. Principalement, la durée de vie est définie par l'usure en dépouille, ceci est dû à son influence significative sur l'état de la surface finie et la précision dimensionnelle de la pièce usinée.

**2) Les résultats du plan expérimental L9 ( $3^2$ ) ont révélé que :**

- Les modèles de la rugosité, la tenue et le volume de copeau indiquent que la vitesse de coupe est le facteur qui influe plus sur la rugosité ( $Ra$ ), la tenue ( $T$ ) et le volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ ) ont des contributions de 38,84%, 66,18% et 83,20% respectivement.

- Le modèle de l'effort de coupe indique que l'avance est le facteur qui influe énormément sur l'effort de coupe ( $Fz$ ), sa contribution dépasse 77%.

- Aussi le modèle de la puissance de coupe montre qu'il est plus sensible à la vitesse de coupe et à l'avance avec des contributions de 53, 57% et 46,43%.

**3) Les modèles de la rugosité, la tenue, l'effort de coupe, la puissance de coupe et le volume de copeau enlevé, représentent un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent de faire des prédictions dans la limite du domaine de variation des conditions de coupe.**

**4) La céramique mixte peut tenir 68 min pour le régime  $V_c=80$  m/min et  $f=0,08$  mm/tr avec une rugosité de surface ( $Ra=0,7\mu m$ ) et 12 min pour le régime  $V_c=140$  m/min et  $f=0,14$ mm/tr avec une rugosité de surface ( $Ra$ ) atteint  $1,01\mu m$ , lors de l'usinage de l'acier fortement allié X210Cr12 traité à 54 HRC.**

**5) Les résultats du plan expérimental L<sub>27</sub> ( $3^3$ ) indiquent que :**

- L'ANOVA a confirmé que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur dominant affectant l'usure en dépouille ( $VB$ ), suivie par l'avance ( $f$ ) et le temps de coupe ( $T_m$ ) avec des contributions respectives de 39,96%, 35,36% et 13,51%.

- L'ANOVA a montré que l'avance ( $f$ ) a une grande influence sur la rugosité ( $Ra$ ) avec une contribution égale à 31,71 %, suivie par le temps de coupe ( $T_m$ ) (23,78 %), et enfin la

vitesse de coupe ( $V_c$ ) (10,37 %). Le terme ( $V_c^2$ ) a également une influence avec (21,95%) de contribution.

- L'ANOVA a montré également que l'effort tangentiel ( $F_z$ ) a été influencé principalement par le temps de coupe ( $T_m$ ) et l'avance ( $f$ ) avec des contributions respectives de 75,74% et 22,66%.

- L'ANOVA des résultats de la puissance de coupe ( $P$ ) a montré que le temps de coupe a la plus grande influence sur ( $P$ ) avec une contribution de 54,17%, suivi par la vitesse de coupe et l'avance avec les contributions respectives (27,12 et 16,15)%. La faible contribution correspond à l'interaction ( $V_c \times T_m$ ) avec un pourcentage inférieur à 2%.

- L'ANOVA des résultats du volume de copeau enlevée ( $V_{chip}$ ) a indiqué que le temps de coupe ( $T_m$ ) a la plus grande influence avec une contribution de 58,45%, suivi par ( $f$ ) et ( $V_c$ ) avec les contributions respectives de (17,51 et 17,29)%. Les interactions ( $V_c \times T_m$ ) et ( $f \times T_m$ ) étaient significatives mais avec des contributions inférieures à 3%.

**6)** Les modèles mathématiques basés sur la méthodologie de surface de réponse (*RSM*) pour l'usure, la rugosité de surface, les effort de coupe, la puissance de coupe et le volume du copeau enlevé, ayant un ( $R^2$ ) de 96,86%; 93,10%; 99,27%; 98,73%; 99,18% ; 99,48% et 99,58%, respectivement obtenus présentent de bonnes concordances avec les données expérimentales. Ces modèles devraient représenter un intérêt industriel important pour les constructeurs mécaniques, puisqu'ils permettent de faire des prédictions, qui présentent un gain de temps et de matériaux significatif.

**7)** 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.

**8)** L'étude comparative des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles (*ANN* et *RSM*) montre clairement que les modèles issus de la méthode *ANN* donnent d'excellents résultats par rapport aux modèles issus du *RSM*.

- Le modèle de ( $VB$ ) obtenu par *RSM* fournit un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) de 0,9686, une erreur (*RMSE*) de 0,002269 et une erreur (*MPE*) de 7,35477%, où comme *ANN* donnent un coefficient de corrélation de 0,99999, une erreur (*RMSE*) de 0,0034197 et une erreur (*MPE*) de  $\approx 0\%$ .

- Le modèle de ( $Ra$ ) obtenu par *RSM* fournit un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,9310, une valeur (*RMSE*) de 0,012461 et 8,00978 % pour (*MPE*). Les valeurs de ces

paramètres obtenues par le modèle construit par l'ANN sont respectivement  $1, 3,9613 \text{ e-}7$  et  $\approx 0\%$ .

- Le modèle de prédiction de l'effort tangentiel ( $Fz$ ) obtenu par RSM fournit un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,9918, une valeur (RMSE) de 0,587701 et 2,985725% pour (MPE). Les valeurs de ces paramètres obtenues par le modèle construit par l'ANN sont respectivement  $1, 7,613 \text{ e-}7$  et  $\approx 0\%$ .

9) Les résultats de l'optimisation montrent que :

- L'optimisation mono-objective réalisée dans ce travail est basée sur la méthode de Taguchi qui (Selon son approche) :

- L'optimum de la réponse ( $VB$  et  $Ra$ )<sub>min</sub> a été obtenu aux paramètres d'usinage ( $Vc=80\text{m/min}$ ,  $f=0,08\text{mm/tr}$  et  $Tm=4 \text{ min}$ ). Cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal / Bruit ( $S/N-VB$ ) et ( $S/N-Ra$ ).

- L'optimum de la réponse ( $Fx$ ,  $Fy$  et  $Fz$ )<sub>min</sub> a été obtenu aux paramètres d'usinage ( $Vc=140\text{m/min}$ ,  $f=0,08\text{mm/tr}$  et  $Tm=4 \text{ min}$ ). Cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal / Bruit ( $S/N-Fx$ ), ( $S/N-Fy$ ) et ( $S/N-Fz$ ).

- L'optimum de la réponse ( $P$ ) correspond aux paramètres d'usinage ( $Vc=80\text{m/min}$ ,  $f=0,08$  et  $Tm=4 \text{ min}$ ) et l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit ( $S/N$ ) exprime la meilleure performance de la réponse ( $P$ ).

- L'optimum des réponses de ( $V_{chip}$ ) correspond aux paramètres d'usinage ( $Vc=140\text{m/min}$ ,  $f=0,14\text{mm/tr}$  et  $Tm=12\text{min}$ ). Cet optimum est la valeur la plus élevée du Signal/ Bruit ( $S/N V_{chip}$ ).

- L'optimisation multi-objective réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité ( $DF$ ) nous a permis d'obtenir des régimes de coupe optimales selon les différents critères choisis sont :

- ( $VB_{\min(+5)}$ ,  $Ra_{\min(+1)}$  et  $V_{chip\max(+1)}$ ) :  $Vc = 80\text{m/min}$ ,  $f = 0,08\text{mm/tr}$  et  $Tm = 12 \text{ min}$ .

- ( $VB_{\min(+1)}$ ,  $Ra_{\min(+1)}$ ,  $V_{chip\max(+5)}$ ) :  $Vc = 140\text{m/min}$ ,  $f = 0,11\text{mm/tr}$  et  $Tm = 12 \text{ min}$ .

- ( $VB_{\min(+1)}$ ,  $Ra_{\min(+5)}$  et  $V_{chip\max(+1)}$ ) :  $Vc = 80\text{m/min}$ ,  $f = 0,08\text{mm/tr}$  et  $Tm = 4,739 \text{ min}$ .

Compromis entre ( $VB$ ), ( $Ra$ ), ( $Fz$ ), ( $P$ ) et le Volume de copeau enlevé ( $V_{chip}$ )

- ( $VB_{\min(+1)}$ ,  $Ra_{\min(+5)}$ ,  $Fz_{\min(+5)}$ ,  $P_{\min(+5)}$  et  $V_{chip\max(+1)}$ ) :  $Vc = 80\text{m/min}$ ,  $f = 0,08\text{mm/tr}$  et  $Tm = 4 \text{ min}$ .

- ( $VB_{\min(+5)}$ ,  $Ra_{\min(+5)}$ ,  $Fz_{\min(+5)}$ ,  $P_{\min(+5)}$  et  $V_{chip\max(+5)}$ ) :  $Vc = 140\text{m/min}$ ,  $f = 0,08\text{mm/tr}$  et  $Tm = 5,976 \text{ min}$ .

10) L'analyse des deux méthodes d'optimisation a montré que la méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse, elle est simple et rapide. Par contre

l'utilisation de la fonction de désirabilité est meilleure pour l'optimisation multi-objective.

- D'autre part, la méthodologie de surface de réponse (RSM) peut fournir plus d'informations que l'ANN, et cela concernant l'effet de chacun des facteurs et des interactions, ainsi que ses valeurs de contribution correspondantes.

## *Perspectives*

Les résultats obtenus dans ces travaux de recherche ouvrent d'importantes perspectives:

- 1-** De nouveaux tests d'usinage peuvent être réalisés, afin de vérifier la validité des observations effectuées dans d'autres conditions expérimentales. La modification des paramètres tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, ainsi l'utilisation d'autres types d'outils (géométries d'outils, différents outils et revêtements, etc.).
- 2-** Etude de l'effet de l'usure, la dureté de la pièce et le rayon du bec de l'outil sur d'autres grandeurs technologiques et physiques (les vibrations générées lors du processus de coupe, la température dans la zone de coupe, la rugosité de surface, ...etc).
- 3-** Développement d'autres modèles mathématiques sur les indicateurs de performance d'usinage en tenant compte d'un grand nombre de paramètres de coupe, tel que (géométries d'outils, dureté de la pièce, lubrification, etc....).
- 4-** Etude de l'effet de la lubrification MQL sur le comportement du couple outil-matière
- 5-** L'application des autres méthodes de modélisation et d'optimisation modernes telles que (la logique floue et les algorithmes génétiques, PSO ... etc).

## Références bibliographiques

- [1] **A. Czaplicki**, L'usinabilité et la coupe des métaux. *Revue de la société royale Belge des ingénieurs et des industries*. **12**, 708 – 736 (1962).
- [2] **B. Gruber**, Outillage et mesure, *Dunod 2<sup>ème</sup> Edition, Lausanne*. 51–63 (1981).
- [3] **G. Poulachon**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis, application: usinabilité de l'acier 100 Cr6. *Thèse de Doctorat, ENSAM de Cluny, Décembre*. 10 –11(1999).
- [4] **M. Robert, G. Godin**, Étude comparée de deux testes rapides d'usinabilité, corrélation avec les résultats d'essais de longue durée. *Revue de Mat.* **70**(12) 1021–1032 (1973).
- [5] <http://www.accreteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [6] **T. B. Bouchnak**, Étude de comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique, thèse de doctorat, École doctorale : *Sciences des Métiers de l'Ingénieur*. **555**(11) (2010).
- [7] **G. Poulachon**, Usinabilité des matériaux difficiles, Application aux aciers durcis. *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique BM7048*. 1–B7048. 18 (2004).
- [8] [www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com)
- [9] **G. Poulachan**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. *Thèse de doctorat de L'ENSAM de cluny*, (1999).
- [10] **G. Werner, W. Knappert**, Machining hardened bearing races with Pc-BN, *Industrial diamond review*, 3, 117–120 (1985).
- [11] **W. König, Th. Wand**, Turning bearing steel steel with amborite and ceramic, *Industrial diamond review*. 3, 117–120 (1987).
- [12] **F. Bagur**, Matériaux pour outils de coupe, *Techniques de l'ingénieur*. BM7080–1 (1999).
- [13] **Sandvik Coromant**  
[http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech\\_guide/spa/MTG\\_H.PDF](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H.PDF)
- [14] **JZ. Zhang, JC. Chen, ED. Kirby**, Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *J Mater Process Technol.* **184**, 233–239(2007).
- [15] **T. Özel, and Y. Karpaz**, Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. **45**(4), 467–479 (2005).

- [16] **BH. Varaprasad, CH. Srinivasa Rao, and P.V. VINAY**, Effect of machining parameters on tool wear in hard turning of AISI D3 steel. *Procedia Engineering*. **97**, 338–345 (2014).
- [17] **Brigitte Vasques**, étude du comportement du rayon d'arête et de son influence sur l'intégrité de surface en tournage à sec. *Docteur de l'université François – Rabelais*, 17 juin (2008).
- [18] **C. Pagès**, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. Mécanique. *France, Ecole Centrale de Lyon* (2003).
- [19] **A. Taylan, P. Fallböhmer, C. A. Rodriguez and T. Özel**, High Speed Cutting of Cast Iron and Alloy Steels. *State of Research, VDI BERICHTE*.1399 (1998).
- [20] **Catalogue de tournage**, Documentation Valenite Safety (2007).
- [21] **H. Aouici, M.A. Yallese, B. Fnides, T. Mabrouki**, Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work stwith CBN tool. *Mechanika*. **6** (86), 71–77(2010).
- [22] **K. K. Hansda**, Machinability Study of AISI 316 Grade Austenitic Stainless Steel Using P 30 Grade Cemented Carbide Insert. *Thèse de doctorat* (2011).
- [23] <http://www.industrie-mag.com/article6425.html>
- [24] **Selaimia Mosaab**, Etude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80. <http://www.memoireonline.com>
- [25] **A. Mosan**, Optimisation économique des opérations de tournage. *Ingénieurs et techniciens*. **12**, 43–48 (1975).
- [26] **C. Trombert**, Usinabilité des aciers inoxydables, *Techniques de l'ingénieur M726. Génie mécanique*, BM 7080.
- [27] **M.A. Yallese, J. F. Rigal, K. Chaoui, et al**, 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** (1), 35–55 (2005).
- [28] **H. Boucheleghem, M.A. Yallese, T. Mabrouki et al**, Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining Science and Technology*. **14** (4), 471–501(2010).
- [29] **O. Zerti, M.A. Yallese, R. Khettabi et al**, Design optimization for minimum technological parameters when dry turning of AISI D3 steel using Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **89**, 1915–1934 (2017).
- [30] **H, Bensouilah, H, Aouici, I, Meddour et al**, Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. *Measurement*. **82**, 1–18 (2016).
- [31] **H. Boucheleghem, M.A. Yallese, A. Amirat et al**, Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel. *Mechanics*. **65**(3), 57–65 (2007).

- [32] **H. Aouici, H. Boucheleghem, M.A. Yallese et al**, Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technolog.* **73**, (9-12), 1775–1788 (2014).
- [33] **M. Nouioua, M.A. Yallese, R. Khettabi et al**, Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* **91**(9-12), 3079–3094 (2017).
- [34] **O. Sadettin, Er. A Osman, N. Camuşcu, E. Aslan**, Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. *NDT & E International.* **40**, 121–126 (2006).
- [35] **B. Varaprasad, S. R. Chelamalasetti, et S. P Kondapalli**, Effect of machining parameters on tool wear and nodal temperature in hard turning of AISI D3 steel. *Open Access Library Journal.* **1**(06), 1 (2014).
- [36] **E. Aslan**, Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). *Materials & design.* **26**(1), 21–27 (2005).
- [37] **J. S. Dureja, R. SINGH, and Bhatti, Manpreet S**, Optimizing flank wear and surface roughness during hard turning of AISI D3 steel by Taguchi and RSM Methods. *Production & Manufacturing Research.* **2**(1), 767–783 (2014).
- [38] **E. Soltani, and H. Shahali**, An investigation of surface roughness and main cutting force during the hard turning of AISI D3 tool steel using ceramic tools: *International AMPT Conference.* (2011).
- [39] **S. Ravi, and M. Pradeep. Kumar**, Experimental investigation of cryogenic cooling in milling of AISI D3 tool steel. *Materials and Manufacturing Processes.* **27**(10), 1017–1021 (2012).
- [40] **V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, L .Figueira, et al**, Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* **27**(4), 754–763 (2009).
- [41] **J. P. Davim, and L. Figueira**, Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Materials & design.* **28**(4) 1186–1191(2007).
- [42] **M. Sarikaya, H. Dilipak, and A. Gezgin**, Optimization of Process Parameters for Surface Roughness and Tool Life in Face Milling using The Taguchi Analysis (2015).
- [43] **J. G. Lima, R. F. Avila, A. M. Abrao, et al**, Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. *Journal of Materials Processing Technology.* **169**(3), 388–395 (2005).

- [44] **J. Paulo. Davim, and L. Figueira**, Machinability evaluation in hard turning of work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Materials & design*. **8**(4), 1186–1191 (2007).
- [45] **J. Paulo. Davim, and L. Figueira**, Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. **221**(4), 625–633 (2007).
- [46] **J. S. Dureja, V. K. Gupta, V. S. Sharma, et al**, Design optimization of cutting conditions and analysis of their effect on tool wear and surface roughness during hard turning of AISI-H11 steel with a coated—mixed ceramic tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. **223**(11), 1441–1453 (2009).
- [47] **M. A. Shalaby, M. A. El Hakim, M. M. Abdelhameed, et al**, Wear mechanisms of several cutting tool materials in hard turning of high carbon–chromium tool steel. *Tribology International*. **70**, 148-154 (2014).
- [48] **Sahin, Yusuf**, Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels. *Journal of materials processing technology*. **209**(7), 3478–3489 (2009).
- [49] **S. NEŞELI, S. YALDIZ, and E. TÜRKEŞ**, Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. *Measurement*. **44**(3) 580–587 (2011).
- [50] **J. S. Dureja, V. K. Gupta, V. S. Sharma, et al**, Wear mechanisms of coated mixed-ceramic tools during finish hard turning of hot tool die steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. **224**(1), 183–193 (2010).
- [51] **E .Aslan, N. CAMUŞCU, and B. BIRGÖREN**, Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ TiCN mixed ceramic tool. *Materials & design*. **28**(5), 1618–1622 (2007).
- [52] **J. G. Lima, R. F. Avila, A. M. ABRAO, et al**, Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*. **169**(3), 388–395 (2005).
- [53] **R. Quiza, L. Figueira, and J. P. Davim**, Comparing statistical models and artificial neural networks on predicting the tool wear in hard machining D2 AISI steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **37** (7-8) 641–648 (2008).
- [54] **H. Tebassi, , M. A. Yallese, I. Meddour, et al**, On the Modeling of Surface Roughness and Cutting Force when Turning of Inconel 718 Using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Accuracy and Benefit. *Periodica Polytechnica. Engineering. Mechanical Engineering*. **61**(1), 1 (2017).

- [55] J. S. Dureja, V. K. Gupta, V. S. Sharma, et al, Design optimization of cutting conditions and analysis of their effect on tool wear and surface roughness during hard turning of AISI-H11 steel with a coated—mixed ceramic tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. **223**(11), 441–1453 (2009).
- [56] J. S. Dureja, V. K. Gupta, V. S. Sharma, et al, Design optimisation of flank wear and surface roughness for CBN-TiN tools during dry hard turning of hot work die steel. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. **7**(1-2), 129–147 (2009).
- [57] A. Chabbi, M. A. Yallese, I. Meddour, et al, Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters in turning of polyoxymethylene polymer (POMC) using RSM and desirability function. *Measurement*. **95**, 99–115 (2017).
- [58] J.S. Dureja, V.K. Gupta, V.S. Sharma, M. Dogra, Wear mechanisms of coated mixed-ceramic tool during finish hard turning of hot tool die steel. *Journal Mechanical Engineering Science, Proc. IMech E Part C*. **223**, 1–11 (2009).
- [59] B. Fnides, H. Aouici, M.A. Yallese, Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic. *Mechanika*. **2** (70), 1392–1207 (2008).
- [60] G. Poulachon, B.P Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, et al, the influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, *international Journal of Machine Tools & Manufacture*. **43**(2), 139–144 (2003).
- [61] M. Remadna, and J. F. Rigal, Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology*. **178**(1-3), 67-75 (2006).
- [62] G. Poulachon, A.L. Moisan, M. Dessoly, A contribution to the study of the cutting mechanisms in hard turning. *Mécanique & Industries*. **3**, 291–299 (2002).
- [63] M. Elbah, Investigation expérimentale sur l'effet de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe en tournage en utilisant les techniques statistiques. *Thèse de doctorat* (2015).
- [64] H. Aouici, M.A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki, J.F. Rigal, Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization, *Measurement*. **45**, 344–353 (2012).
- [65] R. Suresh, S. Basavarajappa, G.L. Samuel, Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coated carbide tool. *Measurement*. **45**, 1872–1884 (2012).
- [66] H. Bouchelaghem, M. A. Yallese, T. Mabrouki, A. Amirat, and J. F. Rigal, Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining Science and Technology*. **14**(4), 471-501(2010).

- [67] G.K. Dosbaeva, M.A. El Hakim, M.A. Shalaby, J.E. Krzanowski, and S.C. Veldhuis, Cutting temperature effect on PCBN and CVD coated carbide tools in hard turning of D2 tool steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. **50**, 1–8 (2015).
- [68] I. Ciftci, Machining of austenitic stainless steels using CVD multilayer coated cemented carbide tools. *Tribology International*. **39**, 565–569 (2006).
- [69] k. Senthil, D. Raja, T. Sornakumar, The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. **173**, 151–156 (2006).
- [70] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420b. *International Journal of Machine Tools &Manufacture*. **46**, 1547–1554 (2006).
- [71] M.Y Noordin, D. kurniawan, S. Sharif, Hard turning of stainless steel using wiper coated carbide tool. *Int. J. Precision Technology*. **1**, 1 (2007).
- [72] H. Bouchelaghem, M.A. Yallese, T. Mabrouki et al, Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining Science and Technology*. **14**, 471–501(2010).
- [73] H. Aouici, M.A. Yallese, K. Chaoui, et al, Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement*. **45**, pp. 344–353 (2012).
- [74] M.A. Yallese, J.F. Rigal, K. Chaoui, et al, 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**, 35–55 (2005).
- [75] R. Suresh and S. Basavarajappa, Effect of process parameters on tool wear and surface roughness during turning of hardened steel with coated ceramic tool. *Procedia Materials Science*. **5**, 1450–1459 (2014).
- [76] B. Fnides, M.A. Yallese, T. Mabrouki, et al, Surface roughness model in turning hardened hot work steel using mixed ceramic tool. *Mechanics*. **77**, 68-73 (2009).
- [77] K. Bouacha, M.A. Yallese, S. Khamel, et al, Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. **45**, 160-178 (2014).
- [78] H. Aouici, M.A. Yallese, B. Fnides, et al, Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work steel with CBN tool. *Mechanics*. **86**, 71–77 (2010).
- [79] <http://mp.cpgedupuydelome.fr/document.php?doc=Article%20%20Les%20r%C3%A9seaux%20de%20neurones.txt>
- [80] P. Wira, Réseaux de neurones artificiels: architectures et applications. *Cours en ligne, Université de Haute-Alsace*, (2009).

[81] <https://fr.slideshare.net/MedZaibi/expos-rseaux-des-neurones>

[82] **G. Burel, and C. S. F. Thomson**, Une nouvelle approche pour les réseaux de neurones : la Représentation Scalaire Distribuée. *Traitement du signal*. **10**(1) (1993).

[83] **A. Schmitt, B. Le blanc, M. M. Corsini, C. Lafond, and J. Bruzek**, Les réseaux de neurones artificiels. Un outil de traitement de données prometteur pour l'anthropologie. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*. **13**, 1–2 (2001).

[84] **P. Wira**, Réseaux de neurones artificiels: architectures et applications. Cours en ligne, *Université de Haute-Alsace* (2009).

[85] **M. Bélanger, N. El-Jabi, D. Caissie, F. Ashkar, and J. M. Ribí**, Estimation de la température de l'eau de rivière en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*. **18**(3), 403–421 (2005).

[86] **O. Moselhi, T. Hegazy and P. Fazio**, Potential applications of neural networks in construction. *Canadian Journal of Civil Engineering*. **19**(3), 521–529 (1992).

[87] **W. Patrice**, Réseaux de neurones artificiels : architectures et applications, Université de Haute Alsace Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes) Avril (2009).

[88] **Math Works. Inc**, *matlab R 2007a*, (2007).

[89] **J. P. Davim**, Machining of hard materials. Springer, vorlag london limited. ISBN 987-1-84996-449-4 (2011).

[90] **M. Ramezani and A. Afsari**, Surface roughness and cutting force estimation in the CNC turning using artificial neural networks. *Management Science Letters*. **5**, 357–362 (2015).

[91] **M. Rajendra, P.C. Jena and H. Raheman**, Prediction of optimized pretreatment process parameters for biodiesel production using ANN and GA. *Fuel*. **88**, 868–875 (2009).

[92] **R.M. Garcia-Gimeno, C. Hervas-Martinez, R. Rodriguez-Perez et al**, Modelling the growth of *Leuconostoc mesenteroides* by artificial neural networks. *International journal of food microbiology*. **105**, 317–332 (2005).

[93] **A. Sahoo, A. Rout, and D. Das**, Response surface and artificial neural network prediction model and optimization for surface roughness in machining. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. **6**, 229–240 (2015).

[94] **K.R. Kashyzadeh and E. Maleki**, Experimental Investigation and Artificial Neural Network Modeling of Warm Galvanization and Hardened Chromium Coatings Thickness Effects on Fatigue Life of AISI 1045 Carbon Steel. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. **17**(6), 1276–1287 (2017).

[95] **M. F. F. Ab. Rashid and M. R. Abdul Lani**, Surface roughness prediction for CNC milling process using artificial neural network, in *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE '10)*. 3, London, UK, June-July (2010).

[96] **G. Taguchi**, Introduction to quality engineering. Asian Productivity Organisation, Tokyo (1986).

- [97] **M. Günay, A. Kaçal, Y. Turgut**, Optimization of machining parameters in milling of Ti-6Al-4 V alloy using Taguchi method. *E-J New World Sci Acad Eng Sci.* **6**(1), 428–440(2011).
- [98] **G. Taguchi**, System of experimental design, unipub/kraus, international publication (1987).
- [99] **A. Bendell, J. Disney, W.A. Pridmore**, Taguchi methods: applications in world industry, *IFS Publications, Bedford* (1989).
- [100] **J. Z. Zhang, J. C. Chen, E. D. Kirby**, Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *J Mater Process Technol.* **184** (1-3), 233–239 (2007).
- [101] **C. Gologlu, N. Sakarya**, The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method. *J Mater Process Technol.* **206**, 7–15 (2008).
- [102] **M. Kurt, E. Bagci, Y. Kaynak**, Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling progress. *Int J Adv Manuf Technol.* **40**, 458–469 (2009).
- [103] **M. Günay, A. Kaçal, Y. Turgut**, Optimization of machining parameters in milling of Ti-6Al-4 V alloy using Taguchi method. *E-J New World Sci Acad Eng Sci.* **6**(1), 428–440 (2011).
- [104] **J. S. Dureja, V. K. Gupta, V. S. Sharma, et al**, Design optimization of flank wear and surface roughness for CBN-TiN tools during dry hard turning of hot work die steel. *International Journal of Machining and Machinability of Materials.* **7**, 129–147 (2009).

## ***Publication***

Les travaux de cette thèse ont été présentés dans un article international qui est intitulé comme suit :

**1<sup>er</sup> Article:** “Cutting Conditions Modeling and Optimization in Hard Turning Using RSM, ANN and Desirability Function ” a été publié dans la revue international “***Journal of Failure Analysis and Prevention***”, Vol. 18(3), 457–720 (2018).

<https://doi.org/10.1007/s11668-018-0501-x>

**Auteurs:** ***Abderrezak Labidi, Hamid Tebassi, Salim Belhadi, Riad Khettabi et Mohamed Athmane Yallese.***

**2<sup>ème</sup> Article intitulé (Accepté):** Statistical Analysis of Flank Wear in Hard Turning Using RSM and ANN Methods. ***Journal of Scientific Bulletin***. x(x), xx-xx. (xxxx).

**Auteurs:** ***Abderrezak Labidi, Hamid Tebassi, Salim Belhadi, Mohamed Athmane Yallese.***

### **Communications internationales :**

***Labidi Abderrezak et al.*** “Prédiction de l’usure de la céramique CC6050 lors l’usinage de l’acier X210Cr12”, ***Conférence Internationale sur la Maintenance et La sécurité Industrielle CIMSI’2013, Skikda-Algérie, 28-29 Octobre 2013.***

***Labidi Abderrezak et al.*** "Modélisation de la rugosité de surface et de l’usure de la céramique revêtue lors de l’usinage d’un acier fortement allié", ***8<sup>ème</sup> journées d’études techniques JET’2014, Marrakech-Maroc, 28, 29 et 30 avril 2014.***

## ANNEXE

## Modèle de l'usure (VB) par la méthode ANN

```

/*%PRODUCER: JMP - Neural */
/*%TARGET: VB_mm */
/*%INPUT: Vc_m_min */
/*%INPUT: f_mm_rev */
/*%INPUT: t_min */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_021 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_032 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_047 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_071 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_08 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_087 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_088 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_092 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_11 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_114 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_126 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_135 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_14 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_142 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_152 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_155 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_175 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_186 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_196 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_2 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_215 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_22 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_24 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_25 */
/*%OUTPUT: VB_mm_0_29 */
LABEL VB_mm_0_021 = 'Predicted: VB_mm=0.021';
LABEL VB_mm_0_032 = 'Predicted: VB_mm=0.032';
LABEL VB_mm_0_047 = 'Predicted: VB_mm=0.047';
LABEL VB_mm_0_071 = 'Predicted: VB_mm=0.071';
LABEL VB_mm_0_08 = 'Predicted: VB_mm=0.08';
LABEL VB_mm_0_087 = 'Predicted: VB_mm=0.087';
LABEL VB_mm_0_088 = 'Predicted: VB_mm=0.088';
LABEL VB_mm_0_092 = 'Predicted: VB_mm=0.092';
LABEL VB_mm_0_11 = 'Predicted: VB_mm=0.11';
LABEL VB_mm_0_114 = 'Predicted: VB_mm=0.114';
LABEL VB_mm_0_126 = 'Predicted: VB_mm=0.126';
LABEL VB_mm_0_135 = 'Predicted: VB_mm=0.135';
LABEL VB_mm_0_14 = 'Predicted: VB_mm=0.14';
LABEL VB_mm_0_142 = 'Predicted: VB_mm=0.142';
LABEL VB_mm_0_152 = 'Predicted: VB_mm=0.152';
LABEL VB_mm_0_155 = 'Predicted: VB_mm=0.155';
LABEL VB_mm_0_175 = 'Predicted: VB_mm=0.175';
LABEL VB_mm_0_186 = 'Predicted: VB_mm=0.186';
LABEL VB_mm_0_196 = 'Predicted: VB_mm=0.196';
LABEL VB_mm_0_2 = 'Predicted: VB_mm=0.2';
LABEL VB_mm_0_215 = 'Predicted: VB_mm=0.215';
LABEL VB_mm_0_22 = 'Predicted: VB_mm=0.22';
LABEL VB_mm_0_24 = 'Predicted: VB_mm=0.24';
LABEL VB_mm_0_25 = 'Predicted: VB_mm=0.25';
LABEL VB_mm_0_29 = 'Predicted: VB_mm=0.29';
/* Transformation Code */

```

```

/* Hidden Layer Code */
H1 = tanh(.5*(-0.0746325767971512*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
0.403832459281867*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
0.504381318176898*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
0.11971195330525*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
0.305432879897557*((t_min="12")-(t_min="8")) +
0.0310636658872849*((t_min="4")-(t_min="8")) + 0.112314006820375));
H2 = tanh(.5*(0.109543501910401*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
0.058348312943117*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
0.175565158444913*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
0.235335928644691*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
0.259052613366792*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
0.611628612756117*((t_min="4")-(t_min="8")) + -0.0741464802057935));
H3 = tanh(.5*(0.428147595937614*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
0.287390130601075*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
0.125185130882289*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
0.238244183598991*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
0.182552544117924*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
0.322668929524518*((t_min="4")-(t_min="8")) + -0.029500259374263));
H4 = tanh(.5*(-0.110932384002796*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
0.125467738960928*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
0.249674878398791*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
0.304689369720575*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
0.153460902892213*((t_min="12")-(t_min="8")) +
0.601538031734767*((t_min="4")-(t_min="8")) + -0.100488278714287));
HH1 = tanh(.5*(0.473693382869607*H1 + -0.13488952263367*H2 +
0.0258587760107014*H3 + 0.154923878495988*H4 + 0.147393122461125));
HH2 = tanh(.5*(0.289225339819848*H1 + -0.173271002090429*H2 +
0.193296629870217*H3 + 0.150984294112162*H4 + 0.204757496137019));
HH3 = tanh(.5*(0.0555395476697339*H1 + 0.16884496508835*H2 +
0.398704104128532*H3 + 0.149047579249438*H4 + -0.064090016154638));
HH4 = tanh(.5*(-0.179775770575384*H1 + 0.460500099344758*H2 +
0.219829788838375*H3 + -0.119894280537793*H4 + -0.0770741423048671));
HH5 = tanh(.5*(0.173572900267891*H1 + 0.255020324923005*H2 +
0.340445530363173*H3 + -0.12507604085511*H4 + 0.102599255351063));
HH6 = tanh(.5*(-0.136608466296861*H1 + 0.0897287648444132*H2 +
0.133511069786988*H3 + -0.3749593946745*H4 + -0.0292139068193503));
HH7 = tanh(.5*(0.0807443678130505*H1 + -0.106472486911804*H2 +
0.0945053013759446*H3 + -0.0810264828367149*H4 + -0.0899976193118128));
HH8 = tanh(.5*(0.00118323765088002*H1 + 0.252862396467253*H2 +
0.252244672754902*H3 + -0.404192928850745*H4 + 0.346468746730841));

/* Final Layer Code */
THETA1=585.760567280439*HH1 + -660.953845232779*HH2 + -
1292.12596963467*HH3 + -539.062374032913*HH4 + -661.034567202191*HH5 + -
1250.47344449901*HH6 + -818.07195674482*HH7 + -621.184721244978*HH8 + -
329.586042069949;
THETA2=-528.807209605623*HH1 + -1565.98857348752*HH2 + -
1008.24291564501*HH3 + 895.135559756127*HH4 + 288.618811483581*HH5 +
723.21420963987*HH6 + -613.017028983676*HH7 + 1078.84948948938*HH8 + -
327.199212707159;
THETA3=110.011705214541*HH1 + -1218.61300446238*HH2 + -
1215.2490402902*HH3 + 178.936770585156*HH4 + -171.709906484946*HH5 + -
492.213889831865*HH6 + -824.912339844655*HH7 + 205.700757145622*HH8 + -
6.1872789291655;
THETA4=756.216610585581*HH1 + -454.48680875881*HH2 + -906.79110525581*HH3
+ -376.317246062302*HH4 + -266.385228007654*HH5 + -1004.61865113625*HH6 +
-748.577267211827*HH7 + -386.162358562339*HH8 + -197.868360875605;
THETA5=-218.346792234778*HH1 + 8.12585766899669*HH2 +
13.2939348927997*HH3 + -35.5847767404247*HH4 + -303.540664920805*HH5 + -

```

336.302778082508\*HH6 + -141.681549065439\*HH7 + -311.84129949364\*HH8 +  
55.2985778683807;  
THETA6=817.843017169256\*HH1 + -400.835662957807\*HH2 + -  
1219.00021261961\*HH3 + -807.320917324356\*HH4 + -550.498811707464\*HH5 + -  
862.75122858238\*HH6 + -470.765887912751\*HH7 + -421.950694854875\*HH8 + -  
366.577178036898;  
THETA7=210.426128263715\*HH1 + 536.617499464966\*HH2 + 217.480971636218\*HH3  
+ -442.203492750875\*HH4 + -605.146980258609\*HH5 + -918.285074284655\*HH6 +  
-175.58605354721\*HH7 + -838.308134527111\*HH8 + -153.328926190259;  
THETA8=-73.8697401497755\*HH1 + -779.33387702702\*HH2 + -  
345.486337609563\*HH3 + 593.093349779082\*HH4 + 431.779041290742\*HH5 +  
459.310406004328\*HH6 + -293.813659907837\*HH7 + 669.023785233322\*HH8 + -  
39.1727224948131;  
THETA9=-988.893584746826\*HH1 + -566.827630110957\*HH2 +  
419.334814619631\*HH3 + 985.628337136313\*HH4 + 517.553972577069\*HH5 +  
1056.37644755076\*HH6 + 210.204819709028\*HH7 + 993.645724057812\*HH8 + -  
358.139910168595;  
THETA10=72.0297789694015\*HH1 + -1106.20440265683\*HH2 + -  
1064.83840904195\*HH3 + 195.674364261109\*HH4 + 216.970305948919\*HH5 +  
538.517595703967\*HH6 + -243.499067523376\*HH7 + 767.517240468667\*HH8 + -  
74.1467082663905;  
THETA11=285.97790659488\*HH1 + -867.597997845902\*HH2 + -761.0771282289\*HH3  
+ 290.921782126261\*HH4 + 108.220136503408\*HH5 + -255.650185741764\*HH6 + -  
677.775501103143\*HH7 + 233.781081106871\*HH8 + 29.4654630269166;  
THETA12=435.596876685222\*HH1 + -227.148186608598\*HH2 + -  
839.596893698498\*HH3 + -540.53256307276\*HH4 + -314.568069841865\*HH5 + -  
424.753159019532\*HH6 + -160.833947655743\*HH7 + -293.764680768542\*HH8 + -  
152.974093007063;  
THETA13=-642.596410198074\*HH1 + -45.0575311294088\*HH2 +  
460.975428582367\*HH3 + 516.887422161531\*HH4 + 83.348250512978\*HH5 +  
431.17777225332\*HH6 + 68.3087844470939\*HH7 + 144.726546277885\*HH8 +  
158.033733213608;  
THETA14=463.556462335926\*HH1 + 1119.68916950837\*HH2 + 821.21057322535\*HH3  
+ -526.731757896295\*HH4 + -231.681562414012\*HH5 + -754.790245702799\*HH6 +  
223.440605860944\*HH7 + -942.239209647517\*HH8 + -227.544529954677;  
THETA15=-439.697857984938\*HH1 + 646.279721812736\*HH2 +  
882.26906180136\*HH3 + 68.4003703732382\*HH4 + -86.9780861980737\*HH5 +  
163.676249436311\*HH6 + 440.596130542892\*HH7 + -335.392521704961\*HH8 +  
89.2730000454545;  
THETA16=-184.317539850387\*HH1 + 495.675894598832\*HH2 +  
297.105662468472\*HH3 + -318.11136648517\*HH4 + -225.180757230039\*HH5 + -  
57.1251308215053\*HH6 + 265.965874596289\*HH7 + -205.95243957801\*HH8 + -  
46.1018980630937;  
THETA17=-365.641416064636\*HH1 + 672.920346606101\*HH2 +  
1048.5645694898\*HH3 + 333.9653386783\*HH4 + 402.406882081974\*HH5 +  
579.697237565497\*HH6 + 468.771923526159\*HH7 + 168.396981055443\*HH8 + -  
35.7058042156666;  
THETA18=-777.239820047735\*HH1 + -232.259785044792\*HH2 +  
870.396116470792\*HH3 + 1110.03446743571\*HH4 + 778.644858136182\*HH5 +  
1305.8891459156\*HH6 + 220.10992642022\*HH7 + 1011.6019024338\*HH8 + -  
476.144451253433;  
THETA19=-590.038845885364\*HH1 + -151.46288716255\*HH2 +  
396.880390744755\*HH3 + 532.874916454614\*HH4 + 545.235508800441\*HH5 +  
1258.58366323566\*HH6 + 497.450206891494\*HH7 + 895.023605676258\*HH8 + -  
245.138045742548;  
THETA20=364.197601761243\*HH1 + 1132.65984359454\*HH2 +  
869.474738175043\*HH3 + -431.826892582398\*HH4 + -79.357453006762\*HH5 + -  
549.046333426934\*HH6 + 339.455771874001\*HH7 + -787.704072359232\*HH8 + -  
193.742913391142;  
THETA21=614.676108336232\*HH1 + 851.272204620217\*HH2 +  
29.1821708642241\*HH3 + -942.236594769469\*HH4 + -505.884945453561\*HH5 + -

```

774.208685606555*HH6 + 213.443032793128*HH7 + -867.843374974041*HH8 + -
286.609816696781;
THETA22=-240.466431164368*HH1 + 286.695602210893*HH2 +
546.138791265394*HH3 + 365.957952023318*HH4 + 328.571326485942*HH5 +
70.389805375803*HH6 + 83.5372397528593*HH7 + 145.581427345788*HH8 +
12.3396722511153;
THETA23=-247.064626368664*HH1 + 482.884645477059*HH2 +
440.164723910622*HH3 + -84.6153112842853*HH4 + -7.60586241092671*HH5 +
490.052340383937*HH6 + 389.668991956956*HH7 + -72.1786721826734*HH8 + -
4.34577343539935;
THETA24=-397.345319842677*HH1 + 88.6328238860763*HH2 +
335.772642841338*HH3 + 286.404677991824*HH4 + 388.490563792667*HH5 +
1042.08353314645*HH6 + 542.759572779999*HH7 + 728.637022615501*HH8 + -
158.102690426535;

```

```

/* Response Mapping Code */
/* construction for probabilities for VB_mm */

```

```

VB_mm_0_021 = Exp(THETA1);
VB_mm_0_032 = Exp(THETA2);
VB_mm_0_047 = Exp(THETA3);
VB_mm_0_071 = Exp(THETA4);
VB_mm_0_08 = Exp(THETA5);
VB_mm_0_087 = Exp(THETA6);
VB_mm_0_088 = Exp(THETA7);
VB_mm_0_092 = Exp(THETA8);
VB_mm_0_11 = Exp(THETA9);
VB_mm_0_114 = Exp(THETA10);
VB_mm_0_126 = Exp(THETA11);
VB_mm_0_135 = Exp(THETA12);
VB_mm_0_14 = Exp(THETA13);
VB_mm_0_142 = Exp(THETA14);
VB_mm_0_152 = Exp(THETA15);
VB_mm_0_155 = Exp(THETA16);
VB_mm_0_175 = Exp(THETA17);
VB_mm_0_186 = Exp(THETA18);
VB_mm_0_196 = Exp(THETA19);
VB_mm_0_2 = Exp(THETA20);
VB_mm_0_215 = Exp(THETA21);
VB_mm_0_22 = Exp(THETA22);
VB_mm_0_24 = Exp(THETA23);
VB_mm_0_25 = Exp(THETA24);

```

```

sum = 1 + VB_mm_0_021 + VB_mm_0_032 + VB_mm_0_047 + VB_mm_0_071 +
VB_mm_0_08 + VB_mm_0_087 + VB_mm_0_088 + VB_mm_0_092 + VB_mm_0_11 +
VB_mm_0_114 + VB_mm_0_126 + VB_mm_0_135 + VB_mm_0_14 + VB_mm_0_142 +
VB_mm_0_152 + VB_mm_0_155 + VB_mm_0_175 + VB_mm_0_186 + VB_mm_0_196 +
VB_mm_0_2 + VB_mm_0_215 + VB_mm_0_22 + VB_mm_0_24 + VB_mm_0_25;

```

```

VB_mm_0_021 = VB_mm_0_021/sum;
VB_mm_0_032 = VB_mm_0_032/sum;
VB_mm_0_047 = VB_mm_0_047/sum;
VB_mm_0_071 = VB_mm_0_071/sum;
VB_mm_0_08 = VB_mm_0_08/sum;
VB_mm_0_087 = VB_mm_0_087/sum;
VB_mm_0_088 = VB_mm_0_088/sum;
VB_mm_0_092 = VB_mm_0_092/sum;
VB_mm_0_11 = VB_mm_0_11/sum;
VB_mm_0_114 = VB_mm_0_114/sum;
VB_mm_0_126 = VB_mm_0_126/sum;
VB_mm_0_135 = VB_mm_0_135/sum;
VB_mm_0_14 = VB_mm_0_14/sum;

```

```

VB_mm_0_142 = VB_mm_0_142/sum;
VB_mm_0_152 = VB_mm_0_152/sum;
VB_mm_0_155 = VB_mm_0_155/sum;
VB_mm_0_175 = VB_mm_0_175/sum;
VB_mm_0_186 = VB_mm_0_186/sum;
VB_mm_0_196 = VB_mm_0_196/sum;
VB_mm_0_2 = VB_mm_0_2/sum;
VB_mm_0_215 = VB_mm_0_215/sum;
VB_mm_0_22 = VB_mm_0_22/sum;
VB_mm_0_24 = VB_mm_0_24/sum;
VB_mm_0_25 = VB_mm_0_25/sum;

```

```

VB_mm_0_29 = 1 - VB_mm_0_021 - VB_mm_0_032 - VB_mm_0_047 - VB_mm_0_071 -
VB_mm_0_08 - VB_mm_0_087 - VB_mm_0_088 - VB_mm_0_092 - VB_mm_0_11 -
VB_mm_0_114 - VB_mm_0_126 - VB_mm_0_135 - VB_mm_0_14 - VB_mm_0_142 -
VB_mm_0_152 - VB_mm_0_155 - VB_mm_0_175 - VB_mm_0_186 - VB_mm_0_196 -
VB_mm_0_2 - VB_mm_0_215 - VB_mm_0_22 - VB_mm_0_24 - VB_mm_0_25;

```

### Modèle de la rugosité de surface ( $Ra$ ) obtenu par la méthode ANN

```

/*%PRODUCER: JMP - Neural */
/*%TARGET: Ra_m */
/*%INPUT: Vc_m_min */
/*%INPUT: f_mm_rev */
/*%INPUT: t_min */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_32 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_33 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_36 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_37 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_4 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_44 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_47 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_51 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_52 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_58 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_62 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_66 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_68 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_69 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_71 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_75 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_76 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_78 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_82 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_85 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_86 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_88 */
/*%OUTPUT: Ra_m_0_91 */
/*%OUTPUT: Ra_m_1_01 */
/*%OUTPUT: Ra_m_1_02 */
/*%OUTPUT: Ra_m_1_1 */
/*%OUTPUT: Ra_m_1_27 */
LABEL Ra_m_0_32 = 'Predicted: Ra_m=0.32';
LABEL Ra_m_0_33 = 'Predicted: Ra_m=0.33';
LABEL Ra_m_0_36 = 'Predicted: Ra_m=0.36';
LABEL Ra_m_0_37 = 'Predicted: Ra_m=0.37';
LABEL Ra_m_0_4 = 'Predicted: Ra_m=0.4';
LABEL Ra_m_0_44 = 'Predicted: Ra_m=0.44';
LABEL Ra_m_0_47 = 'Predicted: Ra_m=0.47';
LABEL Ra_m_0_51 = 'Predicted: Ra_m=0.51';

```

```

LABEL Ra_m_0_52 = 'Predicted: Ra_m=0.52';
LABEL Ra_m_0_58 = 'Predicted: Ra_m=0.58';
LABEL Ra_m_0_62 = 'Predicted: Ra_m=0.62';
LABEL Ra_m_0_66 = 'Predicted: Ra_m=0.66';
LABEL Ra_m_0_68 = 'Predicted: Ra_m=0.68';
LABEL Ra_m_0_69 = 'Predicted: Ra_m=0.69';
LABEL Ra_m_0_71 = 'Predicted: Ra_m=0.71';
LABEL Ra_m_0_75 = 'Predicted: Ra_m=0.75';
LABEL Ra_m_0_76 = 'Predicted: Ra_m=0.76';
LABEL Ra_m_0_78 = 'Predicted: Ra_m=0.78';
LABEL Ra_m_0_82 = 'Predicted: Ra_m=0.82';
LABEL Ra_m_0_85 = 'Predicted: Ra_m=0.85';
LABEL Ra_m_0_86 = 'Predicted: Ra_m=0.86';
LABEL Ra_m_0_88 = 'Predicted: Ra_m=0.88';
LABEL Ra_m_0_91 = 'Predicted: Ra_m=0.91';
LABEL Ra_m_1_01 = 'Predicted: Ra_m=1.01';
LABEL Ra_m_1_02 = 'Predicted: Ra_m=1.02';
LABEL Ra_m_1_1 = 'Predicted: Ra_m=1.1';
LABEL Ra_m_1_27 = 'Predicted: Ra_m=1.27';
/* Transformation Code */

/* Hidden Layer Code */
H1 = tanh(.5*(-19.1748885832312*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
15.2895514698752*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
2.16037009298093*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
5.47061771308684*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
20.9152919488284*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
15.2498782209401*((t_min="4")-(t_min="8")) + -5.37487841967998));
H2 = tanh(.5*(-3.30297203200258*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
13.6384385087681*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
42.0105259567355*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) + -
20.8240447690096*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
14.8753895035777*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
40.1294927313666*((t_min="4")-(t_min="8")) + 9.14113655308675));
H3 = tanh(.5*(4.49356415302184*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
0.26243252873336*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
17.1849963994963*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
18.8961721325891*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
19.0821909147926*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
17.5048524359744*((t_min="4")-(t_min="8")) + -4.21724863112516));
H4 = tanh(.5*(15.4112858537184*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
40.6259162927626*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
43.7546950482793*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) + -
30.4897042827226*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
13.9847153563658*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
15.081277238302*((t_min="4")-(t_min="8")) + -10.6223797735635));
H5 = tanh(.5*(32.3706890398917*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
36.8518242867686*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
22.5613875742921*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) + -
36.3579254202782*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
2.10079955027188*((t_min="12")-(t_min="8")) +
34.1725366430976*((t_min="4")-(t_min="8")) + 12.1007872086799));
H6 = tanh(.5*(9.22194446059305*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
4.62321644451055*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
30.0106636567876*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) + -
11.9709250257134*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
2.42400519348251*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
14.2800100575081*((t_min="4")-(t_min="8")) + 9.71394818660307));
H7 = tanh(.5*(-0.757890698642053*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
4.91293742042657*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
63.9995396581449*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) + -

```

```

5.97575633251308*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
14.8625725023166*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
28.7929465118968*((t_min="4")-(t_min="8")) + 7.78276381047833);
H8 = tanh(.5*(14.1953065494369*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) +
28.2481473046958*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
4.47129672562711*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) + -
5.19691600976536*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
7.52215259684319*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
21.8675882638609*((t_min="4")-(t_min="8")) + 2.20095800689351));
HH1 = tanh(.5*(-18.0329249274392*H1 + 30.8170856642891*H2 +
11.1920892769387*H3 + 26.3596819107537*H4 + 9.2768146480488*H5 +
1.31568602882607*H6 + -53.7960864709233*H7 + 4.53893196235126*H8 +
12.6290461047051;));
HH2 = tanh(.5*(47.9980791877142*H1 + -12.3275698171681*H2 + -
20.5297895330671*H3 + 30.1283327359135*H4 + -39.6273845254061*H5 + -
13.4027942466379*H6 + 11.6301098128165*H7 + 15.8706099738306*H8 +
20.1323859992294;));
HH3 = tanh(.5*(-7.9239084499856*H1 + -20.3107364114608*H2 + -
24.2918211412853*H3 + -21.5428793179673*H4 + 14.8357517681093*H5 + -
7.53522029211742*H6 + -9.50889931725592*H7 + -7.37180859413704*H8 + -
6.05635340941045;));
HH4 = tanh(.5*(-0.651001994417593*H1 + -0.640464556707711*H2 + -
42.9402461953791*H3 + 13.285771536851*H4 + -45.1112093705622*H5 + -
0.618624767060572*H6 + 0.879940591055007*H7 + -21.4420550129952*H8 +
9.2076721299691;));

/* Final Layer Code */
THETA1=67.0749955729761*HH1 + -36.9111370114766*HH2 +
44.8825203162612*HH3 + 44.1705528208262*HH4 + -20.3111863081065;
THETA2=36.9327977738059*HH1 + 71.7823141777872*HH2 + 57.7393000022764*HH3
+ -17.0810721838473*HH4 + -22.0460752301447;
THETA3=43.6442134600868*HH1 + -46.8210351183251*HH2 + -
36.9375124137021*HH3 + 30.4473082824615*HH4 + -14.984920532618;
THETA4=65.6622562278911*HH1 + -51.9157482844295*HH2 +
17.5326062992338*HH3 + 12.2900627620282*HH4 + -10.8994894267804;
THETA5=32.1165987018528*HH1 + 70.7552536096018*HH2 + 26.111485330346*HH3
+ 40.2330784713466*HH4 + -15.4802403346729;
THETA6=0.975880395006491*HH1 + -16.5070828374897*HH2 +
50.6868023846247*HH3 + 76.2763379553704*HH4 + -11.6903431462256;
THETA7=-38.5875638311703*HH1 + -33.1500750017136*HH2 + -
71.7042198275205*HH3 + 63.7130521082492*HH4 + -28.238522049585;
THETA8=35.2239418486481*HH1 + 7.58277180245026*HH2 + 60.2249768761866*HH3
+ -55.8280450697828*HH4 + -14.1689527163924;
THETA9=-19.4358357649748*HH1 + 39.0388421859481*HH2 +
59.3699362565181*HH3 + 38.3747385923705*HH4 + -20.5936566200299;
THETA10=35.904642906092*HH1 + 67.9490305330275*HH2 + -52.623196730319*HH3
+ 22.9084444014415*HH4 + -14.1644116446308;
THETA11=-48.1116912627249*HH1 + 29.3431763119158*HH2 + -
77.4800648661627*HH3 + -14.6420610329504*HH4 + -21.5886535909883;
THETA12=-57.8866680982214*HH1 + -51.1318204775733*HH2 +
39.5812773653795*HH3 + 29.994296185267*HH4 + -20.75517807404;
THETA13=46.2526611460666*HH1 + 12.5498654391629*HH2 + -
40.0745557371786*HH3 + 58.08055781667*HH4 + -17.0532614399842;
THETA14=-30.0003200687479*HH1 + -52.4941754942611*HH2 + -
3.86318758942369*HH3 + 78.4571187811838*HH4 + -19.2031853773863;
THETA15=-21.6920646294389*HH1 + 22.2187336638989*HH2 +
83.2510249311991*HH3 + -5.00417100073039*HH4 + -15.2499102128165;
THETA16=-17.5674263036947*HH1 + -44.7768780209931*HH2 +
50.5535551997398*HH3 + -36.302892479204*HH4 + -32.215420582086;
THETA17=-42.7987565140062*HH1 + 33.0672569649864*HH2 + -
26.3864772513221*HH3 + 51.4278434002351*HH4 + -24.4020404338759;

```

```

THETA18=35.6047943870613*HH1 + -52.6576649423343*HH2 +
52.2518296153282*HH3 + -62.7139839980006*HH4 + -28.4505599471538;
THETA19=68.2930181730228*HH1 + -13.0266326796493*HH2 + -
31.3848099869626*HH3 + -31.6447441816869*HH4 + -18.3471389108135;
THETA20=-22.2079808756713*HH1 + 70.6861662878616*HH2 + 41.4507829963*HH3
+ -47.8108914215919*HH4 + -33.842703989964;
THETA21=14.5252786266746*HH1 + 30.8769978194195*HH2 + -
62.1337613295127*HH3 + -44.9770437708458*HH4 + -18.6328787589098;
THETA22=59.5850479703605*HH1 + 55.2831115517316*HH2 + -
23.7204792931771*HH3 + -32.9910401870095*HH4 + -22.5373506470553;
THETA23=-32.0741992598245*HH1 + -42.9501151337825*HH2 + -
73.2977165724896*HH3 + -19.2967429789782*HH4 + -26.5818486587395;
THETA24=-44.7687753041005*HH1 + 63.555179954655*HH2 + -
11.3589195815129*HH3 + -17.6529431762966*HH4 + -19.0868726723957;
THETA25=-45.0704447748172*HH1 + -13.6586840414762*HH2 + -
16.3371873210438*HH3 + -61.7638884835597*HH4 + -30.1918467281767;
THETA26=24.941200103623*HH1 + -63.5228544354163*HH2 + -
27.8259056168706*HH3 + -46.5885649930844*HH4 + -22.2723608064883;

```

```

/* Response Mapping Code */
/* construction for probabilities for Ra_m */
Ra_m_0_32 = Exp(THETA1);
Ra_m_0_33 = Exp(THETA2);
Ra_m_0_36 = Exp(THETA3);
Ra_m_0_37 = Exp(THETA4);
Ra_m_0_4 = Exp(THETA5);
Ra_m_0_44 = Exp(THETA6);
Ra_m_0_47 = Exp(THETA7);
Ra_m_0_51 = Exp(THETA8);
Ra_m_0_52 = Exp(THETA9);
Ra_m_0_58 = Exp(THETA10);
Ra_m_0_62 = Exp(THETA11);
Ra_m_0_66 = Exp(THETA12);
Ra_m_0_68 = Exp(THETA13);
Ra_m_0_69 = Exp(THETA14);
Ra_m_0_71 = Exp(THETA15);
Ra_m_0_75 = Exp(THETA16);
Ra_m_0_76 = Exp(THETA17);
Ra_m_0_78 = Exp(THETA18);
Ra_m_0_82 = Exp(THETA19);
Ra_m_0_85 = Exp(THETA20);
Ra_m_0_86 = Exp(THETA21);
Ra_m_0_88 = Exp(THETA22);
Ra_m_0_91 = Exp(THETA23);
Ra_m_1_01 = Exp(THETA24);
Ra_m_1_02 = Exp(THETA25);
Ra_m_1_1 = Exp(THETA26);
sum = 1 + Ra_m_0_32 + Ra_m_0_33 + Ra_m_0_36 + Ra_m_0_37 + Ra_m_0_4 +
Ra_m_0_44 + Ra_m_0_47 + Ra_m_0_51 + Ra_m_0_52 + Ra_m_0_58 + Ra_m_0_62 +
Ra_m_0_66 + Ra_m_0_68 + Ra_m_0_69 + Ra_m_0_71 + Ra_m_0_75 + Ra_m_0_76 +
Ra_m_0_78 + Ra_m_0_82 + Ra_m_0_85 + Ra_m_0_86 + Ra_m_0_88 + Ra_m_0_91 +
Ra_m_1_01 + Ra_m_1_02 + Ra_m_1_1;
Ra_m_0_32 = Ra_m_0_32/sum;
Ra_m_0_33 = Ra_m_0_33/sum;
Ra_m_0_36 = Ra_m_0_36/sum;
Ra_m_0_37 = Ra_m_0_37/sum;
Ra_m_0_4 = Ra_m_0_4/sum;
Ra_m_0_44 = Ra_m_0_44/sum;
Ra_m_0_47 = Ra_m_0_47/sum;
Ra_m_0_51 = Ra_m_0_51/sum;
Ra_m_0_52 = Ra_m_0_52/sum;

```

```

Ra_m_0_58 = Ra_m_0_58/sum;
Ra_m_0_62 = Ra_m_0_62/sum;
Ra_m_0_66 = Ra_m_0_66/sum;
Ra_m_0_68 = Ra_m_0_68/sum;
Ra_m_0_69 = Ra_m_0_69/sum;
Ra_m_0_71 = Ra_m_0_71/sum;
Ra_m_0_75 = Ra_m_0_75/sum;
Ra_m_0_76 = Ra_m_0_76/sum;
Ra_m_0_78 = Ra_m_0_78/sum;
Ra_m_0_82 = Ra_m_0_82/sum;
Ra_m_0_85 = Ra_m_0_85/sum;
Ra_m_0_86 = Ra_m_0_86/sum;
Ra_m_0_88 = Ra_m_0_88/sum;
Ra_m_0_91 = Ra_m_0_91/sum;
Ra_m_1_01 = Ra_m_1_01/sum;
Ra_m_1_02 = Ra_m_1_02/sum;
Ra_m_1_1 = Ra_m_1_1/sum;
Ra_m_1_27 = 1 - Ra_m_0_32 - Ra_m_0_33 - Ra_m_0_36 - Ra_m_0_37 - Ra_m_0_4
- Ra_m_0_44 - Ra_m_0_47 - Ra_m_0_51 - Ra_m_0_52 - Ra_m_0_58 - Ra_m_0_62 -
Ra_m_0_66 - Ra_m_0_68 - Ra_m_0_69 - Ra_m_0_71 - Ra_m_0_75 - Ra_m_0_76 -
Ra_m_0_78 - Ra_m_0_82 - Ra_m_0_85 - Ra_m_0_86 - Ra_m_0_88 - Ra_m_0_91 -
Ra_m_1_01 - Ra_m_1_02 - Ra_m_1_1;

```

### Modèle de l'effort tangentiel ( $F_z$ ) obtenu par la méthode ANN

```

/*%PRODUCER: JMP - Neural */
/*%TARGET: Fz_N */
/*%INPUT: Vc_m_min */
/*%INPUT: f_mm_rev */
/*%INPUT: t_min */
/*%OUTPUT: Fz_N_108_4 */
/*%OUTPUT: Fz_N_109_73 */
/*%OUTPUT: Fz_N_110 */
/*%OUTPUT: Fz_N_114_55 */
/*%OUTPUT: Fz_N_116_39 */
/*%OUTPUT: Fz_N_117_2 */
/*%OUTPUT: Fz_N_127_5 */
/*%OUTPUT: Fz_N_130_7 */
/*%OUTPUT: Fz_N_131_31 */
/*%OUTPUT: Fz_N_139_64 */
/*%OUTPUT: Fz_N_151_23 */
/*%OUTPUT: Fz_N_151_27 */
/*%OUTPUT: Fz_N_160_93 */
/*%OUTPUT: Fz_N_40_96 */
/*%OUTPUT: Fz_N_41 */
/*%OUTPUT: Fz_N_47_88 */
/*%OUTPUT: Fz_N_60_66 */
/*%OUTPUT: Fz_N_62_26 */
/*%OUTPUT: Fz_N_66_68 */
/*%OUTPUT: Fz_N_77_47 */
/*%OUTPUT: Fz_N_77_53 */
/*%OUTPUT: Fz_N_77_78 */
/*%OUTPUT: Fz_N_79_06 */
/*%OUTPUT: Fz_N_81_19 */
/*%OUTPUT: Fz_N_82_88 */
/*%OUTPUT: Fz_N_95_72 */
/*%OUTPUT: Fz_N_97_04 */
LABEL Fz_N_108_4 = 'Predicted: Fz_N=108.4';
LABEL Fz_N_109_73 = 'Predicted: Fz_N=109.73';
LABEL Fz_N_110 = 'Predicted: Fz_N=110';

```

```

LABEL Fz_N_114_55 = 'Predicted: Fz_N=114.55';
LABEL Fz_N_116_39 = 'Predicted: Fz_N=116.39';
LABEL Fz_N_117_2 = 'Predicted: Fz_N=117.2';
LABEL Fz_N_127_5 = 'Predicted: Fz_N=127.5';
LABEL Fz_N_130_7 = 'Predicted: Fz_N=130.7';
LABEL Fz_N_131_31 = 'Predicted: Fz_N=131.31';
LABEL Fz_N_139_64 = 'Predicted: Fz_N=139.64';
LABEL Fz_N_151_23 = 'Predicted: Fz_N=151.23';
LABEL Fz_N_151_27 = 'Predicted: Fz_N=151.27';
LABEL Fz_N_160_93 = 'Predicted: Fz_N=160.93';
LABEL Fz_N_40_96 = 'Predicted: Fz_N=40.96';
LABEL Fz_N_41 = 'Predicted: Fz_N=41';
LABEL Fz_N_47_88 = 'Predicted: Fz_N=47.88';
LABEL Fz_N_60_66 = 'Predicted: Fz_N=60.66';
LABEL Fz_N_62_26 = 'Predicted: Fz_N=62.26';
LABEL Fz_N_66_68 = 'Predicted: Fz_N=66.68';
LABEL Fz_N_77_47 = 'Predicted: Fz_N=77.47';
LABEL Fz_N_77_53 = 'Predicted: Fz_N=77.53';
LABEL Fz_N_77_78 = 'Predicted: Fz_N=77.78';
LABEL Fz_N_79_06 = 'Predicted: Fz_N=79.06';
LABEL Fz_N_81_19 = 'Predicted: Fz_N=81.19';
LABEL Fz_N_82_88 = 'Predicted: Fz_N=82.88';
LABEL Fz_N_95_72 = 'Predicted: Fz_N=95.72';
LABEL Fz_N_97_04 = 'Predicted: Fz_N=97.04';
/* Transformation Code */

/* Hidden Layer Code */
H1 = tanh(.5*(-0.82218110093338*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
13.1489220038979*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
5.63350881324849*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
57.617487590281*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
119.710126414052*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
39.0735343713129*((t_min="4")-(t_min="8")) + 16.6322313074555));
H2 = tanh(.5*(-2.11203032017328*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
61.5206639846538*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
5.46829104621413*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) + -
71.3000868928268*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
54.1210093958817*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
5.19733574290547*((t_min="4")-(t_min="8")) + 13.6412829400635));
H3 = tanh(.5*(23.0774578878706*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
35.0484875145907*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
59.9323189447288*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
67.1376598957167*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
17.8958434904752*((t_min="12")-(t_min="8")) +
37.1726175174966*((t_min="4")-(t_min="8")) + 8.42723908838354));
H4 = tanh(.5*(-32.1294806942844*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
73.7587943818462*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
16.00932165459*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
59.4219664801713*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
36.3781941947491*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
38.4726383834761*((t_min="4")-(t_min="8")) + 9.79622474541662));
H5 = tanh(.5*(84.4936636576447*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
12.8621313446615*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) + -
104.727937090181*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
48.3764753414676*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
99.0852771448565*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
17.8396872912324*((t_min="4")-(t_min="8")) + 0.166450857279523));
H6 = tanh(.5*(-24.5706146135614*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
25.6572786061434*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
71.0278085092455*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) + -
6.6640907086904*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +

```

```

63.9407411300353*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
2.69833782973353*((t_min="4")-(t_min="8")) + 18.1351603081737));
H7 = tanh(.5*(46.2537768831364*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
66.1585105805908*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
52.8705738210295*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
14.5577293517061*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) +
20.148863797482*((t_min="12")-(t_min="8")) + -
42.6640075479192*((t_min="4")-(t_min="8")) + 27.4563970138085));
H8 = tanh(.5*(-40.6133225461009*((Vc_m_min="110")-(Vc_m_min="80")) + -
12.3383865001255*((Vc_m_min="140")-(Vc_m_min="80")) +
6.73972217319577*((f_mm_rev="0.08")-(f_mm_rev="0.14")) +
28.8192050707326*((f_mm_rev="0.11")-(f_mm_rev="0.14")) + -
20.6632474858664*((t_min="12")-(t_min="8")) +
2.1686261602352*((t_min="4")-(t_min="8")) + 3.73406006758103));
HH1 = tanh(.5*(19.8609389562953*H1 + -3.41779539094614*H2 + -
63.6524369226233*H3 + -74.7162567758304*H4 + 27.4055037677494*H5 +
46.5774499008281*H6 + 18.380326725814*H7 + 15.0653082296497*H8 + -
11.6260757475302;));
HH2 = tanh(.5*(-59.1513128862034*H1 + 59.1605020583747*H2 + -
19.2583111537313*H3 + 56.6707943337137*H4 + -30.7671818988943*H5 +
56.9720253732105*H6 + -9.34242061973672*H7 + 35.8511232975803*H8 + -
23.0722342852737;));
HH3 = tanh(.5*(-14.2233459723273*H1 + -40.9031243388339*H2 +
42.9639441039124*H3 + 47.9740107266767*H4 + 3.09630106572498*H5 +
87.6988925017833*H6 + -52.2085119159171*H7 + -12.7464767240303*H8 +
4.66817141580104;));
HH4 = tanh(.5*(0.793896253647995*H1 + -54.136342073416*H2 +
19.2857237147765*H3 + 23.6693767823222*H4 + -36.7351387392036*H5 +
21.3781629878389*H6 + 43.6032048895828*H7 + 33.8926202513151*H8 + -
7.12908084540761;));

/* Final Layer Code */
THETA1=-56.2824426278725*HH1 + 5.02057643750563*HH2 + -
60.6430149725514*HH3 + 5.85364725873691*HH4 + -39.166503058559;
THETA2=52.9722749301803*HH1 + 23.3984475945021*HH2 + 82.3961068092626*HH3
+ -47.223970844419*HH4 + 31.9749982374766;
THETA3=87.8262279413645*HH1 + -14.9449112698241*HH2 + -
75.6930293659815*HH3 + 29.4431809090886*HH4 + -40.7115716604328;
THETA4=94.4217333028734*HH1 + -15.1211517008153*HH2 + -
29.9602233358399*HH3 + -60.3196964023597*HH4 + 35.8966941571528;
THETA5=-50.0599108536176*HH1 + 41.7923275556889*HH2 +
43.1475007583799*HH3 + -68.2048486028574*HH4 + -0.348764813892973;
THETA6=-43.2641620275419*HH1 + 31.9682427479829*HH2 + -
76.7623924881165*HH3 + -112.384148939839*HH4 + -17.8806430163614;
THETA7=9.76144739082726*HH1 + 39.5478600524277*HH2 + -
96.3044607663417*HH3 + -29.0458098245128*HH4 + -22.6802387032724;
THETA8=-69.6544586347837*HH1 + -24.9587139513526*HH2 + 100.6378155225*HH3
+ 11.583057579128*HH4 + -37.9379444056749;
THETA9=9.38419575930525*HH1 + -87.3555308598885*HH2 +
69.2577821758386*HH3 + 12.8515522126322*HH4 + -47.6011719578321;
THETA10=97.9472093477299*HH1 + -24.0504677998726*HH2 + -
13.7721290769991*HH3 + 37.325427618704*HH4 + -40.0757445388761;
THETA11=-30.0046524661615*HH1 + -122.681918108807*HH2 +
59.1423260479679*HH3 + -93.9603867089967*HH4 + -34.059806265842;
THETA12=32.0732996815265*HH1 + -98.570932555871*HH2 + -
10.9828679655039*HH3 + -131.256027315788*HH4 + -8.42217958227155;
THETA13=70.2156000249211*HH1 + -42.4852821484834*HH2 +
61.1865788315032*HH3 + -55.2898919439621*HH4 + -8.12497370677293;
THETA14=-75.7826195273687*HH1 + 24.224545148255*HH2 + 61.707264584224*HH3
+ -3.27026998235414*HH4 + -28.3360058843216;

```

```

THETA15=93.548098637266*HH1 + 95.2917346718999*HH2 + -
85.8543260371585*HH3 + 76.6158031022126*HH4 + -76.4128681850013;
THETA16=35.8271632517355*HH1 + 91.0874627515295*HH2 +
47.2910675864227*HH3 + -12.8241974995229*HH4 + 13.302267689801;
THETA17=-74.5792841753049*HH1 + -58.0628914104868*HH2 + -
37.9647758507761*HH3 + -20.2869239418828*HH4 + -53.0514735682683;
THETA18=99.0782893696726*HH1 + -24.4821575622793*HH2 +
89.2710159931117*HH3 + 40.3225420361347*HH4 + -39.6372574022839;
THETA19=-85.7424614632248*HH1 + -80.4116056012739*HH2 +
48.8016315075765*HH3 + -36.7926787254563*HH4 + -21.8877274110053;
THETA20=-36.2697302530785*HH1 + -41.0000591034226*HH2 + -
63.396833844981*HH3 + -87.8498828039664*HH4 + 5.06457170699368;
THETA21=-68.8314986788983*HH1 + 65.466731566802*HH2 + -
38.1907178566666*HH3 + 27.6658137637247*HH4 + -43.6732287216324;
THETA22=87.1901685369967*HH1 + 19.7601375505757*HH2 + -
44.9140185089938*HH3 + -65.1134168436561*HH4 + 2.0938421259659;
THETA23=-73.4066161177916*HH1 + -21.4411250056596*HH2 +
33.834330095905*HH3 + -85.3819268333377*HH4 + 15.025085831755;
THETA24=92.1784961861735*HH1 + 101.552513023607*HH2 + -
6.8879742288838*HH3 + 40.7245816541512*HH4 + -29.2092684944233;
THETA25=-46.9446266370152*HH1 + 32.5553242463492*HH2 +
78.0855256100274*HH3 + 53.396266830273*HH4 + -61.2210672689666;
THETA26=-72.8892511612544*HH1 + 66.3300035843724*HH2 + -
16.3625687855002*HH3 + -31.0001724458971*HH4 + 0.192436684713181;

```

```

/* Response Mapping Code */

```

```

/* construction for probabilities for Fz_N */

```

```

Fz_N_108_4 = Exp(THETA1);
Fz_N_109_73 = Exp(THETA2);
Fz_N_110 = Exp(THETA3);
Fz_N_114_55 = Exp(THETA4);
Fz_N_116_39 = Exp(THETA5);
Fz_N_117_2 = Exp(THETA6);
Fz_N_127_5 = Exp(THETA7);
Fz_N_130_7 = Exp(THETA8);
Fz_N_131_31 = Exp(THETA9);
Fz_N_139_64 = Exp(THETA10);
Fz_N_151_23 = Exp(THETA11);
Fz_N_151_27 = Exp(THETA12);
Fz_N_160_93 = Exp(THETA13);
Fz_N_40_96 = Exp(THETA14);
Fz_N_41 = Exp(THETA15);
Fz_N_47_88 = Exp(THETA16);
Fz_N_60_66 = Exp(THETA17);
Fz_N_62_26 = Exp(THETA18);
Fz_N_66_68 = Exp(THETA19);
Fz_N_77_47 = Exp(THETA20);
Fz_N_77_53 = Exp(THETA21);
Fz_N_77_78 = Exp(THETA22);
Fz_N_79_06 = Exp(THETA23);
Fz_N_81_19 = Exp(THETA24);
Fz_N_82_88 = Exp(THETA25);
Fz_N_95_72 = Exp(THETA26);

```

```

sum = 1 + Fz_N_108_4 + Fz_N_109_73 + Fz_N_110 + Fz_N_114_55 + Fz_N_116_39
+ Fz_N_117_2 + Fz_N_127_5 + Fz_N_130_7 + Fz_N_131_31 + Fz_N_139_64 +
Fz_N_151_23 + Fz_N_151_27 + Fz_N_160_93 + Fz_N_40_96 + Fz_N_41 +
Fz_N_47_88 + Fz_N_60_66 + Fz_N_62_26 + Fz_N_66_68 + Fz_N_77_47 +
Fz_N_77_53 + Fz_N_77_78 + Fz_N_79_06 + Fz_N_81_19 + Fz_N_82_88 +
Fz_N_95_72;

```

---

```
Fz_N_108_4 = Fz_N_108_4/sum;
Fz_N_109_73 = Fz_N_109_73/sum;
Fz_N_110 = Fz_N_110/sum;
Fz_N_114_55 = Fz_N_114_55/sum;
Fz_N_116_39 = Fz_N_116_39/sum;
Fz_N_117_2 = Fz_N_117_2/sum;
Fz_N_127_5 = Fz_N_127_5/sum;
Fz_N_130_7 = Fz_N_130_7/sum;
Fz_N_131_31 = Fz_N_131_31/sum;
Fz_N_139_64 = Fz_N_139_64/sum;
Fz_N_151_23 = Fz_N_151_23/sum;
Fz_N_151_27 = Fz_N_151_27/sum;
Fz_N_160_93 = Fz_N_160_93/sum;
Fz_N_40_96 = Fz_N_40_96/sum;
Fz_N_41 = Fz_N_41/sum;
Fz_N_47_88 = Fz_N_47_88/sum;
Fz_N_60_66 = Fz_N_60_66/sum;
Fz_N_62_26 = Fz_N_62_26/sum;
Fz_N_66_68 = Fz_N_66_68/sum;
Fz_N_77_47 = Fz_N_77_47/sum;
Fz_N_77_53 = Fz_N_77_53/sum;
Fz_N_77_78 = Fz_N_77_78/sum;
Fz_N_79_06 = Fz_N_79_06/sum;
Fz_N_81_19 = Fz_N_81_19/sum;
Fz_N_82_88 = Fz_N_82_88/sum;
Fz_N_95_72 = Fz_N_95_72/sum;
Fz_N_97_04 = 1 - Fz_N_108_4 - Fz_N_109_73 - Fz_N_110 - Fz_N_114_55 -
Fz_N_116_39 - Fz_N_117_2 - Fz_N_127_5 - Fz_N_130_7 - Fz_N_131_31 -
Fz_N_139_64 - Fz_N_151_23 - Fz_N_151_27 - Fz_N_160_93 - Fz_N_40_96 -
Fz_N_41 - Fz_N_47_88 - Fz_N_60_66 - Fz_N_62_26 - Fz_N_66_68 - Fz_N_77_47
- Fz_N_77_53 - Fz_N_77_78 - Fz_N_79_06 - Fz_N_81_19 - Fz_N_82_88 -
Fz_N_95_72;
```