

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar – Annaba
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية التكنولوجيا

Département Génie Mécanique

قسم الهندسة الميكانيكية

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat En-Sciences

Spécialité : Génie Mécanique

Par :

HAMADI Billel

Thème :

Étude de l'impact des revêtements des outils de coupe sur les paramètres technologiques d'usinage en utilisant les méthodes statistiques

Thèse soutenue le 04 Mai 2023 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Hamadache Hamid	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	Boulanouar Lakhdar	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	Yaltese Mohamed Athmane	Prof.	Université 08 Mai 1945 Guelma	Co-rapporteur
04	Mokas Nacer	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
05	Belhadi Salim	MCA	Université 08 Mai 1945 Guelma	Examineur
06	Boucheriet Septi	MCA	Université 08 Mai 1945 Guelma	Examineur

"دراسة تأثير طلاءات أدوات القطع على معاملات المعالجة التكنولوجية للتشغيل

باستخدام الطرق الإحصائية"

الملخص:

تنطلع الصناعة التحويلية باستمرار إلى تقليل تكاليف القطع وتحسين جودة الأجزاء المصنعة. لذلك ، تساهم دراسة سلوك مواد أدوات القطع بشكل كبير في زيادة الإنتاجية وتصنيع المواد الأكثر صعوبة وتحسين الجودة بكميات كبيرة في الصناعة التحويلية. في هذا السياق يتم عمل أطروحة الدكتوراه هذه. في الواقع ، يهدف الموضوع المدروس إلى تحسين فهم تأثير أنواع مختلفة من مواد الطلاء على أداء أدوات القطع المصنوعة من الكربيد أثناء عملية الدوران.

يتمثل الجزء الأول من هذه الأطروحة في التحقق من أداء أداة القطع فيما يتعلق بإدخال التآكل وخشونة السطح وقوى القطع لأربعة إدخالات كربيد معدنية وهي ؛ ثلاثة كربيدات مطلية $GC2015 (TiCN-Al_2O_3-TiN)$ ، $GC4215 (Al_2O_3-Ti (C,N))$ ، و $GC1015 (TiN)$ وكربيد واحد غير مطلي أثناء التقليل الجاف لفلوآز AISI4140. لذلك ، تم إجراء تجارب المعالجة لمدة 5 دقائق من الدوران تحت عمق 0.5 مم ، وتغذية 0.08 مم / دورة وسرعة قطع 350 م / دقيقة.

الجزء الثاني مخصص لنمذجة المعلمات التكنولوجية للمعالجة وفقاً لمعايير القطع ، باستخدام منهجية سطح الاستجابة (RSM). لهذا الغرض ، تم اعتماد تصميم تاجوشي (L_9) لتخطيط التجارب ، ودرست تأثيرات معلمات القطع على مكونات قوة القطع باستخدام تحليل التباين (ANOVA) ، وتم استخدام منهجية سطح الاستجابة من أجل النمذجة الرياضية ، والتي تم من خلالها تطوير النماذج الرياضية الخطية للتنبؤ بـ R_a و F_a و F_r و F_z و P_c و K_s و MRR كدالة لمعلمات القطع.

الجزء الأخير من العمل محجوز للتحسين متعدد الأهداف من أجل إيجاد القيم المثلى لمعلمات القطع فيما يتعلق بمجموعة الأهداف. لهذا الغرض ، تم استخدام ست طرق تحسين تقليدية وغير تقليدية ، وهي: NAMDE و MOALO و MOGWO و SHAMODE و NSGA-II و DF.

كلمات مفتاحية: الخراطة ، الطلاء ، أدوات القطع ، الطرق الإحصائية ، التآكل ، خشونة السطح ، قوة القطع.

« Étude de L'impact des Revêtements des Outils de Coupe sur les Paramètres Technologiques d'usinage en Utilisant les Méthodes Statistiques »

Résumé :

L'industrie manufacturière cherche constamment à réduire les coûts de coupe et à améliorer la qualité des pièces usinées. L'étude du comportement des matériaux des outils de coupe joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la productivité, la capacité d'usiner des matériaux plus difficiles et l'amélioration de la qualité en grande quantité dans l'industrie manufacturière. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de cette thèse de doctorat. En effet, le thème étudié a pour objectif d'améliorer la compréhension de l'effet de différents types de matériaux de revêtement sur la performance des outils de coupe en carbure métallique lors du processus de tournage.

La première partie de cette thèse consiste à étudier les performances de l'outil de coupe en ce qui concerne l'usure de la plaquette, la rugosité de surface et les efforts de coupe lors du tournage à sec de l'acier AISI4140. Quatre plaquettes en carbure métallique ont été utilisées pour l'étude, à savoir trois carbures revêtus GC2015 ($TiCN-Al_2O_3-TiN$), GC4215 ($Al_2O_3-Ti(C,N)$) et GC1015 (TiN), ainsi qu'un carbure non revêtu. De ce fait, des expériences d'usinage ont été réalisées pendant 5 minutes de tournage sous une profondeur de 0,5 mm, une avance de 0,08 mm/tr et une vitesse de coupe de 350 m/min.

La deuxième partie de notre travail se concentre sur la modélisation des paramètres technologiques d'usinage en fonction des paramètres de coupe, en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). Dans ce but, un plan de Taguchi (L_9) a été adopté pour la planification des expériences, les effets des paramètres de coupe sur les composants de la force de coupe ont été étudiés en utilisant l'analyse de la variance (ANOVA), la méthodologie de la surface de réponse a été utilisée pour la modélisation mathématique, avec laquelle des modèles mathématiques linéaires ont été développés pour la prévision de R_a , F_a , F_r , F_z , P_c , K_s et MRR en fonction des paramètres de coupe.

La dernière partie de notre travail est consacrée à l'optimisation multi objective des paramètres de coupe, dans le but de sélectionner les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs fixés. Pour cela, six méthodes d'optimisation conventionnelle et métaheuristique ont été utilisés à savoir : DF, NAMDE, MOALO, MOGWO, SHAMODE et NSGA-II

Mots clés : Usinage, Revêtement, Outils de coupe, Méthodes Statistiques, Usure, Rugosité de surface, effort de coupe.

« Study of the Impact of Cutting Tool Coatings on Machining Technology Parameters Using Statistical Methods »

Abstract:

The manufacturing industry is constantly seeking to reduce its cutting costs and improve the quality of machined parts. Therefore, the study of the behavior of cutting tool materials contribute largely to increase productivity, to machine more difficult materials and to improve the quality in large quantities in the manufacturing industry. It is in this context that the work of this doctoral dissertation takes place. Indeed, the topic studied aims to improve the understanding of the effect of different types of coating materials on the performance of metal carbide cutting tools during the turning process.

The first part of this thesis is to study the cutting tool performance with respect to insert wear, surface roughness and cutting forces, of four metal carbide inserts namely; three coated carbides GC2015 ($TiCN-Al_2O_3-TiN$), GC4215 ($Al_2O_3-Ti(C,N)$) and GC1015 (TiN) and one uncoated carbide during dry turning of AISI4140 steel. Therefore, machining experiments were performed during 5 minutes of turning under a depth of 0.5 mm, a feed rate of 0.08 mm/rev and a cutting speed of 350 m/min.

The second part is devoted to the modeling of the machining technological parameters as a function of the cutting parameters, using the response surface methodology (RSM). For this purpose, a Taguchi design (L_9) was adopted for the planning of the experiments, the effects of the cutting parameters on the components of the cutting force were studied using analysis of variance (ANOVA), the response surface methodology was used for mathematical modeling, with which linear mathematical models were developed for the prediction of R_a , F_a , F_r , F_z , P_c , K_s and MRR as a function of the cutting parameters.

The last part of the work is reserved for multi-objective optimization in order to find the optimal values of the cutting parameters with respect to the set objectives. Therefore, a total of six conventional and non-conventionnel optimization methods are used, namely: DF, NAMDE, MOALO, MOGWO, SHAMODE and NSGA-II

Key words: Machining, Coating, Cutting tools, Statistical methods, Wear, Surface roughness, Cutting force.

Dédicaces

Je tiens à dédier cette thèse à mes parents, qui ont été ma source d'inspiration, de motivation et de bénédiction tout au long de mes années d'études. Leur dévouement et leur soutien permanent, ainsi que leurs sacrifices illimités et leur réconfort moral, ont été inestimables pour mon éducation et mon instruction, et ont contribué à me permettre d'atteindre mes objectifs. Je leur exprime toute ma gratitude pour leur amour et leur soutien indéfectibles, et je leur dédie ce travail en témoignage de mes sentiments les plus sincères.

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

Mes sœurs et mes frères ; Toute

ma famille ;

Mes chers 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 réalisé en collaboration entre le laboratoire de mécanique et structures (LMS) de l'université de Guelma et le laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (LRTAPM) de l'université de Annaba sous la direction de deux professeurs, Monsieur **BOULANOVAR Lakhdar** et Monsieur **YALLESE Mohamed Athmane**, qui ont fait preuve d'une grande disponibilité à mon égard tout au long de la période que j'ai passé au labo, pour m'avoir intégré rapidement au sein du laboratoire, pour la confiance qu'il m'a accordé dès mon arrivée, pour son esprit scientifique qui restera une grande source d'inspiration.*

*Je tiens à remercier Mr., **HAMADACHE Hamid**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université de Annaba, de l'honneur qui m'a fait le plaisir et l'honneur de présider le jury de cette thèse.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Messieurs : **MOKAS Nacer**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique de l'Université de Annaba, **BELHADI Salim**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique de l'Université 08 Mai 1945 de Guelma, et **BOUCHERIT Septi**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique de l'Université 08 Mai 1945 de Guelma pour avoir accepté la tâche d'examineurs et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux de thèse.*

Rien n'aurait été possible sans la présence et le soutien indéfectible de ma famille trouve en cet aboutissement le fruit de la confiance qu'ils m'ont toujours accordée, et des sacrifices qu'ils ont faits pour moi durant ces années.

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

INDEX DES FIGURES

CHAPITRE I
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I. 1 : <i>Classification des carbures métalliques [2].</i>	5
Figure I. 2 : <i>Carbure cémenté [5].</i>	8
Figure I. 3 : <i>Deux grades de microstructures de l'outil CBN : (a) grain de 6 a 22 µm (liant b, n, al) (b) grain de 1 a 4 µm (liant b, n, al, ti, co, w).</i>	11
Figure I. 4 : <i>Paramètres du processus de tournage [1]</i>	13
Figure I. 5 : <i>Les paramètres de coupe [10].</i>	14
Figure I. 6 : <i>Quatre facteurs influençant l'usure des outils [12].</i>	15
Figure I. 7 : <i>Schéma d'usure typique selon la norme ISO 3685 [13].</i>	15
Figure I. 8 : <i>Usure en dépouille [14].</i>	16
Figure I. 9 : <i>Stades typiques de l'usure en dépouille [15].</i>	16
Figure I. 10 : <i>Usure en cratère [14].</i>	17
Figure I. 11 : <i>Usure en entaille [17].</i>	17
Figure I. 12 : <i>Arête rapportée [17].</i>	18
Figure I. 13 : <i>Usure thermique et mécanique [17].</i>	18
Figure I. 14 : <i>Usure par écaillage [14].</i>	19
Figure I. 15 : <i>Déformation plastique [17].</i>	19
Figure I. 16 : <i>Usure abrasive de l'outil en carbure [9].</i>	20
Figure I. 17 : <i>Usure adhésive [19].</i>	21
Figure I. 18 : <i>Diffusion [5].</i>	22
Figure I. 19 : <i>Mécanisme de formation de l'oxydation [21].</i>	22
Figure I. 20 : <i>Impacts du revêtement pendant la coupe [23].</i>	24
Figure I. 21 : <i>Influences et exigences du substrat et du revêtement [24].</i>	25
Figure I. 22 : <i>Étapes du dépôt d'un revêtement par PVD [31].</i>	27
Figure I. 23 : <i>Contribution des paramètres à l'usinabilité [35].</i>	28
Figure I. 24 : <i>Différentes zones de chaleur dans l'usinage [37].</i>	29
Figure I. 25 : <i>Topographie de surface [38].</i>	30
Figure I. 26 : <i>Critères de rugosité [39].</i>	31
Figure I. 27 : <i>Hauteur maximale de l'irrégularité [1].</i>	32
Figure I. 28 : <i>Hauteur en dix points des irrégularités [1].</i>	33

**CHAPITRE II
PROCEDURE EXPÉRIMENTALE**

Figure II. 1 : <i>Tour parallèle modèle SN40</i>	53
Figure II. 2 : <i>(a) Eprouvettes utilisées, (b) Test de dureté universel (UH930), (c) Spectromètre PMI-master pro analyser</i>	55
Figure II. 3 : <i>Représentation (éprouvette en montage d'usinage pour les essais des efforts de coupe et rugosité sur un tour SN 40)</i>	55
Figure II. 4 : <i>Représentation (éprouvette en montage d'usinage pour les essais d'usure sur un tour SN 40)</i>	56
Figure II. 5 : <i>Plaquettes de coupe utilisées: (a) GC2015, (b) GC4215, (c) GC1015 et (d) H13A</i>	57
Figure II. 6 : <i>Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015)</i>	57
Figure II. 7 : <i>Revêtement et substrat de la plaquette GC4215 [119]</i>	58
Figure II. 8 : <i>Plaquette de coupe en carbure avec revêtement PVD (GC1015)</i>	59
Figure II. 9 : <i>Plaquette en carbure non revêtue (H13A)</i>	59
Figure II. 10 : <i>Porte outil PSBNR 2525M12</i>	60
Figure II. 11 : <i>(a) Dynamomètre à quartz standard (KISTLER 9257B), (b) Position du dynamomètre d'effort de coupe</i>	61
Figure II. 12 : <i>Amplificateur de charge (KISTLER 5019B130) & dispositif de programmation graphique (DYNOWARE 2825A1-1)</i>	62
Figure II. 13 : <i>Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE</i>	62
Figure II. 14 : <i>Mesure de topographie avec le rugosimètre portable Mitutoyo</i>	63
Figure II. 15 : <i>Profilomètre AltiSurf 500</i>	64
Figure II. 16 : <i>Rugosité de surface 2D et 3D mesurée par la plate-forme AltiSurf-500</i>	64
Figure II. 17 : <i>(a) Microscope optique Visuel Gage 250, (b) Logiciel visuel Gage 2.2.0</i>	65
Figure II. 18 : <i>Microscope électronique à balayage Tescan, modèle Vega</i>	66
Figure II. 19 : <i>Impression du tracé des logiciels utilisés : (a) design expert (10), (b) Minitab (2018), (c) Matlab (2018) et (d) Origine Pro (8.5)</i>	67
Figure II. 20 : <i>Organigramme de la procédure expérimentale et de l'analyse des données</i> .	70
Figure II. 21 : <i>Organigramme de la procédure expérimentale et de l'analyse des données</i> .	71

**CHAPITRE III
ÉTUDE COMPARATIVE DES REVÊTEMENTS
DES OUTILS DE COUPE**

Figure III. 1 : Profil de l'usure en dépouille selon la norme NF ISO 3685 71

Figure III. 2 : Organigramme de la procédure expérimentale et de l'analyse des données 71

Figure III. 3 : Comparaison entre les différentes plaquettes en termes d'usure en dépouille à $V_c=350\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$, $a_p=0,5\text{mm}$, après 5 min de tournage. 73

Figure III. 4 : Morphologies de l'usure des plaquettes de coupe utilisées. (a) T1: TiCN/Al₂O₃/TiN, (b) T2: TiCN/Al₂O₃, (c) T3: TiN, (d) T4: non revêtue. 74

Figure III. 5 : Micrographie MEB de l'usure en dépouille de la plaquette CVD (T1) à $V_c=350\text{ m/min}$, $f=0,08\text{ mm/rev}$, $a_p=0,5\text{mm}$ et $t=5\text{ min}$ 75

Figure III. 6 : Micrographie MEB de l'usure en dépouille de la plaquette MTCVD (T2) à $V_c=350\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$, $a_p=0,5\text{mm}$ et $t=5\text{ min}$ 76

Figure III. 7 : Micrographie MEB de l'usure en dépouille de la plaquette PVD (T3) à $V_c=350\text{ m/min}$, $f=0,08\text{ mm/tr}$, $a_p=0,5\text{ mm}$ et $t=5\text{min}$ 77

Figure III. 8 : Micrographie MEB de l'usure en dépouille de la plaquette non revêtue (T4) à $V_c=350\text{ m/min}$, $f=0,08\text{ mm/tr}$, $a_p=0,5\text{ mm}$ et $t=5\text{min}$ 77

Figure III. 9 : Comparaison des différentes plaquettes en termes de composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r and F_z) à $V_c=350\text{ m/min}$, $f=0,08\text{ mm/tr}$, $a_p=0,5\text{ mm}$ et après 5 min de tournage. 78

Figure III. 10 : Comparaison entre différentes plaquettes en termes critères de rugosité de surface (R_a , R_b , R_q et R_z), à $V_c=350\text{ m/min}$, $f=0,08\text{ mm/tr}$, $a_p=0,5\text{ mm}$ 79

Figure III. 11 : Topographies 3D des surface usinées avec ; a) GC2015, b) GC4215, c) GC1015 et d) H13A..... 81

**CHAPITRE IV
MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUES
EN UTILISANT L'APPROCHE RSM**

Figure IV. 1 : Organigramme de la procédure expérimentale et de l'analyse des données. ... 93

Figure IV. 2 : Performance de prédiction de R_a pour les trois plaquettes de coupe utilisées 102

Figure IV. 3 : Traces 3D de la rugosité de surface (R_a) en fonction V_c , f et a_p de T1, T2 et T3 103

Figure IV. 4 : Effet de l'avance par tour (f) sur la rugosité de surface (R_a) pour : a) T1 ; b)

<i>T2 ; c) T3</i>	104
Figure IV. 5 : <i>Performance de prédiction de F_a pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.</i>	107
Figure IV. 6 : <i>Tracés de surface 3D de F_a en fonction de V_c, f et a_p pour T1, T2 et T3.</i>	108
Figure IV. 7 : <i>Performance de prédiction de F_r pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.</i>	111
Figure IV. 8 : <i>Tracés de surface 3D de l'effort de coupe radial en fonction de V_c, f et a_p pour T1, T2, et T3.</i>	113
Figure IV. 9 : <i>Performance de prédiction de F_z pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.</i>	116
Figure IV. 10 : <i>Courbes de surface 3D de l'effort de coupe tangentiel (F_z) en fonction de V_c, f et a_p.</i>	118
Figure IV. 11 : <i>Performance de prédiction de P_c pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.</i>	121
Figure IV. 12 : <i>Courbes de surface 3D de la puissance de coupe (P_c) en fonction de V_c, f et a_p de T1, T2 et T3.</i>	122
Figure IV. 13 : <i>Performance de prédiction de K_s pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.</i>	125
Figure IV. 14 : <i>Courbes de surface 3D de l'effort spécifique de coupe (K_s) en fonction de V_c, f et a_p de T1, T2 et T3.</i>	126
Figure IV. 15 : <i>Courbes de surface 3D de taux d'enlèvement de matière (MRR) en fonction de V_c, f et a_p.</i>	128
Figure IV. 16 : <i>Erreurs relatives entre les valeurs expérimentales et prédites : a) F_a, b) F_r et c) F_z pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3).</i>	131
Figure IV. 17 : <i>Erreurs relatives entre les valeurs expérimentales et prédites de R_a pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3).</i>	132

CHAPITRE V
OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF DES PARAMÈTRES
D'USINAGE ENUTILISANT DES MÉTHODES CONVENTIONNELLES ET
NON-CONVENTIONNELLES

Figure V. 1 : <i>Diagramme de désirabilité 2D, (a) Minimum, (b) Maximum [163].</i>	139
Figure V. 2 : <i>Graphique de l'optimisation combinée de (R_a), (F_z), (P_c) et (MRR) pour :</i>	

<i>(a)T1, (b) T2, (c) T3.</i>	140
Figure V. 3 : <i>Barres graphique de la désirabilité pour : (a) T1, (b) T2, (c) T3.</i>	141
Figure V. 4 : <i>Organigramme de l'approche MAOLA [169].</i>	143
Figure V. 5 : <i>Meilleurs fronts de Pareto atteints par MOALO pour l'outil de coupe (T1).</i> 144	
Figure V. 6 : <i>Meilleurs fronts de Pareto atteints par MOALO pour le l'outil de coupe (T2)</i> 145	
Figure V. 7 : <i>Meilleurs fronts de Pareto atteints par MOALO pour l'outil de coupe (T3).</i> . 146	
Figure V. 8 : <i>Organigramme de l'approche NAMDE [170].</i>	147
Figure V. 9 : <i>Graphe de convergence des meilleures solutions pour l'outil de coupe (T1).</i> 151	
Figure V. 10 : <i>Graphe de convergence des meilleures solutions pour l'outil de coupe(T2).</i> 152	
Figure V. 11 : <i>Graphe de convergence des meilleures solutions pour l'outil de coupe(T3).</i> 152	
Figure V. 12 : <i>Meilleurs fronts de Pareto obtenus par les quatre approches utilisées pour l'outil de coupe (T1).</i>	155
Figure V. 13 : <i>Meilleurs fronts de Pareto obtenus par les quatre approches utilisées pour l'outil de coupe (T2).</i>	157
Figure V. 14 : <i>Meilleurs fronts de Pareto obtenus par les quatre approches utilisées pour l'outil de coupe (T3).</i>	158

INDEX DES TABLEAUX

CHAPITRE I ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I. 1 : <i>Classification des carbures [6].</i>	9
---	----------

CHAPITRE II PROCEDURE EXPÉRIMENTALE

Tableau II. 1 : <i>Informations relatives aux matériaux de coupe utilisées.</i>	56
Tableau II. 2 : <i>Réalisation d'essais d'après la méthode uni-factorielle.</i>	69
Tableau II. 3 : <i>Paramètres de coupe des tests longue durée.</i>	69
Tableau II. 4 : <i>Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L_9).</i>	74

CHAPITRE III ÉTUDE COMPARATIVE DES REVÊTEMENTS DES OUTILS DE COUPE

Tableau III. 1 : <i>Paramètres de coupe des tests paramétriques.</i>	79
Tableau III. 2 : <i>Résultats expérimentaux pour (F_a, F_r et F_z), (R_a, R_z, R_q et R_t) et (VB et VB_{max}).</i>	79

CHAPITRE IV MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUES EN UTILISANT L'APPROCHE RSM

Tableau IV. 1 : <i>Niveaux de variation des facteurs</i>	96
Tableau IV. 2 : <i>Taguchi Orthogonal Array Design $L_9(3*2)$.</i>	96
Tableau IV. 3 : <i>plans expérimentale et résultats</i>	99
Tableau IV. 4 : <i>suite</i>	99
Tableau IV. 5 : <i>Analyse de la variance pour la rugosité de surface (R_a).</i>	100
Tableau IV. 6 : <i>Analyse de variance pour F_a</i>	105
Tableau IV. 7 : <i>Analyse de variance pour F_r</i>	110
Tableau IV. 8 : <i>Analyse de variance pour F_z</i>	114
Tableau IV. 9 : <i>Analyse de variance pour la puissance P_c</i>	119
Tableau IV. 10 : <i>Analyse de la variance pour l'effort spécifique de coupe (K_s).</i>	123
Tableau IV. 11 : <i>Analyse de variance pour le taux d'enlèvement de la matière (MRR).</i>	127
Tableau IV. 12 : <i>Testes de confirmation</i>	130

CHAPITRE V
OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF DES PARAMÈTRES
D'USINAGE ENUTILISANT DES MÉTHODES CONVENTIONNELLES ET
NON-CONVENTIONNELLES

Tableau V. 1 : *Objectifs et plages de paramètres pour l'optimisation des conditions de coupe* 139

Tableau V. 2 : *Solutions pour l'optimisation pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3)..* 139

Tableau V. 3 : *Résultats de l'optimisation de MOALO pour le premier outil de coupe.....* 144

Tableau V. 4 : *Résultats de l'optimisation de MOALO pour le deuxième outil de coupe. ...* 145

Tableau V. 5 : *Résultats de l'optimisation de MOALO pour le troisième outil de coupe. ...* 146

Tableau V. 6 : *Résultats de l'optimisation pour la première plaquette de coupe (T1).....* 150

Tableau V. 7 : *Résultats de l'optimisation pour la deuxième plaquette de coupe (T2).* 151

Tableau V. 8 : *Résultats de l'optimisation pour la troisième plaquette de coupe (T3).* 153

Tableau V. 9 : *Résultats statistiques pour les trois cas* 153

Tableau V. 10 : *Solutions optimales pour l'outil (T1)* 156

Tableau V. 11 : *Solutions optimales pour l'outil (T2)* 156

Tableau V. 12 : *Solutions optimales pour l'outil (T3)* 157

Nomenclature

V_c :	<i>Vitesse de coupe (m/min).</i>
a_p :	<i>Profondeur de passe (mm).</i>
f :	<i>Avance par tour (mm/tr).</i>
HB :	<i>Dureté Brinell</i>
HRC :	<i>Dureté Rockwell</i>
R_a :	<i>Rugosité moyenne arithmétique (μm).</i>
R_t :	<i>Rugosité totale (μm).</i>
R_z :	<i>Profondeur moyenne de la rugosité (μm).</i>
R_q :	<i>Rugosité moyenne quadratique (μm)</i>
F_x :	<i>Effort de coupe axial (N).</i>
F_y :	<i>Effort de coupe radial (N).</i>
F_z :	<i>Effort de coupe tangentiel (N).</i>
VB :	<i>Usure en dépouille (mm).</i>
VB_{max} :	<i>Usure maximale (mm).</i>
VN :	<i>Usure en entaille.</i>
P_c :	<i>Puissance de coupe (W).</i>
K_c :	<i>Pression (effort spécifique) de coupe (N/mm^2).</i>
χ_r :	<i>Angle de dépouille principale [degré].</i>
χ_{r1} :	<i>Angle de direction auxiliaire [degré].</i>
γ :	<i>Angle d'attaque [degré].</i>
λ :	<i>Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [degré].</i>
r_ϵ :	<i>Rayon de bec de l'outil (mm).</i>
a_j :	<i>Coefficients des termes linéaires.</i>
a_{ij} :	<i>Termes croisés.</i>
DF :	<i>Degrés de liberté.</i>
\emptyset :	<i>Réponse souhaitée.</i>
$Seq\ SS$:	<i>Somme séquentielle de carrés.</i>
$Adj\ SS$:	<i>Somme des carrés ajustée.</i>
$Adj\ MS$:	<i>Moyenne des carrés ajustés.</i>
$PC\%$:	<i>Ratio de contribution en pourcentage (%).</i>
R^2 :	<i>Coefficient de détermination.</i>
t :	<i>Temps de coupe (s).</i>

Liste des abréviations

AISI :	<i>American Iron and Steel Institute</i>
PVD :	<i>Dépôt physique en phase vapeur</i>
CVD :	<i>Dépôt chimique en phase vapeur</i>
MTCVD	<i>Dépôt chimique en phase vapeur à température moyenne</i>
ISO :	<i>Organisation internationale de normalisation</i>
SEM :	<i>Microscope à balayage électronique</i>
PCBN :	<i>Nitrure de bore cubique polycristallin</i>
MRR :	<i>Taux d'enlèvement de la matière</i>
ANOVA :	<i>Analyse de variance.</i>
RSM :	<i>Méthodologie de surface de réponse.</i>
DOE :	<i>Plans d'expériences</i>
ANN :	<i>Réseaux de neurones artificiels</i>
GRA :	<i>Analyse Relationnelle Grise</i>
MOALO :	<i>Multi-objectif algorithme de Fourmi Lion</i>
NAMDE :	<i>Nouvel algorithme d'évolution différentielle mixte adaptatif</i>
NSGA-II :	<i>Algorithme génétique de triage non dominé II</i>
MOGWO :	<i>Optimiseur multi-objectif de type loup gris</i>
DF :	<i>Fonction de désirabilité</i>
SHAMODE :	<i>Evolution différentielle adaptative multi-objectifs basée sur l'historique des succès</i>
TiAlN :	<i>Nitrure d'aluminium et de titane</i>
TiAlCN :	<i>Nitrure de carbone de titane et d'aluminium</i>
TiCN :	<i>Carbonitrure de titane</i>
TiN :	<i>Nitrure de titane</i>
Al₂O₃ :	<i>Oxyde d'aluminium</i>
TiAlN :	<i>Nitrure d'aluminium et de titane</i>
WC :	<i>Carbure de tungstène</i>
Zr :	<i>Zirconium</i>

TABLE DES MATIÈRES

<i>Résumé</i>	<i>II</i>
<i>Dédicace</i>	<i>V</i>
<i>Remerciement</i>	<i>VI</i>
<i>Index des figures</i>	<i>VII</i>
<i>Index des tableaux</i>	<i>XII</i>
<i>Nomenclatures et Symboles</i>	<i>XIV</i>
<i>Table des matières</i>	<i>XVI</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>I</i>

**CHAPITRE I
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

I. 1 Coupe des métaux	4
I. 2 Importance de la coupe des métaux	4
I. 3 Matériaux des outils de coupe.....	5
I. 3. 1 Les aciers au carbone.....	6
I. 3. 2 Aciers rapides (HSS)	6
I. 3. 3 Alliages de cobalt coulés.....	7
I. 3. 4 Carbures	7
I. 3. 5 Cermets	9
I. 3. 6 Céramique :.....	10
I. 3. 7 Nitrure de silicium	10
I. 3. 8 Nitrure de bore cubique (CBN).....	11
I. 3. 9 Diamant.....	12
I. 4 Paramètres du processus de tournage.....	12
I. 5 Régime de coupe.....	13
I. 5. 1 Vitesse de coupe.....	13
I. 5. 2 L'avance.....	13
I. 5. 3 Profondeur de coupe.....	14
I. 6 Usure de l'outil	14
I. 6. 1 Types d'usure des outils.....	15
I. 6. 1. 1 Usure en dépouille.....	16
I. 6. 1. 2 Usure en cratère	17
I. 6. 1. 3 Usure en entaille.....	17
I. 6. 1. 4 Arête rapportée	18
I. 6. 1. 5 Fatigue thermique et mécanique :	18
I. 6. 1. 6 Écaillage :.....	18
I. 6. 1. 7 Déformation plastique	19
I. 7 Mécanismes d'usure	19
I. 7. 1 Abrasion.....	20
I. 7. 2 Adhésion	21
I. 7. 3 Diffusion	21
I. 7. 4 Oxydation.....	22
I. 8 Techniques de détection de l'usure	23

I. 8. 1 Les méthodes directes	23
I. 8. 2 Les méthodes indirectes	23
I. 9 Revêtements	23
I. 9. 1 Nécessité des revêtements et des techniques de revêtement	23
I. 9. 2 Différents types de revêtements	25
I. 9. 3 Technologies de revêtement	26
I. 9. 3. 1 Dépôt chimique en phase vapeur	26
I. 9. 3. 2 Dépôt physique en phase vapeur	26
I. 10 Nécessité des études d'usinabilité.....	28
I. 10. 1 Température de coupe.....	29
I. 10. 2 Intégrité de la surface.....	30
I. 10. 3 Paramètres d'état de surface	31
I. 10. 3. 1 Écart moyen arithmétique (R_a).....	31
I. 10. 3. 2 Méthode du carré moyen de la route (R_q).....	32
I. 10. 3. 3 La hauteur de crête (R_p).....	32
I. 10. 3. 4 Hauteur maximale du profil (R_t)	32
I. 10. 3. 5 Hauteur de dix points d'irrégularités (R_z)	33
I. 10. 4 Facteurs affectant l'état de surface	33
I. 11 Revue de la littérature	34
I. 11. 1 Comparaison des performances des outils de coupe en carbure revêtus et non revêtus en usinage.....	35
I. 11. 2 Performance des outils de coupe en carbure revêtus dans l'usinage	38
I. 11. 3 Performances des outils de coupe en carbure revêtu en usinage dur	43
I. 11. 4 Revues sur la modélisation et l'optimisation des paramètres d'usinage	46
I. 12 Conclusion.....	51

CHAPITRE II PROCEDURE EXPÉRIMENTALE

II. 1 Introduction.....	53
II. 2 Equipements d'expérimentation.....	53
II. 2. 1 Machine-outil	53
II. 2. 2 Nuance du matériau de la pièce.....	54
II. 2. 3 Plaquettes utilisés	56
II. 2. 4 Porte-outil utilisé	60
II. 3 Instruments de mesures utilisés	60
II. 3. 1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	61
II. 3. 2 Caractérisation de la surface de la pièce.....	63
II. 3. 2. 1 Mesure de la rugosité des surfaces en 2D.....	63
II. 3. 2. 2 Mesure de la rugosité des surfaces en 3D.....	63
II. 3. 3 Microscope optique pour la quantification de l'usure	65
II. 3. 4 Microscope électronique à balayage.....	66
II. 3. 5 Conception et logiciels d'analyse de d'expérimentation.....	66
II. 3. 6 Autres équipements	67
II. 4 Procédure expérimentale.....	67
II. 5 Planification des expériences.....	68

II. 5. 1 Régime de coupe	68
II. 5. 1. 1 Méthode uni-factorielle	69
II. 5. 1. 2 Méthode multifactorielle.....	70
II. 5. 2 Plans d'expériences adoptés	71
II. 5. 2. 1 Terminologie	71
II. 5. 2. 2 Différents types de facteurs	72
II. 5. 3 Méthodologie des plans d'expériences	72
II. 5. 4 Démarche et plan d'expérience adopté.....	73
II. 5. 4. 1 Plan de Taguchi L9.....	74
II. 6 Conclusion.....	75

CHAPITRE III

ÉTUDE COMPARATIVE DES REVÊTEMENTS DES OUTILS DE COUPE

III. 1 Introduction	77
III. 2 Essais réalisés	77
III. 3 Résultats	79
III. 3. 1 Analyse de l'usure des outils	79
III. 3. 2 Analyse de l'efforts de coupe.....	85
III. 3. 3 Analyse de rugosité de surface (2D)	86
III. 3. 4 Analyse de la rugosité de surface (3D)	87
III. 4 Conclusion.....	90

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUES EN UTILISANT L'APPROCHE RSM

IV. 1 Introduction.....	93
IV. 2 RSM expérimental design.....	94
IV. 2. 1 Plan expérimental.....	95
IV. 2. 2 Analyse de la variance (ANOVA)	97
IV. 3 Résultats et discussion	98
IV. 3. 1 Analyse des résultats de la rugosité de surface en fonction de V_c, f et a_p	100
IV. 3. 1. 1 Analyse de la variance pour (R_a)	100
IV. 3. 1. 2 Équation de régression de (R_a) en fonction de V_c, f et a_p	101
IV. 3. 1. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (R_a)	102
IV. 3. 2 Analyse des résultats de l'effort de coupe axiale en fonction de V_c, f et a_p	105
IV. 3. 2. 1 Analyse de la variance pour (F_a)	105
IV. 3. 2. 2 Equation de régression de (F_a) en fonction de V_c, f et a_p	106
IV. 3. 2. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (F_a)	108
IV. 3. 3 Analyse des résultats de l'effort de coupe radial en fonction de V_c, f et a_p	109
IV. 3. 3. 1 Analyse de la variance pour (F_r)	109
IV. 3. 3. 2 Analyse de régression de (F_r) en fonction de V_c, f et a_p	110
IV. 3. 3. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (F_r)	112
IV. 3. 4 Analyse des résultats de F_z en fonction de V_c, f et a_p	114

IV. 3. 4. 1 Analyse de la variance pour (F_z)	114
IV. 3. 4. 2 Analyse de régression de (F_z) en fonction de V_c, f et a_p	115
IV. 3. 4. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (F_z)	117
IV. 3. 5 Analyse des résultats de la puissance de coupe en fonction de V_c, f et a_p	119
IV. 3. 5. 1 Analyse de la variance pour (P_c)	119
IV. 3. 5. 2 Analyse de régression de (P_c) en fonction de V_c, f et a_p	120
IV. 3. 5. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (P_c)	122
IV. 3. 6 Analyse des résultats de la pression de coupe en fonction de V_c, f et a_p	123
IV. 3. 6. 1 Analyse de variance pour (K_s)	123
IV. 3. 6. 2 Analyse de régression de (K_s) en fonction de V_c, f et a_p	124
IV. 3. 6. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (K_s)	126
IV. 3. 7 Analyse des résultats de MRR en fonction de V_c, f et a_p	127
IV. 3. 7. 1 Analyse de variance pour (MRR)	127
IV. 3. 7. 2 Analyse de régression de (MRR) en fonction de V_c, f et a_p	127
IV. 3. 7. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (MRR)	128
IV. 3. 8 Tests de confirmation	129
IV. 4 Conclusions	133

CHAPITRE V
OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF DES PARAMÈTRES
D'USINAGE EN UTILISANT DES MÉTHODES CONVENTIONNELLES ET
NON-CONVENTIONNELLES

V. 1 Introduction	136
V. 2 Optimisation multi-objectif en utilisant la fonction de désirabilité	137
V. 2. 1 Procédure adaptée pour la méthode de fonction désirabilité (DF)	137
V. 2. 1. 1 Résultats	139
V. 3 Optimisation multi-objectif en utilisant les méthodes non-conventionnelles	141
V. 3. 1 Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode MOALO	142
V. 3. 1. 1 Résultats	143
V. 3. 2 Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode NAMDE	146
V. 3. 2. 1 Procédure d'optimisation	147
V. 3. 2. 2 Formulation du problème	149
V. 3. 2. 3 Résultats	149
V. 3. 3 Etude comparative entre quatre récentes méta-heuristiques algorithmes	153
V. 3. 3. 1 Résultats et discussion	155
V. 4 Conclusion	159
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	161
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	164
PRODUCTION SCIENTIFIQUE	xx
Vitaë	xxii

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie manufacturière cherche constamment à réduire ses coûts de coupe et d'améliorer la qualité des pièces usinées, car la demande de produits manufacturés à haute tolérance augmente rapidement. Le besoin croissant d'augmenter la productivité, d'usiner des matériaux plus difficiles et d'améliorer la qualité en grande quantité dans l'industrie manufacturière a été la force motrice du développement des matériaux d'outils de coupe.

Depuis la mise au point de l'acier au carbone il y a un siècle, de nombreux matériaux d'outils de coupe ont été développés pour l'usinage des métaux. Cette recherche constante d'amélioration des matériaux de coupe a permis de répondre à l'augmentation de la demande en produits manufacturés à haute tolérance, en permettant notamment de réduire les coûts de coupe tout en améliorant la qualité des pièces usinées. Ainsi, le développement d'outils de coupe toujours plus performants est devenu un enjeu clé pour l'industrie manufacturière, afin de répondre aux besoins croissants d'augmenter la productivité et d'usiner des matériaux plus difficiles en grande quantité.

Un aspect important qui fait l'objet de recherches et de développements intensifs est le revêtement dur pour les outils de coupe. Ce revêtement est un film mince dont l'épaisseur qui peut varier de quelques fractions de nanomètre (10^{-9} mètres) à quelques micromètres. Il a été prouvé que ces revêtements durs pouvaient multiplier par 10 la durée de vie des outils en ralentissant le phénomène d'usure des outils de coupe. Cette augmentation de la durée de vie des outils permet des changements d'outils moins fréquents, ce qui augmente la taille des lots pouvant être fabriqués et par conséquent, réduit non seulement le coût de fabrication, mais aussi le temps et le coût de préparation. En général, il est recommandé aux utilisateurs d'outils revêtus d'effectuer l'évaluation finale de la réponse tribologique lors d'essais sur le terrain

L'objectif de cette étude était d'améliorer la compréhension de l'effet de différents types de matériaux de revêtement sur la performance des outils de coupe en carbure. Pour atteindre cet objectif, des essais de tournage ont été réalisés avec un tour conventionnel en utilisant des plaquettes de coupe en carbure disponibles dans le commerce avec différents matériaux de revêtement. La performance des outils de coupe est évaluée en considérant la progression de l'usure de l'outil et la finition de surface de la pièce à usiner les efforts de coupe et le taux d'enlèvement de la matière.

Cette thèse est organisée en une introduction, cinq chapitres et une conclusion générale. Un bref résumé de chacun des chapitres est présenté ci-dessous :

INTRODUCTION GÉNÉRALE : Cette section traite les motivations et les objectifs de la recherche.

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE - Ce chapitre donne un aperçu détaillé des outils de coupe, les différentes méthodes de revêtement, la nécessité des études d'usinabilité, la qualité de la surface usinée, les différents types d'usure d'outils et les mécanismes d'usure d'outils. De plus, un examen approfondi de la recherche des scientifiques contemporains dans des domaines apparentés est fourni.

CHAPITRE II : PROCEDURE EXPÉRIMENTALE - Ce chapitre présente un compte-rendu détaillé des montages expérimentaux pour les essais de coupe, y compris la méthodologie expérimentale, les outils de coupe et les paramètres de processus utilisés. Une liste des différents revêtements testés dans cette recherche ainsi que la planification des expériences et les conditions expérimentales utilisées pour caractériser les revêtements sont également fournies.

CHAPITRE III : ÉTUDE COMPARATIVE DES REVÊTEMENTS DES OUTILS DE COUPE - Ce chapitre présente les résultats expérimentaux et fournit des explications détaillées sur les résultats et les analyses relatifs aux tests paramétriques effectués qui ont été effectués.

CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUES EN UTILISANT L'APPROCHE RSM - Ce chapitre est dédié à la présentation d'une étude de modélisation et de statistique basée sur la méthodologie de la surface de réponse (RSM), dans le but de quantifier les effets des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques évalués

CHAPITRE V : OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF DES PARAMÈTRES D'USINAGE EN UTILISANT DES MÉTHODES CONVENTIONNELLES ET NON-CONVENTIONNELLES - Ce chapitre est subdivisé en plusieurs sections où chacune d'entre elles discute les résultats d'un type d'optimisation sélectionné.

CONCLUSION GÉNÉRALE – Cette section résume les résultats importants de la recherche. Les décisions prises sur la base des résultats de l'étude sont exposées en détail, de plus, les recommandations concernant les futurs travaux de recherche liés à la présente étude.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre traite de l'importance du processus d'usinage, des outils de coupe et des différentes méthodes utilisées pour le revêtement des outils de coupe. La nécessité d'étudier l'usinabilité, l'usure des outils et l'intégrité des surfaces sont discutés. Il aborde également les paramètres technologiques d'usinage intervenant dans le processus de coupe. Ce chapitre examine la littérature précédemment publiée sur l'usinage des aciers trempés et non trempés, les systèmes d'outils de coupe, y compris, les revêtements des outils de coupe et leurs propriétés. Enfin, les méthodes statistiques de modélisation et d'optimisation conventionnelles et non-conventionnelles, sont également abordées.

I. 1 Coupe des métaux

Dans le secteur de la fabrication de pièces métalliques, des pièces de différentes formes, dimensions et matériaux sont usinées. Les différents processus de travail se répartissent en deux groupes : la mise en forme sans enlèvement de copeaux, c'est-à-dire le forgeage, l'emboutissage, l'étirage, etc. et la mise en forme avec enlèvement de copeaux, c'est-à-dire le tournage, le fraisage, le perçage, etc. Lors de la mise en forme par coupe, la surface finie de la forme et des dimensions souhaitées est obtenue en séparant une couche de la pièce de base sous forme de copeaux.

Le processus de coupe des métaux, au cours duquel un copeau est formé, est affecté par un mouvement relatif entre la pièce à usiner et l'arête dure d'un outil de coupe maintenu contre la pièce à usiner. Ce mouvement relatif est causé par un amalgame de mouvements de rotation et de translation qui peuvent concerner la pièce ou l'outil de coupe, voire les deux. En fonction de la nature de ce mouvement relatif, l'usinage des métaux est classé en trois catégories : tournage, alésage, rabotage, etc. Dans le tournage, le mouvement de la pièce est rotatif et le mouvement de l'outil de coupe est une translation vers l'avant.

I. 2 Importance de la coupe des métaux

Le découpage des métaux est l'un des processus primordiaux de mise en forme des composants dans l'industrie manufacturière. Les opérations de découpe des métaux représentent 15% de la valeur de tous les composants mécaniques fabriqués dans le monde.

Les facteurs suivants expliquent l'importance croissante du découpage des métaux [1]:

- Des matériaux d'un large spectre peuvent être usinés.
- La possibilité de fabriquer des pièces d'une grande variété ainsi que des caractéristiques géométriques exclusives telles que des perçages ronds d'une plus grande précision, des filets de vis, des arêtes ainsi que des surfaces extrêmement rectilignes.
- Une bonne précision dimensionnelle et un bon état de surface sont obtenus grâce à l'usinage des métaux.

I. 3 Matériaux des outils de coupe

Les classes de matériaux d'outils de coupe actuellement utilisées pour les opérations d'usinage sont l'acier rapide supérieur, les alliages à base de cobalt, les carbures cémentés, la céramique, le nitrure de bore cubique polycristallin et le diamant polycristallin. (Figure I.1). Différentes applications d'usinage nécessitent différents matériaux d'outils de coupe.

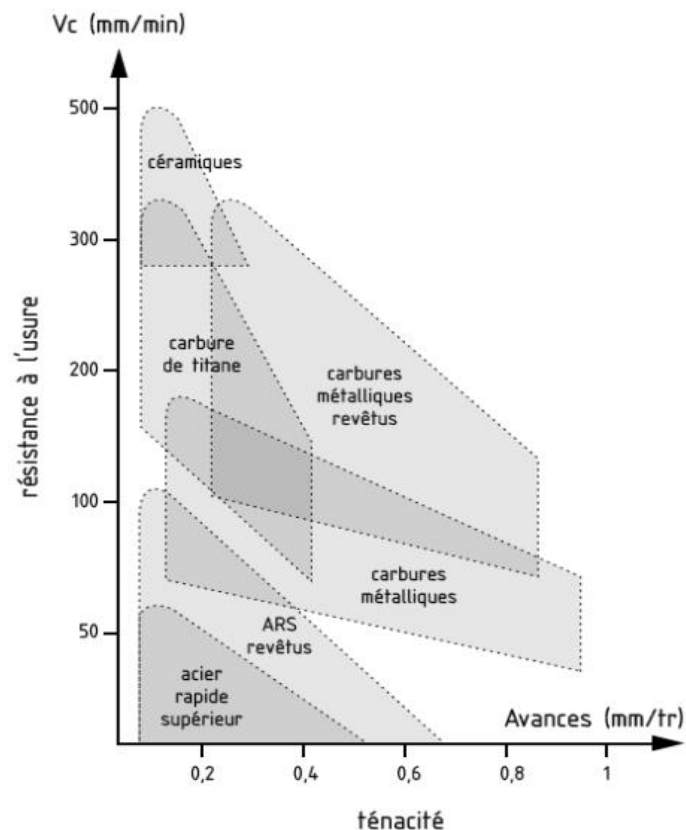


Figure I. 1 : Classification des carbures métalliques [2].

Le matériau d'outil de coupe idéal doit présenter toutes les caractéristiques suivantes :

- Plus dur que la pièce qu'il coupe.
- Stabilité à haute température
- Résiste à l'usure et aux chocs thermiques
- Résistant aux chocs
- Inerte chimiquement vis-à-vis du matériau à usiner et du liquide de coupe.

Pour choisir efficacement des outils pour l'usinage, un machiniste ou un ingénieur doit avoir des informations spécifiques sur :

- La forme de la pièce de départ et de la pièce finie.

- La dureté de la pièce à usiner
- La résistance à la traction du matériau
- L'abrasivité du matériau
- Le type de copeaux générés

Les matériaux d'outils de coupe les plus courants sont décrits ci-dessous :

I. 3. 1 Les aciers au carbone

Les aciers au carbone sont utilisés depuis les années 1880 pour les outils de coupe. Cependant, les aciers au carbone commencent à se ramollir à une température d'environ 180°C. Cette limitation signifie que ces outils sont rarement utilisés pour les opérations de coupe des métaux. Les outils en acier au carbone ordinaire, contenant environ 0,9 % de carbone et environ 1 % de manganèse, trempés à environ 62 HRC, sont largement utilisés pour le travail du bois et peuvent être utilisés dans une défonceuse pour usiner des feuilles d'aluminium jusqu'à environ 3 mm d'épaisseur.

I. 3. 2 Aciers rapides (HSS)

Les outils HSS sont ainsi nommés car ils ont été développés pour couper à des vitesses plus élevées. Développés vers 1900, les HSS sont les aciers à outils les plus fortement alliés. Le tungstène (série T) a été développé en premier et contient généralement 12 à 18 % de tungstène, plus environ 4 % de chrome et 1 % de plomb.

- 5 % de vanadium. La plupart des nuances contiennent environ 0,5% de molybdène et la plupart des nuances contiennent 4

- 12% de cobalt.

On a rapidement découvert que le molybdène (dans des proportions moindres) pouvait remplacer la majeure partie du tungstène, ce qui a permis d'obtenir une formulation plus économique, offrant une meilleure résistance à l'abrasion que la série T et subissant moins de déformation pendant le traitement thermique. Par conséquent, environ 95 % de tous les outils en acier rapide sont fabriqués à partir des qualités de la série M. Ces qualités contiennent du molybdène et du tungstène. Celles-ci contiennent 5 à 10% de molybdène, 1,5 à 10% de tungstène, 1 à 4% de vanadium, 4% de chrome et de nombreuses nuances contiennent 5 à 10% de cobalt.

Les outils en acier rapide sont résistants et adaptés aux coupes interrompues. Ils sont utilisés pour fabriquer des outils de forme complexe tels que des forêts, des alésoirs, des tarauds, des matrices et des fraises à engrenages. Les outils peuvent également être revêtus pour améliorer leur résistance à l'usure. L'acier rapide est le matériau d'outillage le plus utilisé actuellement. Les vitesses de coupe typiques utilisées pour ce type d'outil sont comprises entre 10 et 60 m/min.

I. 3. 3 Alliages de cobalt coulés

Lancés au début des années 1900, ces alliages sont composés d'environ 40 à 55% de cobalt, 30% de chrome et 10 à 20% de tungstène et ne sont pas traitables thermiquement. Les valeurs de dureté maximales sont de 55 - 64 HRC. Ils ont une bonne résistance à l'usure mais ne sont pas aussi résistants que les aciers rapides, mais peuvent être utilisés à des vitesses un peu plus élevées que les aciers rapides. Leur utilisation est aujourd'hui limitée.

I. 3. 4 Carbures

Également connus sous le nom de carbures cémentés ou carbures frittés, ils ont été introduits dans les années 1930 et présentent une dureté élevée sur une large gamme de températures, une conductivité thermique élevée, un module de Young élevé, ce qui en fait des matériaux d'outils et de matrices efficaces pour toute une série d'applications. Les deux groupes utilisés pour l'usinage sont le carbure de tungstène et le carbure de titane ; les deux types peuvent être revêtus ou non revêtus.

Le carbure de tungstène est l'un des nombreux composés comprenant des éléments de transition. Ces matériaux sont largement utilisés comme matériaux d'outils et occupent une position dominante en tant que matériau principal pour les outils de coupe, en raison de la composition du carbure de tungstène [3].

Les carbures de tungstène et de molybdène ont une structure hexagonale. Des changements structuraux majeurs ne se produisent pas dans ces composés rigides et fortement liés ; par conséquent, le traitement thermique ou les températures élevées ne modifient pas leurs propriétés. À des températures extrêmes, la résistance des carbures diminue rapidement, mais ils restent beaucoup plus résistants que l'acier dans presque toutes les circonstances. L'utilisation d'outils de coupe en carbure est encouragée par leur dureté et leur stabilité dans une large gamme de traitements thermiques [4].

Le processus de production de poudre métallique permet de contrôler précisément la taille des grains de carbure ainsi que la composition chimique de l'alliage [3]. La Figure (I.2) montre comment le carbure de tungstène est assemblé sur le liant.

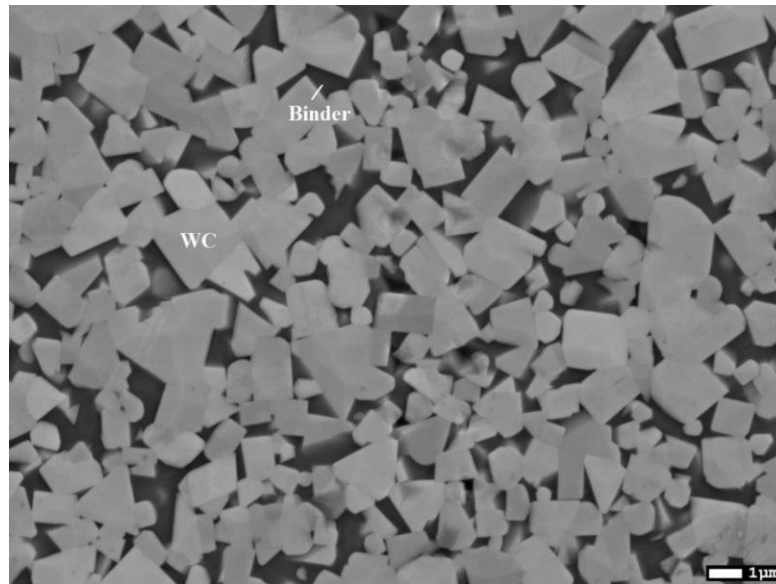


Figure I. 2 : Carbure cimenté [5].

Les carbures de titane et de niobium peuvent également être inclus pour conférer des propriétés particulières. Une large gamme de nuances est disponible pour différentes applications. Les plaquettes en carbure fritté sont le principal type de matériau utilisé pour la coupe des métaux. La proportion de cobalt (le matériau de matrice habituel) présente à un effet significatif sur les propriétés des outils en carbure. Une matrice de 3 à 6 % de cobalt donne une plus grande dureté tandis qu'une matrice de 6 à 15 % de cobalt donne une plus grande ténacité tout en diminuant la dureté, la résistance à l'usure et la résistance.

Les outils en carbure de tungstène sont couramment utilisés pour l'usinage des aciers, des fontes et des matériaux non ferreux abrasifs. Le carbure de titane a une plus grande résistance à l'usure que le tungstène mais n'est pas aussi résistant. Avec un alliage de nickel-molybdène comme matrice, le TiC convient à l'usinage à des vitesses plus élevées que celles qui peuvent être utilisées pour le carbure de tungstène.

Dans l'industrie actuelle, les outils en carbure ont remplacé les aciers rapides dans la plupart des applications. Ces outils y compris ceux avec un revêtement, sont capables de couper jusqu'à trois à cinq fois plus vite que les aciers rapides.

Le Tableau (I.1) présente la classification des carbures en fonction de leur utilisation.

Tableau I. 1 : *Classification des carbures [6].*

Symbole	Catégorie	Code couleur	Désignation
P	Métaux ferreux à copeaux longs	Blue	P01
			P10
			P20
			P30
			P40
			P50
M	Acier inoxydable / Acier moulé	Jaune	M01
			M10
			M20
			M30
			M40
K	Fonte (Fonte grise / Fonte nodulaire)	Rouge	K01
			K10
			K20
			K30
			K40
N	Métaux non ferreux (Aluminium / Métaux non ferreux / Non-métaux)	Vert	N01
			N10
			N20
			N30
S	Matériaux difficiles à usiner (alliages de titane / alliages résistant à la chaleur)	Marron	S01
			S10
			S20
			S30
H	Matériaux durs (Acier trempé / Fonte trempée)	Noir	H01
			H10
			H20
			H30

Selon le Tableau (I.1), les outils en carbures présentent une combinaison de résistance élevée et de dureté élevée, ainsi que la capacité de se déformer plastiquement sous une contrainte de compression avant la rupture. Ces caractéristiques permettent aux carbures cémentés d'être utilisés comme outils de coupe.

I. 3. 5 Cermets

Développés dans les années 1960, ils contiennent généralement 70% d'oxyde d'aluminium et 30% de carbure de titane. Certaines formulations contiennent du carbure de molybdène, du carbure de niobium et du carbure de tantale. Leurs performances se situent entre celles des carbures et des céramiques et les revêtements semblent offrir peu d'avantages. Les vitesses de

coupe typiques utilisées pour ce type d'outil sont comprises entre 150 et 350 m/min.

I. 3. 6 Céramique

Introduites au début des années 1950, deux catégories sont utilisées pour les outils de coupe : l'oxyde d'aluminium de haute pureté à grain fin (Al_2O_3) et le nitrure de silicium (Si_3N_4) sont pressés en forme de plaquettes et frittés à haute température. Des ajouts de carbure de titane et d'oxyde de zirconium (ZrO_2) peuvent être effectués pour améliorer les propriétés. Mais si le ZrO_2 améliore la résistance à la rupture, il réduit la dureté et la conductivité thermique. Des trichites de carbure de silicium (SiC) peuvent être ajoutées pour donner une meilleure ténacité et une meilleure résistance aux chocs thermiques. Les pointes ont une résistance à l'abrasion et une dureté à chaud élevées et leur stabilité chimique supérieure à celle des aciers rapides et des carbures signifie qu'elles sont moins susceptibles d'adhérer aux métaux pendant la coupe et ont donc moins de tendance à former une arête rapportée. Leur principale faiblesse est leur faible ténacité et des angles de coupe négatifs sont souvent utilisés pour éviter l'écaillage en raison de leur faible résistance à la traction. Lors de l'usinage avec des outils en céramique, il est crucial d'utiliser des machines-outils et des montages rigides pour éviter les vibrations qui peuvent entraîner une défaillance prématurée de la pointe de l'outil. Les outils de coupe en céramique sont plus durs et plus résistants à la chaleur que les carbures, mais plus fragiles. Les céramiques à base d'alumine sont utilisées pour la semi-finition et la finition à grande vitesse des matériaux ferreux et de certains matériaux non ferreux. Les céramiques à base de nitrure de silicium sont généralement utilisées pour l'usinage plus grossier et plus lourd de la fonte et des superalliages. Les vitesses de coupe typiques utilisées pour ce type d'outil sont comprises entre 150 et 650 m/min.

I. 3. 7 Nitrure de silicium

C'est un matériau d'outil à base de nitrure de silicium, qui a été développé dans les années 1970. Ces outils peuvent également contenir de l'oxyde d'aluminium, de l'oxyde d'yttrium et du carbure de titane. Le nitrure de silicium (Si_3N_4) possède des propriétés intéressantes, telles qu'un faible coefficient de dilatation thermique ($3,2 \times 10^{-6}$), une dureté élevée (environ 2000 HV) et une meilleure résistance au compression que l'aluminium (environ 900 MPa), une résistance aux chocs thermiques [3]. Ce matériau est recommandé pour l'usinage des fontes et des superalliages à base de nickel à des vitesses de coupe moyennes.

I. 3. 8 Nitrure de bore cubique (CBN)

Introduit au début des années 1960, il s'agit du deuxième matériau le plus dur après le diamant. L'outil de coupe CBN est également connu sous le nom de nitrure de bore cubique polycristallin. Cet outil de coupe est fabriqué par la métallurgie des poudres, où les grains de CBN sont frittés avec un matériau liant, et il est devenu un matériau très attrayant pour être appliqué comme matériau d'outil de coupe qui peut surmonter certaines difficultés rencontrées lors de l'usinage de matériaux difficiles à couper. Ces outils de coupe présentent quelques propriétés mécaniques et physiques souhaitables. Ses propriétés offrent une haute et une bonne stabilité thermique [3].

L'outil CBN est considéré comme un matériau de haute dureté, proche du diamant [7, 8]. C'est pourquoi il existe une longue liste d'applications du nitrure de bore cubique polycristallin comme matériau d'outil de coupe pour l'usinage des alliages difficiles à couper. En outre, ces outils de coupe offrent une excellente dureté à chaud, ce qui permet d'utiliser ce matériau à des vitesses de coupe très élevées. Ils présentent également une bonne résistance aux chocs thermiques et une bonne ténacité [9].

Les microstructures des outils CBN sont présentées dans la Figure (I.3). La distribution globale des gros grains est relativement uniforme mais il y a encore quelques agglomérations de liant. La Figure (I.3a) montre que la distribution de la microstructure des grains fins est déséquilibrée, et la Figure (I.3b) montre un exemple d'échantillon avec une grande quantité d'agglomérations de liant [9].

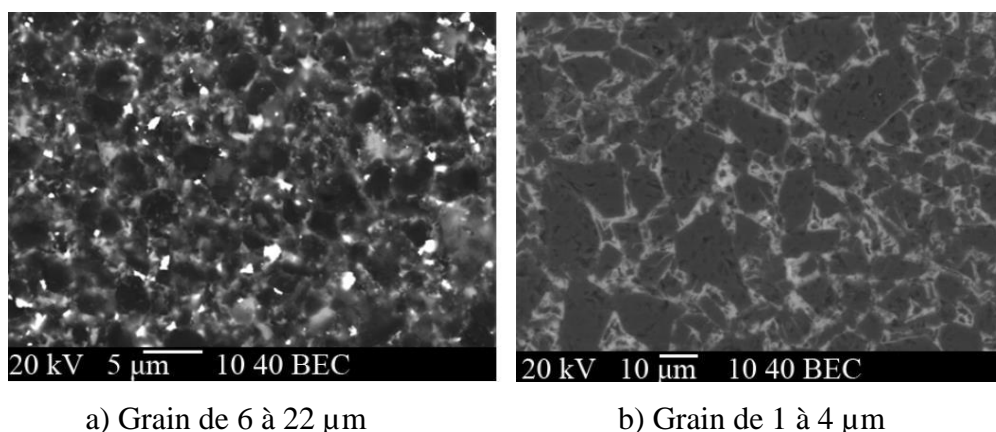


Figure I. 3 : Deux grades de microstructures de l'outil CBN : (a) grain de 6 à 22 µm (liant B, N, Al) (b) grain de 1 à 4 µm (liant B, N, Al, Ti, Co, W).

I. 3. 9 Diamant

Le diamant polycristallin ou PCD est l'un des matériaux d'outillage les plus durs et les plus résistants à l'abrasion disponibles sur le marché. Il se compose de particules de diamant (grains de diamant) qui sont frittées avec un liant métallique (cobalt). Mais le coût élevé de ces matériaux a limité son utilisation à des applications où d'autres matériaux d'outils ne peuvent pas fonctionner avec succès. En raison de la très grande dureté du diamant, il donne de bons résultats dans les cas où l'abrasion est le principal mécanisme d'usure. Ainsi, toutes les formes d'outils en PCD présentent un taux d'usure beaucoup plus faible et une durée de vie plus longue que les carbures ou les oxydes [4].

L'orientation aléatoire des cristaux de diamant empêche la propagation des fissures, ce qui améliore la ténacité. En raison de sa réactivité, le PCD ne convient pas à l'usinage des aciers au carbone ordinaires ou des alliages à base de nickel, de titane et de cobalt. Le PCD convient le mieux aux coupes de finition légères et ininterrompues à presque toutes les vitesses et est principalement utilisé pour l'usinage à très grande vitesse des alliages d'aluminium et de silicium, des composites et d'autres matériaux non métalliques. Les vitesses de coupe typiques utilisées pour ce type d'outil sont comprises entre 200 et 2000 m/min.

I. 4 Paramètres du processus de tournage

Les paramètres de processus qui affectent les caractéristiques des pièces tournées sont : les paramètres liés à la pièce à usiner - métallographie et dureté ; les paramètres de l'outil de coupe - géométrie et matériau de l'outil ; le régime de coupe - vitesse de coupe, l'avance et profondeur de coupe ; les paramètres de l'environnement de coupe - lubrification humide, sèche et quantité minimale ; les paramètres du système - rigidité statique et rigidité dynamique. L'optimisation des paramètres de processus a été largement utilisée dans les opérations de tournage. Le diagramme en arête de poisson de la classification des paramètres du processus de tournage est présenté à la Figure (I.4).

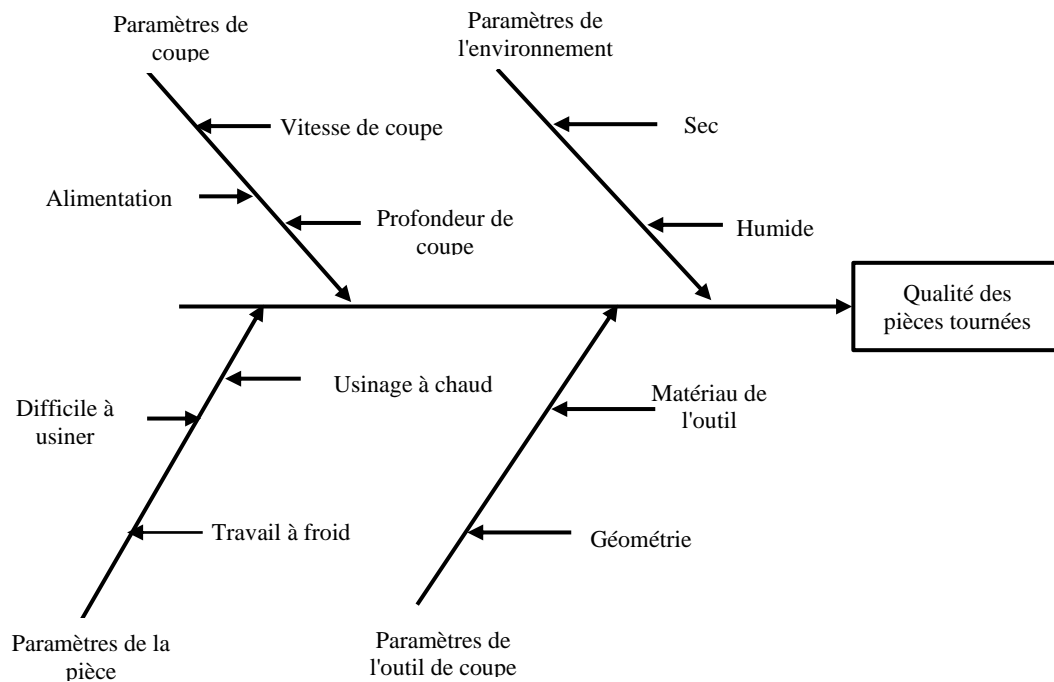


Figure I. 4 : Paramètres du processus de tournage [1]

I. 5 Régime de coupe

Les trois paramètres de coupe du tournage sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe, qui affectent les caractéristiques de qualité des pièces tournées.

I. 5. 1 Vitesse de coupe

La vitesse de coupe est la vitesse relative entre l'arête de coupe de l'outil et la pièce à usiner. Elle est fonction de rotation de la pièce (n_r) et du diamètre D de la pièce (mm). Elle se note V_c et s'exprime en m/min :

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

I. 5. 2 L'avance

Dans le cas du tournage sur un tour, l'avance est la distance sur laquelle l'outil avance en un tour de la pièce.

Pour les outils à pointe unique l'avance est spécifiée en millimètres par tour, en millimètres par course, etc. Elle peut également être exprimée en millimètres par dent pour les fraises et les broches.

I. 5. 3 Profondeur de coupe

La profondeur de coupe est la distance perpendiculaire mesurée entre la surface usinée et la surface non usinée de la pièce (Figure I.5).

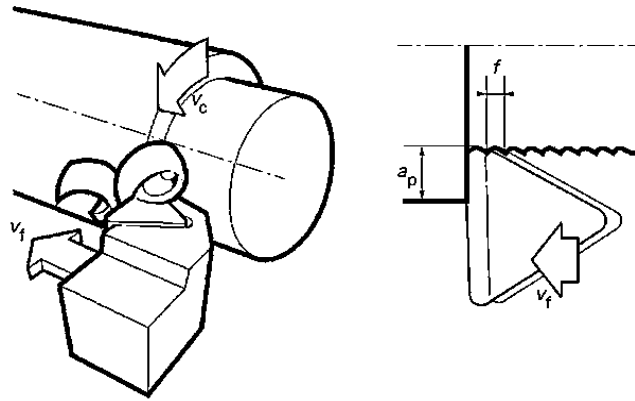


Figure I. 5 : Les paramètres de coupe [10].

La géométrie de la plaquette de coupe et la condition de lubrification sont des paramètres desquels on doit tenir compte.

I. 6 Usure de l'outil

L'usure de l'outil est le changement de forme de l'outil par rapport à sa forme originale, pendant la coupe, résultant de la perte graduelle de matière de l'outil ou de la déformation. La vitesse de déplacements relatifs, les contraintes et la température générée à la surface de contact dictent l'usure de l'outil et sont souvent décrites en termes de taux d'usure. L'usure de l'outil est un phénomène inévitable dans tous les processus d'usinage. Elle affecte négativement la productivité, la précision dimensionnelle, ainsi que la qualité du produit dans la plupart des processus d'usinage. Il est donc primordial de réduire l'usure des outils dans tout processus d'usinage.

Selon Yen et al. [11], quatre facteurs principaux affectent l'usure des outils, comme le montre la Figure (I.6). Premièrement, les propriétés physiques (par exemple, la dureté, la ductilité, la conductivité thermique) et la microstructure du matériau de la pièce à usiner qui affectent les forces de coupe et l'énergie impliquée dans l'action de coupe. Deuxièmement, le choix des paramètres de coupe et de l'alimentation en liquide de refroidissement/lubrifiant affecte la nature du contact à l'interface de l'outil et de la pièce et influence le coefficient de friction. Troisièmement, il y a l'effet de l'outil lui-même, comme le matériau de l'outil

(substrat et revêtement) ainsi que sa conception géométrique, qui doit être choisie de manière appropriée en fonction de l'opération d'usinage spécifique. Enfin, la stabilité et la dynamique du système de la machine-outil jouent un rôle.

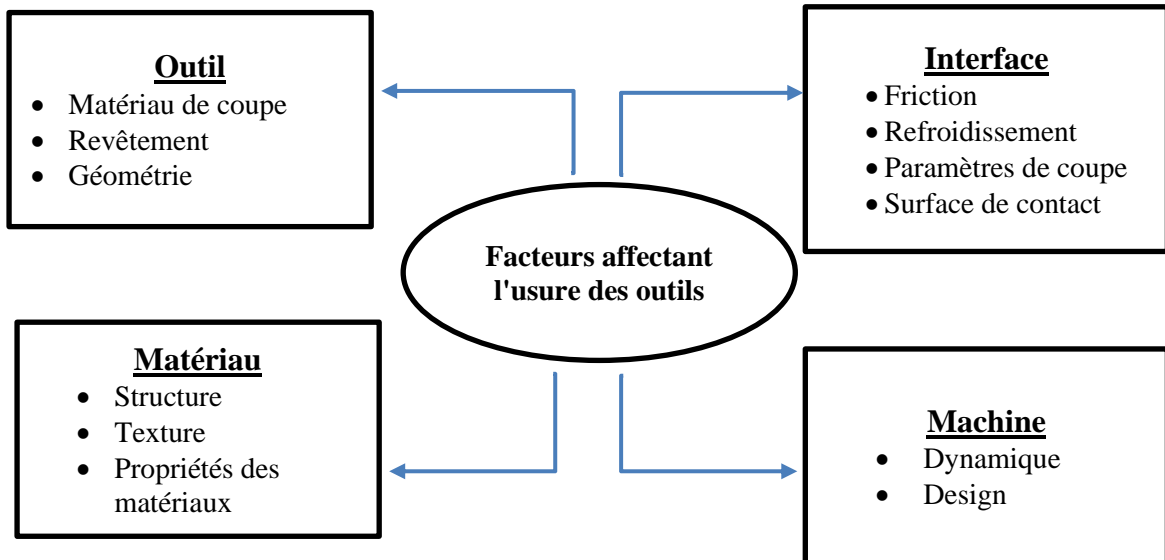


Figure I. 6 : Quatre facteurs influençant l'usure des outils [12].

I. 6. 1 Types d'usure des outils

Selon la norme ISO 3685 :1993, il existe plusieurs types d'usure. Les types d'usure les plus importants sont l'usure en dépouille et l'usure des cratères. Les diverses formes de l'usure d'un outil de coupe sont schématisées ci-dessous (Figure I.7).

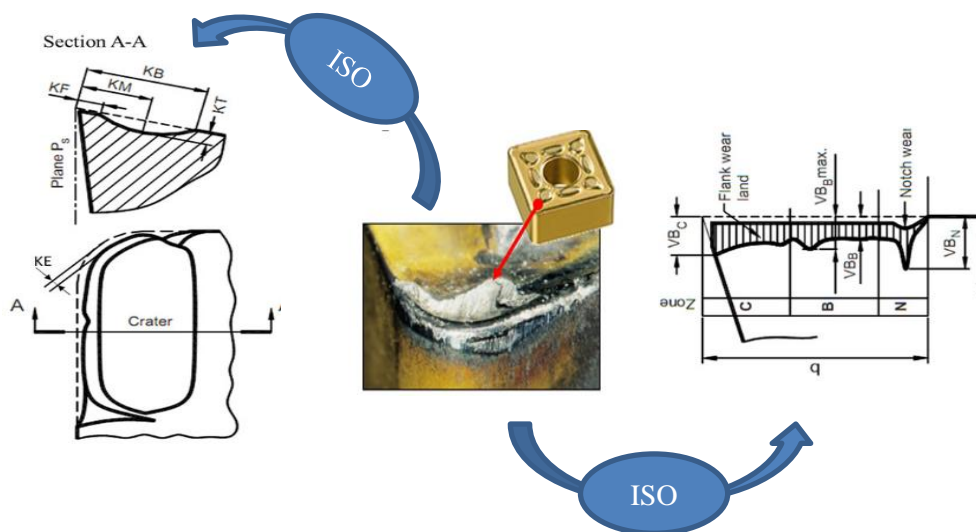


Figure I. 7 : Schéma d'usure typique selon la norme ISO 3685 [13].

I. 6. 1. 1 Usure en dépouille :

L'usure en dépouille apparaît sous la forme d'une zone d'usure sur la face de dépouille de l'outil (Figure I.8). L'usure en dépouille réduit l'angle de dépouille sur la face de dégagement de l'outil, augmentant ainsi la résistance au frottement [4]. Elle est principalement due à des mécanismes d'usure abrasive. Elle entraîne une réduction de la précision dimensionnelle et une mauvaise intégrité de la surface de la pièce usinée. Selon les normes ISO 3685 :1993, le critère de durée de vie de l'outil est fixé à 0,3 mm d'usure en dépouille. La Figure (I.9) montre la courbe caractéristique d'usure de l'outil.

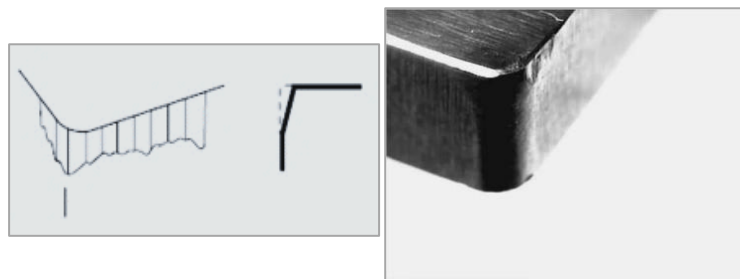


Figure I. 8 : Usure en dépouille [14].

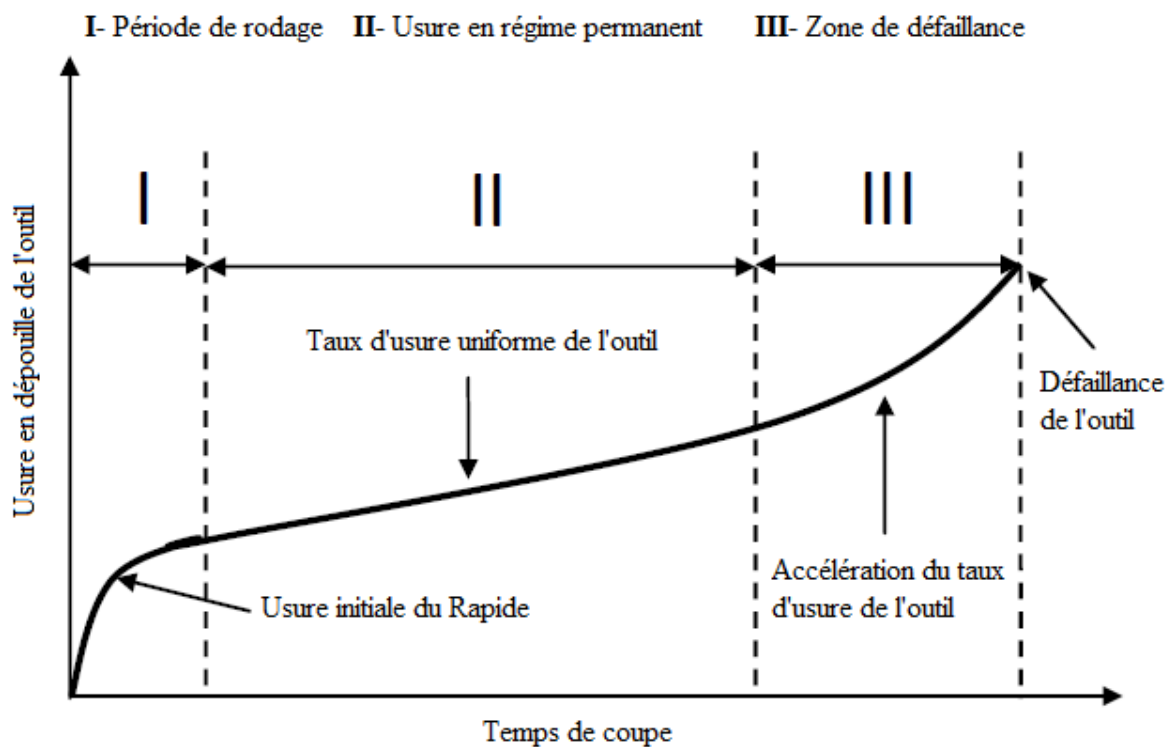


Figure I. 9 : Stades typiques de l'usure en dépouille [15].

I. 6. 1. 2 Usure en cratère

L'usure en cratère est la conséquence du mouvement de collage et de glissement des copeaux lorsqu'ils passent sur la face de coupe de l'outil à haute température et sous forte contrainte (Figure I.10). L'usure par cratère diminue la résistance de l'arête de coupe, ce qui augmente la probabilité de rupture de l'outil.

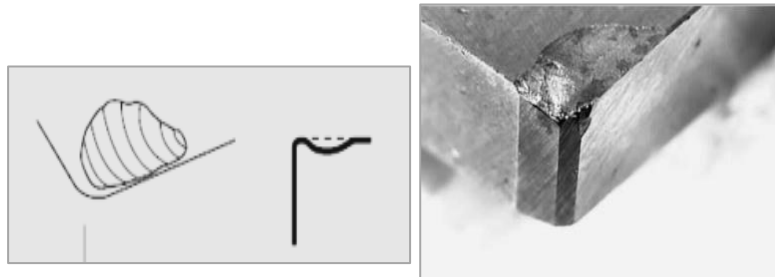


Figure I. 10 : *Usure en cratère* [14].

Les mécanismes d'usure par diffusion, abrasion et adhésion déterminent généralement l'usure en cratère. Lors de l'évaluation de l'usure de la face de coupe, la profondeur du cratère, KT , est le plus souvent utilisée.

I. 6. 1. 3 Usure en entaille

L'usure en entaille se produit lorsque la dépouille et la face de coupe de l'outil sont usées près du point où le bec de coupe principale rencontre la pièce à usiner (Figure I.11). [16]. Cette usure est souvent associée à la profondeur de coupe choisie, qui détermine la largeur du copeau non coupé. L'encoche ou les stries présentes sur le bec extérieur de la zone d'usure peuvent être causées par l'oxydation ou la présence de particules dures ou abrasives sur la pièce, ou encore par l'écaillage des surfaces usinées précédemment.



Figure I. 11 : *Usure en entaille* [17].

I. 6. 1. 4 Arête rapportée

L'arête rapportée désigne le matériau de la pièce qui se colle à l'arête de coupe de l'outil, altérant ainsi sa géométrie (Figure I.12), il n'est jamais complètement stable. Le matériau adhérent se détache lorsqu'il atteint une taille critique, entraînant souvent avec lui une partie du matériau de l'outil, ce qui provoque un écaillage de l'outil.



Figure I. 12 : Arête rapportée [17].

I. 6. 1. 5 Fatigue thermique et mécanique

Ces types d'usure sont dus à des charges cycliques. Celles-ci peuvent être de nature thermique ou mécanique. Les chocs thermiques, provenant du chauffage et du refroidissement alternés de la surface de l'outil, sont plus importants dans le fraisage en raison de la nature interrompue de la coupe (Figure I.13a). Les fluctuations des charges mécaniques sont souvent causées par des avances excessives. Les charges cycliques initient ainsi la propagation des fissures le long de l'arête de coupe (Figure I.13b).

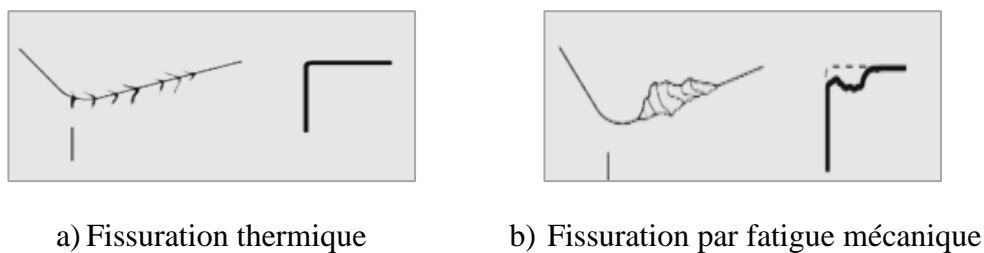


Figure I. 13 : Usure thermique et mécanique [17].

I. 6. 1. 6 Écaillage

L'écaillage des outils de coupe correspond à la formation de grandes particules discrètes de matériau enlevé. Cette dégradation est favorisée par des conditions de coupe discontinues et

la formation d'arêtes accumulées. Elle est due au manque de résistance des outils pour supporter des charges cycliques, ou à leur fragilité (voir Figure I.14).

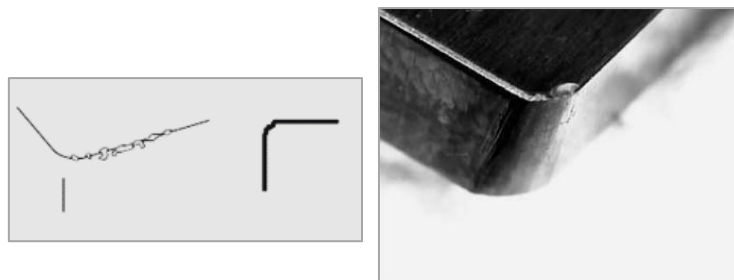


Figure I. 14 : *Usure par écaillage* [14].

I. 6. 1. 7 Déformation plastique

La déformation plastique de l'arête de coupe se produit lorsque l'outil est soumis à une température élevée et à des contraintes supérieures à la limite d'élasticité du matériau de l'outil (Figure I.15). Des forces de coupe élevées, une avance et une vitesse excessives favorisent l'usure par déformation.

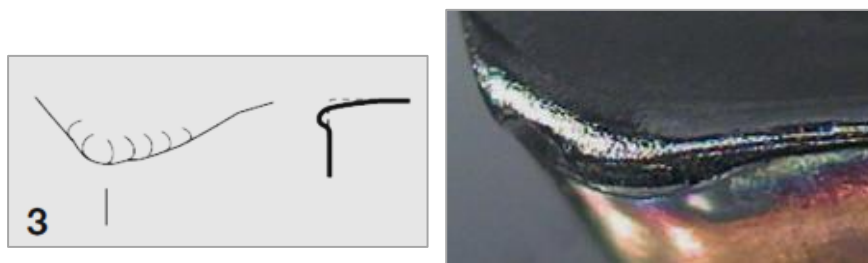


Figure I. 15 : *Déformation plastique* [17].

I. 7 Mécanismes d'usure

Tout au long du processus d'usinage, l'outil de coupe est exposé à des contraintes mécaniques et thermiques extrêmes, qui sont générées par la combinaison du matériau de la pièce et des conditions de coupe choisies pour effectuer l'usinage. Ces contraintes finissent par entraîner l'usure ou l'endommagement de l'outil.

L'usure est un phénomène progressif sur les surfaces de l'outil qui est causé par l'action de coupe et qui, avec le temps, modifie la forme de l'outil et donc sa géométrie d'origine, ce qui a un impact sur le processus d'usinage.

L'usure est le produit de différents mécanismes, où un mécanisme peut dominer sur un autre. L'usure dépend du matériau de la pièce et de l'outil, du processus d'usinage, des conditions de coupe, de la configuration de l'outil et du fluide de coupe appliqué pendant la coupe [18].

La section suivante présente un concept général des principaux mécanismes d'usure rencontrés au cours du processus d'usinage.

I. 7. 1 Abrasion

L'usure par abrasion est l'une des principales causes d'endommagement de l'arête de l'outil de coupe. Elle peut affecter à la fois la face de coupe et la dépouille de l'outil. Toutefois, l'usure en dépouille est généralement la plus fréquente et la plus signalée. Elle se développe lorsque la surface de dégagement de l'outil frotte contre la pièce usinée au fil du temps. Quant à l'usure de la face de coupe, elle peut générer un cratère lorsque le copeau glisse sur la surface de l'outil. Il est important de noter que l'usure par abrasion peut affecter la qualité de la pièce usinée et réduire la durée de vie de l'outil.

Le taux d'usure par abrasion est augmenté par la présence de particules dures dans le matériau de la pièce et par des températures de coupe élevées qui réduisent effectivement la dureté de l'outil de coupe. Par conséquent, les outils de coupe présentant des propriétés de dureté à chaud élevées offrent des niveaux plus élevés de résistance aux dommages causés par l'abrasion et, par conséquent, de meilleures performances. Souvent, des particules dures adhèrent à la surface de l'outil et sont entraînées le long de la face latérale lorsque l'outil de coupe glisse le long de la pièce. Dans ce cas, l'abrasion se produit généralement sur la face de dépouille de l'outil de coupe, comme le montre la Figure (I.16).

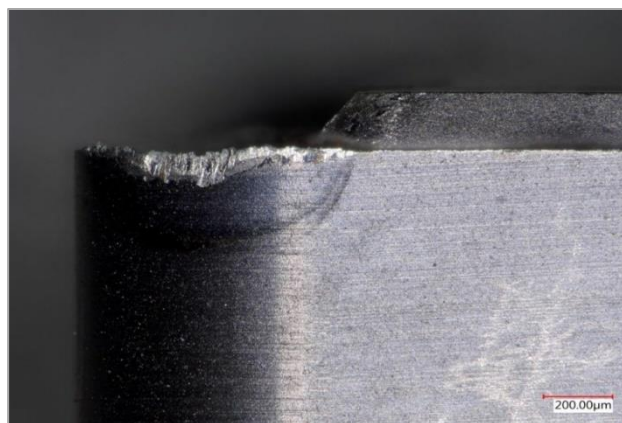


Figure I. 16 : Usure abrasive de l'outil en carbure [9].

I. 7. 2 Adhésion

L'usure par adhérence se produit lorsque des fragments de l'outil sont retirés de sa surface à une échelle microscopique. En raison de la température et des pressions élevées au niveau de l'arête de coupe, une liaison métallique se forme entre l'outil et le copeau, créant une zone de contact étroite et un flux de copeaux instable sur la face de coupe de l'outil. Ce phénomène conduit à la formation de l'arête rapportée. En augmentant la vitesse de coupe, l'écoulement des copeaux sur le BUE entraîne la rupture du matériau soudé, entraînant ainsi une partie du matériau de l'outil par adhérence. Pour contrôler l'adhérence, l'utilisation d'un fluide de coupe est recommandée pour former un film entre les surfaces de contact [18]. La Figure (I.17) illustre le processus d'usure par adhérence.

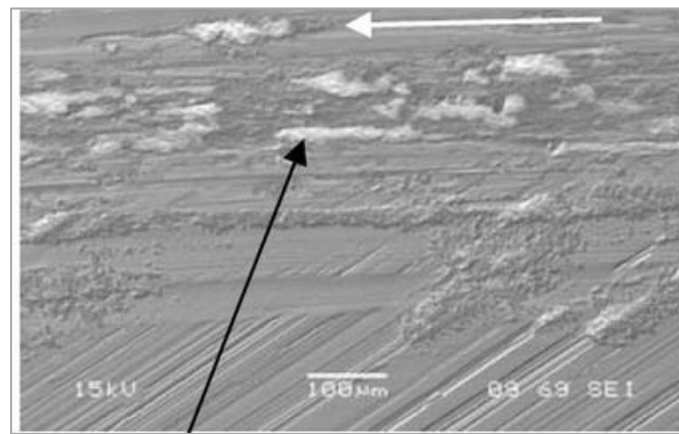


Figure I. 17 : Usure adhésive [19].

I. 7. 3 Diffusion

Le processus de diffusion est un phénomène qui est activé dans la zone de coupe par la température. Ce phénomène est généralement caractéristique d'une opération de coupe à grande vitesse. En conséquence de ce processus, on observe une usure en cratère sur la face de coupe de l'outil. La Figure (I.18) montre un outil usé avec un motif d'usure typique qui est généré par la diffusion. La diffusion à l'état solide consiste à transférer les atomes d'un métal à un autre. La vitesse de diffusion dépend de la température des deux métaux concernés, de la durée du contact et de l'affinité physico-chimique entre les matériaux respectifs. Comme cela se fait au niveau atomique, les zones usées par diffusion ont un aspect lisse lorsqu'on les observe au microscope [5].

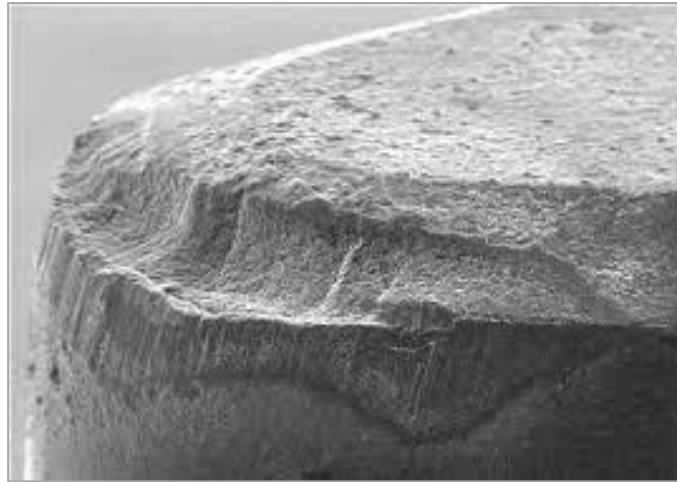


Figure I. 18 : *Diffusion* [5].

I. 7. 4 Oxydation

Lorsque la surface de l'outil entre en contact avec l'oxygène à des températures élevées, une réaction chimique appelée oxydation se produit, formant une couche d'oxydes sur la surface de l'outil (voir Figure I.19) [9].

Le processus de formation et d'élimination de la couche d'oxyde est un phénomène répétitif qui peut se produire dans certaines conditions d'usinage. Dans certains cas, l'accumulation de cette couche fine peut même contribuer à réduire l'usure de l'outil en isolant l'outil et la pièce et en conférant à la zone de contact des propriétés uniques [20].

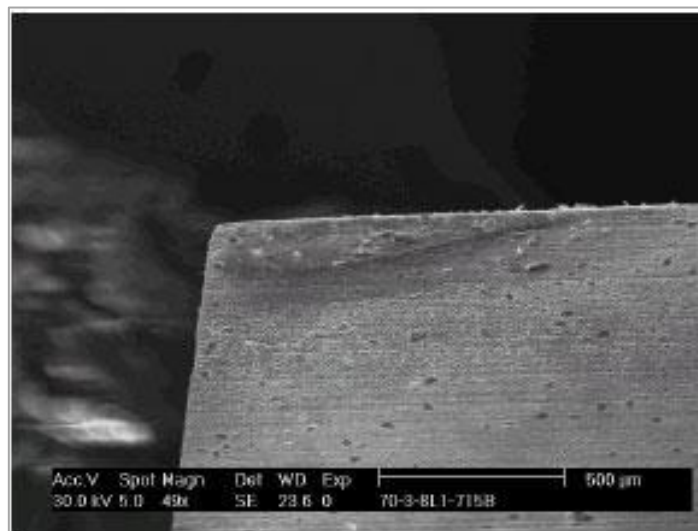


Figure I. 19 : *Mécanisme de formation de l'oxydation* [21].

I. 8 Techniques de détection de l'usure

Les techniques de détection de l'usure de l'outil de coupe peuvent être divisées en deux catégories [22]:

I. 8. 1 Les méthodes directes

Elles sont appliquées lorsque l'outil de coupe n'est pas en contact avec la pièce usinée (microscopie, image par caméra...etc.). Cependant, Elles ne sont pas appropriées aux systèmes de surveillance en ligne. L'inconvénient est que cela prend du temps. Ces méthodes incluent :

- Mesure de résistance électrique.
- Mesures optiques.
- Mesures de radioactive.
- Détection par contact.

I. 8. 2 Les méthodes indirectes

Elles sont basées sur la relation entre les conditions de coupe et les réponses mesurables du processus d'usinage (l'effort de coupe, l'émission acoustique, la vibration ou le courant électrique). Ces méthodes sont plus couramment utilisées dans l'industrie. Cependant, elle est moins sensible que la méthode directe. Aujourd'hui, le développement des moyens de calcul informatique a rendu les systèmes de surveillance basé sur les méthodes indirectes plus efficaces. Les grandeurs mesurées qui peuvent être évaluées à l'aide de ces méthodes sont :

- Température
- Couple et puissance
- Vibration et émission de bruit
- Force de coupe et contrainte

I. 9 Revêtements

I. 9. 1 Nécessité des revêtements et des techniques de revêtement

L'usinage en général génère des températures élevées pendant la coupe. La chaleur générée est dissipée dans le copeau, l'outil et la pièce. Au fil des ans, des revêtements ont été appliqués sur les outils de coupe afin de réduire la friction entre les interfaces outil-copeau ou outil-pièce à usiner, minimisant ainsi la température de coupe. Il est important de comprendre comment les revêtements se comportent avec différentes combinaisons d'outils et de matériaux de travail, ainsi que l'effet qu'ils ont sur la génération de la température de coupe.

La Figure (I.20) illustre les influences que les revêtements peuvent avoir pendant la découpe. Les revêtements doivent donc être conçus de manière à pouvoir résister aux conditions d'usinage difficiles, à offrir une résistance à l'usure et à servir de barrière thermique.

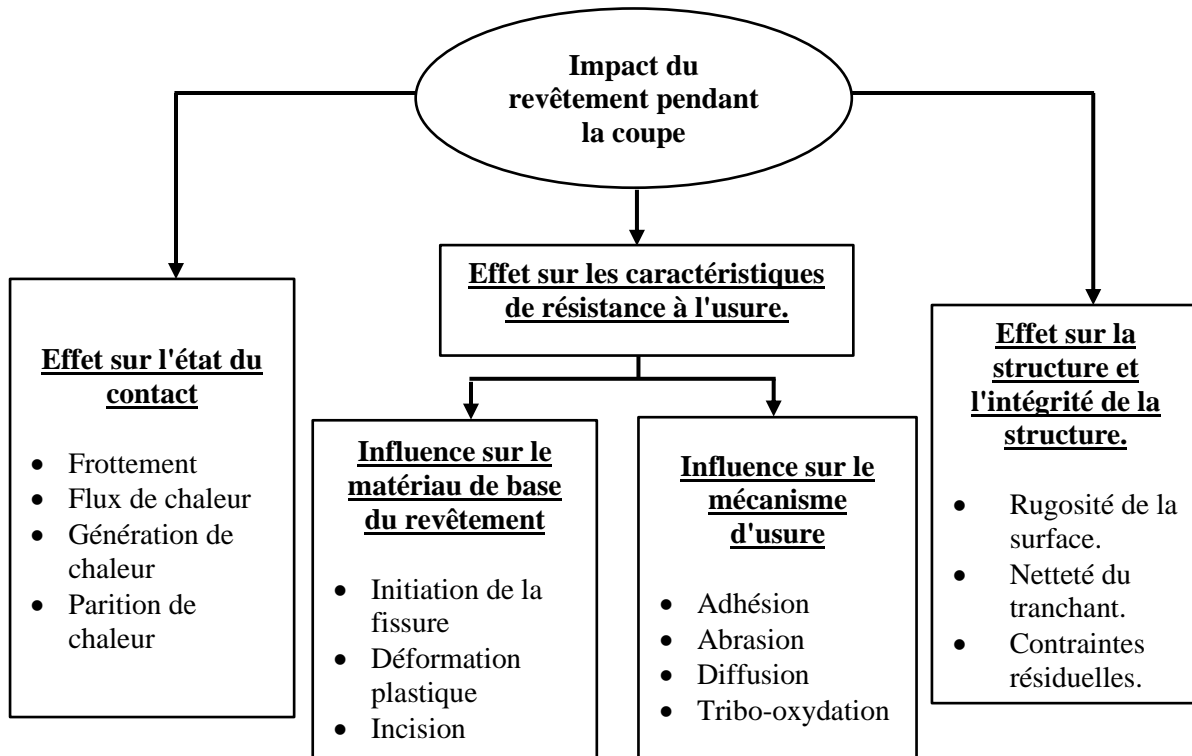


Figure I. 20 : Impacts du revêtement pendant la coupe [23].

Il y a trois couches à l'interface entre le revêtement et le substrat. La première couche est l'interface entre le substrat de l'outil et le revêtement. La compatibilité chimique et physique du revêtement, comme le coefficient de dilatation thermique, ainsi que l'adhérence du revêtement au matériau du substrat sont de la plus haute importance dans cette couche. La deuxième couche est le matériau de base du revêtement. Ici, les propriétés du revêtement sont déterminées par la composition et la microstructure du revêtement. La troisième couche est la couche supérieure ou extérieure du revêtement et c'est cette couche qui détermine comment le revêtement interagira avec la pièce à usiner ou le milieu environnant. La Figure (I.21) montre les influences et les exigences du revêtement et du substrat.

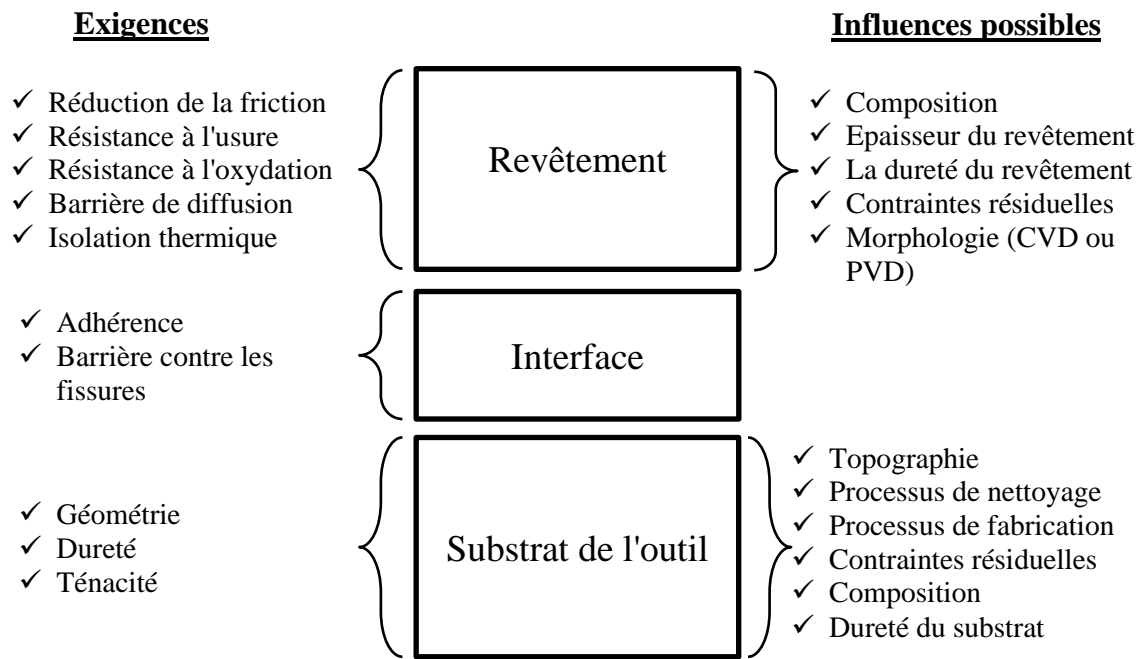


Figure I. 21 : Influences et exigences du substrat et du revêtement [24].

I. 9. 2 Différents types de revêtements

Plusieurs revêtements sont utilisés sur la surface des outils de coupe pour améliorer leurs performances d'usinage. En fonction de leur composition, de leur structure et de leurs performances, les revêtements peuvent être classés comme suit :

- Revêtement dur conventionnel
- Revêtement en alliage multi-composants
- Revêtement multicouche
- Revêtement super treillis
- Revêtement super dur
- Revêtement composite
- Revêtement souple

I. 9. 3 Technologies de revêtement

La méthode de dépôt en phase vapeur est largement utilisée pour déposer divers matériaux de revêtement sur la surface du substrat. Cette méthode de dépôt permet d'atteindre un haut degré d'uniformité et d'épaisseur de couche sur le substrat de l'outil.

Les principaux types de méthode de revêtement sont

- Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)
- Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

I. 9. 3. 1 Dépôt chimique en phase vapeur

Les carbures cémentés revêtus par CVD ont connu un énorme succès depuis leur introduction à la fin des années 1960 [25]. Depuis cette époque, les technologies de dépôt chimique en phase vapeur ont évolué d'une couche unique à des versions multicouches combinant TiN, TiCN, TiC et Al₂O₃ [26]. Les revêtements CVD modernes combinent des processus à haute et moyenne température dans des cycles complexes qui produisent d'excellents revêtements résistants à l'usure avec une épaisseur totale de 4-20 µm [27].

Cependant, la température élevée de dépôt (950-1059 °C) pendant le CVD entraîne la diffusion d'éléments chimiques du substrat de carbure au revêtement pendant la croissance. L'effet principal est une fragilisation du revêtement [28]. En outre, le processus CVD entraîne une croissance plus rapide au niveau du bec de l'outil de coupe, ce qui permet d'obtenir une épaisseur de revêtement uniforme. Par conséquent, il y avait un fort désir de trouver des revêtements qui pourraient être déposés à des températures plus basses afin de permettre aux outils avec des becs plus tranchants d'être revêtus sans effet de fragilisation. La solution a été le PVD, où la température de dépôt peut être maintenue à environ 500 °C.

I. 9. 3. 2 Dépôt physique en phase vapeur

Les revêtements PVD, dont la température de dépôt se situe entre 400 et 600 °C, sont de plus en plus acceptés sur le marché. Au cours de la dernière décennie, ils ont été appliqués avec succès aux plaquettes de coupe en carbure. Ils offrent des avantages en termes de performances dans les applications impliquant des coupes interrompues, celles nécessitant des arêtes vives, ainsi que dans les applications de finition et autres [29]. Selon l'application visée, différentes technologies de dépôt physique en phase vapeur (PVD) telles que

l'évaporation par faisceau d'électrons, la pulvérisation et l'évaporation à l'arc sont utilisées. Les améliorations apportées à ces technologies, telles que la pulvérisation magnétron à haute ionisation et les nouveaux procédés à arc cathodique, ont permis d'améliorer encore les performances des outils revêtus par PVD [30].

Le diagramme présenté dans la Figure (I.22) décrit le processus étape par étape impliqué dans le revêtement PVD. Il implique le transfert du matériau cible (transfert d'atome à atome) de l'état solide à l'état de vapeur et de nouveau à l'état solide par condensation, déposant ainsi progressivement un film mince sur la surface du substrat. Les revêtements PVD présentent généralement une dureté, une résistance à l'usure et un coefficient de frottement réduits. La principale limite des revêtements PVD est le coût élevé de l'investissement pour un faible taux de dépôt, ce qui les rend peu rentables en termes d'argent et de temps.

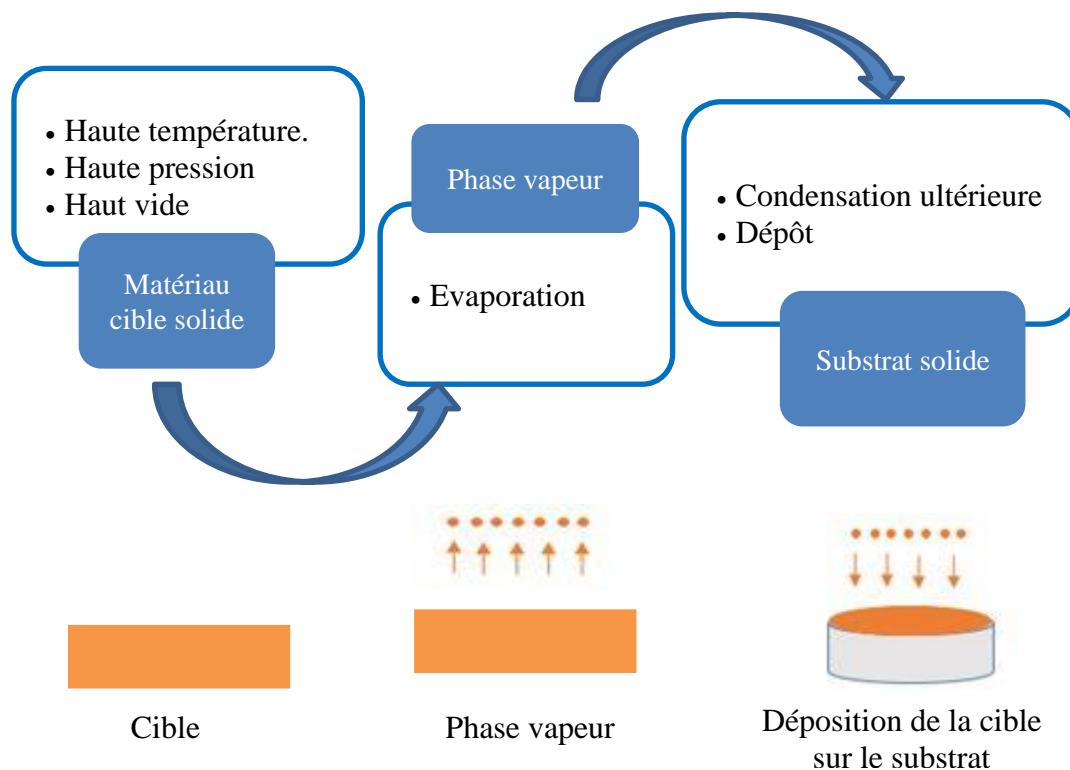


Figure I. 22 : Étapes du dépôt d'un revêtement par PVD [31].

Les performances de coupe des outils à revêtement PVD dépendent fortement de la composition, de la microstructure, des contraintes internes et de l'adhérence du revêtement au substrat, ainsi que de la composition du substrat et de la géométrie de l'outil [32]. La chaîne des procédés PVD comprend des procédés de prétraitement et des procédés post-PVD. Les

procédés de prétraitement tels que la gravure au plasma et la gravure chimique influencent l'adhérence, la croissance des grains, les contraintes à la surface du substrat et la structure du revêtement, tandis que les procédés post-PVD influencent le lissage de la surface du revêtement et un meilleur écoulement des copeaux [33].

Les revêtements PVD attribuent d'excellentes performances de coupe aux plaquettes en carbure cémenté [34]. La raison pour laquelle le PVD a pris de plus en plus d'importance dans le dépôt de nombreux revêtements est que les températures de revêtement plus basses offrent des avantages en matière de micro-dureté.

I. 10 Nécessité des études d'usinabilité

L'usinabilité est la capacité des outils de coupe à enlever la matière de la pièce selon les dimensions requises, avec un taux de production élevé, à faible coût et une consommation d'énergie réduite. Les principaux paramètres influençant l'usinabilité sont l'usure de l'outil de coupe, la température de coupe et la rugosité de surface. La Figure (I.23) présente les différents paramètres impliqués dans l'usinabilité des matériaux.

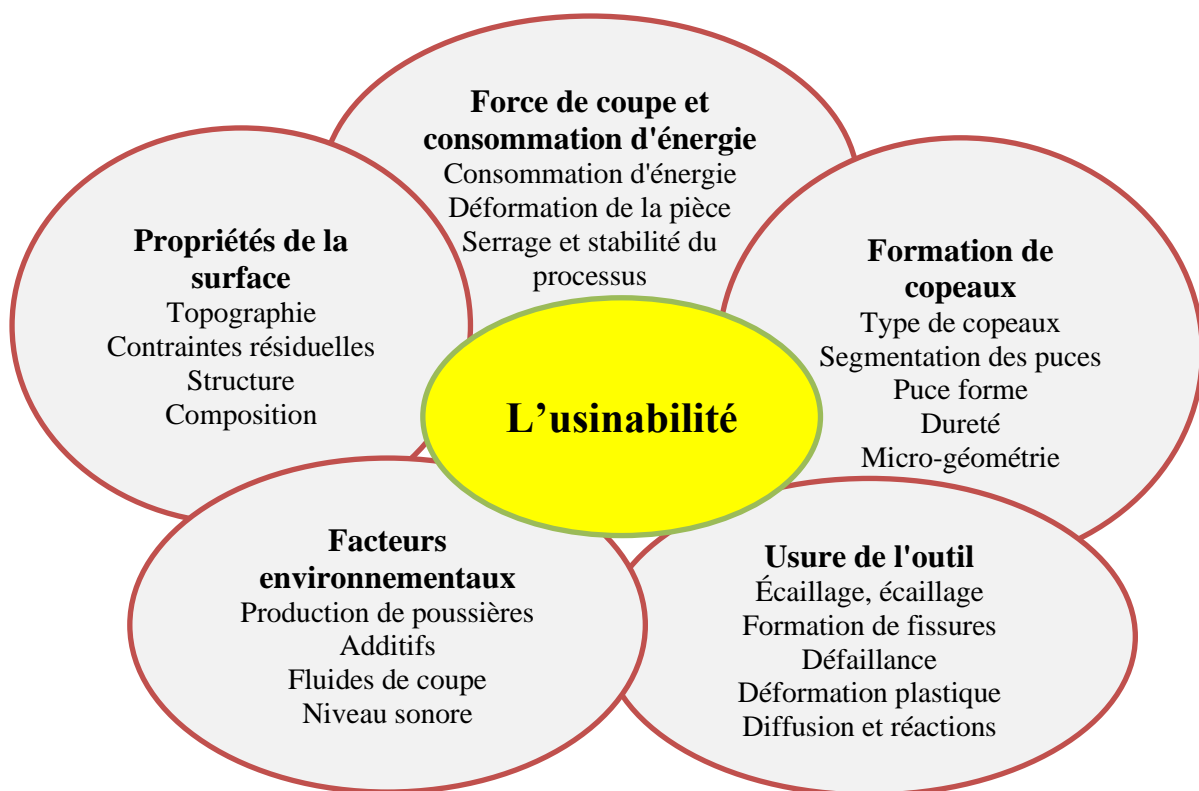


Figure I. 23 : Contribution des paramètres à l'usinabilité [35]

Auparavant, l'usinabilité d'un matériau de travail était liée à la performance d'usinage d'un matériau de travail standard. Ainsi, l'indice d'usinabilité est calculé en utilisant l'équation suivante [36]:

$$\text{Indice d'usinabilité} = \frac{\text{Vitesse de coupe de l'usinage du matériau de travail offrant 60 minutes de vie d'outil}}{\text{Vitesse de coupe de l'usinage du matériau de travail standard offrant 60 minutes de vie d'outil}} \quad (\text{I.2})$$

La composition, la microstructure de la pièce et les paramètres de coupe ne peuvent être prédits par l'équation ci-dessus. Elle peut donc être désignée de manière quantitative.

I. 10. 1 Température de coupe

La déformation plastique des copeaux qui se brisent ainsi que la force de friction générée entre la pièce, l'outil et l'interface des copeaux entraînent une élévation importante de la température dans la zone de coupe. Cette dernière est en effet fortement sollicitée lors des opérations d'usinage, comme l'illustre la Figure (I.24), qui met en évidence les trois zones de coupe impactées par cette augmentation de température.

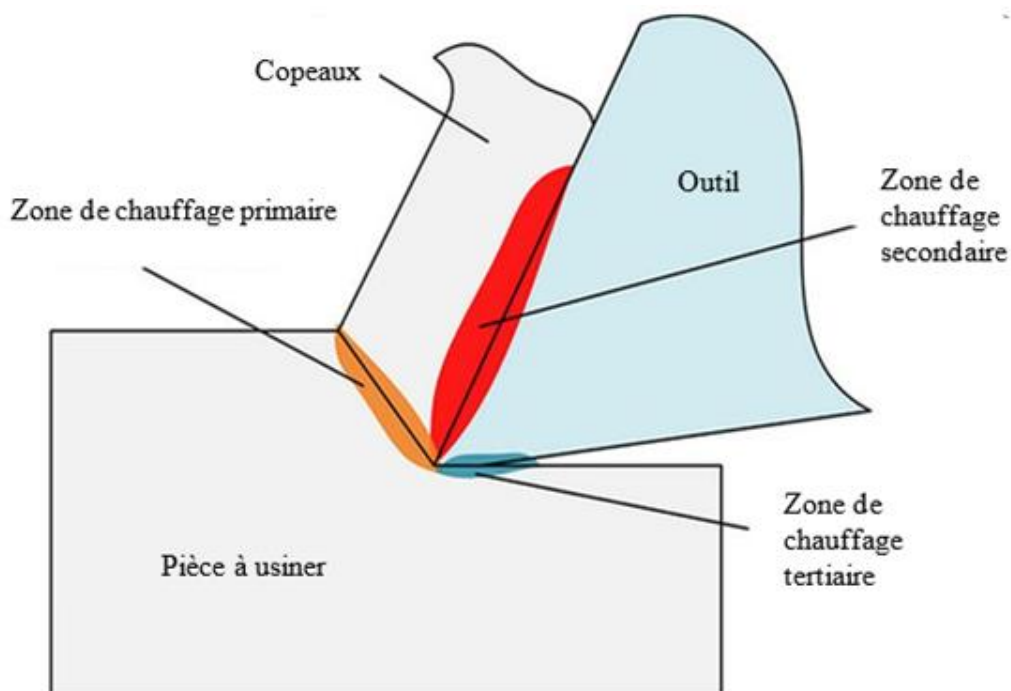


Figure I. 24 : Différentes zones de chaleur dans l'usinage [37].

- **Zone de chaleur primaire** : La déformation mécanique et plastique entraîne une production de chaleur extrême, de l'ordre de 60 à 80 % dans la zone de chaleur primaire, et la majeure partie de la chaleur générée est évacuée par les copeaux.
- **Zone de chaleur secondaire** : Dans la zone thermique secondaire, près de 10 à 15 % de la chaleur est produite en raison de la déformation mécanique et de la friction de contact entre le copeau et l'interface de l'outil.
- **Zone de chaleur tertiaire** : La force de frottement entre l'outil et la pièce engendre 5 à 10 % de la chaleur globale.

I. 10. 2 Intégrité de la surface

L'intégrité de la surface est un aspect crucial pour évaluer la qualité de la surface usinée. Elle englobe différents aspects tels que les dommages sub-superficiels, les textures et les contraintes résiduelles, qui peuvent influencer les propriétés fonctionnelles de la surface. En revanche, la rugosité de surface ne représente que la variation des hauteurs de la surface. Bien que la rugosité soit un paramètre important pour décrire la texture de la surface, elle ne fournit pas une indication complète de l'intégrité de la surface. En somme, l'intégrité de la surface englobe la topographie, mais également d'autres aspects critiques qui peuvent affecter les performances de la surface usinée.

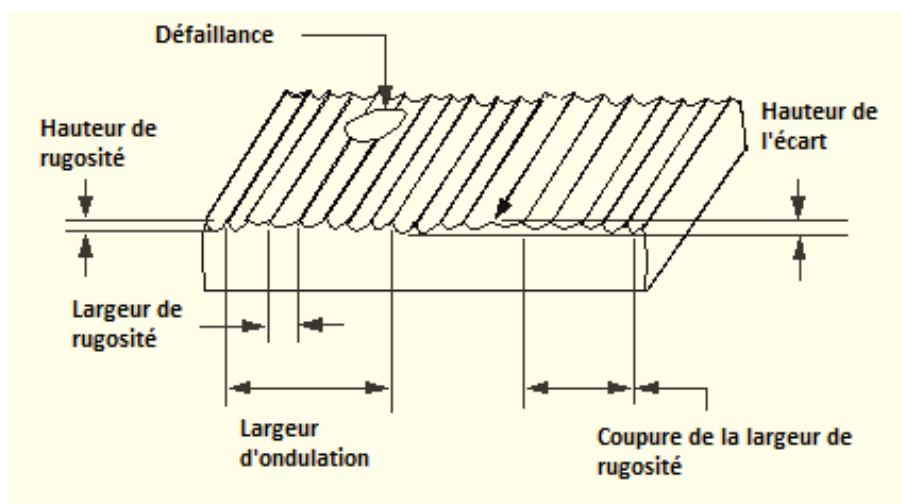


Figure I. 25 : topographie de surface [38].

La Figure (I.25) illustre les topographies de la surface usinée. Les caractéristiques

importantes de la topographie de la surface sont la texture de la surface, les couches, les ondulations et la rugosité, qui sont en contact direct avec l'environnement.

I. 10. 3 Paramètres d'état de surface

Nombreux sont les normes et les paramètres pour qualifier la rugosité de surface. On se limite donc à présenter les paramètres de surface couramment utilisés dans le domaine de la fabrication mécanique, définis selon la norme **ISO 4287** (Figure I.26).

- Moyenne de la ligne centrale (R_a)
- Carré moyen du parcours (R_q)
- Hauteur maximale du profil (R_t)
- Moyenne sur dix points (R_z)
- La hauteur de crête R_p

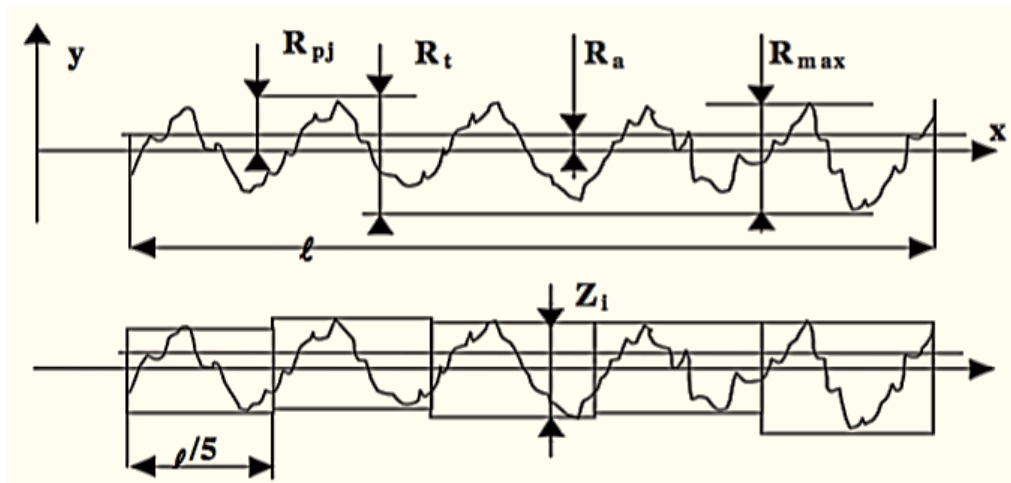


Figure I. 26 : Critères de rugosité [39].

I. 10. 3. 1 Écart moyen arithmétique (R_a)

Elle est calculée comme la moyenne de toutes les différences verticales par rapport à la surface nominale pour une longueur définie d'échantillonnage. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (\text{I.3})$$

I. 10. 3. 2 Méthode du carré moyen de la route (R_q)

Elle est calculée comme la moyenne quadratique des vallées et des pics évalués à partir de la surface nominale. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2} \quad (\text{I.4})$$

I. 10. 3. 3 La hauteur de crête (R_p)

La hauteur maximale de la crête du profil R_p est la valeur moyenne des hauteurs de crêtes des cinq longueurs de référence du profil obtenues. Le paramètre de rugosité de surface R_p associé à R_z peut fournir des informations sur les caractéristiques de surface.

I. 10. 3. 4 Hauteur maximale du profil (R_t)

La hauteur maximale du profil est déterminée en mesurant la différence entre la hauteur maximale du pic et la hauteur maximale de la vallée.

$$R_t = R_p - R_v \quad (\text{I.5})$$

où R_p est la hauteur maximale du pic, R_v est la hauteur maximale de la vallée.

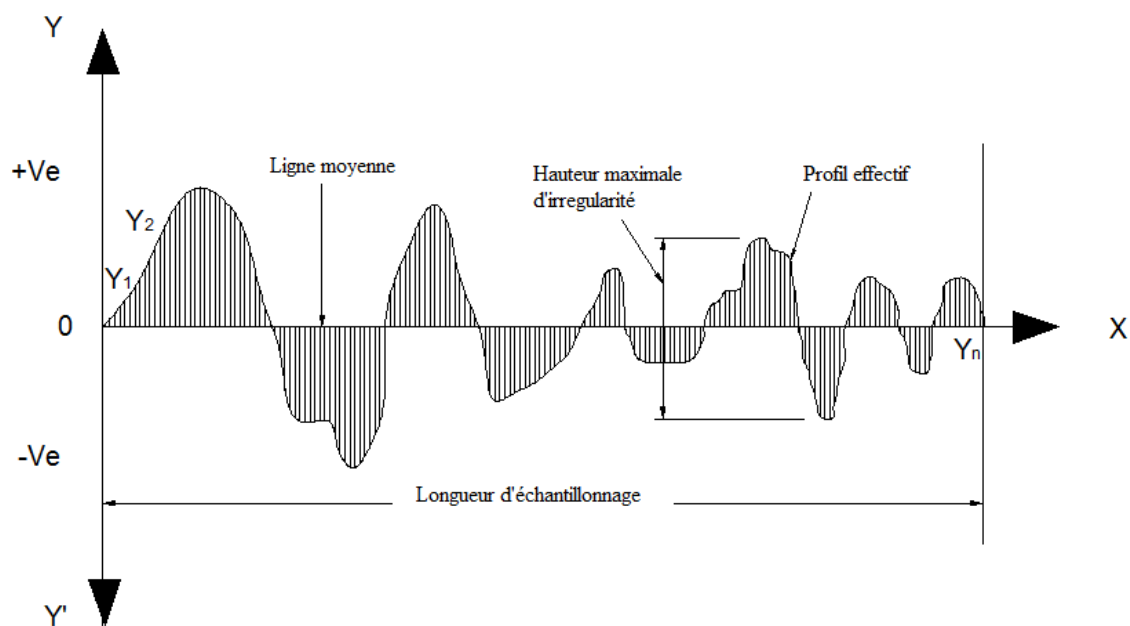


Figure I. 27 : Hauteur maximale de l'irrégularité [1].

I. 10. 3. 5 Hauteur de dix points d'irrégularités (R_z)

C'est la mesure des déviations de la hauteur moyenne et du pic le plus bas dans une longueur donnée. Elle est calculée par l'équation suivante :

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5} \quad (\text{I.6})$$

Où $R_1, 3, 5, 7, 9$ sont les hauteurs mesurées des pics et $R_2, 4, 6, 8, 10$ sont les hauteurs mesurées des vallées par rapport aux données de référence.

Les détails de la hauteur des irrégularités en dix points sont présentés dans la Figure (I.28).

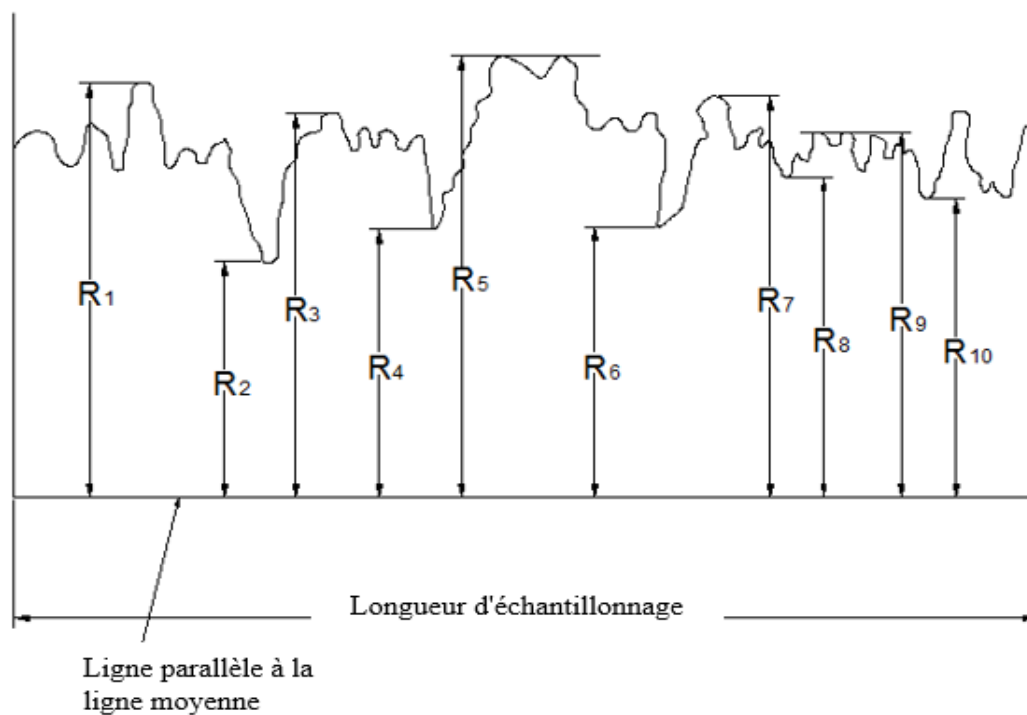


Figure I. 28 : Hauteur en dix points des irrégularités [1].

I. 10. 4 Facteurs affectant l'état de surface

Chaque fois que deux surfaces usinées entrent en contact l'une avec l'autre, la qualité des pièces appariées joue un rôle important dans la performance et l'usure des pièces appariées. La hauteur, la forme, la disposition et la direction de ces irrégularités de surface sur la pièce à usiner dépendent d'un certain nombre de facteurs tels que [16] :

a) Le régime de coupe

- La vitesse de coupe
- L'avance.
- La profondeur de coupe.

b) La géométrie de l'outil

Les facteurs géométriques qui affectent l'état de surface obtenu sont les suivants :

- Le rayon du nez.
- L'angle de coupe.
- L'angle de l'arête de coupe latérale.
- L'arête de coupe.

c) La combinaison des matériaux de la pièce et de l'outil et leurs propriétés mécaniques.

- Qualité et type de la machine-outil utilisée.
- Outillage auxiliaire et lubrifiant utilisé.
- Vibrations entre la pièce, la machine-outil et l'outil de coupe.

I. 11 Revue de la littérature

Afin d'atteindre les objectifs de cette recherche, une revue de la littérature a été réalisée. Celle-ci fournit des informations de base sur les questions à considérer dans cette thèse et son objet est de résumer la pertinence de la présente étude. Dans cette section, nous présentons un aperçu des différents thèmes abordés dans la littérature, qui seront brièvement examinés dans les points suivants.

- Sur les outils de coupe en carbure revêtus dans l'usinage
- Sur les outils de coupe en carbure revêtu dans l'usinage dur
- Sur l'approche de modélisation et d'optimisation dans l'usinage

I. 11. 1 Comparaison des performances des outils de coupe en carbure revêtus et non revêtus en usinage

Les outils de coupe en carbure cimenté doivent présenter des propriétés de surface résistantes à l'abrasion, dures et chimiquement inertes pour éviter toute interaction avec la matière à usiner pendant l'opération d'usinage. Pour répondre à ces exigences, des plaquettes indexables en carbure cimenté revêtues ont été développées dans les années 1970 [40], atteignant un niveau de qualité supérieur au début des années 1980 avec l'introduction d'outils revêtus de TiN.

Dans cette section, un résumé des résultats des expériences sur l'évaluation comparative des performances des plaquettes en carbure revêtues et non revêtues est présenté. Renato et al. [41] ont observé que l'outil en carbure revêtu d'une monocouche de TiN par PVD assisté par plasma était plus performant que l'outil en carbure non revêtu en ce qui concerne la résistance à l'usure des cratères, avec une largeur et une profondeur de cratère plus faibles pendant le tournage continu de l'acier AISI 8620. J. Rech [42] a étudié la performance tribologique des outils de carbure PVD TiN, TiN et TiN des plaquettes en carbure revêtues et non revêtues de PVD TiN, TiAlN et TiAlN+MoS₂.

C.Y.H. a observé que les revêtements TiN et (Ti,Al)N+MoS₂ étaient les plus efficaces pour améliorer les caractéristiques tribologiques par rapport aux outils non revêtus lors de l'usinage des aciers 27MnCr5. Ces revêtements ont permis de réduire la surface de contact outil-copeau, l'épaisseur de la zone de cisaillement secondaire, et la température d'interface. En revanche, le revêtement TiAlN n'a pas contribué à réduire la température d'interface et a eu une influence limitée sur le flux thermique. Enfin, les tests d'usure ont montré que la capacité de glissement du revêtement TiN était un paramètre clé pour une meilleure résistance à l'usure par rapport au revêtement (Ti,Al)N."

Selon Lim et ses collaborateurs [43], le revêtement de TiN a été observé pour offrir une meilleure résistance à l'usure de cratère lors de l'usinage à des vitesses et avances élevées. Plus spécifiquement, lors du tournage d'un acier au carbone moyen laminé à chaud, une réduction de l'usure de l'outil a été remarquée pour l'outil HSS revêtu de TiN par rapport à l'outil non revêtu.

Hasan GO KKAYA et Muammer NALBANT [44] ont observé qu'une rugosité de surface plus faible a été induite en utilisant un outil à revêtement multicouche CVD avec TiN à

l'extérieur par rapport à un outil non revêtu, revêtu de AlTiN et revêtu de TiAlN en utilisant la technique PVD pendant le tournage à sec de l'acier AISI 1015.

J. Wang [45] a constaté que les plaquettes à revêtements multicouches CVD (TiC+Al₂O₃+TiN) permettent de réduire les forces de coupe, bien que cette réduction reste marginale lorsque les conditions de coupe sont plus légères que celles nécessaires pour une plaquette en carbure non revêtu dans le cadre d'un tournage d'acier doux.

Recep YIGIT et ses collègues [46] ont comparé les performances d'outils en carbure à revêtement multicouche (TiCN+TiC+ Al₂O₃+TiN) avec différentes épaisseurs de revêtement (7,5 µm et 10,5 µm) à celles d'un outil en carbure non revêtu lors de l'usinage de la fonte à graphite sphéroïdal. Les résultats ont montré que l'outil en carbure revêtu de TiN multicouche avec une épaisseur de revêtement de 10,5 µm offrait une meilleure qualité de surface et des forces de coupe plus faibles que la plaquette en carbure non revêtue, quelles que soient les vitesses de coupe. Cette observation suggère un usinage plus économique en termes d'énergie de coupe et de consommation d'énergie.

D. Gillibrand et al. [47] ont étudié l'avantage économique de l'utilisation d'outils de coupe en carbure revêtu et en carbure non revêtu pour le tournage de finition. Les résultats ont montré que le coût d'usinage en utilisant des outils en carbure revêtu est inférieur de 30% à celui des outils en carbure non revêtu lors du tournage de finition d'un acier au carbone moyen. De plus, l'utilisation d'outils en carbure revêtu de TiN a permis d'obtenir une faible rugosité de surface ainsi qu'une durée de vie de l'outil améliorée de 250 à 300% par rapport à celle des outils en carbure non revêtu."

Selon W.Grzesik [48], lors de l'usinage d'un acier au carbone moyen, une plaquette en carbure revêtue d'un CVD multicouche (TiC/Al₂O₃/TiN) a donné de meilleurs résultats que le carbure revêtu d'une seule couche de TiC, le carbure à revêtement binaire (TiC/TiN) et le carbure non revêtu. En effet, cette plaquette revêtue de TiN permet une réduction du contact outil-copeau, de la température de l'interface et de la consommation d'énergie. Cela est dû à la faible conductivité thermique et à la faible capacité thermique de la couche de TiN par rapport à la plaquette de carbure non revêtu. Ainsi, la chaleur est concentrée dans la fine couche supérieure du revêtement TiN, ce qui protège l'outil contre la diffusion.

M.Y. Noordin et al. [49] ont évalué la performance de plaquettes en carbure revêtues et non revêtues pour le tournage de finition de l'acier AISI1010. Les résultats ont montré que les

outils revêtus CVD avec TiCN/TiC et PVD avec TiN ont donné des performances supérieures à celles du CVD avec (TiCN/TiC/Al₂O₃) et de la plaquette en carbure non revêtue. En effet, les outils revêtus ont produit des forces de coupe et une rugosité de surface plus faibles, ainsi que des copeaux d'épaisseur minimale, contribuant à une faible déformation des copeaux et à de faibles contraintes résiduelles sur la surface de la pièce.

C.H. Haron et al. [50] ont rapporté que la rugosité de surface des outils en carbure non revêtus était comprise entre 0,36 et 4,05 µm et entre 0,30 et 1,51 µm pour les plaquettes en carbure revêtues CVD (TiN/Al₂O₃/TiCN) respectivement lors du tournage de l'acier AISI D2 (22 HRC). La plus faible valeur de rugosité de surface pour les deux types d'outils en carbure a été observée à une vitesse de coupe de 250 m/min et une avance de 0,05 mm/tr.

C.H. Haron et ses collègues [51] ont constaté que les outils revêtus (TiCN/ Al₂O₃/TiN) surpassaient le carbure non revêtu en termes d'usure en dépouille lors de l'usinage de l'acier à outils (23 HRC). Ils ont également observé que les plaquettes en carbure revêtues pouvaient être utilisées à des vitesses de coupe plus élevées, contrairement aux plaquettes en carbure non revêtu dont la vitesse de coupe était limitée à 75 m/min lors du tournage de l'acier à outils. Ces résultats suggèrent que le revêtement améliore les performances de l'outil en prolongeant sa durée de vie et en augmentant sa vitesse de coupe.

Dans son expérience sur l'usinabilité de l'aciers à outils en utilisant des outils HSS, des plaquettes non revêtues WC, revêtues TiAlN et TiC/TiCN/TiN en tournage à sec, Yahya Isik [52] a observé que la plaquette en carbure revêtue était plus performante à des vitesses de coupe élevées. En termes de rugosité de surface, l'avance par tour a eu l'impact le plus important, suivi de la profondeur de coupe, tandis que la vitesse de coupe a eu le moins d'impact. L'auteur a également remarqué que, pour les outils revêtus, l'usure en dépouille a eu un impact plus important sur la rupture que l'usure du cratère.

C.H. Che Haron et ses collaborateurs [53] ont observé que la plaquette en carbure revêtue (CVD-TiN/ Al₂O₃/TiCN) présentait de meilleures performances que l'outil non revêtu lors du tournage de l'acier à outils AISI D2 (22 HRC) dans des conditions de coupe à sec. Les résultats ont montré une finition de surface de meilleure qualité et une durée de vie plus longue pour la plaquette en carbure revêtue. L'usure pour les deux types d'outils en carbure a progressé en trois étapes : initiale, graduelle et abrupte.

Sahoo et al. [54], les performances de l'outil revêtu multicouche (TiN-TiCN- Al₂O₃-TiN)

étaient supérieures à celles de son homologue non revêtu et à celles du carbure revêtu (TiN-TiCN- Al₂O₃-ZrCN), en termes d'usure et de rugosité de surface lors du tournage de l'acier trempé AISI 4340. L'étude a également révélé que l'abrasion était le principal mécanisme d'usure, et que l'utilisation du carbure non revêtu entraînait des phénomènes de défaillance catastrophique et d'écaillage.

Thakur et al. [55] ont mené une étude expérimentale pour évaluer l'usure de l'outil, la rugosité de surface et la force de coupe lors du tournage de l'Incoloy 825 en utilisant trois types de plaquettes de coupe : CVD avec TiCN- Al₂O₃, PVD avec TiAlN-TiN et un outil non revêtu. Les résultats ont montré que l'outil revêtu de PVD était plus efficace que les autres outils, en grande partie grâce aux propriétés du revêtement. Les auteurs ont également observé une réduction significative de l'usure de l'outil et de la rugosité de surface lors de l'utilisation de l'outil revêtu de PVD par rapport aux autres outils.

I. 11. 2 Performance des outils de coupe en carbure revêtus dans l'usinage

Cette section présente une analyse des performances de certaines plaquettes en carbure revêtues. Une expérience menée par Samir et Lin [56] a montré que, lors de l'usinage de l'acier AISI 4140 avec des plaquettes à revêtement PVD-TiAlN, la coupe à sec peut être préférée à la coupe humide pour des vitesses de coupe élevées allant de 200 à 400 m/min. Les résultats ont montré que les meilleures performances ont été obtenues à une vitesse de coupe de 260 m/min. À des vitesses de coupe plus élevées (310-410 m/min) en coupe à sec, la micro-abrasion et la micro-fatigue ont été identifiées comme les principaux mécanismes d'usure. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de plaquettes à revêtement PVD-TiAlN en coupe à sec peut offrir des performances optimales pour l'usinage de l'acier AISI 4140 à des vitesses de coupe élevées, ce qui peut permettre une amélioration de l'efficacité et de la qualité de l'usinage.

Dans une étude menée par Posti et Nieminen [57], l'impact de l'épaisseur du revêtement sur la durée de vie des plaquettes de coupe en acier rapide revêtues de TiN a été examiné expérimentalement. Les résultats ont montré que l'épaisseur du revêtement avait un effet significatif sur les performances de l'outil, en ce sens que la durée de vie de l'outil augmentait avec l'augmentation de l'épaisseur du revêtement. Ces résultats suggèrent que l'application d'un revêtement plus épais peut être une stratégie efficace pour prolonger la durée de vie des plaquettes de coupe et ainsi améliorer les performances de l'outil.

K. Tuffy et al. [58] ont observé que l'usure du revêtement TiN avec une épaisseur de 3,5 μm était 40 fois inférieure à celle du carbure non revêtu en raison de la diminution de l'usure par diffusion par l'application d'un revêtement à couche mince pendant le tournage de l'acier AISI 1040. Le coefficient de diffusion et le coefficient de solubilité de l'outil ont été diminués par l'application de revêtements à couche mince. De plus, le revêtement TiAlN CVD a surpassé le TiAlN PVD et le MS TiN en usinage à sec. Les performances inférieures des revêtements plus épais étaient dues à leurs niveaux plus élevés de contrainte de compression entraînant la rupture du revêtement en raison de l'écaillage du bec de l'outil.

Selon une étude menée par Lim et al. [59], l'ajout d'une couche de revêtement TiC sur les outils en carbure permet d'améliorer significativement leur résistance à l'usure. Cette amélioration se traduit par une capacité accrue à supporter des vitesses de coupe élevées et des avances importantes lors de l'usinage de l'acier AISI 1045. En effet, l'application d'une couche de revêtement TiC unique permet d'optimiser les performances des outils en carbure, offrant ainsi une solution efficace pour les applications d'usinage exigeantes.

Hasan Gokkaya et Muammer Nalbant [60] ont étudié l'impact de différents rayons de plaquette, profondeurs de coupe et d'avance par tour sur la qualité de surface de l'acier AISI 1030 usiné à sec à l'aide d'une plaquette en carbure revêtue d'une couche multiple CVD [TiC/Al₂O₃/TiN (la plus externe est TiN)]. Les résultats ont montré que l'augmentation du rayon de la plaquette avait pour effet de réduire la rugosité de surface tandis que l'augmentation de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe entraînait une augmentation de la rugosité de surface. Les auteurs ont également constaté que ces paramètres avaient un impact significatif sur la qualité de surface des pièces usinées.

Selon l'étude menée par G. M. Robinson et M. J. Jackson [61], les revêtements contenant du titane ont montré une grande résistance à la dégradation thermique lors de l'usinage d'aciers inoxydables à haute teneur en alliage et à nanostructure. Ils ont constaté que l'ajout de faibles quantités de chrome et d'yttrium améliorerait considérablement la durée de vie des plaquettes en carbure revêtues.

Dans son étude sur l'usinage de l'acier AISI 4340, W. Bouzid Sa [62] a constaté que la durée de vie de l'outil en carbure revêtu (TiCN/Al₂O₃) restait constante et régulière pour des vitesses de coupe supérieures à 650 m/min. Cela indique que l'utilisation de valeurs élevées de vitesse de coupe peut être avantageuse, en particulier pour les opérations de tournage où la

rapidité de la coupe est importante. Toutefois, il convient de noter que la sélection des paramètres d'usinage doit être basée sur d'autres facteurs tels que la qualité de surface et la précision dimensionnelle de la pièce. Ces résultats suggèrent que l'optimisation des paramètres d'usinage est cruciale pour améliorer les performances de l'outil et obtenir des pièces de haute qualité.

D'après les résultats de l'étude menée par Tzeng Yih-fong [63], les paramètres les plus significatifs influençant la rugosité de surface lors du tournage de l'acier à outils étaient l'outil de coupe et l'avance. L'utilisation d'une plaquette de carbure à revêtement multiple (TiCN/Al₂O₃/TiN) a permis de trouver le paramètre optimal grâce à une approche Taguchi. Cette approche a permis de réduire la déviation dimensionnelle de 45%.

La section suivante présente une comparaison des performances de différentes plaquettes en carbure revêtues. Selon l'étude menée par C. Ducros et F. Sanchette [64], les outils en carbure revêtus de nanocouches TiN/AlTiN (d'une épaisseur de 7 nm) présentent une excellente résistance mécanique à haute température et génèrent une faible force de coupe principale ainsi qu'une usure en dépouille réduite par rapport aux outils revêtus de CrN-TiN et CrN-AlTiN lors de l'usinage de l'Inconel 718. L'usure par abrasion a été le principal mécanisme d'usure observé lors de l'usinage de superalliages.

L'étude menée par H. Scheerer et son équipe [65] a examiné l'efficacité des nouveaux revêtements (Cr, Al)N sur des plaquettes en carbure, avec des pourcentages variables de Cr et de Al, pour le tournage de la fonte sphéroïdale dans un environnement sec. Les résultats ont montré que les meilleurs revêtements dans les essais avaient des teneurs similaires en chrome et en aluminium d'environ 15 %, et une teneur en azote d'environ 60 %. Cependant, un revêtement avec une teneur élevée en chrome a entraîné une détérioration des performances de l'outil lors du tournage à sec.

Lors de l'usinage de composites renforcés de SiCp, les outils en carbure revêtus de plusieurs couches de TiN CVD ont montré une meilleure performance que les outils à revêtement bicouche, selon l'expérience menée par Y. Sahin [66]. L'abrasion était le principal mécanisme d'usure observé sur la surface de dépouille, tandis que l'écaillage sur l'arête de coupe était plus fréquent à des vitesses de coupe plus élevées. En revanche, à des vitesses de coupe plus faibles, la formation d'arêtes rapportées a été constatée.

Y. Sahin et G. Sur [67] ont constaté que lors de l'usinage de matériau composite contenant

10% en poids de particules de SiC de différentes tailles, l'outil revêtu de CVD TiC/Al₂O₃ présentait une performance d'usure considérablement meilleure que celui revêtu de CVD TiCN/Al₂O₃/TiN. L'efficacité de l'usinage a été améliorée avec une vitesse de coupe plus élevée. Pour les composites renforcés par des particules grossières, une vitesse de coupe plus faible pourrait être utilisée, tandis qu'une vitesse de coupe plus élevée était recommandée pour les composites renforcés par des particules fines.

Selon les observations de Fazal A. Khalid [68], le revêtement CVD multicouche TiN/Al₂O₃ a montré une meilleure performance en raison de sa plus grande intégrité structurelle et de sa moindre sensibilité à la rupture fragile, par rapport au revêtement TiN monocouche. Cette résistance accrue est particulièrement bénéfique pour les applications de coupe et d'usinage de matériaux durs, où les contraintes mécaniques peuvent causer des dommages à l'outil de coupe. En outre, le revêtement multicouche TiN/Al₂O₃ peut améliorer la résistance à l'usure et prolonger la durée de vie de l'outil, ce qui peut être avantageux pour les processus d'usinage de haute précision et les opérations à haute température. Ces avantages peuvent être attribués à la combinaison de différentes couches de matériaux, chacune avec des propriétés spécifiques qui contribuent à la résistance globale du revêtement. Ainsi, le choix du revêtement optimal dépendra des exigences spécifiques de l'application et des matériaux utilisés.

Ibrahim Ciftci [69] a observé que la force de coupe des outils en carbure revêtus de TiC/TiCN/TiN multicouches CVD était inférieure à celle des outils revêtus de TiCN/TiC/Al₂O₃ CVD lors du tournage à sec d'aciers inoxydables austénitiques. Cette différence est attribuée à la propriété lubrifiante de la couche supérieure du revêtement TiN, qui présente un coefficient de frottement très faible. Cependant, à faible vitesse de coupe, la formation d'arêtes rapportées a entraîné une augmentation de la rugosité de surface.

E.O. Ezugwu et K.A. Olajire [70] ont évalué l'impact de l'utilisation d'une huile générale émulsionnée comme liquide de refroidissement sur la durée de vie de l'outil en tournage humide et à sec d'un acier inoxydable martensitique, en utilisant une plaquette à revêtement multicouche CVD TiCN/TiC/Al₂O₃. Les résultats ont montré une augmentation significative de la durée de vie de l'outil, ce qui suggère que l'huile émulsionnée peut être un liquide de refroidissement efficace pour ce type d'usinage.

Anselmo Eduardo Diniz et Adilson Jose de Oliveira [71] ont comparé les performances en

termes d'usure et de durée de vie de deux outils en carbure revêtus multicouches CVD TiCN/Al₂O₃/TiN (nuances P15 et P25) lors du tournage de l'acier AISI 1045. Les résultats ont montré que la nuance P15 a fourni une durée de vie d'outil plus longue que la nuance P25. De plus, les tests ont démontré que le tournage humide est plus favorable pour la durée de vie de l'outil, tandis que la coupe à sec ne peut être utilisée avec une grande profondeur de coupe. Cependant, si le matériau de l'outil est changé pour un matériau plus résistant à l'usure, la coupe à sec peut être utilisée avec des résultats très similaires à ceux obtenus avec une lubrification par fluide.

Y.L. Su et W.H. Kao [72] ont comparé la résistance à l'usure de différents types de revêtements lors d'une opération de fraisage. Ils ont observé que les revêtements multicouches PVD TiN/TiCN/TiN offraient une meilleure résistance à l'usure que les revêtements binaire TiN/TiCN et monocouche TiN. Cette résistance accrue a été attribuée à la réduction des fissures thermiques et de fatigue pour les revêtements multicouches. L'épaisseur optimale du revêtement a été trouvée à 7 µm. Les résultats ont montré que l'usure par adhérence était prédominante pour les outils bicouches et multicouches, tandis que les fissures thermiques et de fatigue ont accéléré l'usure des outils à revêtement monocouche.

H. SERT et al. [73] ont comparé les performances d'usure de différentes plaquettes en carbure revêtues. Ils ont constaté que les outils revêtus de PVD TiAlN étaient adaptés pour une vitesse de coupe inférieure à 200 m/min lors de l'usinage de l'acier AISI 5140. En revanche, les outils de coupe revêtus de CVD TiN étaient plus appropriés pour une vitesse de coupe plus élevée de 250 m/min, présentant une usure minimale de l'outil. L'outil de coupe en cermet a quant à lui montré le taux d'usure le plus élevé à toutes les vitesses de coupe allant de 100 à 250 m/min. Ces résultats confirment ainsi l'efficacité de la plaquette en carbure revêtue de TiN CVD pour l'usinage à grande vitesse.

Suresh et al. [74] ont étudié la rugosité de surface pendant l'usinage de l'acier AISI 4340 (48 HRC) en utilisant une multicouche CVD (TiN-TiCN- Al₂O₃) sur un substrat en carbure cimenté. Ils ont observé que la meilleure finition de surface était obtenue à une faible avance avec une vitesse de coupe plus élevée, tandis que l'abrasion était le principal mécanisme d'usure observé pour toutes les conditions d'usinage.

Dans leurs expériences de tournage de l'acier AISI 4140 avec une plaquette de coupe en carbure revêtue, Keblouti et al. [75] ont noté que les deux principaux mécanismes d'usure

rencontrés étaient l'abrasion et l'adhésion.

I. 11. 3 Performances des outils de coupe en carbure revêtu en usinage dur

Plusieurs études ont examiné les performances des outils de coupe en carbure revêtus lors de l'usinage de pièces dont la dureté se situe dans une plage modérée (30-40 HRC). Des résultats impressionnants ont été obtenus en utilisant ces outils dans un environnement cryogénique [76, 77]. Le tournage dur avec une application minimale de fluide a donné des résultats significativement meilleurs que l'usinage à sec ou à l'humide en utilisant des plaquettes en carbure revêtues, comme l'ont rapporté CH.R.Vikram Kumar et B. Ramamoorthy [78]. Kudapa et ses collègues [79] ont constaté que l'ajout d'un composant ZrCN (MTCVD) au revêtement TiCN (MTCVD) de base améliore la résistance à l'usure par abrasion et prolonge la durée de vie de l'outil. Pour éviter une forte cratérisation, il est recommandé d'utiliser un revêtement comme barrière thermique.

Plusieurs auteurs ont étudié les performances des outils de coupe en carbure revêtus pour le tournage dur. Dans une étude menée par J.G. Lima et ses collaborateurs [80], l'abrasion a été identifiée comme le principal mécanisme d'usure lors du tournage de l'acier AISI 4340 (42 HRC) avec une plaquette en carbure revêtue. Le taux d'usure a été plus élevé lors du tournage d'un acier de 50 HRC avec un outil PCBN, mais la force de coupe a été plus élevée lors du tournage de l'acier 42 HRC. Les expériences ont été menées à une vitesse de coupe modérée de 120 m/min et une durée de vie de l'outil de 8 minutes a été rapportée.

Dans leur étude, M.Y. Noordin et ses collaborateurs [81] ont effectué le tournage dur de finition de l'acier AISI 420 (47-48 HRC) en utilisant un outil en carbure revêtu de PVD TiAlN dans des conditions de coupe à sec. Les résultats ont montré que l'utilisation de ces plaquettes de carbure revêtues d'une seule couche entraînait une réduction de la durée de vie de l'outil à des vitesses de coupe supérieures à 130 m/min.

A.G. Jaharah et ses collaborateurs [82] ont observé que le mécanisme d'usure prédominant lors du fraisage en bout d'un acier à outils AISI H13 trempé (50 HRC) avec une plaquette en carbure revêtue de TiN était l'usure en dépouille. L'abrasion et l'adhésion ont été identifiées comme les principales causes de la défaillance de l'outil.

M.Y.Noordin et al. [83] ont évalué les performances de coupe lors de l'usinage d'un acier à outils inoxydable martensitique trempé (43-45 HRC) en utilisant deux outils de coupe

différents. Le premier outil était un cermet à base de TiCN revêtu (KT 315), et le second était un carbure revêtu (KC 9110). Les résultats ont montré que, sauf à faible vitesse de coupe et faible avance, le KC 9110 a surpassé le KT 315 en termes de performances de coupe.

L'analyse des modes de défaillance a révélé que pour le KT 315, l'usure en dépouille et la défaillance catastrophique étaient les modes de défaillance dominants.

W.F. Sales et ses collaborateurs [84] ont comparé l'efficacité de différents outils pour le tournage de l'acier W320 trempé et revenu. Ils ont utilisé des outils en carbure revêtu (TiN/Al₂O₃/TiCN), en céramique mixte et en PCBN avec un pourcentage élevé de CBN. Les résultats ont montré que les outils en carbure revêtu ont été les plus performants pour des vitesses de coupe allant jusqu'à 120 m/min, tandis que les outils PCBN se sont montrés plus efficaces pour des vitesses allant jusqu'à 200 m/min. En revanche, les outils en céramique mixte ont donné des résultats peu satisfaisants dans les conditions étudiées.

L'étude a mis en évidence que l'abrasion, l'adhésion et la déformation plastique étaient les principaux mécanismes d'usure du système tribologique. Des écaillages sur les faces de coupe et de dépouille de l'outil, ainsi que des défaillances catastrophiques, ont également été observés.

Abhijit. more et al.[85] ont étudié l'utilisation de plaquettes en carbure revêtues de composite CBN-TiN pour le tournage dur de l'acier AISI 4340 (53 HRC). Les plaquettes revêtues ont permis d'obtenir un bon état de surface et une durée de vie de 18 minutes, tandis que l'usure en cratère des plaquettes revêtues de CBN-TiN était inférieure à celle des plaquettes PCBN en raison du pouvoir lubrifiant de la couche de TiN. Les coûts d'usinage ont été réduits pour les outils en carbure revêtus de CBN-TiN par rapport aux outils PCBN. L'usure en dépouille était principalement due à l'abrasion lors de l'usinage de l'acier trempé AISI 4340, ce qui souligne l'importance d'un revêtement de TiN pour améliorer la durabilité de l'outil.

M. Cemal Cakir et al [86] ont examiné l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI P20 (52-54 HRC) à l'aide de plaquettes en carbure revêtues CVD (TiCN/Al₂O₃/TiN) et PVD TiAlN. Les résultats ont démontré qu'une avance plus élevée a entraîné une augmentation de la rugosité de surface, tandis que la vitesse de coupe a eu l'effet inverse. La profondeur de coupe, quant à elle, n'a pas eu d'effet significatif. Les auteurs ont souligné la nécessité d'approfondir l'étude de la durée de vie.

M.Y. Noordin et al. [87] ont examiné les performances d'une plaquette en carbure revêtue en PVD TiAlN lors du tournage dur de l'acier inoxydable AISI 420 (47-48 HRC) à différentes vitesses et avances. Les résultats ont montré que la durée de vie de l'outil a atteint un maximum de 18 minutes, mais a diminué à mesure que les vitesses de coupe et les avances augmentaient. En outre, les plaquettes revêtues ont permis d'obtenir une meilleure qualité de surface que les plaquettes non revêtues.

W.Y.H. Liew et al. [88] ont rapporté une usure plus faible des plaquettes en carbure revêtues par rapport aux plaquettes non revêtues lors de l'usinage d'ultra-précision de l'acier inoxydable AISI 420 (55 HRC) à basse vitesse, avec ou sans lubrifiant.

Anirban Bhattacharya et al. [89] ont examiné l'effet des paramètres de coupe sur la qualité de surface et la consommation d'énergie lors de l'usinage à grande vitesse de l'acier AISI 1045 (50 HRC) avec un outil en carbure revêtu (TiC/TiN). Les résultats ont montré que l'utilisation de vitesses de coupe plus élevées a conduit à une amélioration de la qualité de surface, mais aussi à une augmentation de la consommation d'énergie. Ainsi, l'optimisation des paramètres de coupe est nécessaire pour trouver un équilibre entre la qualité de surface et la consommation d'énergie.

Vikram Kumar et al. [90] ont mené une étude comparative de la performance d'outils en carbure revêtus de TiCN et TiAlN pour l'usinage à sec, avec de l'eau, et avec un minimum de lubrifiant de l'acier AISI 4340 (44 HRC). Les résultats ont montré que l'application de lubrifiant minimum a permis d'obtenir de meilleures performances, et que l'outil revêtu de TiAlN a offert une meilleure résistance à l'usure et une finition de surface supérieure.

Wenping Jiang et al. [91] ont développé un revêtement nano-composite CBN-TiN sur un substrat en carbure spécialement pour le tournage dur. Une amélioration de la durée de vie de l'outil et de la rugosité de la surface de la pièce a été obtenue lors de l'usinage d'aciers trempés AISI 4340 (50 à 53 HRC) en utilisant les plaquettes revêtues.

J G de Lima et al [92] ont étudié le tournage continu de l'acier AISI 4340 sur une plage de dureté allant de 30 HRC à 50 HRC. Les résultats de leur étude ont montré une performance satisfaisante des plaquettes en carbure à revêtement multicouche pour des duretés inférieures à 50 HRC. Toutefois, les chercheurs ont noté une fracture soudaine des plaquettes lorsqu'ils ont atteint la dureté de 50 HRC.

Dash et al. [93] ont exploré la faisabilité d'un outil en carbure à revêtement multicouche (TiCN-Al₂O₃-TiN) pendant le tournage dur de l'acier AISI D3 sous lubrification quantique minimale assistée par nano-fluide (NFMQL). Les résultats ont démontré que les performances des outils de coupe en carbure revêtus sont améliorées, dans lesquelles une gamme inférieure de rugosité de surface a été enregistrée ($R_a = 0,306-1,875 \mu\text{m}$), grâce aux capacités efficaces de refroidissement et de lubrification obtenues lorsque la technique NFMQL est appliquée.

L'étude menée par Menderes Kam et ses collaborateurs [94] a porté sur l'effet de l'usinabilité sur la qualité de surface et les vibrations générées lors du tournage dur de l'acier AISI 4040. Les résultats ont révélé que l'avance par tour était le paramètre de coupe le plus important qui affectait à la fois la rugosité de surface et les vibrations générées.

Das et al. [95] ont évalué les performances d'usinage et l'usinabilité en utilisant deux carbures revêtus (HSN2-TiAl_xN et TiCN) dans le tournage à sec d'un acier à matrice AISI D6 trempé (65 HRC). Les résultats ont montré que le remplacement du matériau de revêtement de TiCN à TiAl_xN a considérablement amélioré la performance de coupe, avec des avantages économiques considérables. En effet, le coût de production a été réduit de 12%.

Das et ses collègues [96] ont étudié l'usinabilité d'un acier AISI D6 trempé (65HRC) en tournage à sec en utilisant une plaquette en carbure revêtue (AlTiSiN). Les résultats ont montré que le revêtement nanostructure (AlTiSiN) a présenté une usure d'outil inférieure ($VB = 0,044-0,076 \text{ mm}$) et a produit un état de surface (R_a) comprise entre $0,322-0,905 \mu\text{m}$. Cette qualité de surface est proche de celle obtenue avec une rectification cylindrique en raison du coefficient de friction minimal.

I. 11. 4 Revues sur la modélisation et l'optimisation des paramètres d'usinage

Dans cette section, nous passons en revue la littérature sur les méthodes de prédiction des performances, y compris l'utilisation de plans d'expérience factoriels, de la méthode de Taguchi, de la méthodologie de la surface de réponse, de la modélisation ANN et de la méthodologie d'optimisation paramétrique.

M. Nalbant et al. [97] ont découvert qu'un rayon de plaquette plus grand, une faible avance et une faible profondeur de coupe pouvaient être recommandés pour obtenir une meilleure

rugosité de surface lors du tournage de l'acier AISI 1030 avec une plaquette en carbure revêtue de TiN. L'expérience a été réalisée en utilisant le tableau orthogonal L9 de Taguchi.

M.Y. Noordin et al. [98] ont évalué les performances de deux outils WC à revêtement multicouche (TiCN/Al₂O₃/TiN) de type CNMG120408-FN et TNMG120408-FN lors du tournage d'un acier AISI 1045. Ils ont utilisé une méthodologie de surface de réponse (RSM) avec un plan composite central. Les auteurs ont constaté que l'avance était le facteur le plus significatif influençant à la fois la rugosité de surface et la force tangentielle.

K.A. Risbood et ses collaborateurs [99] ont étudié la prédiction de la finition de surface dans le tournage avec des outils revêtus de TiN en utilisant un réseau neuronal. Leurs résultats ont montré que la finition de surface pouvait être prédite avec une précision raisonnable en utilisant cette méthode.

P.V.S. Suresh et al. [100] ont développé un modèle de prédiction de la rugosité de surface pour l'usinage de l'acier doux à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (RSM), en utilisant des outils de coupe en carbure de tungstène revêtus de TiN. Les résultats ont montré que la rugosité de surface diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et augmente avec l'augmentation de l'avance. En outre, une augmentation de la profondeur de coupe et du rayon du nez entraîne une augmentation de la rugosité de surface. Les conditions d'usinage optimaux ont été obtenues en utilisant l'approche d'algorithme génétique (GA).

Santanu Das et A.B. Chattopadhyay [101] ont observé que l'AHP (Analytic Hierarchy Process) était raisonnablement bon pour évaluer l'état d'usure de l'outil lors du tournage avec un outil revêtu de TiN.

I.A. Choudhury et M.A. El-Baradie [102] ont appliqué la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour développer des modèles de premier et de second ordre pour la durée de vie des outils lors du tournage à sec de l'acier à haute résistance EN24 (290BHN) avec des outils en carbure non revêtus. Les résultats ont montré que la vitesse de coupe était le principal facteur influençant l'usure de l'outil, suivie de l'avance par tour et de la profondeur de coupe.

Dans son étude sur l'influence des conditions de coupe sur la finition de surface lors du tournage, J. Paulo Davim [103] a utilisé un outil en carbure et la méthode Taguchi pour établir une corrélation entre les paramètres de coupe et la rugosité de surface, en utilisant une

analyse de régression linéaire multiple. Les résultats de cette étude indiquent que la vitesse de coupe ainsi que l'interaction entre la vitesse de coupe et l'avance par tour ont une plus grande influence sur la rugosité de surface, suivies de l'avance. En revanche, la profondeur de coupe n'a pas été significative.

Mohamed A. Dabnun et son équipe [104] ont mis au point un modèle de réponse pour prédire la rugosité de surface en utilisant la méthodologie de surface de réponse et un plan d'expérience factoriel (DOE). Ils ont utilisé des plaquettes en carbure non revêtues pour l'usinage à sec. Les résultats ont montré que l'avance avait le plus grand impact sur la rugosité de surface, suivie de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe.

Dans leur étude, I. Puertas Arbizu et C.J. Luis Perez [105] ont mis en place un modèle prédictif de la rugosité de surface à l'aide de la méthode de surface de réponse (RSM). Ils ont déterminé que les principaux facteurs ayant une influence significative sur la rugosité de surface étaient l'avance et la profondeur de coupe.

Chang-Xue (Jack) Feng [106] a appliqué une approche de conception factorielle fractionnée pour étudier l'influence des paramètres de tournage sur la rugosité de surface lors de l'utilisation de plaquettes en carbure à revêtement multicouche (TiCN/Al₂O₃/TiN). L'avance, le rayon du nez, le matériau et les vitesses de travail, l'angle de la pointe de l'outil se sont avérés être les paramètres influençant la rugosité de surface, et que les interactions les plus dominantes se situaient entre les matériaux de travail, l'angle de pointe et les vitesses. En revanche, la profondeur de coupe s'est avérée être un facteur moins important pour la rugosité de surface.

Muammer Nalbant et al. [107] ont développé un modèle de réseau neuronal prédictif qui permet d'obtenir des prévisions plus précises que plusieurs modèles de régression pour la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier AISI 1030 avec un outil en carbure revêtu de TiC/Al₂O₃/TiN. Les résultats de leur étude ont montré que l'avance par tour et le rayon du nez de la plaquette sont les facteurs les plus importants influençant la rugosité de surface, tandis que la profondeur de coupe ne s'avère pas plus informative que les deux autres facteurs.

Hari Singh et Pradeep Kumar [108] ont démontré que les contributions en pourcentage de la profondeur de coupe (55,15 %) et de l'avance par tour (23,33 %) avaient une influence significativement plus importante sur la force axiale que la vitesse de coupe (2,63 %) lors de l'usinage de l'acier EN24 avec des plaquettes en carbure de tungstène revêtues de TiC, selon

l'approche de conception de Taguchi.

Tugrul Äzel et al. [109] ont montré que l'utilisation d'outils en carbure à lamelles permet d'obtenir des valeurs de rugosité de surface plus faibles que celles obtenues avec des outils conventionnels pour le tournage de finition de l'acier AISI 1045. De plus, les résultats de leur étude ont montré que la prédiction de la rugosité de surface peut être améliorée grâce à l'utilisation d'un réseau de neurone

Bouacha et al. [110] ont étudié l'impact de la vitesse de coupe, de la profondeur de coupe, l'avance et du temps de coupe sur les forces de coupe lors du tournage d'un acier trempé AISI 52100 (63 HRC) avec un outil CBN. Les résultats ont montré que la profondeur de coupe est le facteur le plus significatif influençant les forces de coupe

Mikołajczyk et al. [111] ont développé un logiciel permettant de visualiser l'effet de l'épaisseur minimale de la couche de coupe (MTCL) sur la rugosité de surface lors du processus de tournage, ainsi que de comparer les profils de surface réels.

Mikołajczyk et al. [112] ont proposé une méthode de prédiction automatique de la durée de vie de l'outil dans les opérations de tournage. Cette méthode combine un logiciel de reconnaissance d'image et la modélisation ANN. Les résultats de l'étude suggèrent que cette méthode pourrait être développée en un outil industriel utile pour estimer à faible coût la durée de vie de l'outil dans les opérations de tournage.

Paese et al. [113] ont étudié l'influence des paramètres d'usinage, à savoir la vitesse de coupe, la profondeur de coupe, le rayon du nez de l'outil, l'avance par tour, ainsi que le substrat et les méthodes de revêtement des outils de coupe sur la rugosité de surface dans le cas du tournage de l'acier AISI 1045. Les résultats ont montré que la qualité de surface des pièces usinées se dégrade avec l'augmentation de l'avance (f) et la diminution du rayon du nez de l'outil. En outre, l'outil WC/PVD offre la plus faible rugosité de surface par rapport aux deux autres outils WC/CVD et Cermet/PVD.

Mohamed Elbah et al. [114] ont utilisé les méthodes ANOVA et RSM pour étudier l'effet de cinq paramètres de coupe (V_c , f , a_p , χ_r , et r) sur la rugosité de surface et la force radiale lors du tournage dur d'un acier 42CrMo4 en utilisant une plaquette céramique mixte. Leurs résultats indiquent que la profondeur de coupe est le facteur le plus influent sur la force radiale, tandis que la rugosité de surface est significativement affectée par le rayon du nez.

Vats et al. [115] ont étudié l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface, la force de coupe et la puissance de coupe en utilisant une plaquette de coupe en carbure pour le tournage de l'acier AISI4140 dans différents environnements de lubrification (sec et MQL). Ils ont enregistré une réduction de 15,95%, 13,92% et 13,7% respectivement de la force de coupe, de la rugosité de surface et de la puissance de coupe en utilisant de l'huile de noix de coco comme lubrifiant. D'autre part, Mustafa Özdemira et ses collaborateurs. [116] ont constaté lors de leur étude sur le tournage de l'acier AISI 4140 à l'aide d'une plaquette de carbure que l'avance est le paramètre qui a le plus d'impact sur la rugosité de surface et la force de coupe

I. 12 Conclusion

Ce chapitre donne une brève introduction aux outils de coupe, les différentes méthodes de revêtement, en soulignant l'importance des études d'usinabilité, de la qualité de la surface usinée et de l'usure des outils. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée aux travaux de recherche dans le domaine du tournage, avec un accent particulier sur la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe. Cette étude nous a permis de comprendre les phénomènes physiques liés au processus de coupe, ainsi que les méthodes de pointe utilisées pour optimiser les conditions de coupe.

CHAPITRE II

PROCEDURE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'ensemble des moyens et techniques expérimentales exploités pour la réalisation des expériences, afin de caractériser le comportement du couple outil-matière. Nous allons donc décrire les différents équipements utilisés pour suivre l'évolution des paramètres technologiques pendant les essais. Nous présenterons également la démarche expérimentale utilisée, ainsi que les outils de coupe, les conditions de coupe et le plan d'expérience choisi

II. 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des équipements utilisés pour effectuer cette étude expérimentale méthodique, dont le but est de comprendre le comportement du matériau usiné en évaluant différents paramètres technologiques d'usinage, tels que l'usure de l'outil, la rugosité de surface, la force de coupe, la puissance de coupe, l'effort de coupe spécifique et le débit du copeau, en fonction des conditions de coupe. Nous décrirons également la démarche utilisée pour planifier les expériences et leurs conditions de réalisation.

Les essais de tournage de l'acier AISI4140 ont été réalisés au laboratoire de mécanique et de structure (LMS) du département de génie mécanique de l'université 8 Mai 1945 à Guelma.

II. 2 Equipements d'expérimentation

II. 2. 1 Machine-outil

- Les expériences de tournage que nous avons effectuées lors de notre étude ont été réalisées à l'aide d'un tour conventionnel « TOS TRENCIN » modèle SN40 (Figure II.1) dont les caractéristiques sont les suivantes :
- Puissance du moteur électrique : 6.6 kW
- Vitesses de rotation possibles : 45 à 2000 tr/min.
- Vitesse d'avance en millimètres par tour : 0.08 à 6.4 mm/tr.



Figure II. 1 : *Tour parallèle modèle SN40*

II. 2. 2 Nuance du matériau de la pièce

C'est un acier faiblement allié de nuance AISI 4140 selon la norme American, destiné généralement à la fabrication des pièces de transmission à titre d'exemple (arbre, vérin, pignon, couronne etc...) [117]. Il est considéré comme un acier résistant aux chocs thermiques en raison de la présence de chrome, de molybdène et de vanadium.

- Le chrome a plusieurs effets bénéfiques sur l'acier, tels qu'une meilleure trempabilité, une réduction du grossissement du grain pendant l'austénitisation, un retard de l'adoucissement pendant le revenu et une réduction de l'oxydation à haute température. De plus, il forme des carbures qui améliorent la résistance à l'abrasion de l'acier

- Le vanadium permet de générer des carbures extrêmement durs (3000 HV). De petites quantités, supérieures à 0,2 % en masse, sont très efficaces pour éviter le grossissement des grains lors du traitement thermique. Dans les aciers à outils, il est souvent utilisé en combinaison avec le chrome, le molybdène et le tungstène. Cependant, sa mauvaise résistance à l'oxydation au-delà de 600°C est compensée par la présence de chrome. De plus, la teneur en carbone de l'acier est étroitement liée à la teneur en vanadium, qui se trouve limitée par des problèmes de trempabilité.

- Le molybdène confère à l'acier une très bonne résistance à l'usure à chaud via la présence de carbure très dur de 1500 (M6C) à 2000 HV (M2C), et ralentit l'adoucissement [118].

Les éprouvettes utilisées ont été préparées sous forme de barres rondes de 80 mm de diamètre et de 400 mm de longueur, avec un trou de centrage pour assurer un montage mixte. Pour mieux caractériser notre matériau, des tests et mesures ont été effectués au laboratoire de la société GERMAN (Ain-Smara). Nous avons utilisé successivement un duromètre universel de marque UH930 (voir Figure II.2b) et un spectromètre de marque Oxford PMI-Master Pro (voir Figure II.2c) pour mesurer la dureté et analyser la composition chimique.

Le matériau utilise AISI4140 à une dureté de 284 HB et une composition chimique réelle comme suit :

- | | | |
|-----------------------|--------------------------|----------------|
| ➤ 0,424% de carbone | ➤ 0,841% de manganèse | ➤ 0.002 de V |
| ➤ 0,997% de chrome | ➤ 0,80-1.2% de cuivre ; | ➤ 0.0068 de Zr |
| ➤ 0,196% de molybdène | ➤ 0.0151% de l'aluminium | ➤ 0.002 de W |
| ➤ 0,297% de silicium | ➤ 0,0371% de nickel | ➤ Reste est Fe |

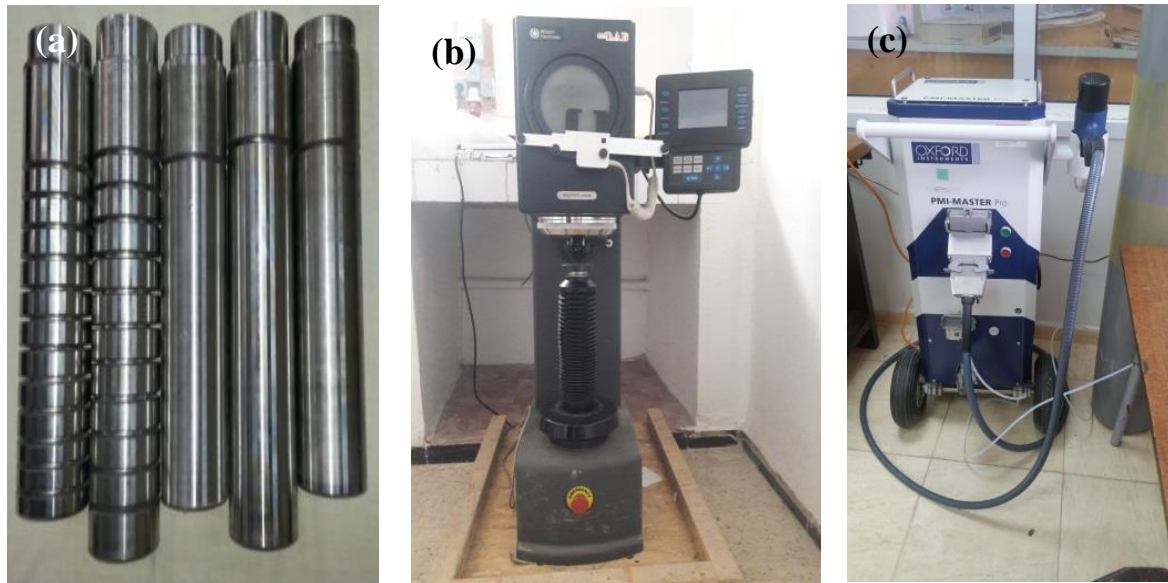


Figure II. 2 : (a) *Eprouvettes utilisées*, (b) *Test de dureté universel (UH930)*, (c) *Spectromètre PMI-master pro analyser.*

Nous avons utilisé deux types d'éprouvettes pour les mesures de rugosité, les efforts de coupe et de l'usure des plaquettes. Les essais de rugosité et des efforts ont été établis sur des paliers de 20 mm (Figure II.3), tandis que la caractérisation et la quantification de l'usure des plaquettes ont été réalisées par usinage continu sur toute la longueur de la deuxième éprouvette (Figure II.4).

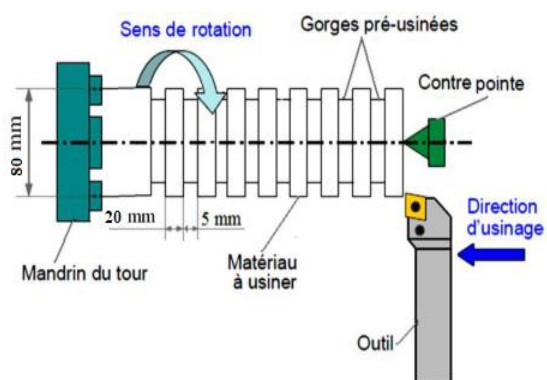


Figure II. 3 : *Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage pour les essais des efforts de coupe et rugosité sur un tour SN 40.*

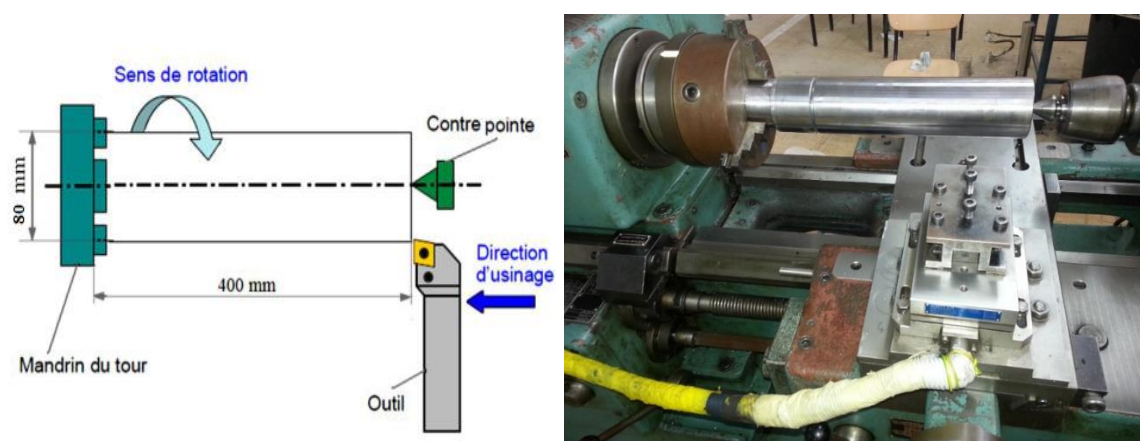


Figure II. 4 : Représentation de l'éprouvette en montage d'usinage pour les essais d'usure sur un tour SN 40.

II. 2. 3 Plaquettes utilisées

Le matériau des plaquettes de coupe utilisées est du carbure, avec ou sans revêtement. Ces plaquettes sont amovibles de forme carrée, comportant 8 arêtes de coupe par plaquette et sont de marque SANDVIK, avec fixation par trou central. Des images des plaquettes sont présentées sur la Figure (II.5) Toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le Tableau (II.1)

Tableau II. 1 : Informations relatives aux matériaux de coupe utilisés

Matériau de coupe	Carbure revêtu	Carbure revêtu	Carbure revêtu	Carbure Non revêtu
Fabricant & Grade	Sandvik GC2015 (T1)	Sandvik GC4215 (T2)	Sandvik GC1015 (T3)	Sandvik H13A
Procédé de revêtement	CVD	MTCVD	PVD	Non
Matériau de revêtement	TiN Al ₂ O ₃ Ti(C,N)	Ti(C,N) Al ₂ O ₃	TiN	
Domaine d'application ISO	P25 (P20-P30)	P15 (P10-P30)	P25 (P10-P35)	(K20, S15, N15)
Géométrie selon ISO	SNMG 120408	SNMG 120408	SNMG 120408	SNMG 120408

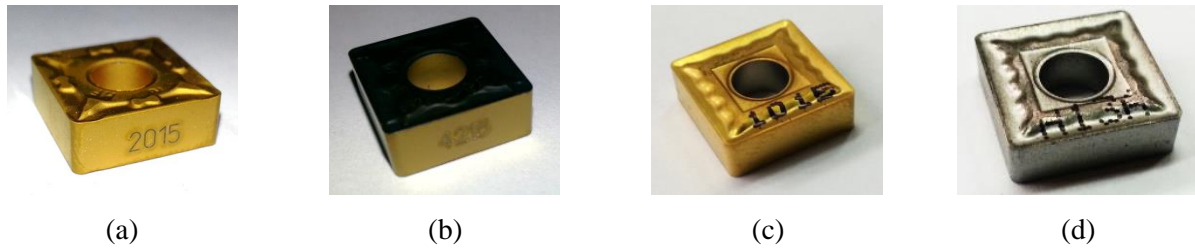


Figure II. 5 : Plaquettes de coupe utilisées : (a) GC2015, (b) GC4215, (c) GC1015 et (d) H13A

✓ Descriptif de la plaquette SNMG 12 04 08

S : Indique la forme de la plaquette (Ici carre) ;

N : Valeur de l'angle de dépouille ;

M : Tolérances dimensionnelles ;

G : correspond à « brise copeau sur 2 face, avec trou de fixation ;

12 : Indication de la longueur d'arête de coupe ;

04 : Indication de l'épaisseur de la plaquette ;

08 : Rayon du bec de l'outil ici égal à 0,8 mm ;

➤ **Plaquette en carbure revêtu GC2015**

Cette nuance porté un triple revêtement *CVD* ($TiN/TiCN/Al_2O_3$) sur un substrat de carbure cémenté (Figure II.6). Le revêtement *CVD* est obtenu par une déposition en phase vapeur à température épaisse et modérée (*MTCVD*) de TiN pour une résistance élevée et un coefficient de frottement réduit. $TiCN$ pour la résistance à l'usure et la stabilité thermique. Al_2O_3 pour une résistance élevée à la température et à l'usure en mode cratère [74].

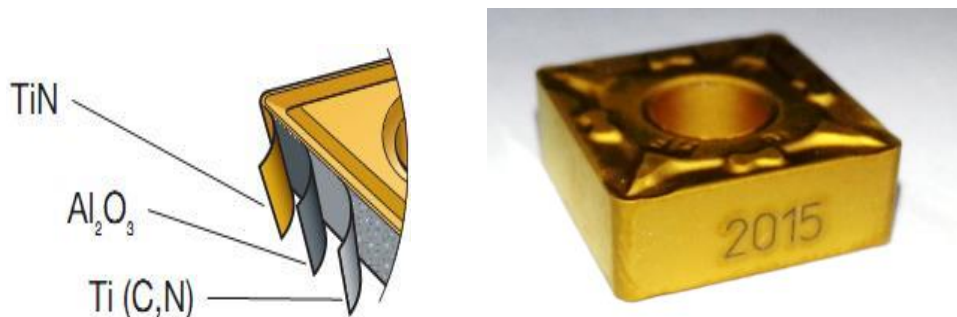


Figure II. 6 : Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement *CVD* (GC2015).

➤ **Plaquette en carbure revêtu GC4215**

Cette nuance apporte de meilleures performances à l'usinage dans toute une variété d'applications. Elle permet d'augmenter les conditions de coupe à sec et sous arrosage. La technologie de pointe de la nuance GC4215 autorise une meilleure productivité sans compromettre la sécurité dans les applications P10 et P20. Le nouveau substrat au carbure et la technologie de revêtement s'associent pour offrir une meilleure résistance d'arête. Le domaine d'application s'en trouve élargi. Les performances sont sûres et fiables, notamment en raison de la résistance fortement accrue à la déformation et à l'usure conférée par la combinaison du nouveau substrat et du revêtement à faibles contraintes.

Les performances sont excellentes dans les coupes continues. Elle permet aussi de mieux exploiter les machines car la résistance de leurs arêtes réduit les risques de rupture, et, par conséquent, les temps morts. Leur résistance à l'usure diminue le besoin de la maintenance et permet une production continue avec moins d'ajustements. Par ailleurs, l'usinage à sec est possible. Le revêtement épais d'alumine Al_2O_3 à faibles contraintes offre une protection maximale contre l'échauffement et l'usure chimique. La couche de TiCN déposée par la technologie MTCVD (Dépôt Chimique en Phase Vapeur à Température Moyenne) apporte la meilleure résistance possible à l'usure mécanique ainsi qu'une bonne adhérence au substrat. Ce dernier est un matériau gradient optimisé pour offrir une résistance maximale à la déformation plastique sans perte de ténacité (Figure II.7).

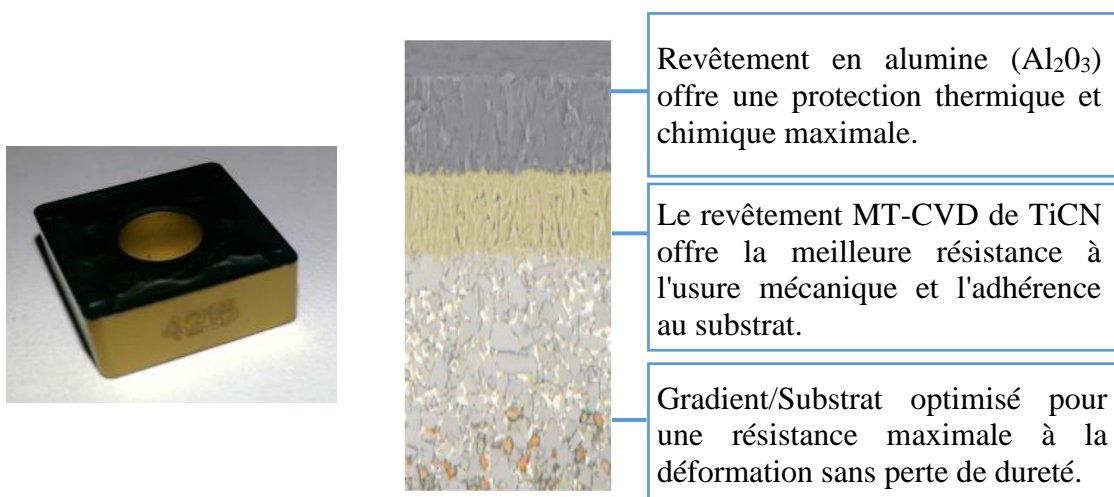


Figure II. 7 : Revêtement et substrat de la plaquette GC4215 [119]

En outre, il est possible de profiter d'une sécurité d'usinage élevée dans les aciers de faible teneur en carbone comme dans les aciers faiblement ou fortement alliés. GC4215 est aussi un choix possible pour les applications de tournage des fontes qui demandent de la ténacité. La détection de l'usure est aisée grâce à la coloration noire et dorée typique des plaquettes de la nouvelle génération pour le tournage des aciers [119].

➤ **Plaquette en carbure revêtu GC1015**

C'est une nuance à grain très fin et dotée d'un nouveau revêtement PVD en TiN, qui est à la fois tenace et résistant à l'usure (voir la Figure II.8). Cette nuance présente des arêtes de coupe vives et offre une excellente protection contre le martelage des copeaux, ce qui la rend adaptée aux tolérances serrées et à l'état de surface en finition des aciers inoxydables [6].

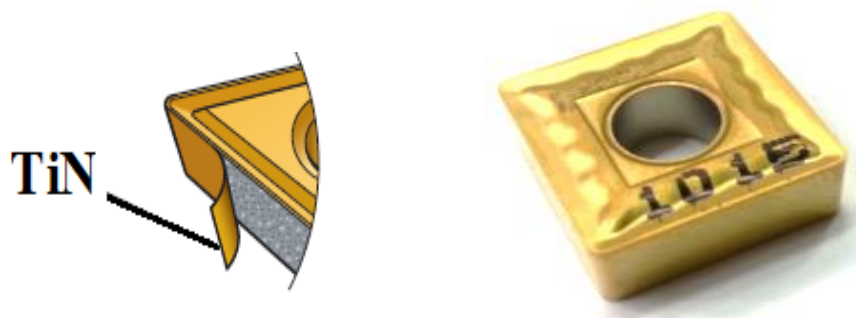


Figure II. 8 : *Plaquette de coupe en carbure avec revêtement PVD (GC1015).*

➤ **Plaquette en carbure non revêtu H13A**

La plaquette H13A est un type de carbure non revêtu, comme illustré dans la Figure II.9. Cette plaquette présente une excellente résistance à l'usure par abrasion, ainsi qu'une grande ténacité, ce qui en fait un choix idéal pour le tournage grossier ou de finition de divers matériaux, tels que les alliages résistants à la chaleur, les alliages de titane, les fontes et les alliages d'aluminium [21].

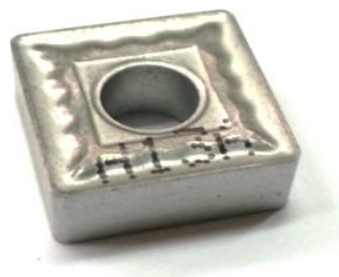


Figure II. 9 : *Plaquette en carbure non revêtue (H13A).*

II. 2. 4 Porte-outil utilisé

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil sur lesquels se fixent les plaquettes mécaniquement par levier pour plaquette avec trou. Ce porte-outil portant la désignation PSBNR 2525M12. Leur géométrie de la partie active est caractérisée par les angles suivants : $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = -6^\circ$, $\chi = 75^\circ$ et $\lambda = -6^\circ$ (Figure II.10).



Figure II. 10 : Porte outil PSBNR 2525M12

Descriptif du porte-outil PSBNR 2525 M12 [120].

P : désigne le système de fixation de la plaquette sur le corps du porte-outil (par trou central)

S : désigne la forme carrée du logement de la plaquette

B : désigne l'angle de direction principal ($\chi = 75^\circ$)

N : désigne l'angle de dépouille de la plaquette

R : désigne la direction de la coupe (à droite)

25 : désigne la hauteur du manche (25 mm)

25 : désigne la largeur du manche (25 mm)

M : désigne la longueur totale du manche (150 mm)

12 : désigne la longueur de l'arête de coupe (12 mm)

II. 3 Instruments de mesures utilisés

Pour réaliser les différentes mesures des paramètres étudiés, nous avons utilisé les instruments de mesure suivants :

- Un dynamomètre KISTLER 9257B pour la mesure des efforts de coupe.
- Un rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.

- Un rugosimètre 3D pour voir la topographie de la surface.
- Microscope à balayage électronique Tescan module VEGA.
- Microscope optique binoculaire Visuel Gage 250.

II. 3. 1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Les composantes de la force de coupe (F_a , F_r et F_z) ont été mesurées pendant les opérations d'usinage par un dynamomètre à quartz standard (KISTLER 9257B) qui permet des mesures de -5kN à 5kN. La Figure (II.11a) illustre le dynamomètre de force de coupe utilisé. Le dispositif de mesure comprend un amplificateur de charge (KISTLER 5019B130), un système d'acquisition de données (A/D 2855A3) et un dispositif de programmation graphique (DYNOWARE 2825A1-1) pour l'analyse et la visualisation des données (Figure. II.11b). Le signal de force acquis a été analysé pour un temps de coupe de 5 secondes et une vitesse d'acquisition de 500 Hz.

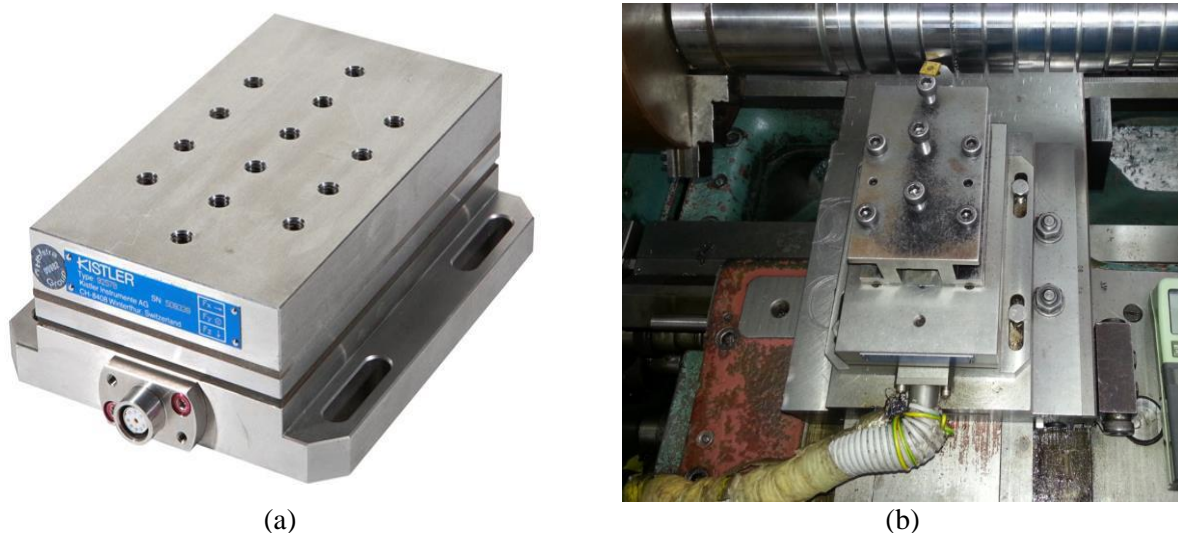


Figure II. 11 : (a) *Dynamomètre à quartz standard (KISTLER 9257B)*, (b) *Position du dynamomètre d'effort de coupe.*

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 a le mouvement de translation. Ce dernier est monté sur la plate-forme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (Figure II.11b). La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure.

Les réactions qui agissent sur cette plaque lors de l'opération d'usinage sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des charges. Ensuite,

l'acquisition de ces dernières est assurée par le PC (DYNOWARE) qui analyse, traite et converti ces charges en signaux, exprimant ainsi les forces produites lors du processus du tournage en trois composantes F_a , F_r et F_z . (Voir Figure II.12) [121].

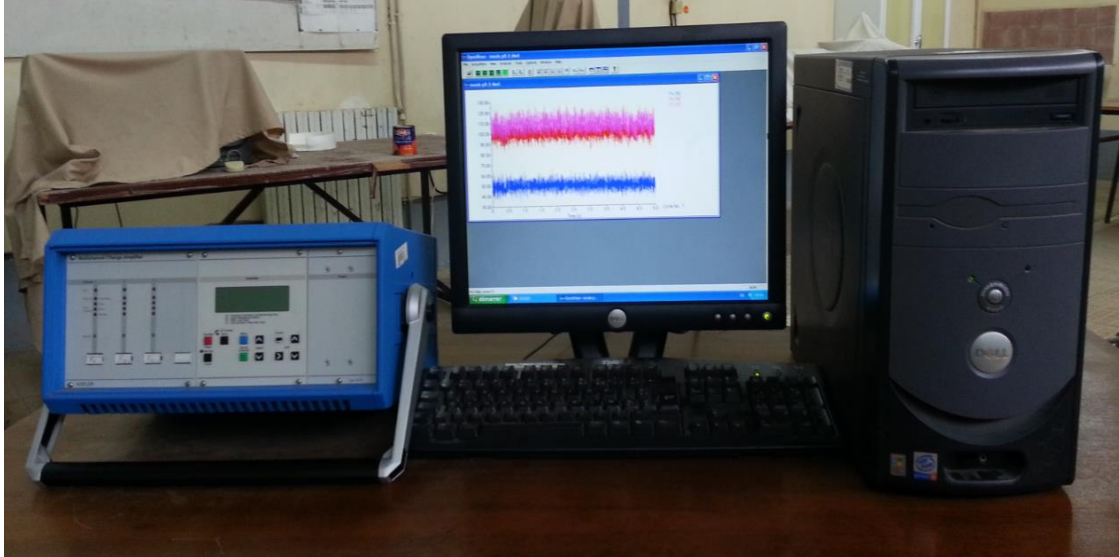


Figure II. 12 : Amplificateur de charge (KISTLER 5019B130) & dispositif de programmation graphique (DYNOWARE 2825A1-1)

La Figure (II.13) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (effort axial, effort radial et effort tangentiel) [122].

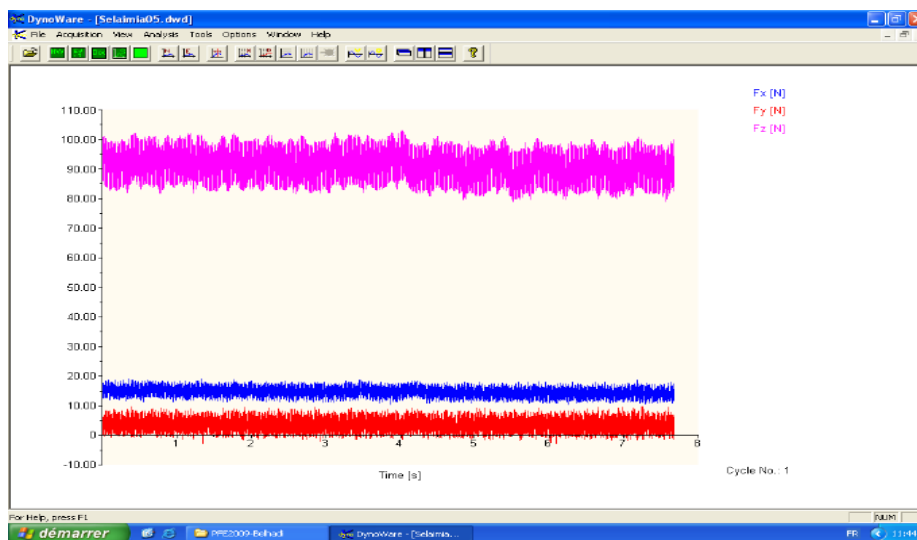


Figure II. 13 : Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

II. 3. 2 Caractérisation de la surface de la pièce

II. 3. 2. 1 Mesure de la rugosité des surfaces en 2D

Les différents critères de la rugosité de surface (R_a , R_t , R_z et R_q) ont été obtenus instantanément après chaque passage de l'outil (essai) au moyen d'un appareil de rugosité Mitutoyo Surftest SJ-201 muni d'une pointe en diamant de 5 μm de rayon elle se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précisions, les mesures de la rugosité ont été effectuées directement sur la pièce à trois reprises sans avoir recours à la démonter. La valeur de la rugosité de la surface est la moyenne de trois points pris pour chaque mesure. La Figure (II.12) montre la méthode de mesure des quatre critères de rugosité

Le rugosimètre était étalonné avant chaque campagne d'essais sur un étalon de caractéristiques : R_a de 3,2 μm

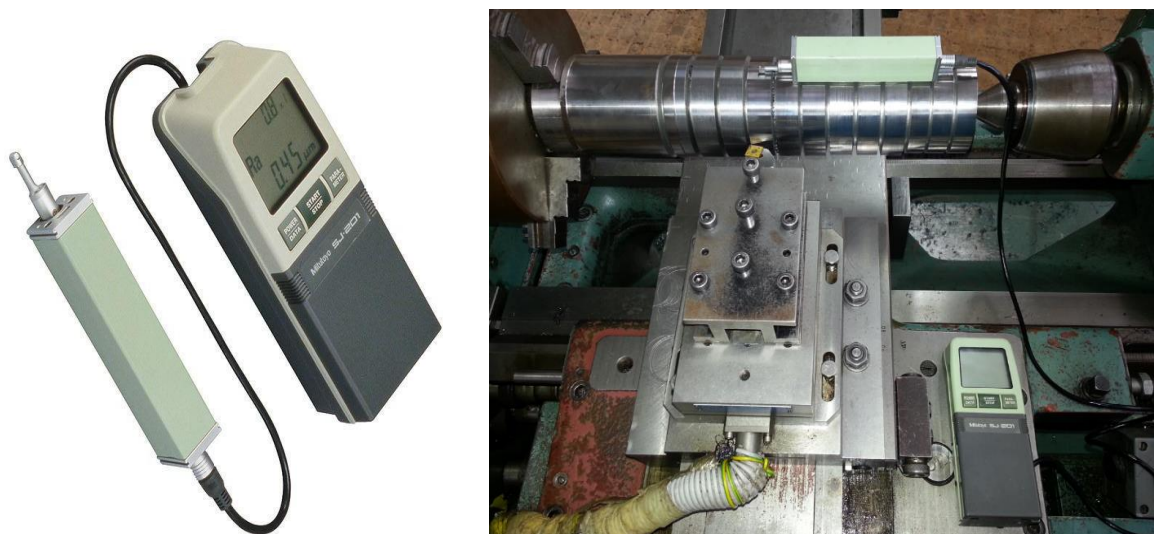


Figure II. 14 : Mesure de topographie avec le rugosimètre portable Mitutoyo.

II. 3. 2. 2 Mesure de la rugosité des surfaces en 3D

Plusieurs mesures ont été établies sur la plate-forme 3D de métrologie optique modulaire AltiSurf-500 (Figure II.13). Cet appareil permet la caractérisation de surface 2D et 3D, l'analyse de rugosité 2D, analyse de forme et mesure de distance. Dans notre étude on s'intéresse seulement à l'analyse 2D et 3D.

L'appareil AltiSurf-500 est doté de plusieurs tables de déplacement motorisées de haute précision qui permettent un mouvement fluide de l'échantillon selon les axes X et Y, ainsi que selon un ou plusieurs axes rotatifs, si nécessaire. De plus, il dispose d'une plateforme rectangulaire spécialement conçue pour supporter l'échantillon à mesurer. Cette conception garantit une grande stabilité et une précision accrue lors des mesures.



Figure II. 15 : Profilomètre AltiSurf 500

L'exécution des mesures est réalisée par le logiciel Phénix qui est l'interface de l'Altisurf. 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. Un exemple d'acquisition est présenté dans la Figure (II.16).

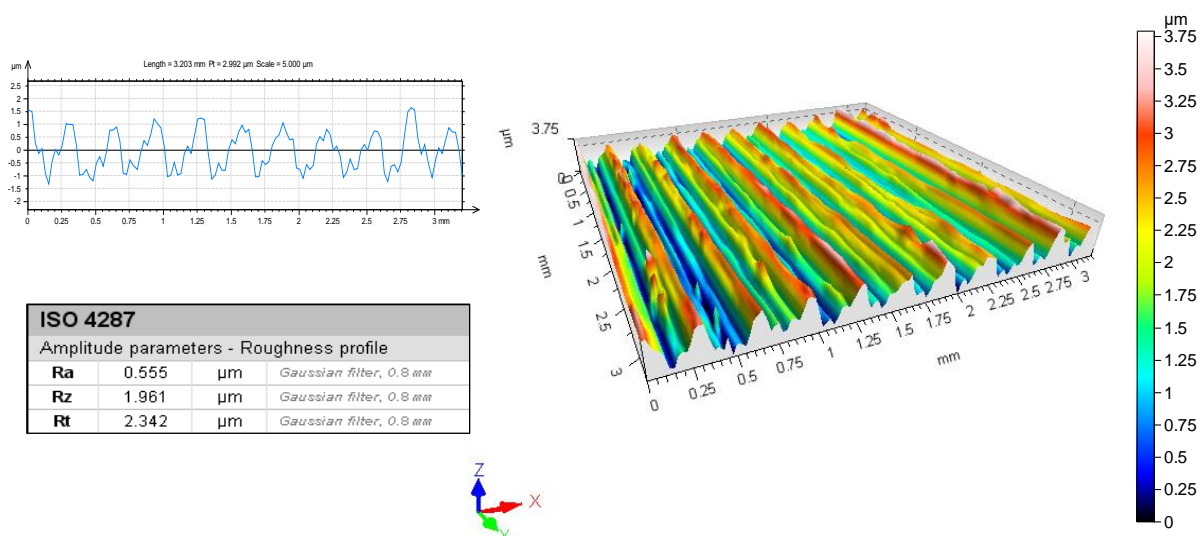


Figure II. 16 : Rugosité de surface 2D et 3D mesurée par la plate-forme AltiSurf-500

II. 3. 3 Microscope optique pour la quantification de l'usure

Afin de caractériser l'usure en dépouille (*VB*) des différents matériaux de coupe étudiés, nous avons utilisé un microscope optique binoculaire du type Visual Gage 250 (Figure II.17a), équipé d'une caméra et doté de deux chariots à mouvements croisés et à affichage digital de précision de 0,001 mm. Il offre un grossissement compris entre G/4, G/10, G/40 et G/100. Les données sont acquises sur PC à l'aide du logiciel Visual Gage 2.2.0 (Figure II.17b), qui permet à tout opérateur comme au métrologue de mesurer rapidement et précisément la plupart des éléments géométriques. Il se distingue par sa facilité d'utilisation, son interface graphique et sa flexibilité lors de la création des rapports de mesure.



(a)



(b)

Figure II. 17 : (a) Microscope optique Visual Gage 250, (b) Logiciel visual Gage 2.2.0

Le VISUAL 250 présente les caractéristiques suivantes [123]:

- Etendue de mesure (X/Y) : 250 x 150 mm.
- Caméra CCD couleur, 752 x 582 pixels.
- Zoom indexable (0,7x à 4,5x).
- Eclairage diascoïque, LED verte
- Eclairage annulaire, LED blanche.
- Pointeur laser.
- Etalonnage : à 10 mm
- Température de référence : 20°C ±1°C.

La mesure s'effectue en plaçant la plaquette sur une table micrométrique à mouvements croisés. L'affichage digital sur l'interface graphique permet de localiser l'intersection de la face de coupe et de la face de dépouille de la plaquette, de prendre cette intersection comme ligne de référence à partir de laquelle l'usure en dépouille est évaluée.

II. 3. 4 Microscope électronique à balayage

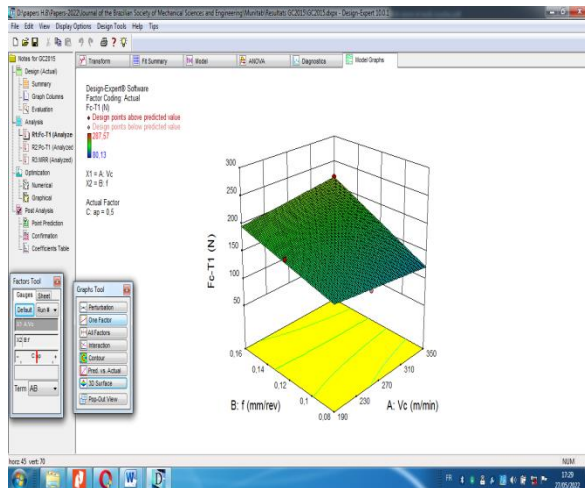
Dans le but d'étudier le modèle d'usure et le mode de défaillance des outils, une analyse de la plaquette usée a été effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage. La Figure (II.17) montre le microscope électronique à balayage (Tescan, modèle Vega).



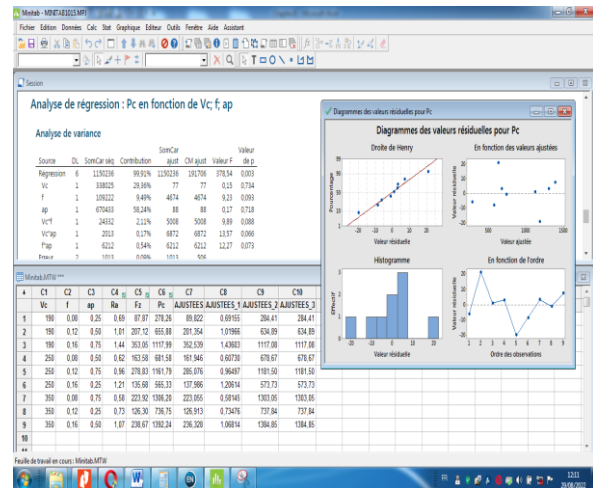
Figure II. 18 : *Microscope électronique à balayage Tescan, modèle Vega*

II. 3. 5 Conception et logiciels d'analyse de d'expérimentation

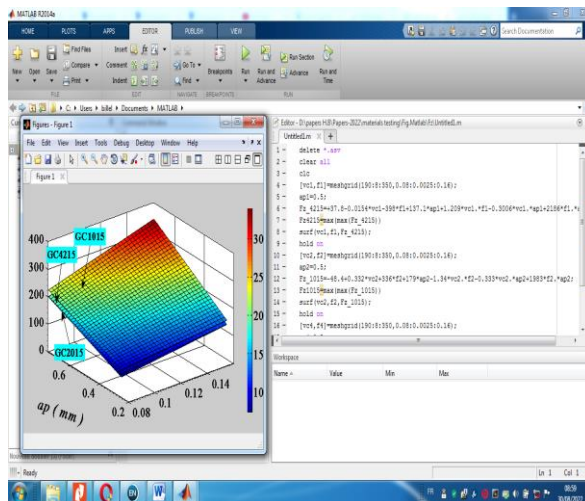
La version 10.0.1 de Design Expert et le logiciel Minitab (2018) ont été utilisées pour la conception et l'analyse des résultats des expériences. Les Figures (II.18a) et (II.18b) montrent respectivement un aperçu sur les deux logiciels utilisés. Le logiciel matlab (2014) a été utilisé pour tracer les graphes en 3D et la compilation des algorithmes d'optimisation (Figure II.18c), tandis que le logiciel origine Pro (8.5) a été utilisé pour tracer les graphes comparant les valeurs prédites et expérimentales (Figure II.18d).



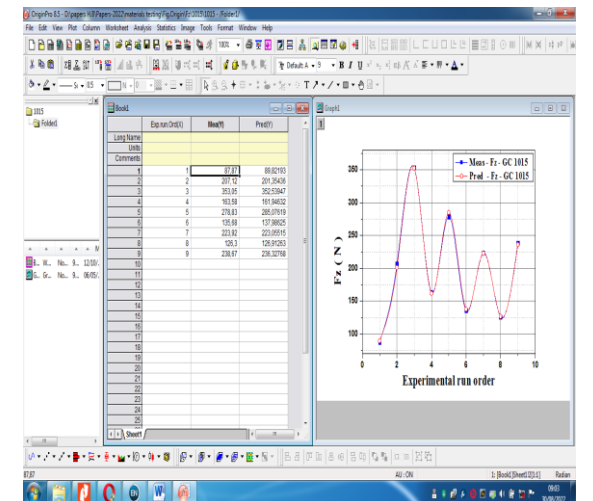
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II. 19 : Impression du tracé des logiciels utilisés : (a) design expert (10), (b) Minitab (2018), (c) Matlab (2018) et (d) Origine Pro (8.5)

II. 3. 6 Autres équipements

- Un chronomètre pour enregistrer le temps d'usinage ;
- Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
- Un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.

II. 4 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale a été divisé en deux parties principales, Dans la première partie, l'évaluation des performances des quatre outils de coupe en carbure (GC2015,

GC1015, GC4215 et H13A) a été réalisée, en ce qui concerne les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z) ainsi que la rugosité de surface (R_a , R_q , R_t et R_z). La deuxième partie est consacrée à la quantification et à la caractérisation de l'usure en dépouille de tous les outils de coupe utilisés. Les tests ont été réalisés pour une durée de 05 minutes.

Toutefois, nous nous sommes limités à un ensemble de points à explorer :

Paramètres testés :

- Vitesse de coupe (V_c),
- L'avance par tour (f),
- Profondeur de passe (a_p),

Résultats à observer :

- Rugosité des surfaces usinées (2D et 3D),
- Les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z),
- Usure en dépouille des plaquettes (V_b),
- Puissance de coupe (P_c)
- L'effort spécifique de coupe (K_s)

Le but du travail consiste à établir et à quantifier les modes d'évolution de ces résultats en fonction de l'ensemble des paramètres recensés.

II. 5 Planification des expériences

II. 5. 1 Régime de coupe

Parmi le grand nombre des facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...) et les conditions de lubrification.

Considérant X_1 , X_2 , X_3 , ..., X_n comme paramètres d'entrée et Y_1 , Y_2 , Y_3 , ... Y_n comme paramètres de sortie. L'influence d'un ou de plusieurs facteurs (X_1 , X_2 , X_3 , ..., X_n) sur un paramètre Y , peut être obtenue en utilisant les deux méthodes suivantes :

- Méthode uni-factorielle
- Méthode multifactorielle

II. 5. 1. 1 Méthode uni-factorielle

Le but de l'utilisation de cette méthode est d'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.

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 $Y = f(X)$. Dans ce cas, on varie seulement le facteur X , tout en maintenant les autres facteurs constants (Tableau II.2).

Tableau II. 2 : Réalisation d'essais d'après la méthode uni-factorielle.

N°	Facteurs variable	Paramètres de sortie						
	X	Y ₁	Y ₂	~	Y _j	~	Y _n	Y _{moy}
1	X ₁	Y ₁₁	Y ₂₁	~	Y _{j1}	~	Y _{n1}	Y _{moy1}
2	X ₂	Y ₁₂	Y ₂₂	~	Y _{j2}	~	Y _{n2}	Y _{moy2}
3	X ₃	Y ₁₃	Y ₂₃	~	Y _{j3}	~	Y _{n3}	Y _{moy3}
i	X _i	Y _{1i}	Y _{2i}	~	Y _{ji}	~	Y _{ni}	Y _{moyi}
~	~	~	~	~	~	~	~	~
N	X _N	Y _{1N}	Y _{2N}	~	Y _{jN}	~	Y _{nN}	Y _{moyN}

Dans notre cas une étude paramétrique destinée à comparer l'influence des différentes qualités de plaquettes en carbure a été réalisée. Le tableau (II. 3) présente les conditions de coupe pour les essais paramétriques tandis que la Figure (II.20) montre la procédure expérimentale.

Tableau II. 3 : Paramètres de coupe des tests longue durée.

Vitesse de coupe V_c (m/min)	350 m/min
L'avance par tour f (mm/tr)	0,08 mm/tr
Profondeur de coupe a_p (mm)	0,5 mm
Temps d'usinage (Minutes)	05 Minutes

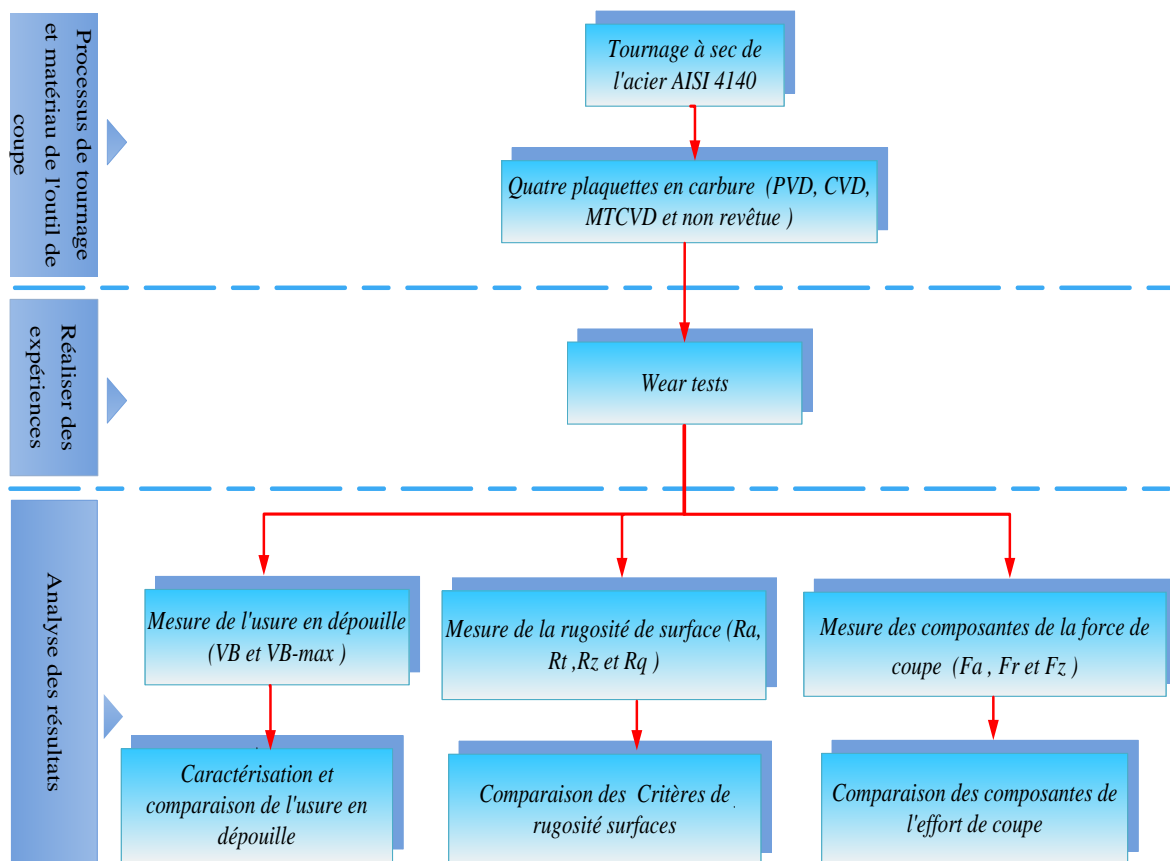


Figure II. 20 : Organigramme de la procédure expérimentale et de l'analyse des données

II. 5. 1. 2 Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y_i , dont la forme est la suivante :

$$Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (\text{II.1})$$

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c, f et a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (rugosité, efforts de coupe, puissance de coupe, pression de coupe et le taux d'enlèvement de la matière). L'illustration de travail expérimental a été donnée à la Figure (II.21).

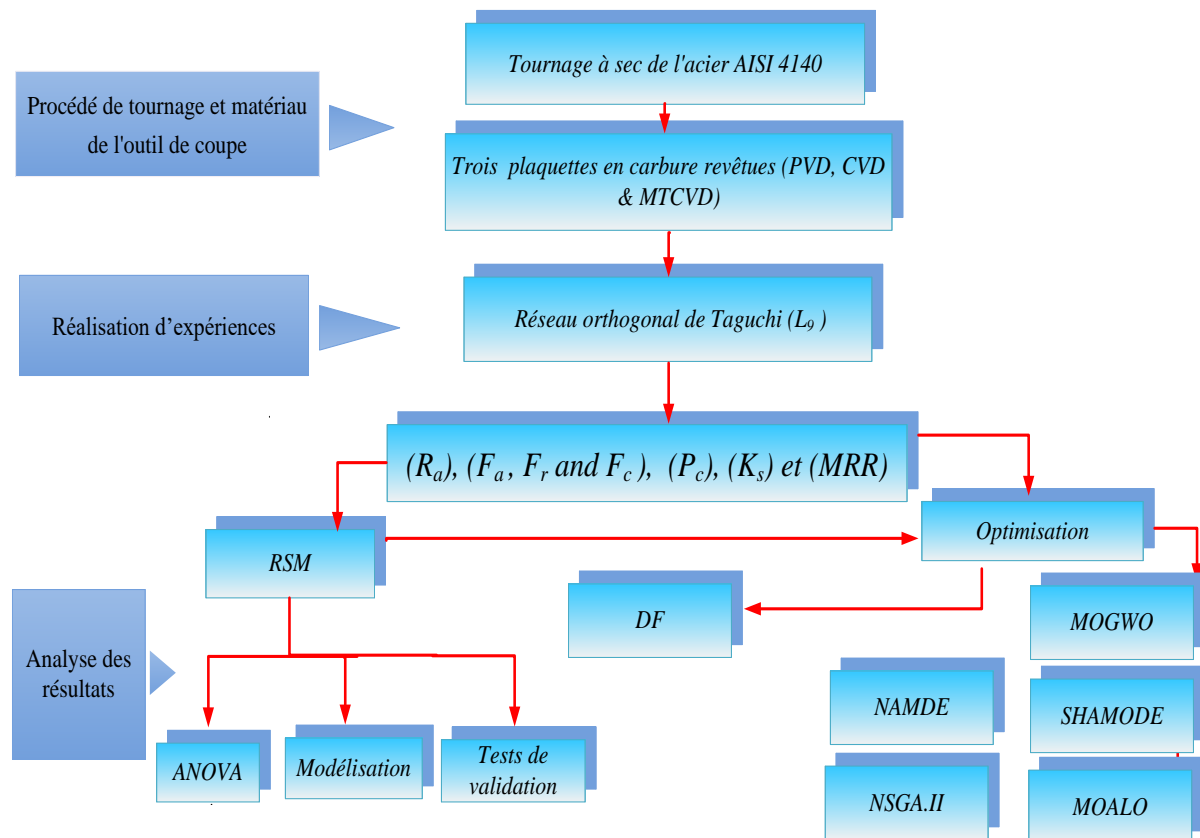


Figure II. 21 : Organigramme de la procédure expérimentale et de l'analyse des données.

II. 5. 2 Plans d'expériences adoptés

L'approche expérimentale est adoptée en vue d'étudier les interactions entre les différents facteurs et leurs effets sur les réponses en les changeant d'une façon commandée. Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on doit effectuer. Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables et représentatifs de la variation réelle du phénomène étudié.

II. 5. 2. 1 Terminologie

Lors de la mise en place de plans d'expériences, il est courant de désigner la grandeur d'intérêt à mesurer comme la "réponse", notée généralement y . Les "facteurs", quant à eux, sont les variables qui ont une influence sur cette réponse. Dans le domaine des plans d'expériences, le vocabulaire est standardisé et les termes "facteur" et "réponse" sont largement utilisés pour décrire ces concepts fondamentaux.

II. 5. 2. 2 Différents types de facteurs

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens.

Chaque facteur peut être :

- **Continu** : la pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.
- **Facteurs discrets** : au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.
- **Facteurs ordonnables** : il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.
- **Facteurs booléens** : les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

II. 5. 3 Méthodologie des plans d'expériences

Pour l'élaboration d'un plan d'expériences, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

- a) **La recherche des facteurs influents** : Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié : parmi tous les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse, lesquels ont une influence significative ? Que vaut cette influence ? et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ? Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences sont quantifiées, on passe au second stade

- b) **La modélisation** : Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe... et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, où n est le nombre d'expériences et k est le nombre des effets.
- c) **L'optimisation** : Une fois la forme graphique et analytique de notre réponse déterminée, il est essentiel de trouver les conditions expérimentales qui offrent les meilleurs résultats. Cette étape requiert une connaissance approfondie du phénomène étudié.

II. 5. 4 Démarche et plan d'expérience adopté

Les éléments du régime de coupe tel que la vitesse de coupe V_c , l'avance par tour f et la profondeur de passe a_p sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité de surface, l'effort de coupe spécifique, la puissance de coupe et le taux d'enlèvement de la matière représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode des plans des expériences. Nous nous servons des plans d'expériences pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. La planification des expériences et l'analyse statistique des résultats a été faite avec les logiciels Design-Expert 10 et MINITAB, ceux sont dédiés à la planification des expériences et l'analyse des résultats obtenus. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- Etablissement du but et des objectifs des essais.
- Sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses).
- Choix du type de plan d'expérience.
- Réalisation des essais.
- Détermination des facteurs influents.
- Modélisation rapide des réponses.
- Recherche des paramètres optimaux.
- Validation des résultats.

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

et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre cas, un plan d'expérience de Taguchi (L_9) a été adopté.

II. 5. 4. 1 Plan de Taguchi L_9

Le plan de Taguchi est un plan d'expériences qui vous permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés.

Pour ce plan, les paramètres d'entrée sont (V_c , a_p et f). Donc les essais ont été effectués avec 3 facteurs en utilisant le plan de Taguchi L_9 (3^3). La combinaison des différents paramètres est présentée dans le Tableau (II.4).

Tableau II. 4 : Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L_9).

N° d'essai	Vitesse de coupe V_c (m/min)	L'avance f (mm/rev)	Profondeur de coupe a_p (mm)
1	190	0,08	0,25
2	190	0,12	0,50
3	190	0,16	0,75
4	250	0,08	0,50
5	250	0,12	0,75
6	250	0,16	0,25
7	350	0,08	0,75
8	350	0,12	0,25
9	350	0,16	0,50

II. 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents équipements indispensables pour opérations d'usinage et de mesure. Nous avons également présenté la composition chimique réel des éprouvettes utilisées.

Enfin, nous avons défini la matrice de planification des expériences et les conditions expérimentales pour réaliser le tournage à sec de cet acier.

CHAPITRE III

ÉTUDE COMPARATIVE DES REVÊTEMENTS DES OUTILS DE COUPE

Dans ce troisième chapitre, notre objectif est d'appréhender le mieux possible les performances des différentes nuances de plaquettes en carbure métallique revêtues et non revêtu dans le cas du tournage de l'acier AISI4140. L'usure, les efforts de coupe, la rugosité de surface usinée (2D et 3D) sont les performances à évaluées à travers des essais de chariotage dans des conditions de coupe déterminées.

III. 1 Introduction

En se basant sur l'étude bibliographique (Chapitre I), il est constaté que différents facteurs interviennent dans la détermination des coûts de fabrication des pièces mécaniques. Parmi eux, l'usure en dépouille est considérée comme le principal critère affectant la durée de vie d'un outil de coupe [124]. En outre, elle est en relation directe avec plusieurs paramètres technologiques, tels que la précision d'usinage et la qualité de l'état de surface. Cela a conduit les auteurs à réaliser une analyse détaillée des différentes morphologies d'usure, de son taux de progression et des mécanismes d'endommagement subis, notamment lors de l'usinage avec des carbures métalliques revêtus de différentes couches et par plusieurs méthodes de dépôt (PVD, CVD, MTCVD, et non revêtus).

III. 2 Essais réalisés

Afin de vérifier la possibilité d'enregistrer l'influence des revêtements sur la coupe, une série d'essais a été réalisée pour connaître la capacité des différentes nuances de plaquettes en carbure dans le cas de tournage de l'acier AISI4140.

Ces essais préliminaires ont été faits dans les conditions suivantes :

- Trois types de revêtement (CVD, MTCVD, PVD) et une plaquette non revêtue
- $V_c=350\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.5\text{mm}$
- Temps de coupe de 5 minutes
- Usinage à sec

Les variables de sorties suivantes ont été enregistrées et déterminées :

- Efforts de coupe (table kistler)
- État de surface de la pièce usinée (2D et 3D)
- Usure de la plaquette

La Figure (III.1) montre le profil d'usure en dépouille selon la norme NF ISO 3685, tandis que la Figure (III.2), montre la procédure expérimentale suivie durant les essais. Le Tableau (III. 1) présente les conditions de coupe pour les essais paramétriques.

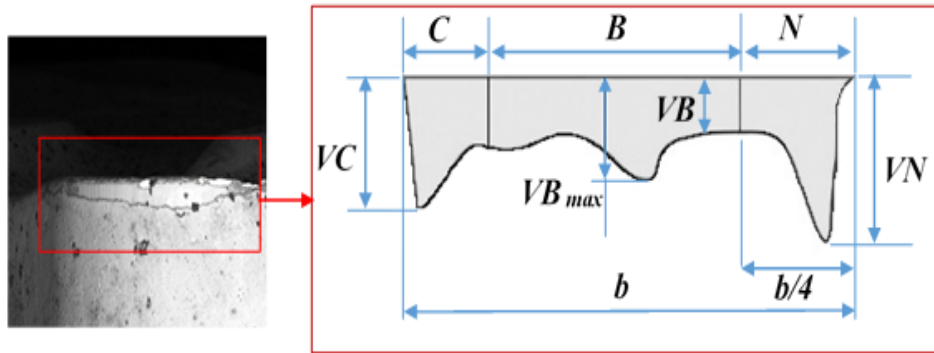


Figure III. 1 : Profil de l'usure en dépouille selon la norme NF ISO 3685

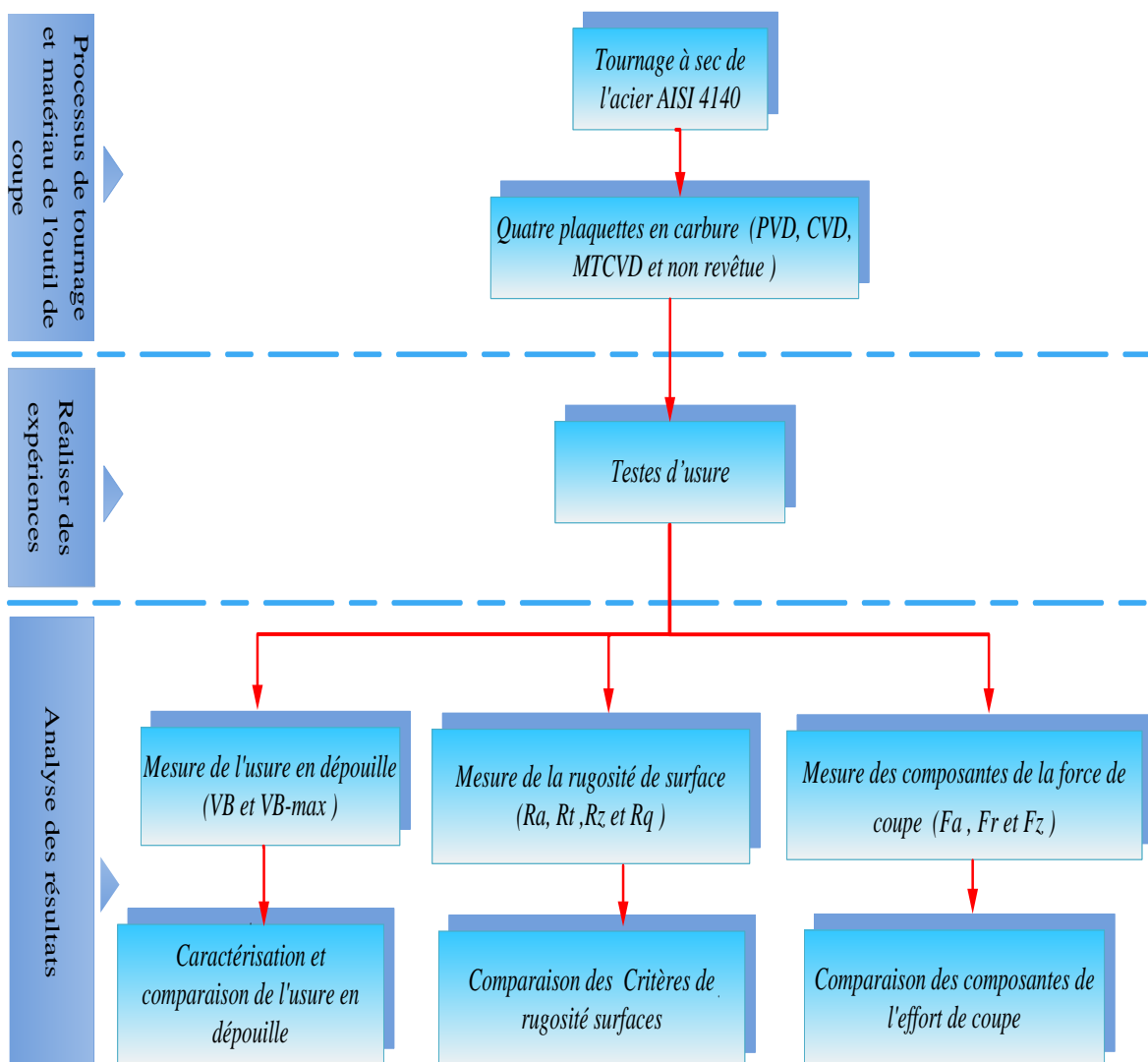


Figure III. 2 : Organigramme de la procédure expérimentale et de l'analyse des données

Tableau III. 1 : Paramètres de coupe des tests paramétriques.

Paramètres de coupe	
Vitesse de coupe V_c (m/min)	350 m/min
L'avance par tour f (mm/tr)	0,08 mm/tr
Profondeur de coupe a_p (mm)	0,5 mm
Temps d'usinage (Minutes)	05 Minutes

III. 3 Résultats

Le Tableau (III.2) montre les résultats expérimentaux en termes de critères de rugosité de surface (R_a , R_z , R_q and R_t), d'usure en dépouille (V_B) ainsi que son optimum (V_{B-max}) et enfin les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z) pour les quatre plaquettes de coupe utilisées (T1), (T2), (T3) et le carbure non revêtu (T4). Les résultats ont été obtenus à la fin des expériences, qui ont duré 5 minutes de tournage.

Tableau III. 2 : Résultats expérimentaux pour (F_a , F_r et F_z), (R_a , R_z , R_q et R_t) et (V_B et V_{B-max}).

Plaquette de coupe	Efforts de coupe			Critères de rugosité de surface				Usure en dépouille	
	F_a (N)	F_r (N)	F_z (N)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)	V_B (mm)	V_{B-max} (mm)
T1	85,76	124,44	135,24	0,44	3,04	0,57	3,19	0,069	0,105
T2	95,84	138,74	141,48	0,61	3,79	0,74	4,03	0,140	0,167
T3	106,8	151,12	152,83	0,72	4,41	0,89	5,51	0,306	0,378
T4	152,02	194,36	239,04	2,04	8,19	2,36	8,68	0,524	2,818

III. 3. 1 Analyse de l'usure des outils

La Figure (III.3) représente l'usure (V_B and V_{B-max}) pour les quatre outils de coupe étudiés. Il est clair que les deux plaquettes de coupe (T1) et (T2) présentent une usure plus faible par rapport aux plaquettes (T3) et (T4). La plaquette CVD (T1) présente une usure minimale. Cette différence est principalement due aux propriétés physiques des matériaux de revêtement utilisés, la présence de la couche de revêtement (Al_2O_3) offre une protection maximale contre la diffusion de la chaleur vers le substrat et réduit la température dans la zone de coupe, ce qui offre également une protection maximale contre l'usure [125, 126]. La plaquette à revêtement

bicouche (TiCN-Al₂O₃) présente une résistance à l'usure relativement plus faible que la plaquette à revêtement multicouche (TiN/Al₂O₃/TiCN), la raison étant la présence de la couche de revêtement (TiCN). Ce revêtement appliqué par la technique CVD utilise une température de dépôt moyenne et offre donc une meilleure résistance à l'usure mécanique ainsi qu'une bonne adhérence au substrat. Le taux d'usure de dépouille de la plaquette monocouche (T3) atteint environ 2 fois celui de la plaquette bicouche (T2) et 4 fois celui de la plaquette multicouche (T1). Ceci est attribué aux propriétés thermiques de la couche de revêtement (TiN) qui facilite la diffusion de la chaleur vers le substrat de l'outil et diminue ainsi la dureté de la couche de revêtement (TiN), conduisant à une usure accrue de l'outil. La plaquette de coupe non revêtue (T4) présente le taux le plus élevé d'usure sur la surface en dépouille. Cette usure élevée de cette plaquette de coupe peut s'expliquer par l'absence de protection car toutes les autres plaquettes étaient revêtues.

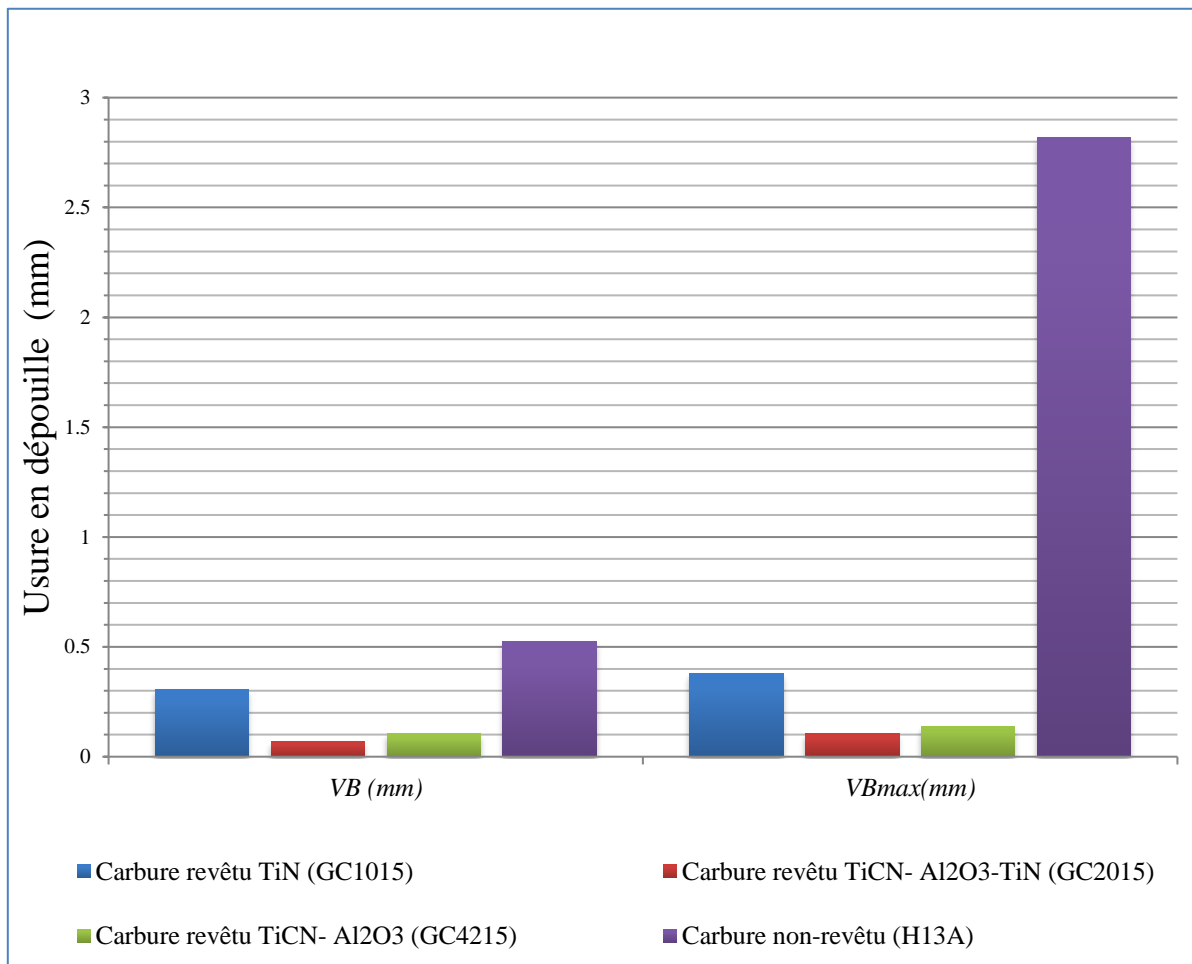


Figure III. 3 : Comparaison entre les différentes plaquettes en termes d'usure en dépouille à $V_c=350\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$, $a_p=0,5\text{mm}$, après 5 min de tournage.

La comparaison en termes de ratios de l'usure (V_B) illustre clairement la différence quantitative entre les plaquettes testées. Le rapport (V_{B-T2}/V_{B-T1}) a été trouvé 2,02 tandis que les rapports (V_{B-T3}/V_{B-T1}) et (V_{B-T4}/V_{B-T1}) ont atteint 4,43 et 7,59 respectivement. Par conséquent, et sur la base des résultats ci-dessus, on peut conclure que la plaquette CVD (T1) est la plus adaptée à l'usinage de l'acier AISI 4140 en termes d'usure. De plus, le triple revêtement ($TiCN/Al_2O_3/TiN$) CVD a prouvé son efficacité en termes de protection contre l'usure par rapport aux autres revêtements ($TiCN/Al_2O_3$ -MTCVD et TiN -PVD) dans les conditions de coupe utilisées.

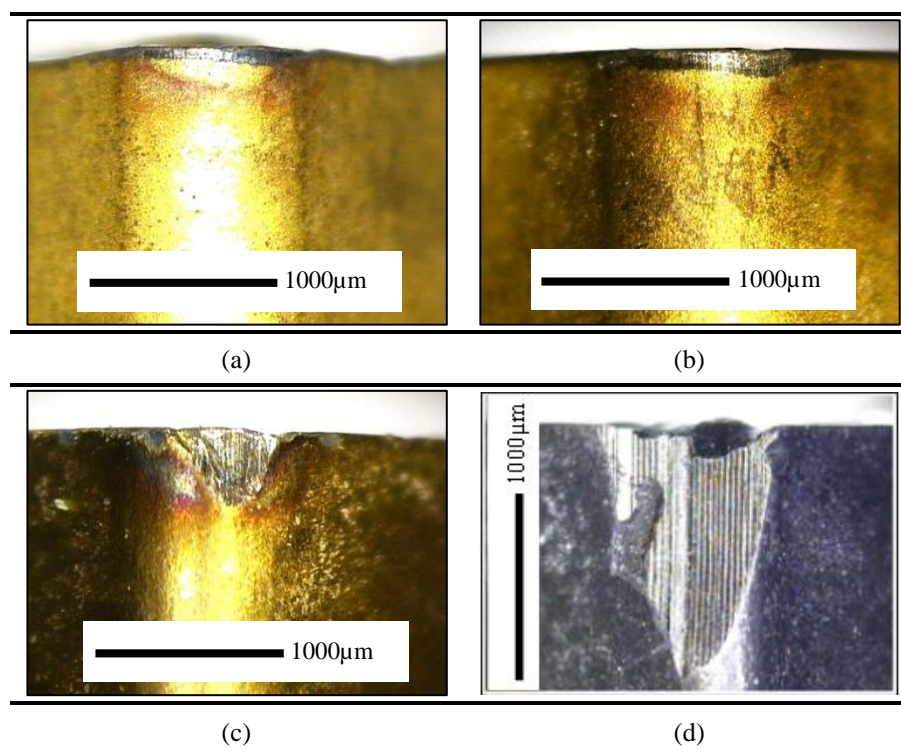


Figure III. 4 : Morphologies de l'usure des plaquettes de coupe utilisées. (a) T1 : $TiCN/Al_2O_3/TiN$, (b) T2: $TiCN/Al_2O_3$, (c) T3: TiN , (d) T4: non revêtue.

La Figure (III.4) expose la morphologie de l'usure sur la surface en dépouille des plaquettes utilisées. Les usures des plaquettes CVD (T1) et (T2) sont illustrées dans les Figures (III. 4(a)-(b)). On peut observer que l'usure est régulière et se manifeste par l'apparition d'une bande brillante est striée parallèle à l'arête de coupe. La Figure (III.4(c)) montre l'usure de dépouille de la plaquette PVD (T3). Un petit effondrement de la pointe de l'outil est observé ainsi que de petites rainures sur le bord de la plaquette, ce qui permet de conclure à la présence d'une usure abrasive. Enfin, la plaquette non revêtue (T4) présente une forte usure abrasive sur sa face de

dépouille qui conduit à l'effondrement du nez et précipite une défaillance catastrophique de l'arête de coupe ainsi qu'une perte de précision dimensionnelle (Figure III. 4(d)).

Afin de mieux comprendre le comportement et les mécanismes d'usure lors des opérations d'usinage, des micrographies MEB ont été capturées avec le même grossissement après 5 minutes d'usinage pour les différentes plaquettes de coupe utilisées. Elles sont présentées dans les Figures (III.5-8) et révèlent que la surface de la coupe, la surface de dégagement et l'arête de coupe sont les trois régions où l'usure se produit. Pour les plaquettes (T1) et (T2), représentées sur les Figures (III.5 et III.6), l'usure est régulière et l'abrasion est le principal mécanisme d'usure observé. Ceci est essentiellement le résultat de la présence de rainures sur toute la longueur de la bande d'usure (VB). Ces rainures sont principalement produites par les particules dures présentes dans la structure du matériau de la pièce utilisée [127].

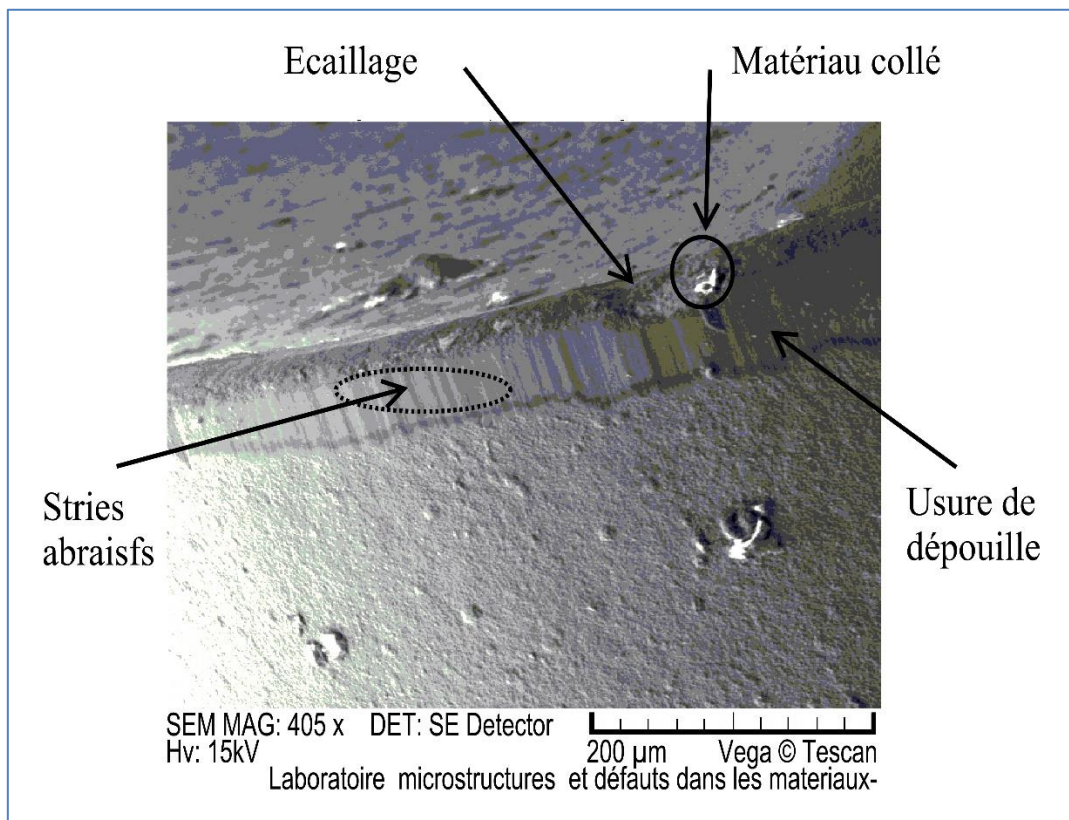


Figure III. 5 : Micrographie MEB de l'usure en dépouille de la plaquette CVD ($\text{TiCN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$) à $V_c = 350 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/rev}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$ et $t = 5 \text{ min}$.

Elles ne sont pas aussi profondes que celles observées sur d'autres plaquettes de coupe et ceci est le résultat de la présence de couches de revêtement qui agissent comme une protection

contre l'usure abrasive. L'usure par adhérence est également observée pour les deux plaquettes (T1) et (T2), ce qui a été confirmé par les traces de matériau collé à la surface de l'outil (voir les images MEB des plaquettes de coupe (T1) et (T2) des Figures (III. 5 et 6)). Ceci est la conséquence des hautes températures produites pendant l'usinage ainsi que des propriétés physico-mécaniques du matériau à usiner.

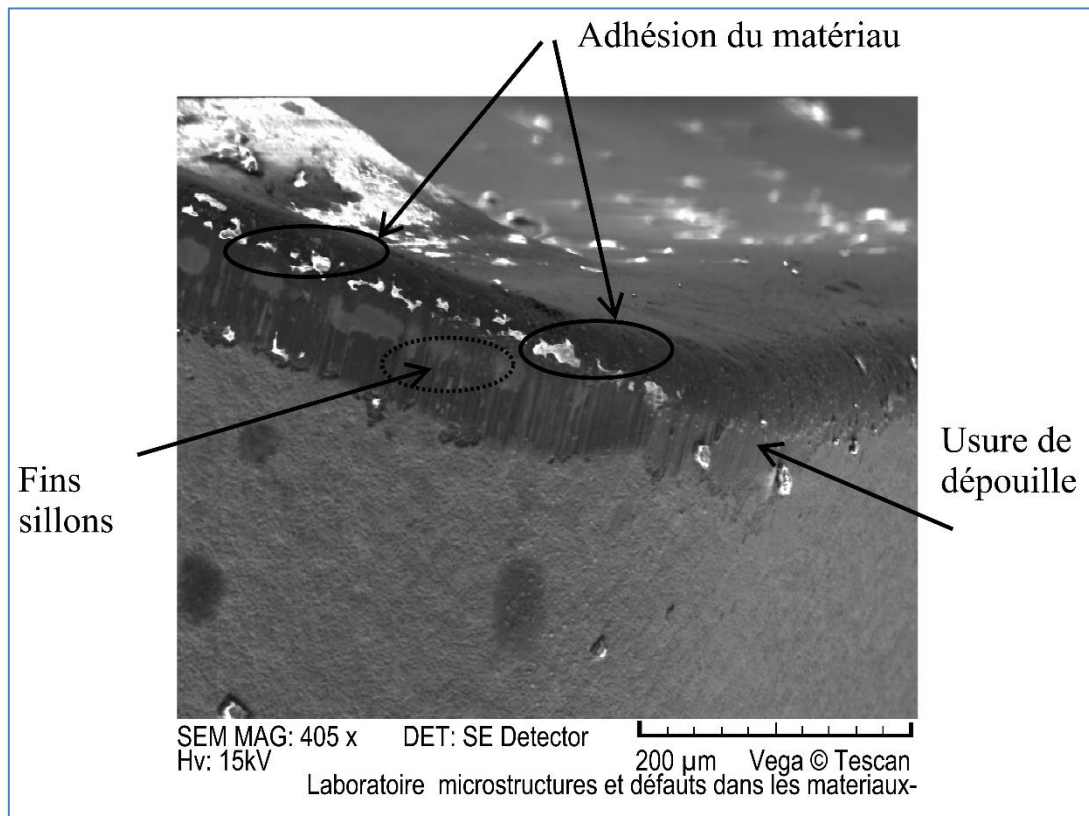


Figure III. 6 : Micrographie MEB de l'usure en dépouille de la plaquette MTCVD ($TiCN/Al_2O_3$) à $V_c = 350m/min$, $f = 0.08mm/tr$, $a_p = 0.5mm$ et $t = 5 min$

La Figure (III.7) montre l'illustration MEB de l'usure de la plaquette de coupe PVD (T3). De nombreuses rainures abrasives sont clairement observées sur la face de dépouille de l'outil, confirmant que l'usure abrasive est le mécanisme d'usure prédominant. Une usure adhésive est également présente sur les surfaces de l'outil et on observe également un écaillage sur la pointe de la plaquette, probablement dû à des contraintes élevées.

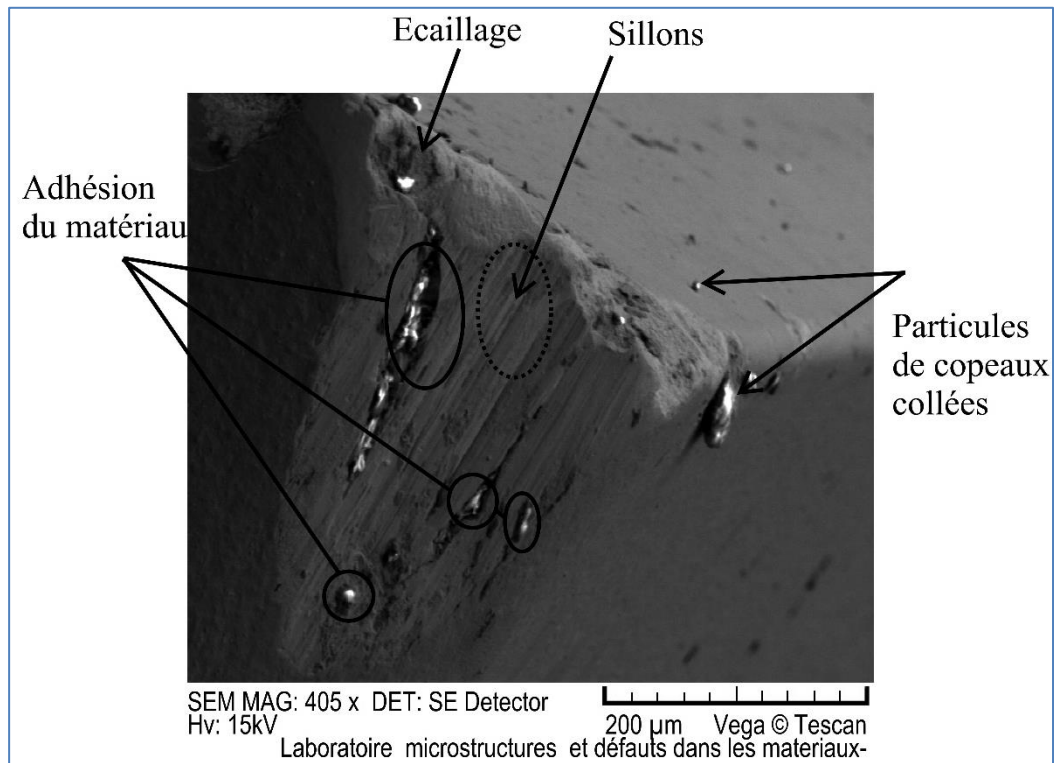


Figure III. 7 : Micrographie MEB de l'usure en dépouille de la plaquette PVD (TiN) à $V_c = 350 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$ et $t = 5 \text{ min}$.

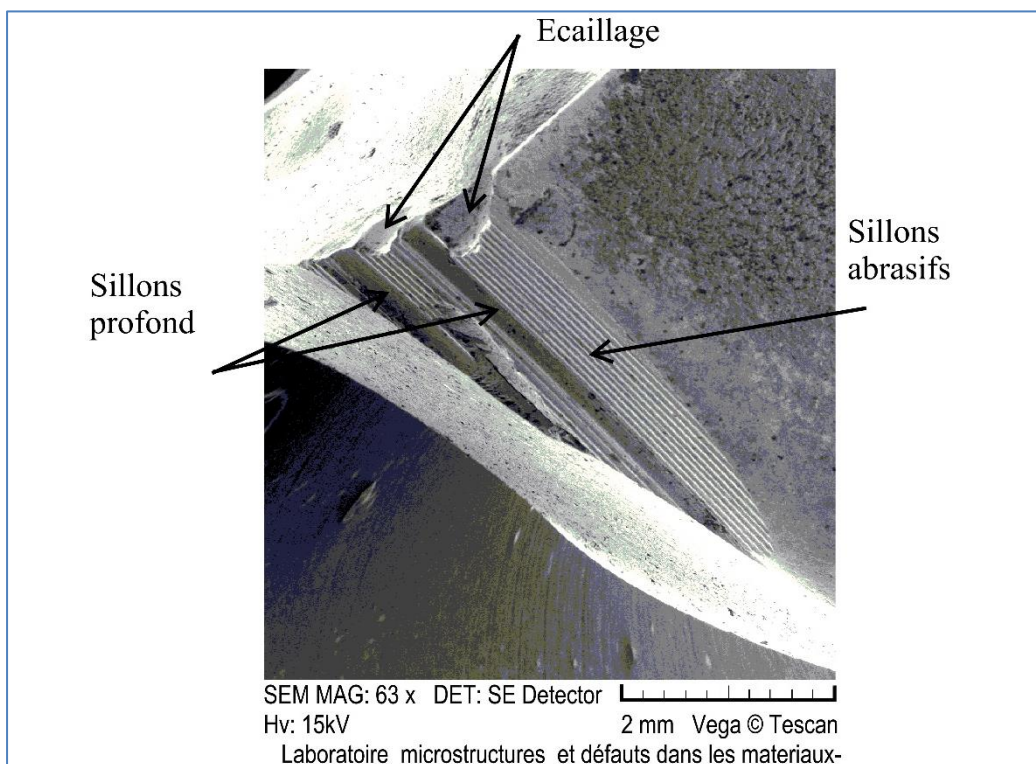


Figure III. 8 : Micrographie MEB de l'usure en dépouille de la plaquette non revêtue (T4) à $V_c = 350 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$ et $t = 5 \text{ min}$

Dans la Figure (III.8), une usure abrasive élevée est clairement observée sur la face de dépouille de la plaquette non revêtue (T4). Elle est principalement le résultat de l'absence de revêtement. L'écaillage est également observé sur son bord de coupe et est la conséquence de la faible dureté de la plaquette. Une défaillance catastrophique de la pointe de l'outil est produite à la fin du temps d'usinage. Il s'agit probablement de la conséquence de la fatigue mécanique générée par l'augmentation de l'effort de coupe tangentiel et des températures élevées sur la pointe de l'outil.

L'analyse des micrographies d'usure présentées dans les Figures (III. 5-8), permet de conclure que les principaux mécanismes d'usure sont représentés par l'abrasion, l'adhésion et l'écaillage.

III. 3. 2 Analyse de l'effort de coupe

Les résultats concernant les trois composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r and F_z) sont représentés dans la Figure (III.9) pour les quatre plaquettes de coupe testées. Il est clair que la composante tangentiel de l'effort de coupe (F_z) est celle qui atteint la valeur maximale par rapport aux deux composantes (F_a and F_r), tandis que la plaquette CVD (T1) génère la plus faible composante tangentiel (F_z)

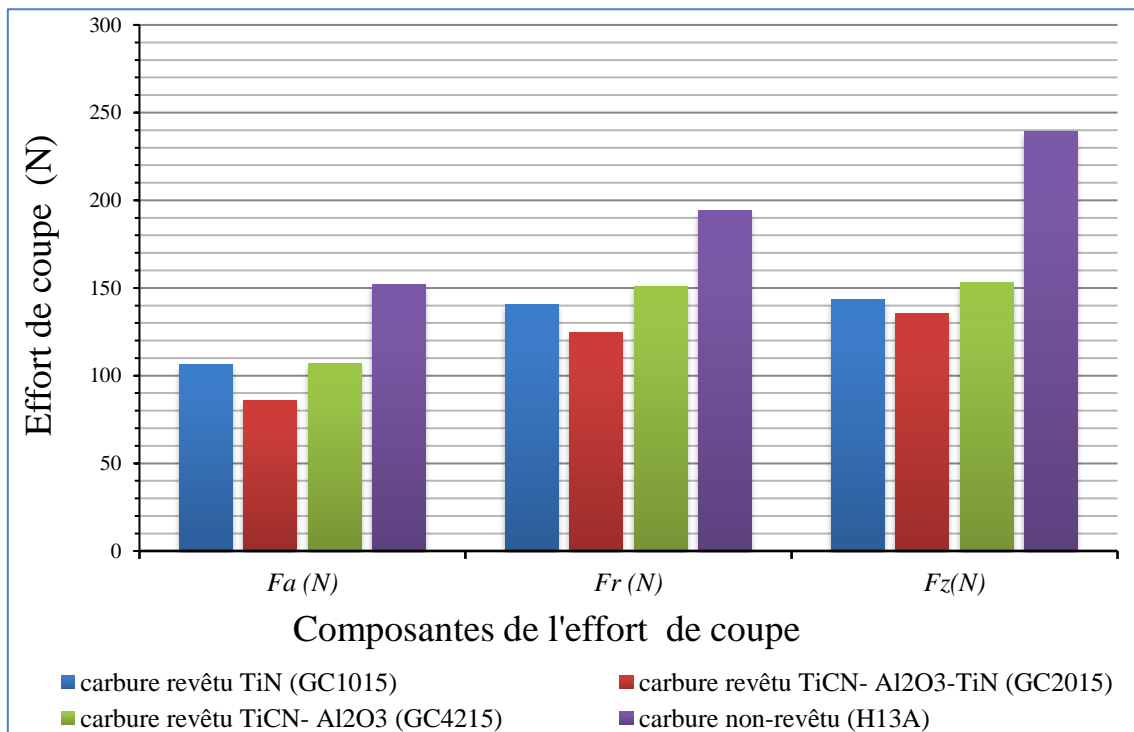


Figure III. 9 : Comparaison des différentes plaquettes en termes de composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r and F_z) à $V_c = 350$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, $a_p = 0,5$ mm et après 5 min de tournage.

La comparaison entre les quatre matériaux de coupe en termes de rapports d'effort de coupe tangentiel illustre clairement la différence entre eux. Le rapport (F_{z-T2}/F_{z-T1}) est trouvé égal à 1,05 tandis que celui de (F_{z-T3}/F_{z-T1}) atteint 1,13 et enfin (F_{z-T4}/F_{z-T1}) prend la valeur maximale de 1,77. Par conséquent et en termes d'effort de coupe, la plaquette de coupe CVD (T1) s'avère être la plus adaptée pour l'usinage de l'acier AISI 4140. Cependant, les forces de coupe pour les quatre plaquettes testées étaient généralement proches les unes des autres car la section de coupe est la même. Par conséquent, le revêtement fait la différence en termes d'efforts de coupe pour les différentes plaquettes testées. L'évolution de l'usure de dépouille entraîne une augmentation de la surface de contact entre l'outil et la pièce. La conséquence est l'augmentation des efforts de friction et par conséquent des efforts de coupe. Des résultats comparatifs ont été trouvés par keblouti et autres [128] lors du tournage de l'acier AISI4140.

III. 3. 3 Analyse de rugosité de surface (2D)

La Figure (III.10) compare les quatre plaquettes de coupe étudiées en fonction des quatre critères de rugosité de surface (R_a , R_t , R_q and R_z) enregistrés.

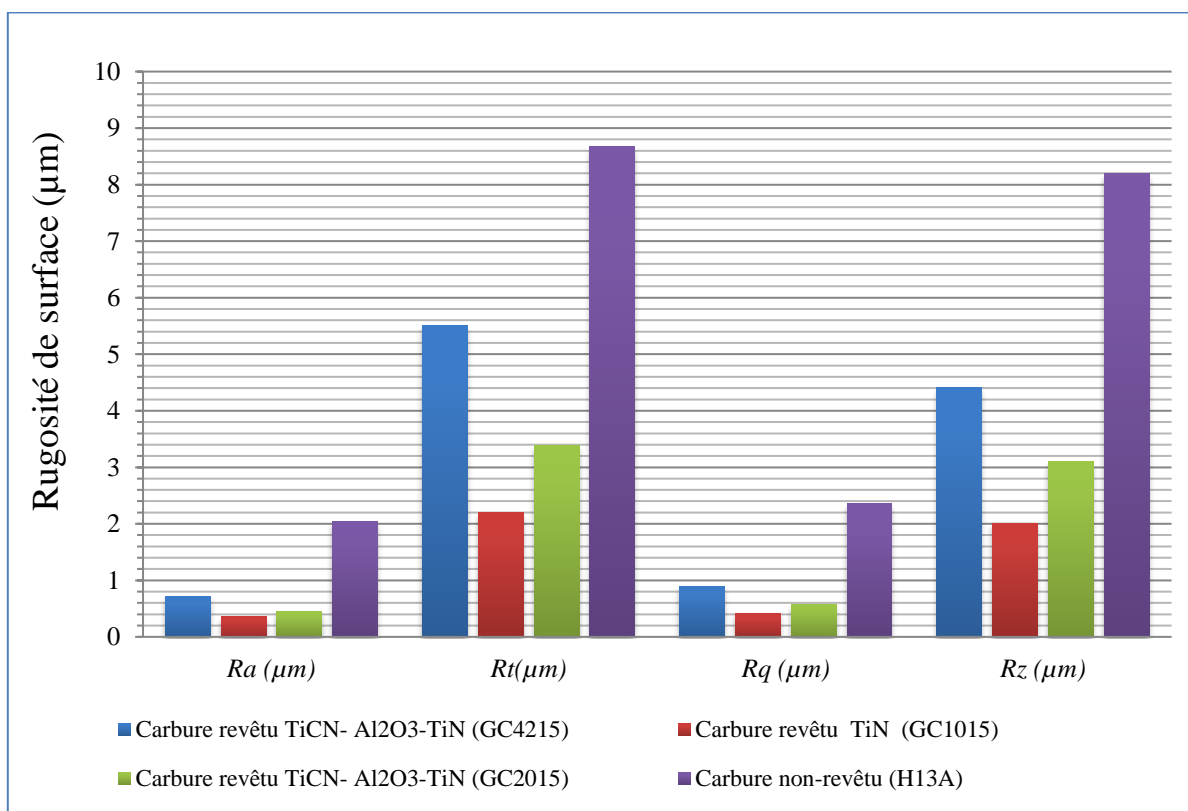


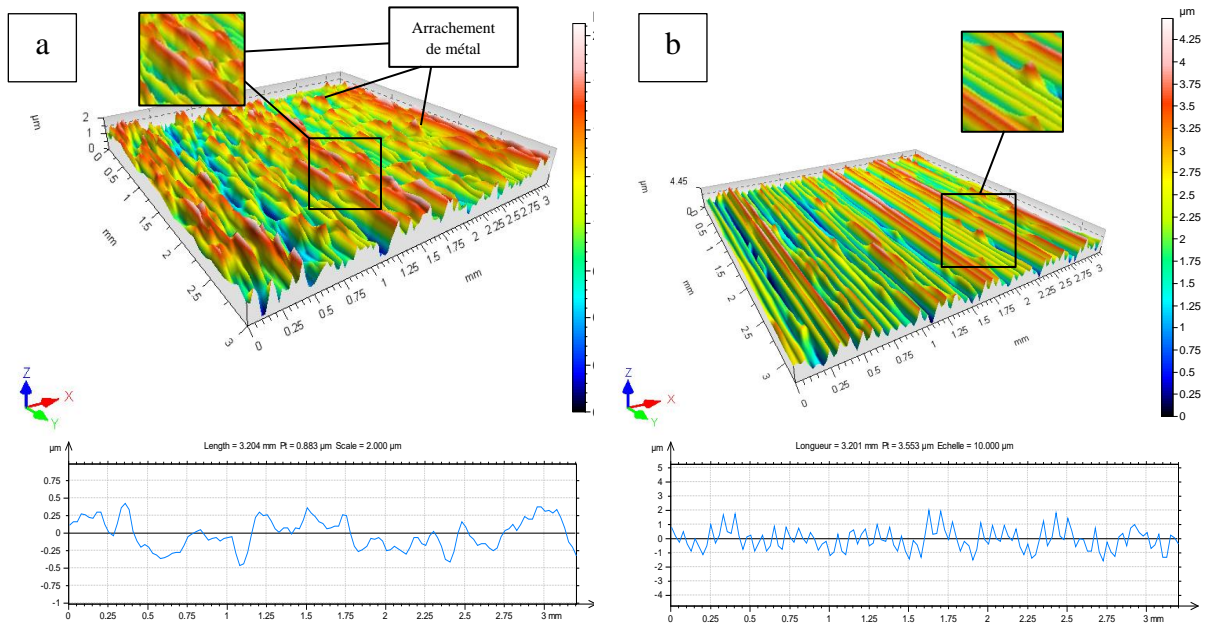
Figure III. 10 : Comparaison entre différentes plaquettes en termes critères de rugosité de surface (R_a , R_t , R_q et R_z), à $V_c = 350 \text{ m/min}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$.

Les résultats indiquent clairement que l'usinage avec la plaquette à revêtement CVD (T1) conduit à une rugosité de surface plus faible pour les quatre critères cités ci-dessus. En termes de (R_a), le rapport (R_{a-T2}/R_{a-T1}) est trouvé à 1,38 tandis que (R_{a-T3}/R_{a-T1}) atteint 1,64 et (R_{a-T4}/R_{a-T1}) atteint un maximum de 4,63. En réalité, la rugosité de surface est fonction de plusieurs facteurs [129], en plus des paramètres de coupe et de la géométrie de coupe des plaquettes [130], l'usure de l'outil qui a une influence considérable sur la rugosité de surface [131]. Comme les plaquettes utilisées ont une géométrie de coupe identique et qu'elles ont été testées avec les mêmes paramètres de coupe, leurs effets ne seront pas étudiés.

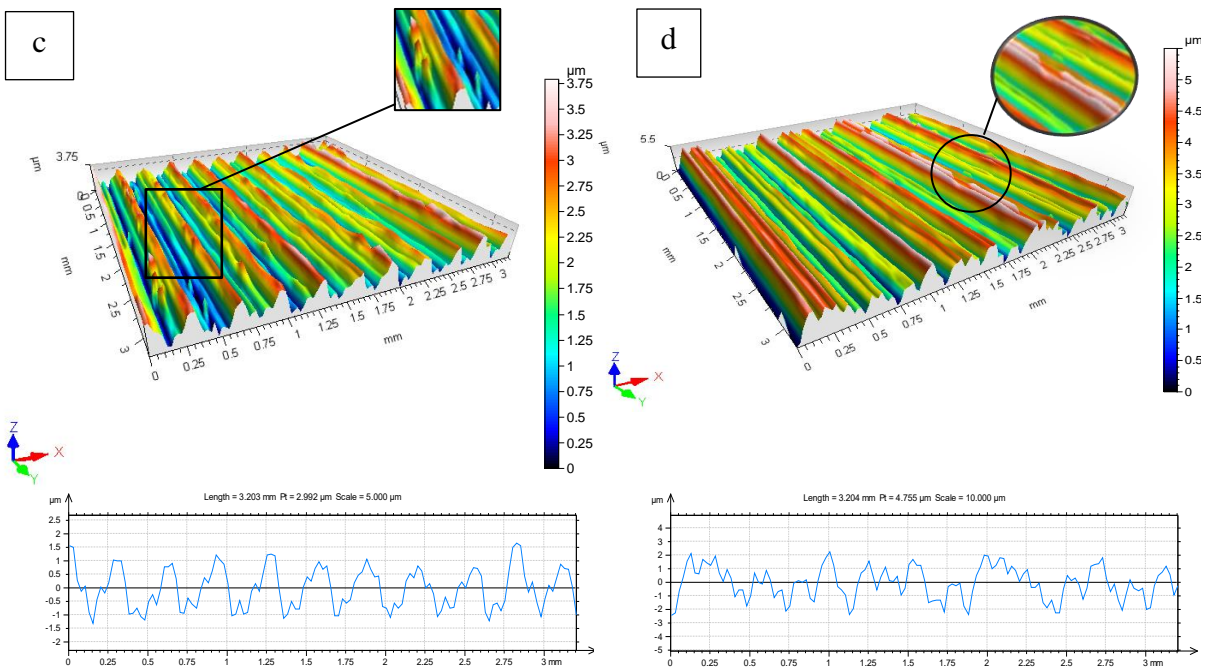
Selon la comparaison faite précédemment de l'usure en dépouille des quatre plaquettes utilisées, on peut clairement voir qu'il y a une différence dans le niveau d'usure entre les deux premières plaquettes (T1) et (T2) par rapport aux troisième et quatrième plaquette de coupe (T3) et (T4). L'usure en dépouille de la plaquette (T3) est environ deux fois supérieure à celle de la plaquette (T2) et quatre fois supérieure à celle de la plaquette (T1), tandis que la plaquette (T4) présente l'usure la plus élevée. Cette différence correspond à une rugosité de surface (R_a) avec la valeur de (0,069 μm) pour la plaquette (T1), la valeur de (0,140 μm) pour la plaquette (T2), la valeur de (0,72 μm) pour la plaquette (T3) et la valeur de (2,04 μm) pour la plaquette (T4). L'augmentation de l'usure en dépouille (V_B) conduit à une augmentation de la zone de contact entre l'outil et la pièce qui déstabilise le processus d'usinage conduisant à une détérioration de la rugosité de surface. Ce résultat conduit à dire que le suivi de l'usure en dépouille est essentiel dans l'usinage car son évolution détériore l'état de surface. Des résultats similaires sur l'effet de l'usure sur la rugosité de surface ont été rapportés par plusieurs chercheurs [31, 132, 133]

III. 3. 4 Analyse de la rugosité de surface (3D)

Dans cette partie, nous avons présenté et analysé la topographie de surface 3D obtenue lors de l'usinage de l'acier AISI4140 avec quatre outils de coupe (GC2015, GC4215, GC1015 et H13A) dont les conditions de coupe adoptées sont : $V_c = 350$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr et $a_p = 0,5$ mm. Les profils ont été obtenus à l'aide d'une plateforme optique de métrologie modulaire Alitsurf 500 avec une vue isométrique



ISO 4287			ISO 4287		
Amplitude paramètres - profil de rugosité			Amplitude paramètres - profil de rugosité		
R_a	0,099 μm	Gaussian filter, 0,8mm	R_a	0,424 μm	Gaussian filter, 0,8mm



ISO 4287			ISO 4287		
Amplitude paramètres - profil de rugosité			Amplitude paramètres - profil de rugosité		
R_a	0,555 μm	Gaussian filter, 0,8mm	R_a	0,733 μm	Gaussian filter, 0,8mm

Figure III. 11 : Topographies 3D des surface usinées avec ; a) GC2015, b) GC4215, c) GC1015 et d) H13A

La Figure (III.11) montre les profils de topographie 3D représentative des surfaces usinées obtenus avec les quatre outils de coupe. En effet, les graphes obtenus sont caractérisés par des pics et des vallées bien définis permettant d'évaluer la qualité des surfaces. Pendant le processus de tournage, la surface générée se présente sous forme d'un sillon hélicoïdal, résultant de la forme du bec de l'outil et du mouvement hélicoïdal de la pièce-outil engendré par la machine-outil utilisée.

En ce qui concerne les conditions de coupe, l'utilisation d'une avance élevée peut engendrer une mauvaise rugosité de surface. En effet, lorsque l'avance (f) augmente, la distance entre les pics et les vallées devient plus importante, ce qui entraîne une dégradation de la qualité de surface. Toutefois, l'utilisation de becs à grand rayon d'arrondi peut significativement améliorer la qualité de surface en écrasant les aspérités. Des résultats comparatifs ont été trouvés par Zerti et autre [134] lors du tournage de l'acier AISI D3.

En ce qui concerne les types d'outil, lors de l'usinage à sec, la forme réelle de la surface générée par l'outil a été affectée par des perturbations et des déchirures, en plus d'avoir des pics tranchants, comme le montrent la Figure (III.11).

III. 4 Conclusion

Les résultats trouvés dans ce chapitre ont apporté des informations intéressantes sur le comportement d'usinabilité de l'acier AISI 4140 avec quatre plaquettes de coupe en carbure métallique ayant différents revêtements par différentes méthodes (CVD(GC2015), MTCVD(GC4215), PVD (GC1015) et non revêtue (H13A)). Il ressort d'après l'analyse des résultats obtenus que :

- La plaquette de coupe CVD (T1) produit une usure plus faible par rapport à ses homologues testés, la valeur maximale de (V_B) étant affichée par la plaquette non revêtue (T4). Cela illustre le poids du matériau de revêtement, en particulier la couche de Al_2O_3 , qui joue un rôle important dans la réduction de la quantité de chaleur générée pendant l'usinage.
- En termes d'usure, le rapport (V_{B-T2}/V_{B-T1}) atteint 2,02 tandis que (V_{B-T3}/V_{B-T1}) atteint 4,43 et (V_{B-T4}/V_{B-T1}) arrive à 7,59. Ceci montre clairement l'efficacité des deux plaquettes de coupe T1 et T2 en termes d'usure.
- L'analyse des images SEM représentant l'usure des dépouille des plaquettes de coupe testées permet de conclure que l'abrasion, l'adhésion et l'écaillage sont les mécanismes d'usure dominantes observés pour les trois plaquettes de coupe revêtues (T1), (T2) et (T3) alors que seuls l'abrasion et l'écaillage sont les dominants observés pour le cas de la plaquette non revêtue (T4).
- La valeur la plus faible pour la rugosité de surface a été présentée par la plaquette de coupe (T1-CVD) alors que la plus importante a été produite pour la plaquette non revêtue (T4). Les rapports (R_{a-T2}/R_{a-T1}), (R_{a-T3}/R_{a-T1}) et (R_{a-T4}/R_{a-T1}) ont atteint 1,38, 1,63 et 4,63 respectivement. Par conséquent, on peut conclure que la plaquette de coupe revêtue CVD T1 ($TiCN/Al_2O_3/TiN$) est plus performante que ses trois homologues en termes de rugosité de surface.
- Les cartes topographiques tridimensionnelles de la surface usinée obtenue par la plate-forme optique de métrologie modulaire à une grande importance dans l'étude de la rugosité de surface, elle permet de visualiser les topographies des surfaces usinées en 3D et d'identifier clairement les piques et les vallées.
- L'enquête a montré la proximité des efforts de coupe (F_a , F_r et F_z) pour les quatre plaquettes de coupe testées. La raison de cette proximité est l'utilisation de la même section de coupe. L'effort coupe tangentiel (F_z) est la composante la plus importante. L'effort de coupe le plus faible est générée par l'utilisation de la plaquette CVD (T1).

Ceci est confirmé par les résultats des rapports de l'effort tangentiel (F_z) obtenus et identifiées comme $(F_{z-T2}/F_{z-T1}) = 1,05$, $(F_{z-T3}/F_{z-T1}) = 1,13$ et enfin $(F_{z-T4}/F_{z-T1}) = 1,77$. Par conséquent et en termes d'efforts de coupe, le matériau à triple couches de revêtement ($TiCN-Al_2O_3-TiN$) est identifié comme le matériau leader.

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUES EN UTILISANT L'APPROCHE RSM

Ce chapitre présente une étude statistique basée sur l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression afin de déterminer les modèles mathématiques qui relient les facteurs de coupe (V_c , f et a_p) aux différents paramètres de sortie étudiés, tels que les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), la rugosité de surface (R_a), la puissance de coupe (P_c), la pression de coupe (K_s) et le taux d'enlèvement de matière (MRR). Le plan d'expérience utilisé est celui de Taguchi L_9

IV. 1 Introduction

Ce chapitre porte sur la détermination des modèles mathématiques des différents paramètres technologiques lors du processus de coupe en tournage de l'acier 42CrMo4v, en utilisant trois plaquettes de coupe en carbure revêtues avec différentes techniques : une monocouche appliquée par PVD (TiN), une multicouche appliquée par MTCVD ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}(\text{C},\text{N})$) et une multicouche appliquée par CVD ($\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}(\text{C},\text{N})$).

Les modèles trouvés permettront d'exprimer les relations entre les éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p) et les paramètres technologiques étudiées (la rugosité de surface (R_a), les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), la puissance de coupe (P_c), la pression de coupe (K_s) et le taux d'enlèvement de matière (MRR)). La corrélation entre les entrées et les sorties a été établie à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (RSM), l'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisé afin de déterminer l'influence (contribution %) des facteurs d'usinage sur les paramètres de sortie. De plus des présentations graphiques en 3D des surfaces de réponse étudiées ont été réalisées par l'utilisation des trois logiciels statistique « Minitab 18, Design-Expert 10 et Matlab 2015 ». Enfin, des tests de confirmation ont été effectués pour évaluer l'adéquation des modèles mathématiques prédits. L'ensemble des étapes réalisées dans cette partie sont présentés dans la Figure (IV.1).

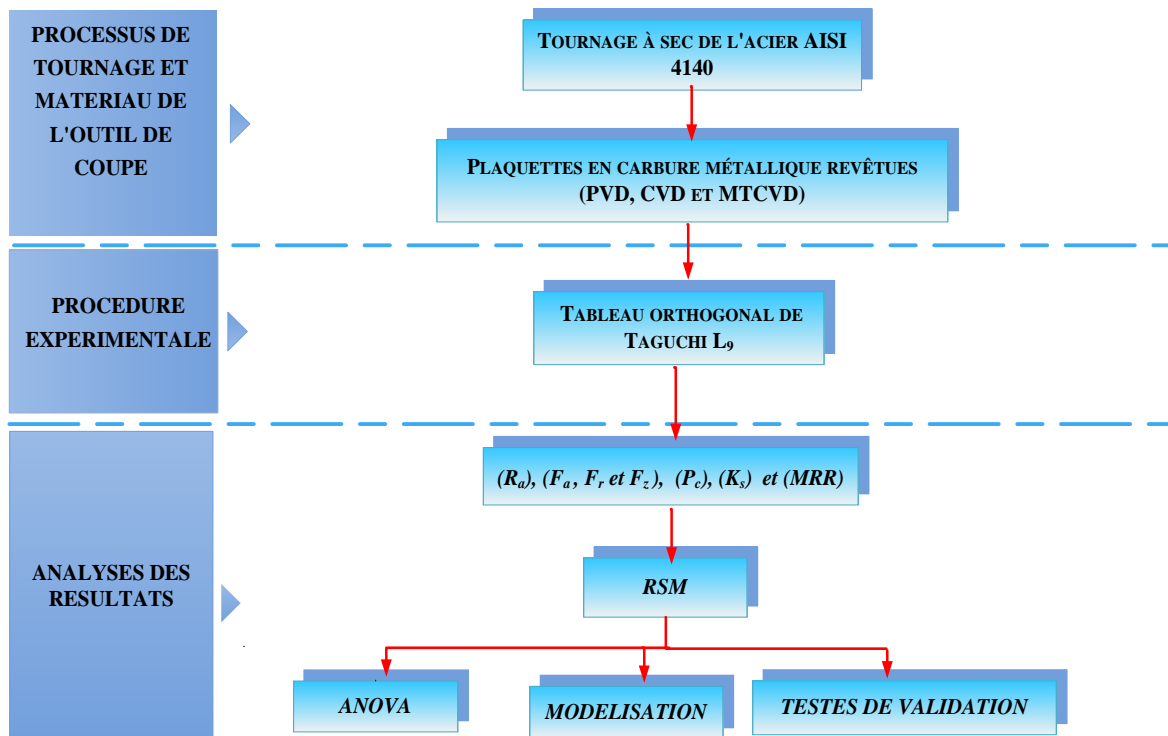


Figure IV. 1 : Organigramme de la procédure expérimentale et de l'analyse des données.

IV. 2 RSM expérimental design

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est une approche dynamique et un outil important dans la planification d'expériences (DOE). Elle est utilisée pour établir une relation mathématique entre les paramètres d'entrée indépendants du processus et les réponses souhaitées en sortie. La RSM est une technique statistique puissante qui a été largement utilisée pour la prédiction et l'optimisation des paramètres de coupe [135, 136].

Dans cette étude, la méthode de surface de réponse (RSM) a été utilisée pour évaluer les performances du processus de coupe en termes d'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), de rugosité de surface (R_a), de puissance de coupe (P_c), d'effort spécifique de coupe (K_s) et de taux d'enlèvement de matière (MRR). La RSM est un ensemble de techniques mathématiques et statistiques basées sur la conception expérimentale, permettant de modéliser et de déterminer l'importance des variables d'entrée indépendantes (V_c , f et a_p) sur les réponses ciblées (F_a , F_r et F_z), (R_a), (P_c), (K_s) et (MRR). Elle est également un outil précieux pour l'optimisation [137].

Cette méthode comprend six étapes qui peuvent être résumées comme suit [138]:

- (1) définir les variables d'entrée et les réponses de sortie requises,
- (2) sélectionner un plan d'expérience,
- (3) effectuer une analyse de régression avec des modèles de régression linéaire multiple MSR comme indiqué dans les Équations (IV.1 et 2) [139],
- (4) effectuer une ANOVA pour les variables d'entrée indépendantes afin de spécifier les paramètres qui affectent significativement la réponse,
- (5) déterminer le statut des modèles de régression linéaire multiple de RSM,
- (6) optimiser et effectuer des expériences de confirmation.

Dans cette étude, la relation entre l'avance par tour (f), la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de coupe (a_p) avec la sortie Y est donnée par l'équation (IV.1) :

$$y = \phi(V_c, f, a_p) \quad \text{(IV.1)}$$

Où ϕ est la fonction de réponse et Y est l'usinabilité souhaitée telle que (F_a , F_r et F_z), (R_a), (P_c), (K_s) et (MRR). L'approximation de Y est proposée en utilisant une régression

polynomiale linéaire multiple, qui convient pour étudier les effets d'interaction des paramètres d'entrée (V_c, f et a_p) sur les sorties (F_a, F_r et F_z), (R_a), (P_c), (K_s) et (MRR). Le modèle linéaire multiple de (y) peut-être écrit comme suit (Équation **(IV.2)**) :

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i,j} b_{ij} X_i X_j \quad \text{(IV.2)}$$

Où b_0 est une constante de l'équation de régression, b_i et b_{ij} sont respectivement les coefficients des termes linéaires et d'interaction [140]. X_i et X_j représentent les paramètres d'usinage étudiés, tels que la profondeur de coupe (a_p), l'avance par tour (f) et la vitesse de coupe (V_c).

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation **(IV.3)**.

$$R^2 = \frac{\sum (y_j - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad \text{(IV.3)}$$

Avec :

Y_i : Valeur de la réponse calculée à la i ème expérience.

\bar{Y}_j : Valeur mesurée à la j ème expérience.

\bar{y} : Valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse des variances (*ANOVA*) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. L'*ANOVA* permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés ($R_a, F_a, F_r, F_z, K_s, P_c$ et MRR).

IV. 2. 1 Plan expérimental

Dans cette étude, la conception expérimentale a été réalisée à l'aide d'un réseau orthogonal L_9 de Taguchi (OA). Trois niveaux de vitesse de coupe, d'avance et de profondeur de coupe ont été testés, les niveaux de chaque facteur ont été choisis dans la gamme recommandée par le fabricant d'outils de coupe (Sandvik). De plus, ces choix sont basés sur le concept d'appariement (du couple) outil-matériau et permettent de clarifier l'effet de ces paramètres

sur les réponses visées (R_a , F_a , F_r , F_z , P_c et MRR). Les paramètres de coupe et leurs niveaux ainsi que le plan expérimental pour le réseau orthogonal de taguchi L_9 sont présentés dans les Tableaux (IV.1) et (IV.2) respectivement.

Tableau IV. 1 : Niveaux de variation des facteurs

Niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance par tour f (mm/tr)	Profondeur de coupe ap (mm)
1	190	0.08	0.25
2	250	0.12	0.50
3	350	0.16	0.75

Tableau IV. 2 : Taguchi Orthogonal Array Design $L_9(3^*2)$.

$L_9(3^*2)$	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Les résultats expérimentaux obtenus selon le plan expérimental appliqué sont présentés dans les deux Tableaux (IV. 3 et 4). Ces résultats présentent la rugosité de surface (R_a), les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), la puissance de coupe (P_c), l'effort spécifique de coupe (K_s) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) lors de l'utilisation de trois plaquettes en carbure T1 (TiCN- Al_2O_3 -TiN), T2 (Al_2O_3 -Ti(C,N)) et T3 (TiN). L'effort de coupe tangentiel a été mesuré au cours de l'opération d'usinage, l'effort spécifique de coupe (K_s) et la puissance de coupe (P_c) ont été calculées à partir des Equations (IV.4) et (IV.5), respectivement.

$$K_s = \frac{F_z}{S} = \frac{F_z}{f \times ap} \quad (IV.4)$$

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (IV.5)$$

Où K_s est l'effort spécifique (MPa), F_z est l'effort tangentiel (N), et S est la surface de cisaillement (mm^2), P_c est la puissance de coupe (W), f est l'avance par tour (mm/tr), a_p est la profondeur de coupe (mm) et V_c est la vitesse de coupe (m/min).

Le taux d'enlèvement de matière (MRR) est calculé à l'aide de l'équation (IV.6) [141].

$$MRR = V_c \times a_p \times f \quad (\text{IV.6})$$

Où MRR est en (cm^3/min), V_c , a_p et f , sont respectivement la vitesse de coupe en (m/min), la profondeur de coupe en (mm), et l'avance en (mm/tr).

IV. 2. 2 Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est une technique statistique standard qui est couramment utilisée pour déterminer l'importance des variables indépendantes sur les réponses de sortie. Elle n'analyse pas les données directement, mais détermine le pourcentage de contribution de chaque facteur dans la détermination de la variabilité (variance) des données.

L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer l'influence des paramètres d'entrée tels que l'avance par tour (f), la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de coupe (a_p) sur les réponses de sortie comme R_a , F_a , F_r , F_z , P_c , K_s et MRR . Cette analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab-18 avec un niveau de confiance de 95% ($\alpha = 0,05$) [142, 143].

Le tableau ANOVA composé de différentes colonnes est donné en termes de sources de variation avec leurs degrés de liberté (DF), somme des carrés (SS), carré moyen (MS), valeur F et valeur P (probabilité), la dernière colonne est réservée à la contribution en pourcentage (Cont. %). La plus grande valeur de Cont.% indique le facteur le plus important influençant la réponse du processus [144].

Le (SC) est utilisé pour estimer le carré de l'écart par rapport à la moyenne. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{IV.7})$$

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

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

$$MC = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{IV.8})$$

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

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

MC_e les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (Cont. %), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) à la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat [145].

$$Cont\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{IV.10})$$

IV. 3 Résultats et discussion

Les Tableaux (IV.3-4) montrent les résultats expérimentaux de la rugosité de surface (R_a), les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), la puissance de coupe, l'effort *spécifique de coupe* (K_s) et le volume de copeau enlevé (MRR) qui sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe. Les essais sont réalisés suivant un plan de taguchi L₉. L'analyse statistique est faite afin d'analyser les effets de la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p) sur les réponses. Le traitement statistique des résultats (IV.3 et 4) a été réalisé en deux phases. La première phase portait sur l'analyse de la variance et de l'effet des facteurs et des interactions. La deuxième phase a permis d'obtenir des modèles mathématiques des paramètres étudiés (régression linéaire).

Tableau IV. 3 : plan expérimentale et résultats

Test N°	Paramètres d'usinage			Caractéristiques d'usinabilité								
				Effort de coupe axial F_a (N)			Effort de coupe radial F_r (N)			Effort de coupe tangentiel F_z (N)		
	V_c	f	a_p	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	190	0,08	0,25	39,77	31,95	54,85	78,15	67,40	83,94	80,13	85,09	87,87
2	190	0,12	0,50	94,89	87,18	129,03	127,17	112,92	169,15	179,10	188,12	207,12
3	190	0,16	0,75	169,75	157,68	203,76	170,66	160,37	214,96	287,57	329,68	353,05
4	250	0,08	0,50	86,25	77,42	119,48	120,36	103,19	147,57	136,93	142,87	163,58
5	250	0,12	0,75	142,63	135,28	192,82	159,52	139,51	208,40	246,51	265,60	278,83
6	250	0,16	0,25	62,65	54,36	81,52	105,63	94,96	130,59	115,71	120,63	135,68
7	350	0,08	0,75	140,38	122,93	174,89	152,72	136,23	182,33	180,19	189,81	223,92
8	350	0,12	0,25	53,80	49,43	70,56	99,74	85,50	113,73	104,52	109,64	126,3
9	350	0,16	0,50	103,00	89,32	130,12	135,45	122,99	148,34	220,30	227,26	238,67

Tableau IV. 4 : suite

Test N°	Caractéristiques d'usinabilité									
	Rugosité de surface R_a (μm)			Puissance de coupe P_c (W)			Pression de coupe spécifique K_s (MPa)			MRR (cm^3/min)
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	
1	0,61	0,67	0,69	253,75	269,45	278,26	4006,50	4254,50	4393,50	3,80
2	0,75	0,89	1,01	567,15	595,71	655,88	2985,00	3135,33	3452,00	11,40
3	0,95	1,20	1,44	910,64	1043,99	1117,99	2396,42	2747,33	2942,08	22,80
4	0,49	0,58	0,62	570,54	595,29	681,58	3423,25	3571,75	4089,50	10,00
5	0,73	0,85	0,96	1027,13	1106,67	1161,79	2739,00	2951,11	3098,11	22,50
6	0,93	1,14	1,21	482,13	502,63	565,33	2892,75	3015,75	3392,00	10,00
7	0,50	0,47	0,58	1051,11	1107,23	1306,20	3003,17	3163,50	3732,00	21,00
8	0,63	0,74	0,73	609,70	639,57	736,75	3484,00	3654,67	4210,00	10,50
9	0,92	1,12	1,07	1285,08	1325,68	1392,24	2753,75	2840,75	2983,38	28,00

IV. 3. 1 Analyse des résultats de la rugosité de surface en fonction de V_c , f et a_p

IV. 3. 1. 1 Analyse de la variance pour (R_a)

Le Tableau (IV.5) montre l'analyse ANOVA pour la rugosité de surface (R_a), des trois plaquettes de coupe (T1, T2 et T3). On peut voir que l'avance par tour (f) est le facteur ayant la plus grande signification statistique avec des contributions de 92,52%, 92,95% et 81,94% successivement. Il est suivi par la vitesse de coupe (V_c) avec des contributions de 4,06%, 5,65% et 14,03%. Alors que la profondeur de coupe (a_p) s'est avérée moins significative, sa contribution est de 0,01%, 0,03% et 3% pour les plaquettes de coupe T1, T2 et T3, respectivement.

Tableau IV. 5 : Analyse de la variance pour la rugosité de surface (R_a).

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont, (%)
Analyse de variance pour la plaquette T1						
<i>Régression</i>	6	0,259144	0,043191	337,00	0,003	
V_c	1	0,010616	0,004900	38,23	0,025	4,09
f	1	0,240000	0,005616	43,82	0,022	92,52
a_p	1	0,000017	0,003860	30,12	0,032	0,01
$V_c \times f$	1	0,001971	0,000008	0,06	0,824	0,76
$V_c \times a_p$	1	0,005094	0,006401	49,95	0,019	1,96
$f \times a_p$	1	0,001446	0,001446	11,29	0,078	0,56
<i>Erreur</i>	2	0,000256	0,000256			0,10
<i>Total</i>	8	0,259400				100
R-Sq = 99,90%			R-Sq(adj) = 99,60%			
Analyse de variance pour la plaquette T2						
<i>Régression</i>	6	0,259144	0,043191	200,63	0,005	
V_c	1	0,010616	0,004900	16,05	0,057	5,67%
f	1	0,240000	0,005616	16,11	0,057	92,95%
a_p	1	0,000017	0,003860	3,76	0,192	0,03%
$V_c \times f$	1	0,001971	0,000008	1,71	0,321	0,81%
$V_c \times a_p$	1	0,005094	0,006401	4,37	0,172	0,16%
$f \times a_p$	1	0,001446	0,001446	2,70	0,242	0,22%
<i>Erreur</i>	2	0,000256	0,000256			0,17%
<i>Total</i>	8	0,259400				100
R-Sq = 99,83%			R-Sq(adj) = 99,34%			
Analyse de variance pour la plaquette T3						
<i>Régression</i>	6	0,541988	0,090331	666,48	0,001	
V_c	1	0,030776	0,007225	0,05	0,847	14,03
f	1	0,504600	0,007256	250,74	0,004	81,94
a_p	1	0,000150	0,001695	14,83	0,061	3,00
$V_c \times f$	1	0,004384	0,000772	37,43	0,023	0,47
$V_c \times a_p$	1	0,000862	0,001966	17,09	0,054	0,12
$f \times a_p$	1	0,001216	0,001216	16,38	0,056	0,41
<i>Erreur</i>	2	0,000900	0,000450			0,05
<i>Total</i>	8	0,542889				100
R-Sq = 99,95%			R-Sq(adj) = 99,80%			

IV. 3. 1. 2 Équation de régression de (R_a) en fonction de V_c , f et a_p

La relation entre les paramètres de coupe utilisés (V_c , f et a_p) et la rugosité de surface (R_a) pour les trois plaquettes de coupe T1, T2 et T3 a été établie grâce à des régressions linéaires multiples. Les différents modèles mathématiques développés à partir de l'analyse statistique ont présenté des coefficients de corrélation élevés (R^2) et des valeurs de probabilité (valeur P) inférieures à 0,05.

Les modèles mathématiques de la rugosité de surface (R_a) et leurs coefficients de détermination pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3 sont présentés dans les équations (IV.11), (IV.12) et (IV.13), respectivement.

$$R_{a-T1} = 0,7328 - 0,001924 * V_c + 3,922 * f - 1,161 * a_p + 0,00067 * V_c \times f + 0,003003 * V_c \times a_p + 3,178 * f \times a_p \quad (\text{IV.11})$$

$R^2 = 99,90\%$; R^2 ajusté était de 99,60 %.

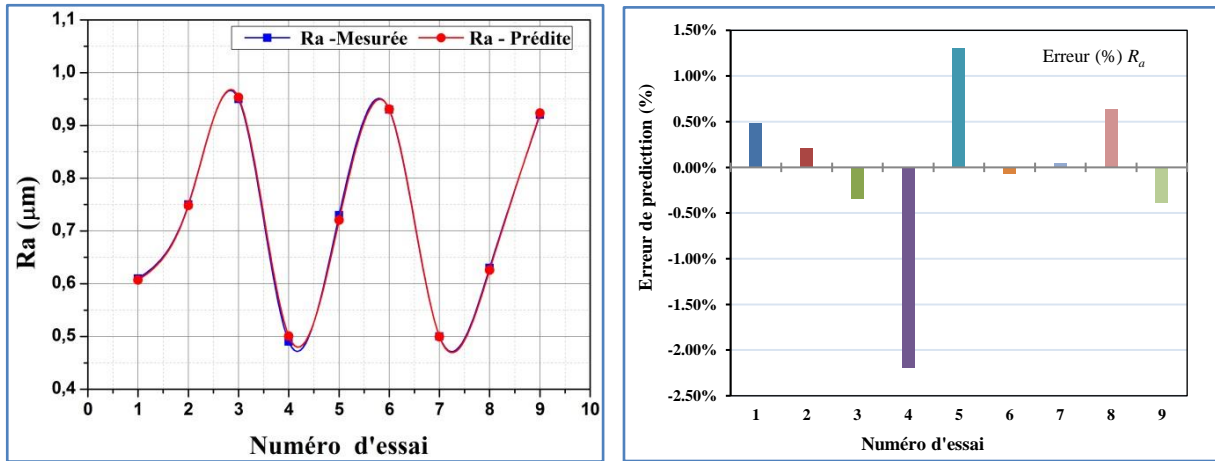
$$R_{a-T2} = 0,716 - 0,002336 * V_c + 4,46 * f - 0,770 * a_p + 0,00652 * V_c \times f + 0,001664 * V_c \times a_p + 2,91 * f \times a_p \quad (\text{IV.12})$$

$R^2 = 99,83\%$; R^2 ajusté était de 99,34 %.

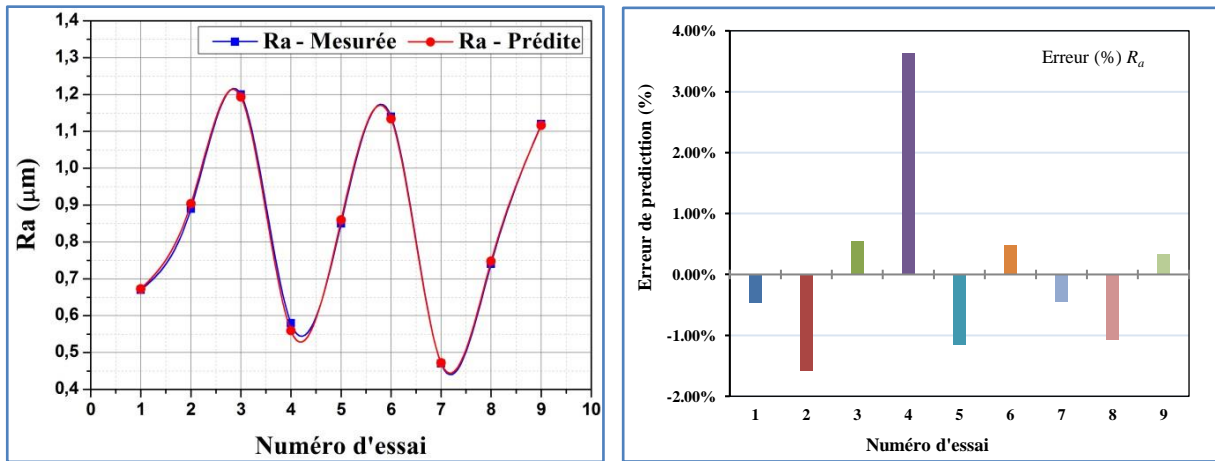
$$R_{a-T3} = 0,1765 - 0,000079 * V_c + 10,813 * f - 0,939 * a_p - 0,01873 * V_c \times f + 0,002024 * V_c \times a_p + 4,41 * f \times a_p \quad (\text{IV.13})$$

$R^2 = 99,95\%$; R^2 ajusté était de 99,80 %.

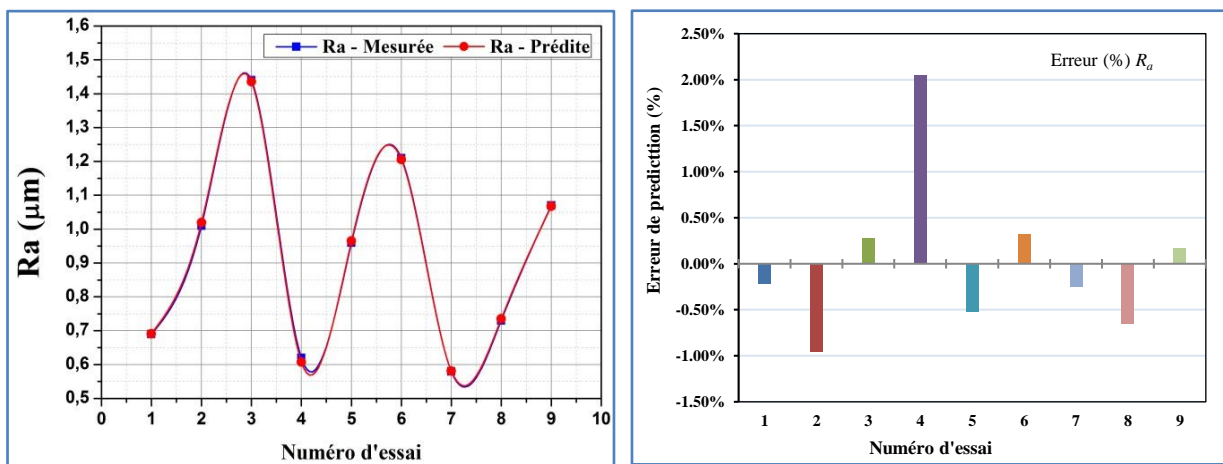
La Figure (IV.2) montre la comparaison entre les valeurs prédites et mesurées de la rugosité de surface (R_a), respectivement, pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2, T3. Nous pouvons remarquer que les valeurs prédites des modèles développés sont très proches de celles enregistrées expérimentalement, en notant que les erreurs de prédiction sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de 3,63% pour les trois outils de coupe. Ces résultats nous permettent de conclure que les modèles mathématiques développés en appliquant l'approche RSM ont une très bonne précision.



(a)



(b)



(c)

Figure IV. 2 : Performance de prédiction de R_a pour les trois plaquettes de coupe utilisées
a) T1, b) T2 et c) T3.

IV. 3. 1. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (R_a)

L'évolution de la surface de réponse estimée pour la rugosité de surface (R_a) en fonction de la vitesse de coupe (V_c), de la profondeur de coupe (a_p) et de l'avance par tour (f) pendant le tournage à sec de l'acier AISI 4140, a été présentée dans la Figure (IV.3).

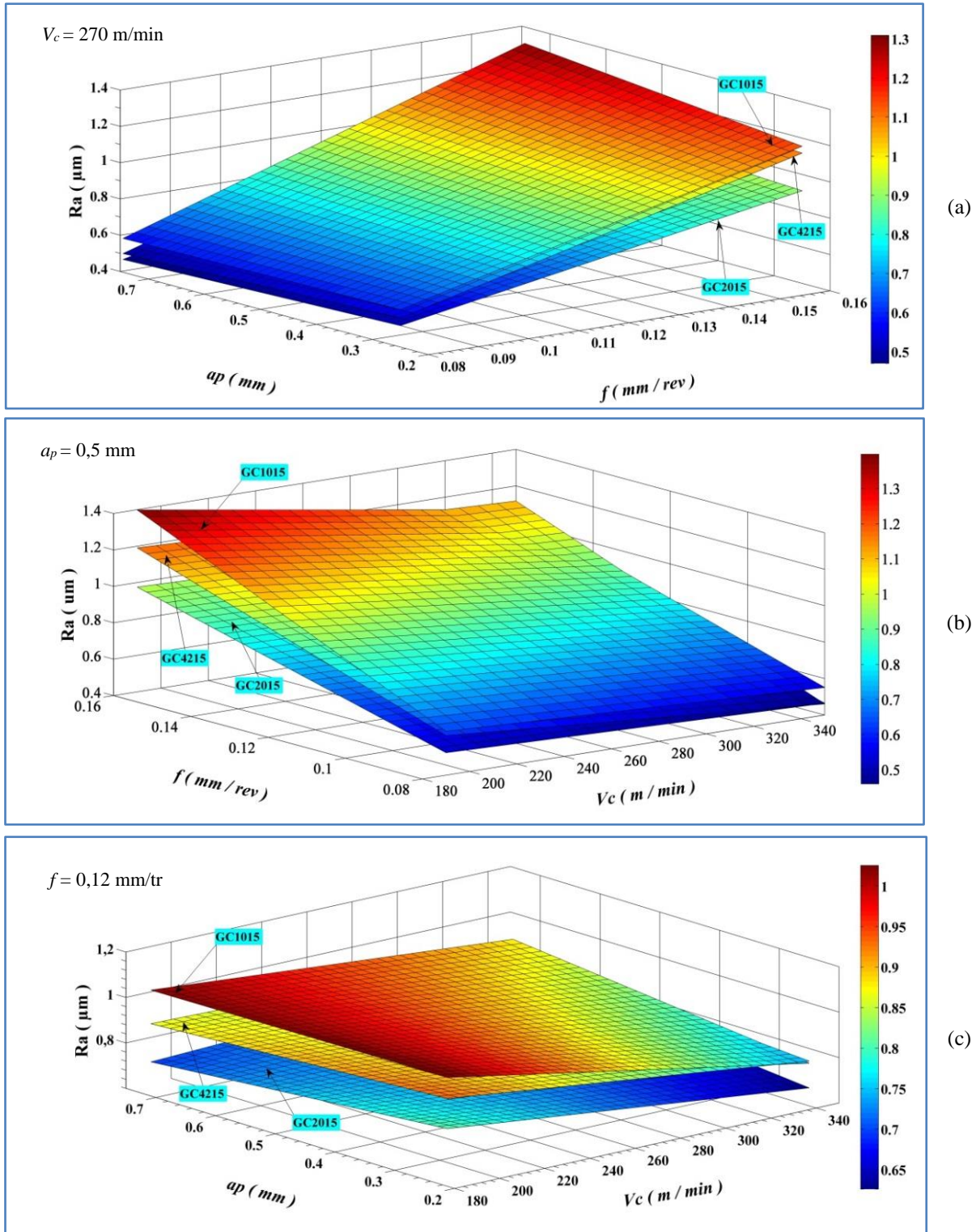


Figure IV. 3 : Traces 3D de la rugosité de surface (R_a) en fonction V_c , f et a_p de T1, T2 et T3

En examinant les Figures (IV. 3a-b), on peut remarquer que la rugosité de surface (R_a) est meilleure à faible avance par tour (f) et se dégrade avec l'augmentation de celle-ci. La Figure (IV.3c) montre l'effet de l'interaction entre la profondeur de coupe et la vitesse de coupe, alors que l'avance par tour (f) est maintenue à une valeur moyenne de son niveau, sur la rugosité de surface (R_a).

L'usinage avec la plaquette CVD conduit à une rugosité de surface plus faible par rapport aux deux autres plaquettes de coupe (MTCVD et PVD). Ceci a été vérifié en comparant les valeurs obtenues par les trois plaquettes de coupe. Le rapport (R_{a-T2}/R_{a-T1}) s'avère être de 1,18 tandis que (R_{a-T3}/R_{a-T1}) atteint 1,28. L'explication de la variabilité de ces résultats réside dans le fait que le comportement d'usure des outils testés est différent. L'augmentation de l'usure en dépouille (VB) entraîne une augmentation de la zone de contact entre l'outil et la pièce, ce qui déstabilise le processus d'usinage et conduit à une détérioration de la rugosité de surface. Ce résultat nous permet de dire que le suivi de l'usure en dépouille est essentiel dans le processus d'usinage, son évolution détériore l'état de surface.

Les courbes d'effet principal qui décrivent l'influence de l'avance par tour (f) sur la rugosité de surface sont présentées dans la Figure (IV.4). Sur cette figure, on peut observer que l'avance a une influence importante sur la rugosité de surface, et que lorsque (f) augmente la rugosité de surface détériore. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature [146, 147].

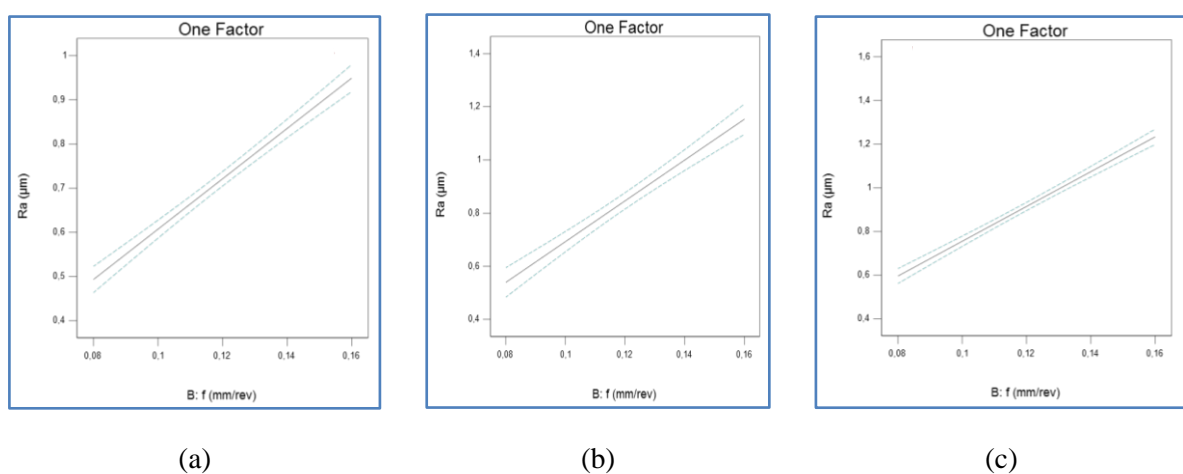


Figure IV. 4 : Effet de l'avance par tour (f) sur la rugosité de surface (R_a) pour : a) T1 ; b) T2 ; c) T3

IV. 3. 2 Analyse des résultats de l'effort de coupe axial en fonction de V_c , f et a_p

IV. 3. 2. 1 Analyse de la variance pour (F_a)

Le Tableau (IV.6) montre l'analyse ANOVA pour l'effort de coupe axial (F_a), des trois plaquettes de coupe (T1, T2 et T3).

Tableau IV. 6 : Analyse de variance pour F_a

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont, %
Analyse de variance pour la plaquette T1						
<i>Régression</i>	6	15679,0	2613,17	524,52	0,002	
V_c	1	5,3	179,73	36,07	0,027	0,03
f	1	793,5	251,69	50,52	0,019	5,06
a_p	1	14656,0	8,08	1,62	0,331	93,42
$V_c \times f$	1	138,8	206,27	41,40	0,023	0,88
$V_c \times a_p$	1	5,0	12,44	2,5	0,255	0,03
$f \times a_p$	1	80,4	80,41	16,14	0,057	0,51
<i>Erreur</i>	2	10,0	4,98			0,06
<i>Total</i>	8	15689,0				100
R-Sq = 99,94%				R-Sq (adj) = 99,75%		
Analyse de variance pour la plaquette T2						
<i>Régression</i>	6	14149,8	2358,29	296,83	0,003	
V_c	1	35,6	193,13	24,31	0,039	0,25
f	1	794,9	190,55	23,98	0,039	5,61
a_p	1	13080,7	63,93	8,05	0,105	92,34
$V_c \times f$	1	133,6	128,76	16,21	0,057	0,94
$V_c \times a_p$	1	73,2	12,48	1,57	0,337	0,52
$f \times a_p$	1	31,9	31,85	4,01	0,183	0,22
<i>Erreur</i>	2	15,9	7,94			0,11
<i>Total</i>	8	14165,7				100
R-Sq = 99,89%				R-Sq (Adj) = 99,55%		
Analyse de variance pour la plaquette T3						
<i>Régression</i>	6	23005,1	3834,18	368,09	0,003	
V_c	1	32,5	31,98	3,07	0,222	0,14
f	1	730,0	100,07	9,61	0,090	3,17
a_p	1	22148,2	334,29	32,09	0,030	96,16
$V_c \times f$	1	47,6	6,72	0,65	0,506	0,21
$V_c \times a_p$	1	34,5	46,29	4,44	0,170	0,15
$f \times a_p$	1	12,2	12,24	1,18	0,392	0,05
<i>Erreur</i>	2	20,8	10,42			0,09
<i>Total</i>	8	23025,9				100
R-Sq = 99,91%				R-Sq (adj) = 99,64%		

L'objectif est d'analyser l'effet des facteurs principaux et de déterminer la contribution des différents facteurs et interactions sur l'effort de coupe (F_a). L'analyse des résultats indique que la profondeur de coupe (a_p) est le paramètre ayant la plus grande signification statistique avec des contributions de 93,42%, 92,34% et 96,16%, suivie par l'avance par tour (f) avec des contributions de 5,06%, 5,61% et 3,17%. Alors que la vitesse de coupe (V_c) s'est avérée moins significative, sa contribution est de 0,03%, 0,25% et 0,14% pour les plaquettes de coupe T1, T2 et T3, respectivement.

IV. 3. 2. 2 Équation de régression de (F_a) en fonction de V_c , f et a_p

Les modèles mathématiques et leurs coefficients de détermination de l'effort de coupe axial (F_a) pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3 sont présentés dans les Équations (IV.14), (IV.15) et (IV.16), respectivement.

$$F_{a-T1} = -80,0 + 0,3685 * V_c + 830 * f + 53,1 * a_p - 3,369 * V_c \times f + 0,1324 * V_c \times a_p + 749 * f \times a_p \quad (\text{IV.14})$$

$R^2 = 99,94\%$; R^2 ajusté était de 99,75 %.

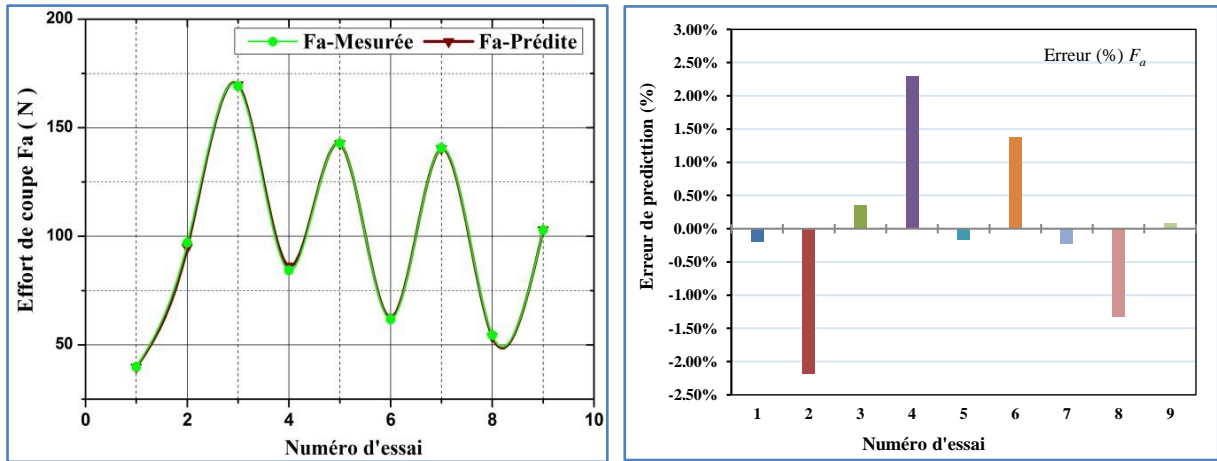
$$F_{a-T2} = -99,3 + 0,3820 * V_c + 722 * f + 149,5 * a_p - 2,662 * V_c \times f - 0,133 * V_c \times a_p + 472 * f \times a_p \quad (\text{IV.15})$$

$R^2 = 99,89\%$; R^2 ajusté était de 99,55 %.

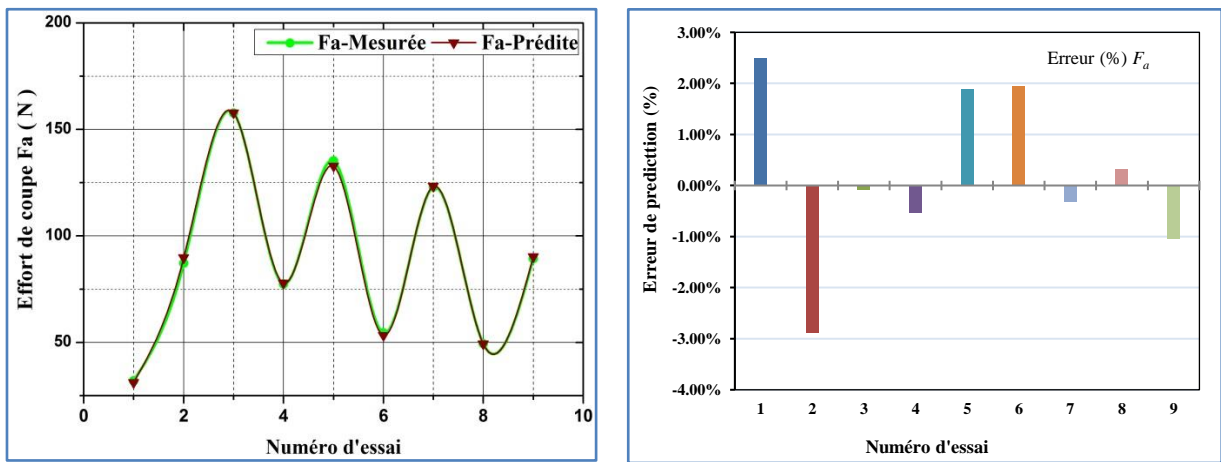
$$F_{a-T3} = -75,7 + 0,1554 * V_c + 524 * f + 341,8 * a_p - 0,608 * V_c \times f - 0,255 * V_c \times a_p - 292 * f \times a_p \quad (\text{IV.16})$$

$R^2 = 99,91\%$; R^2 ajusté était de 99,64 %.

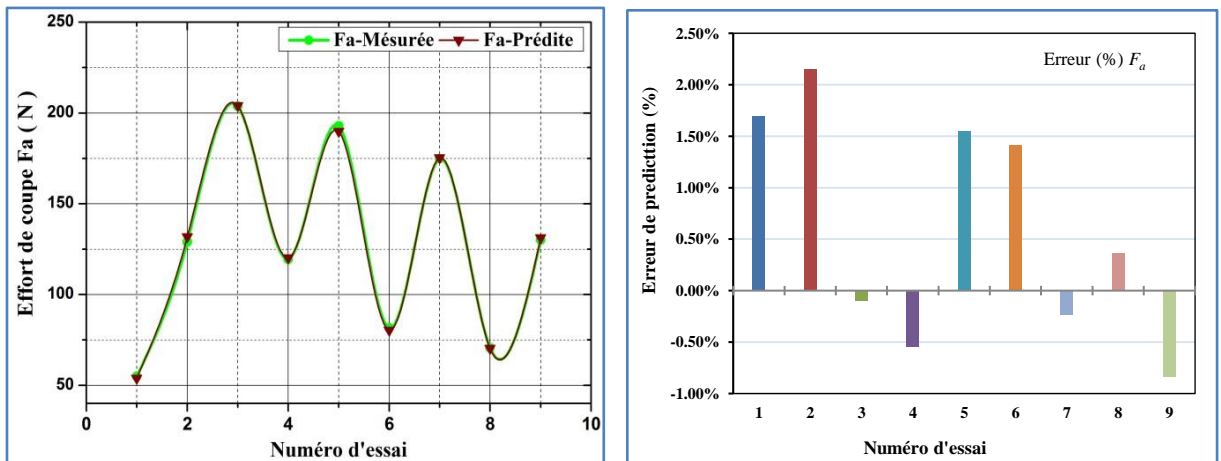
La Figure (IV.5) montre la comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de l'effort de coupe axial (F_a). L'analyse de cette figure montre une très bonne corrélation avec ($R^2 = 98,45\%$), en notant aussi que les erreurs de prédiction sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de 2,89% pour les trois outils de coupe.



(a)



(b)



(c)

Figure IV. 5 : Performance de prédiction de F_a pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.

IV. 3. 2. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (F_a)

L'effet des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) et leurs interactions sur l'effort de coupe axial (F_a) pour les trois plaquettes en carbure, à savoir T1, T2 et T3, ont été illustrés par des présentations graphiques tridimensionnelles (3D) (Figures IV.6).

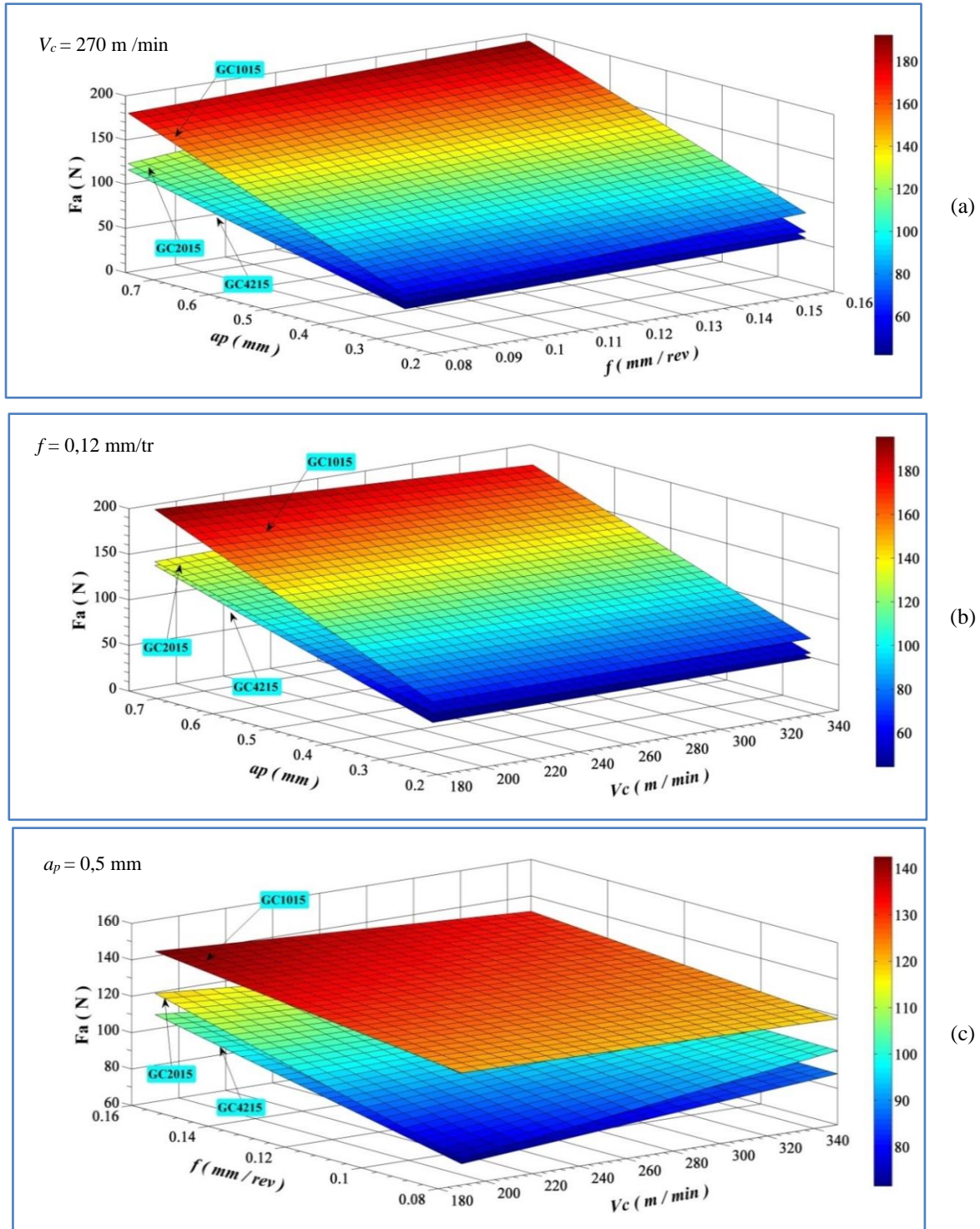


Figure IV. 6 : Tracés de surface 3D de F_a en fonction de V_c , f et a_p pour T1, T2 et T3.

Ces graphiques ont été générés à partir des modèles mathématiques développés (Équations **IV.14-16**), basés sur la variation de deux paramètres de coupe à la fois et le maintien du troisième paramètre à une valeur moyenne de son niveau.

On peut clairement voir que l'effort de coupe axial augmente fortement avec l'augmentation de la profondeur de coupe (Figure **IV.6a-b**), et qu'il augmente d'une manière plus lente avec l'augmentation de l'avance par tour (f) (Figure **IV.6c**). L'effort de coupe axial la plus faible a été obtenue lors de l'usinage avec la plaquette de coupe T2 puis avec les plaquettes de coupe T1 et T3 respectivement. D'autre part, l'effort de coupe axial diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe (Figure **IV.6b-c**). Ce phénomène est principalement dû à l'augmentation de la température dans la zone du plan de cisaillement, qui provoque un ramollissement plastique de la zone de déformation primaire et par conséquent une réduction de la résistance au cisaillement du matériau. Cette dernière va, à son tour, réduire l'effort nécessaire pour déformer le matériau usiné. Des explications similaires ont été données par Aouici et al. [117].

IV. 3. 3 Analyse des résultats de l'effort de coupe radial en fonction de V_c , f et a_p

IV. 3. 3. 1 Analyse de la variance pour (F_r)

L'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort de coupe radial (F_r) des trois plaquettes de coupe (T1, T2 et T3) est présentée dans le Tableau (**IV.6**). La profondeur de coupe (a_p) est le facteur le plus significatif influençant l'effort de coupe radial avec des contributions de 90,48%, 86,36% et 86,44%, suivie par l'avance par tour (f) avec des contributions de 8,33%, 12,46% et 7,20% pour T1, T2 et T3, respectivement. Ceci est dû au fait que l'augmentation de la profondeur de coupe augmente la longueur de contact de l'outil [138]. Par la suite, l'épaisseur du copeau devient importante ce qui conduit à l'augmentation du volume de métal déformé, cela nécessite plus d'efforts de coupe pour couper le copeau. D'autre part, lorsque l'avance par tour (f) est augmenté, la région du copeau cisailé augmente, car la résistance du matériau à la rupture est plus élevée et nécessite donc des efforts plus importants pour enlever le copeau [131]. La vitesse de coupe (V_c) s'est avérée moins significative, sa contribution est de 0,29%, 0,06% et 0,91% pour T1, T2 et T3, respectivement.

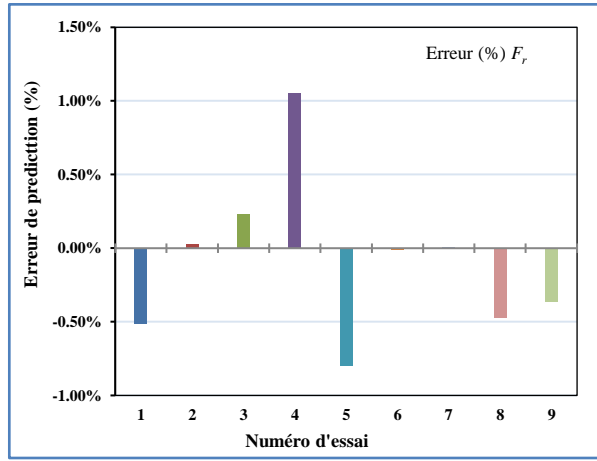
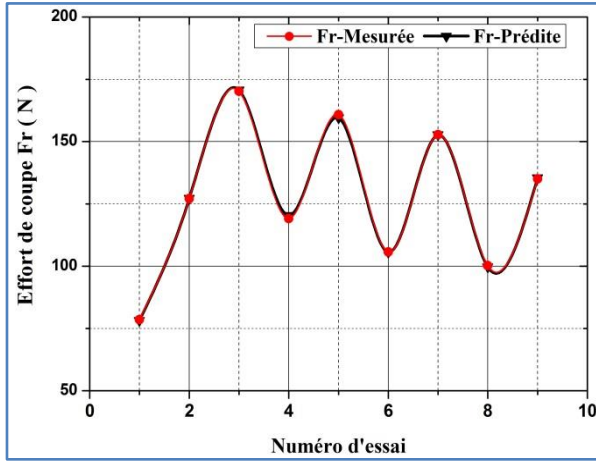
Tableau IV. 7 : Analyse de variance pour F_r

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont, %
Analyse de variance pour la plaquette T1						
Régression	6	7318,36	1219,73	612,25	0,002	
V_c	1	20,98	36,37	18,26	0,051	0,29
f	1	610,24	80,33	40,32	0,024	8,33
a_p	1	6625,40	133,12	66,82	0,015	90,48
$V_c \times f$	1	33,14	4,19	2,11	0,284	0,45
$V_c \times a_p$	1	17,93	28,58	14,35	0,063	0,24
$f \times a_p$	1	10,66	10,66	5,35	0,147	0,15
Erreur	2	3,98	1,99			0,05
Total	8	7322,34				100
R-Sq = 99,95%				R-Sq (adj) = 99,78%		
Analyse de variance pour la plaquette T2						
Régression	6	6819,95	1136,66	117,29	0,008	
V_c	1	3,87	57,97	5,98	0,134	0,06
f	1	852,04	139,59	14,40	0,063	12,46
a_p	1	5906,34	27,00	2,79	0,237	86,36
$V_c \times f$	1	50,27	43,86	4,53	0,167	0,74
$V_c \times a_p$	1	3,06	0,03	0,00	0,962	0,04
$f \times a_p$	1	4,35	4,35	0,45	0,572	0,06
Erreur	2	19,38	9,69			0,28
Total	8	6839,33				100
R-Sq = 99,72%				R-Sq (Adj) = 98,87%		
Analyse de variance pour la plaquette T3						
Régression	6	14811,7	2468,62	173,08	0,006	
V_c	1	134,5	58,21	4,08	0,181	0,91
f	1	1068,0	334,12	23,43	0,040	7,20
a_p	1	12827,9	1006,14	70,54	0,014	86,44
$V_c \times f$	1	257,1	0,63	0,04	0,854	1,73
$V_c \times a_p$	1	111,6	422,78	29,64	0,032	0,75
$f \times a_p$	1	412,6	412,64	28,93	0,033	2,78
Erreur	2	28,5	14,26			0,19
Total	8	14840,3				100
R-Sq = 99,81%				R-Sq (adj) = 99,23%		

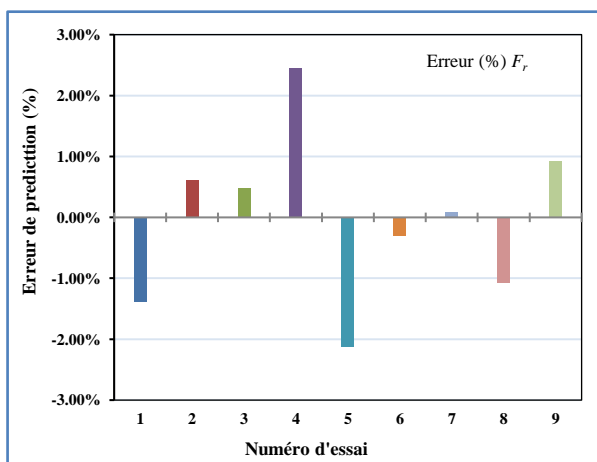
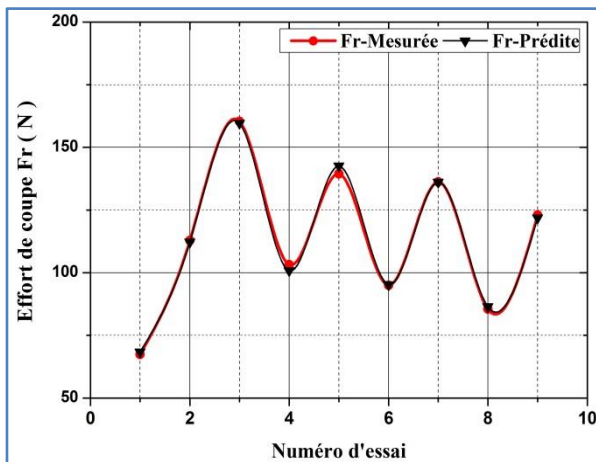
IV. 3. 3. 2 Analyse de régression de (F_r) en fonction de V_c , f et a_p

Les modèles mathématiques et leurs coefficients de détermination de l'effort de coupe radial (F_r) pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3 sont présentés dans les Équations (IV.17), (IV.18) et (IV.19), respectivement.

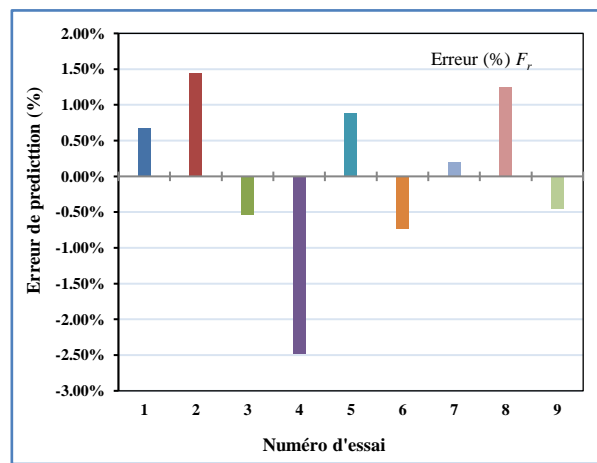
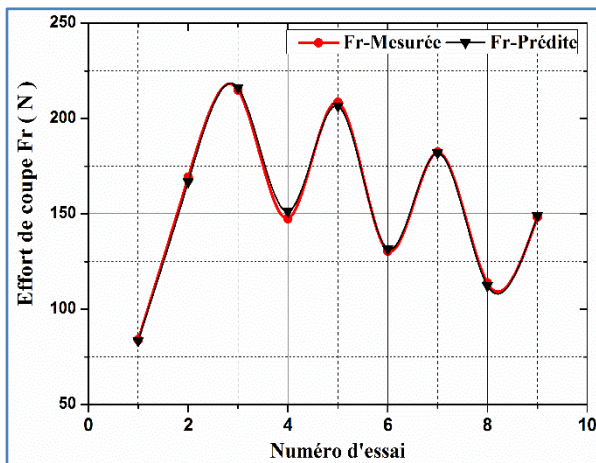
$$F_{r-T1} = -22,10 + 0,1658 * V_c + 469,1 * f + 215,7 * a_p - 0,480 * V_c \times f - 0,2006 * V_c \times a_p - 273 * f \times a_p \tag{IV.17}$$



(a)



(b)



(c)

Figure IV. 7 : Performance de prédiction de F_r pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.

$R^2 = 99,95\%$; R^2 ajusté était de $99,78\%$.

$$F_{r-T2} = -24,7 + 0,2093 * V_c + 618 * f + 97,1 * a_p - 1,553 * V_c \times f - 0,006 * V_c \times a_p + 174 * f \times a_p \quad (\text{IV.18})$$

$R^2 = 99,72\%$; R^2 ajusté était de $98,87\%$.

$$F_{r-T3} = -113,5 + 0,210 * V_c + 957 * f + 593,0 * a_p + 0,186 * V_c \times f - 0,772 * V_c \times a_p - 1698 * f \times a_p \quad (\text{IV.19})$$

$R^2 = 99,81\%$; R^2 ajusté était de $99,23\%$.

Les courbes des valeurs expérimentales et prédites de l'effort de coupe radial sont présentés dans la Figure (IV.7). On remarque que l'allure générale de la courbe des valeurs prédites suit celle de la courbe des valeurs expérimentales. En notant aussi que les erreurs de prédiction sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de $2,48\%$ pour les trois outils de coupe.

IV. 3. 3. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (F_r)

L'influence des paramètres de coupe (V_c , a_p et f) sur l'effort de coupe radial (F_r) est présentée dans la Figure (IV.8 a-c).

On peut voir que la tendance de l'effort de coupe radial tend à augmenter avec l'augmentation de la profondeur de coupe (a_p) et de l'avance par tour (f) (Figure IV. 8a), tandis que l'effort de coupe radial diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe (Figure IV.8b-c).

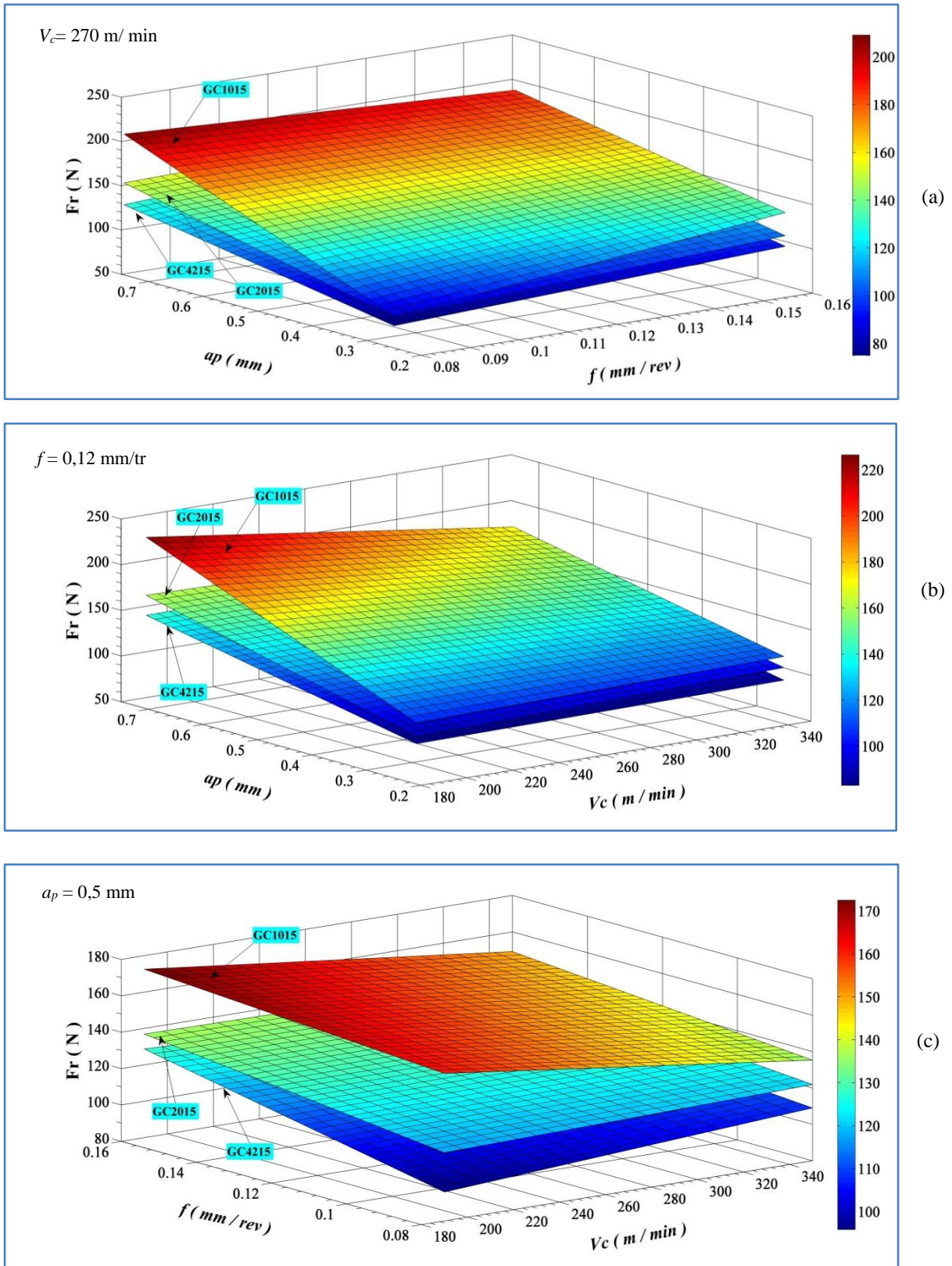


Figure IV. 8 : Tracés de surface 3D de l'effort de coupe radial en fonction de V_c , f et a_p pour $T1$, $T2$, et $T3$.

IV. 3. 4 Analyse des résultats de (F_z) en fonction de V_c , f et a_p

IV. 3. 4. 1 Analyse de la variance pour (F_z)

L'analyse de la variance pour l'effort de coupe tangentiel (F_z), des trois plaquettes de coupe (T1, T2 et T3) est présentée dans le Tableau (IV.8).

Tableau IV. 8 : Analyse de variance pour F_z

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont, %
Analyse de variance pour la plaquette T1						
Régression	6	38695,0	6449,17	235,92	0,004	
V_c	1	227,5	138,36	5,06	0,153	0,59
f	1	8537,5	194,81	7,13	0,116	22,03
a_p	1	28553,6	175,28	6,41	0,127	73,69
$V_c \times f$	1	767,4	280,06	10,25	0,085	1,98
$V_c \times a_p$	1	425,2	73,00	2,67	0,244	1,01
$f \times a_p$	1	183,7	183,71	6,72	0,122	0,47
Erreur	2	54,7	27,34			0,14
Total	8	38749,7				100
R-Sq = 99,86%				R-Sq (adj) = 99,44%		
Analyse de variance pour la plaquette T2						
Régression	6	50812,3	8468,71	1640,13	0,001	
V_c	1	805,3	0,31	0,06	0,828	1,58
f	1	11249,3	57,74	11,18	0,079	22,13
a_p	1	36774,4	53,79	10,42	0,084	72,36
$V_c \times f$	1	443,0	26,56	5,14	0,151	0,87
$V_c \times a_p$	1	856,1	64,17	12,43	0,072	1,68
$f \times a_p$	1	684,2	684,22	132,51	0,007	1,35
Erreur	2	10,3	5,16			0,02
Total	8	50822,6				100
R-Sq = 99,98%				R-Sq (Adj) = 99,92%		
Analyse de variance pour la plaquette T3						
Régression	6	55109,0	9184,84	202,03	0,005	
V_c	1	448,6	146,20	3,22	0,215	0,81
f	1	10586,5	41,33	0,91	0,441	19,18
a_p	1	42664,2	92,00	2,02	0,291	77,29
$V_c \times f$	1	31,6	32,86	0,72	0,485	0,06
$V_c \times a_p$	1	815,2	78,95	1,74	0,318	1,48
$f \times a_p$	1	562,9	562,89	12,38	0,072	1,02
Erreur	2	90,9	45,46			0,16
Total	8	55199,9				100
R-Sq = 99,84%				R-Sq (adj) = 99,34%		

L'analyse des résultats montre que la profondeur de coupe (a_p) est le paramètre ayant la plus grande signification statistique, sa contribution est de 73,69% ; 72,36% et 77,29% pour les plaquettes de coupe T1, T2 et T3, respectivement. L'avance par tour (f) est le deuxième facteur qui influence l'effort de coupe tangentiel, sa contribution est de 22,03% pour la plaquette T1 ; 22,13% pour la plaquette T2 et 19,18% pour la plaquette T3. Il est important de noter que lorsque nous augmentons la profondeur de coupe (a_p), la section du copeau ($S=a_p \times f$) augmente et par conséquent, la pièce à usiner exerce une résistance à la pénétration sur l'outil dans les deux directions tangentiel et axial ce qui contribue à l'augmentation de l'effort tangentiel (F_z). Des explications similaires ont été rapportées par Lima et al [80]. La vitesse de coupe (V_c) a un effet significatif très faible par rapport à l'avance par tour (f) et à la profondeur de coupe (a_p), sa contribution est de 0,59%, 1,58% et 0,81% pour T1, T2 et T3, respectivement.

IV. 3. 4. 2 Analyse de régression de (F_z) en fonction de V_c , f et a_p

Les Équations de régression obtenues et les coefficients de détermination correspondant de l'effort de coupe de coupe tangentiel (F_z) pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3 sont présentés dans les Équations (IV.20), (IV.21) et (IV.22), respectivement.

$$F_{z-T1} = 71,6 - 0,323 * V_c - 730 * f + 247,5 * a_p + 3,93 * V_c \times f - 0,321 * V_c \times a_p + 1133 * f \times a_p \quad (\text{IV.20})$$

$R^2 = 99,86\%$; R^2 ajusté était de 99,44 %.

$$F_{z-T2} = 37,8 - 0,0154 * V_c - 398 * f + 137,1 * a_p + 1,209 * V_c \times f - 0,3006 * V_c \times a_p + 2186 * f \times a_p \quad (\text{IV.21})$$

$R^2 = 99,98\%$; R^2 ajusté était de 99,92 %.

$$F_{z-T3} = -48,4 + 0,332 * V_c + 336 * f + 179 * a_p - 1,34 * V_c \times f - 0,333 * V_c \times a_p + 1983 * f \times a_p \quad (\text{IV.22})$$

$R^2 = 99,84\%$; R^2 ajusté était de 99,34 %.

Les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'effort tangentiel de coupe (F_z) sont illustrées dans la Figure (IV.9). La comparaison des résultats montre que les valeurs prédites et celles mesurées sont proches ce qui prouve la fiabilité des modèles développés. De manière générale on remarque que la courbe des valeurs prédites épouse la forme de la courbe des

valeurs expérimentales, notant aussi que les erreurs de prédiction sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de 3,37% pour les trois outils de coupe.

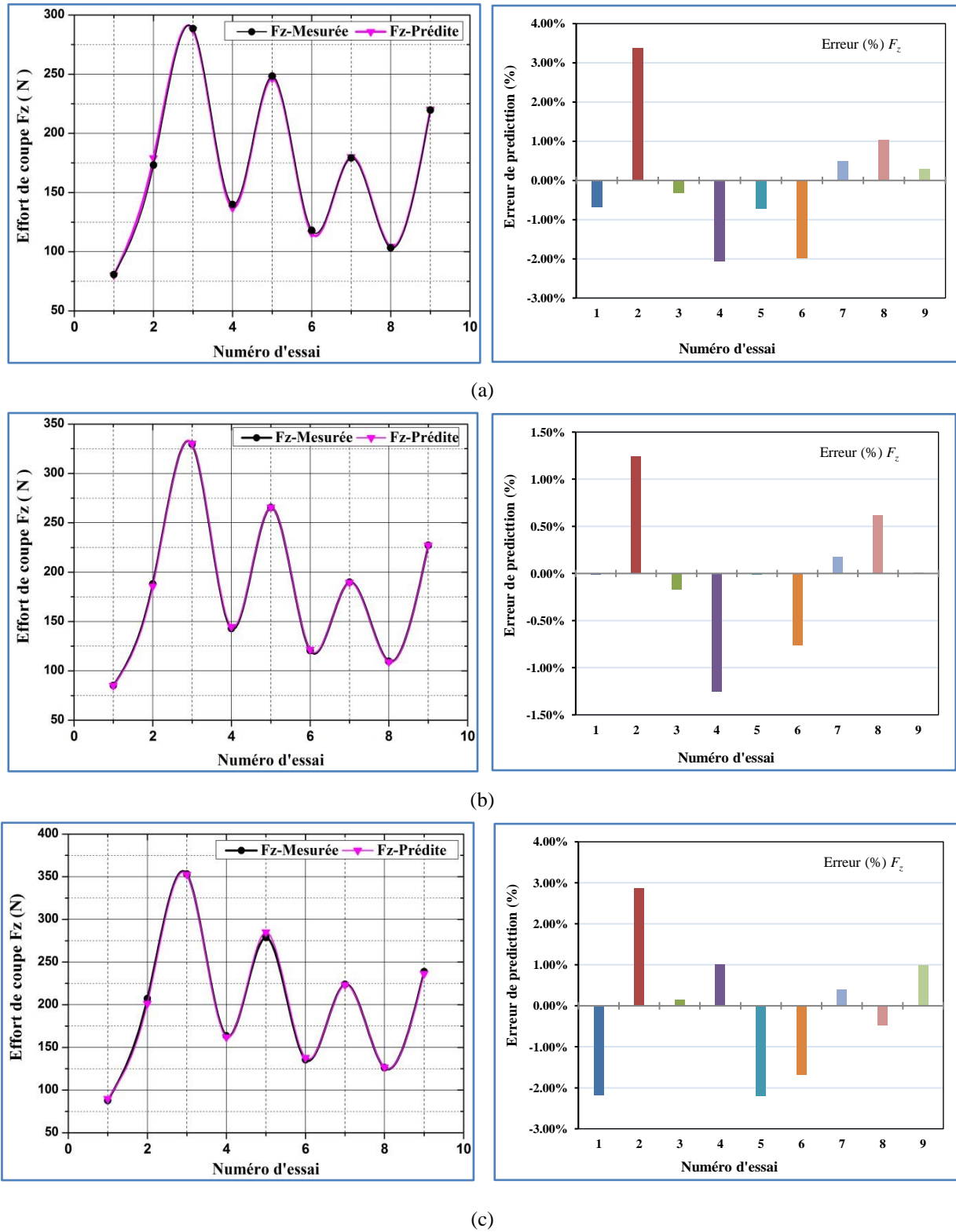


Figure IV. 9 : Performance de prédiction de F_z pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.

IV. 3. 4. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (F_z)

L'effet des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) et leurs interactions sur l'effort de coupe tangentiel (F_z), pour les trois plaquettes en carbure, à savoir T1, T2 et T3, ont été clarifiés par des présentations graphiques tridimensionnelles (3D) (Figure **IV.10a-c**). Ces graphiques ont été générés à partir des modèles mathématiques développés (Équations **IV. 20-22**), basés sur la variation de deux paramètres de coupe à la fois et le maintien du troisième paramètre à une valeur moyenne de son niveau.

Figure (**IV.10 a-c**) montre l'évolution de la surface de réponse estimée de (F_z) en fonction de la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de coupe (a_p) et l'avance par tour (f). L'effet d'interaction de l'avance avec la profondeur de coupe est montré dans la Figure (**IV.10a**). Il est clairement observé que la tendance du tracé de la surface de réponse pour l'effort de coupe tangentiel (F_z) tend à augmenter de manière significative avec l'augmentation de la profondeur de coupe (a_p) et de l'avance (f). Il convient de noter que la combinaison des deux valeurs les plus élevées des paramètres de coupe (a_p) et (f), génère l'effort de coupe tangentiel maximale. Ceci est dû au fait que l'augmentation de la profondeur de coupe et de l'avance par tour conduit à une augmentation de la section transversale du copeau cisailé, qui nécessite des efforts de coupe plus élevés pour l'enlever [[131](#), [148](#)]. D'après la Figure (**IV.10b-c**), on peut voir que le tracé de l'effort de coupe tangentiel tend à diminuer avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Ce phénomène est principalement dû à l'adoucissement thermique du matériau usiné, produit par une augmentation de la température dans la zone de coupe.

La comparaison entre les trois plaquettes de coupe testées en termes de composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z) est présentée dans les Figures (**IV.10a-c**). Il est clair que (F_z) développe la valeur maximale par rapport aux deux composantes (F_a et F_r). La composante de l'effort de coupe radial (F_r) est l'effort axial (F_a) est la plus petite composante. L'effort de coupe le plus faible a été obtenu en utilisant la plaquette de coupe CVD, par rapport aux deux autres plaquettes (MTCVD et PVD). Ceci a été vérifié en comparant les valeurs obtenues par les trois plaquettes de coupe. Le rapport de (F_{z-T2}/F_{z-T1}) est trouvé égal à 1,07 tandis que celui de (F_{z-T3}/F_{z-T1}) atteint 1,17. Cette différence en termes d'efforts de coupe pour les plaquettes utilisées est fonction de la qualité de revêtement. Aussi, l'augmentation de l'usure en dépouille entraîne une augmentation de la surface de contact entre l'outil et la pièce, ce qui conduit à une augmentation de frottement et donc à une augmentation des efforts de coupe [[149](#)].

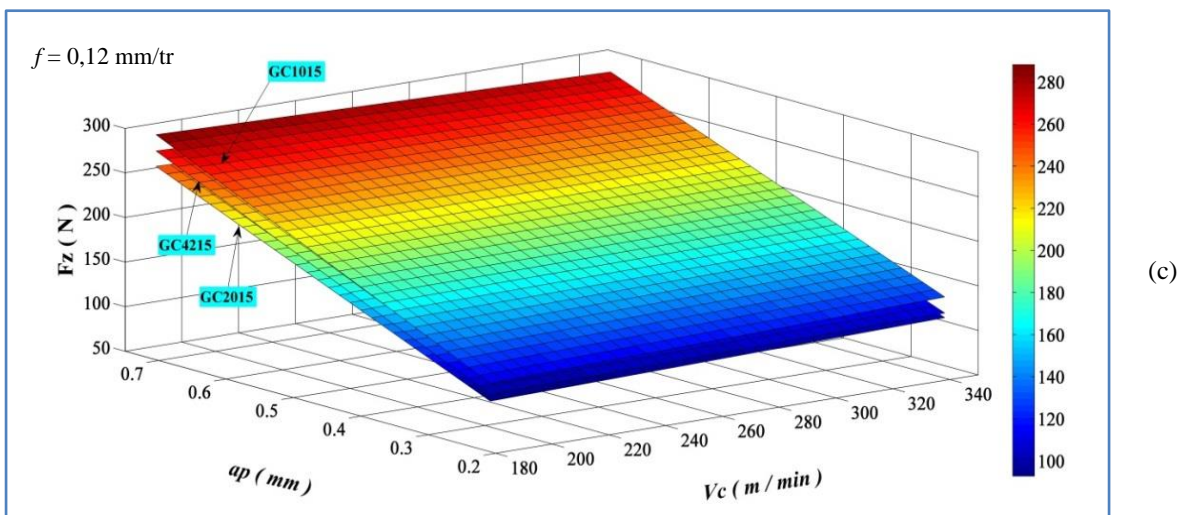
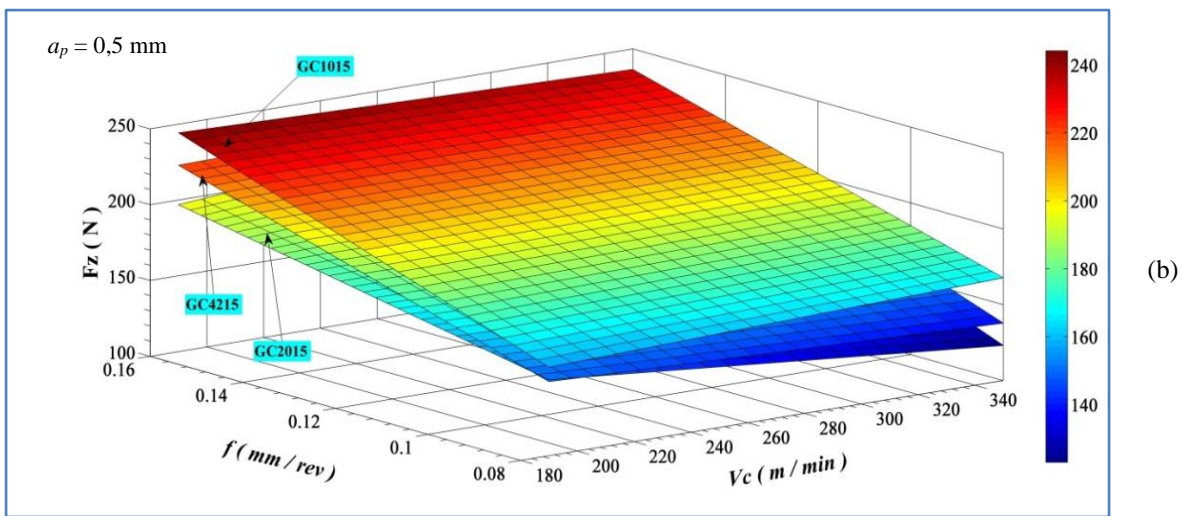
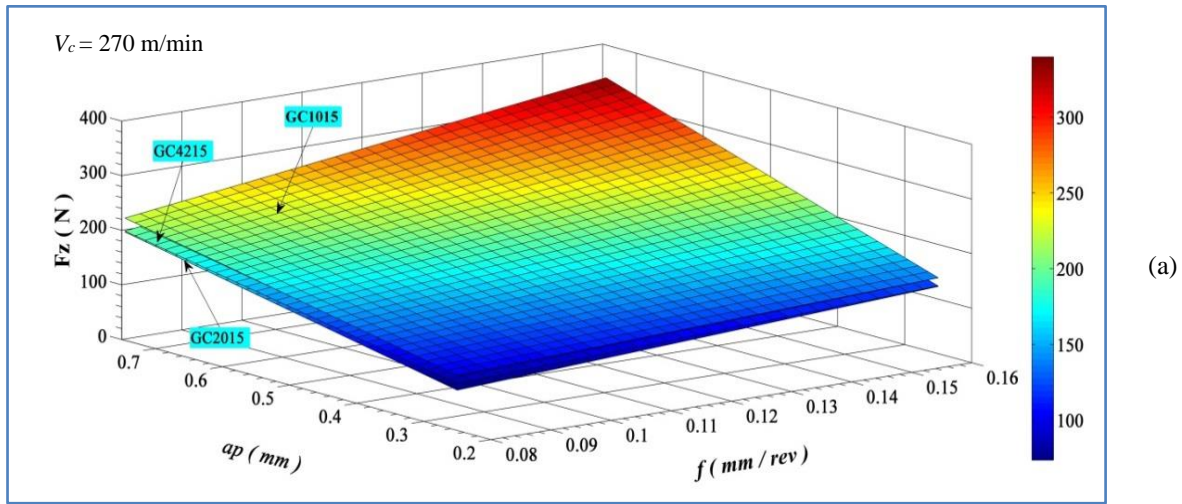


Figure IV. 10 : Courbes de surface 3D de l'effort de coupe tangential (F_z) en fonction de V_c , f et a_p

IV. 3. 5 Analyse des résultats de la puissance de coupe en fonction de V_c , f et a_p

IV. 3. 5. 1 Analyse de la variance pour (P_c)

Les résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c) pour un niveau de confiance de 95% sont exprimés dans Tableau (IV.7).

Tableau IV. 9 : Analyse de variance pour la puissance P_c

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont, (%)
Analyse de variance pour la plaquette T1						
<i>Régression</i>	6	882292	147049	464,87	0,002	
V_c	1	258176	12703	40,16	0,024	29,24
F	1	107321	24065	76,08	0,013	12,16
a_p	1	450074	132	0,42	0,584	50,98
$V_c \times f$	1	62260	27039	85,48	0,011	7,05
$V_c \times a_p$	1	2443	4414	13,95	0,065	0,28
$f \times a_p$	1	2017	2017	6,38	0,127	0,23
<i>Erreur</i>	2	633	316			0,07
<i>Total</i>	8	882924				100
R-Sq = 99,93%				R-Sq(adj) = 99,71%		
Analyse de variance pour la plaquette T2						
<i>Régression</i>	6	1003441	167240	2586,88	0,000	
V_c	1	239438	6035	93,35	0,011	23,86%
F	1	135099	18782	290,52	0,003	13,46%
a_p	1	568098	27	0,42	0,583	56,61%
$V_c \times f$	1	53414	17172	265,61	0,004	5,32%
$V_c \times a_p$	1	665	4823	74,60	0,013	0,07%
$f \times a_p$	1	6727	6727	104,05	0,009	0,67%
<i>Erreur</i>	2	129	65			0,01%
<i>Total</i>	8	1003570				100
R-Sq = 99,99%				R-Sq (Adj) = 99,95%		
Analyse de variance pour la plaquette T3						
<i>Régression</i>	6	1150236	191706	378,54	0,003	
V_c	1	338025	77	0,15	0,734	29,36%
F	1	109222	4674	9,23	0,093	9,49%
a_p	1	670433	88	0,17	0,718	58,24%
$V_c \times f$	1	24332	5008	9,89	0,088	2,11%
$V_c \times a_p$	1	2013	6872	13,57	0,066	0,17%
$f \times a_p$	1	6212	6212	12,27	0,073	0,54%
<i>Erreur</i>	2	1013	506			0,09%
<i>Total</i>	8	1151249				100
R-Sq = 99,91%				R-Sq(adj) = 99,65%		

Ce tableau indique que la profondeur de coupe (a_p) est le facteur le plus significatif influençant la puissance de coupe (P_c) avec des contributions de 50,98%, 56,61% et 58,24%, suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec des contributions de 29,24%, 23,86% et 29,36% pour les plaquettes GC2015, GC4215 et GC1015 respectivement.

L'avance par tour (f) s'est avérée moins significative, sa contribution est de 12,16%, 13,46% et 9,49% pour GC2015, GC4215 et GC1015, respectivement. L'interaction entre la vitesse de coupe et l'avance par tour ($V_c * f$) est également significative pour la puissance de coupe (P_c), ses contributions sont de 7,05%, 5,32% et 2,11% pour GC2015, GC4215 et GC1015.

IV. 3. 5. 2 Analyse de régression de (P_c) en fonction de V_c, f et a_p

Les modèles mathématiques et leurs coefficients de détermination de la puissance de coupe (P_c) pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3 sont présentés dans les Équations (IV.23), (IV.24) et (IV.25), respectivement.

$$P_{c-T1} = 661 - 3,098 * V_c - 8119 * f + 215 * a_p + 38,57 * V_c \times f + 2,493 * V_c \times a_p + 3753 * f \times a_p \quad (\text{IV.23})$$

$R^2 = 99,93\%$; R^2 ajusté était de 99,71 %.

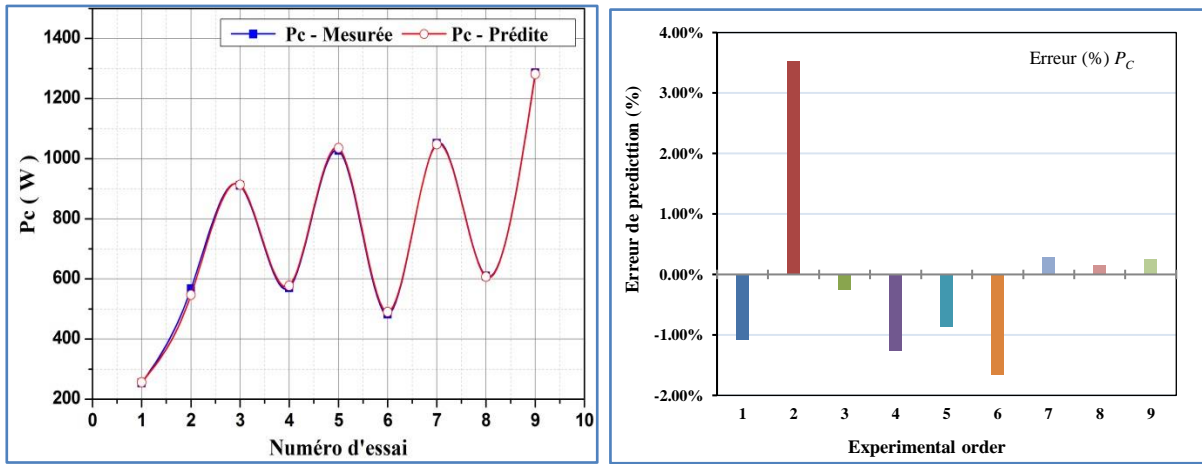
$$P_{c-T2} = 544,6 - 2,136 * V_c - 7172 * f - 98 * a_p + 30,74 * V_c \times f + 2,606 * V_c \times a_p + 6854 * f \times a_p \quad (\text{IV.24})$$

$R^2 = 99,99\%$; R^2 ajusté était de 99,95 %.

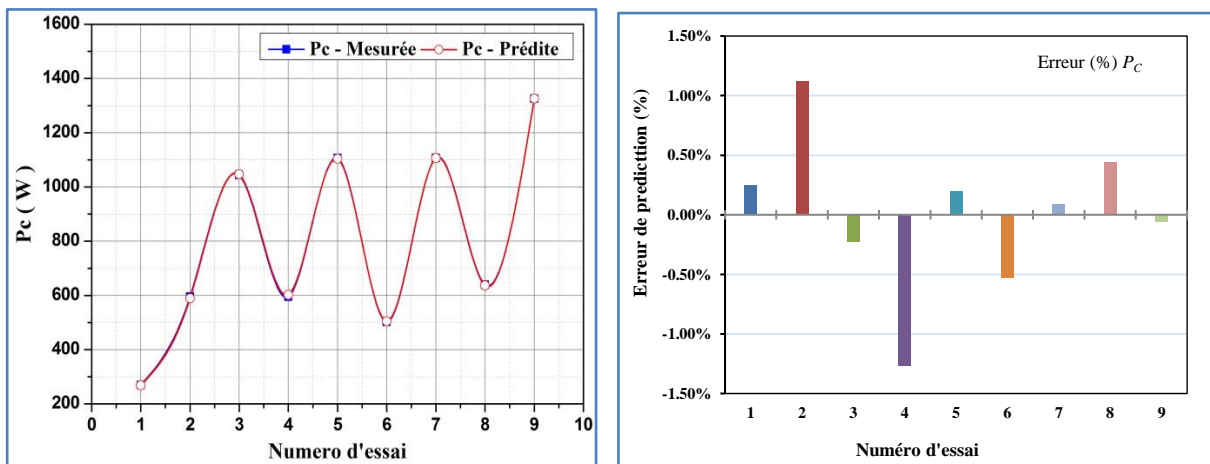
$$P_{c-T3} = 128 - 0,241 * V_c - 3578 * f - 175 * a_p + 16,60 * V_c \times f + 3,111 * V_c \times a_p + 6586 * f \times a_p \quad (\text{IV.25})$$

$R^2 = 99,91\%$; R^2 ajusté était de 99,65 %.

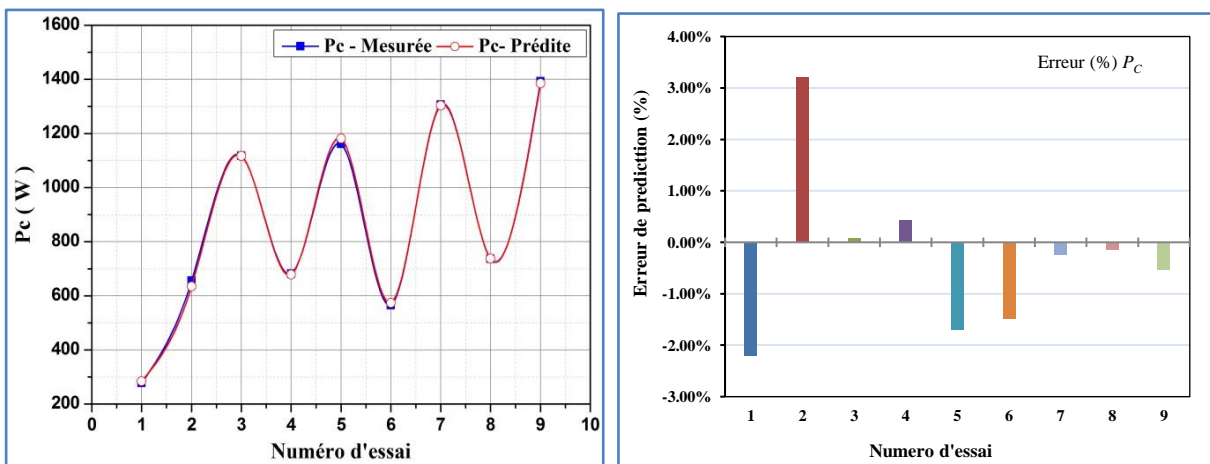
La Figure (IV.11) illustre les différences entre les valeurs mesurées et celles prédites de la puissance de coupe (P_c). On remarque que l'allure générale de la courbe des valeurs prédites suit celle de la courbe des valeurs expérimentales pour les trois plaquettes de coupe T1, T2 et T3. En notant que les erreurs de prédiction sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de 2,21% pour les trois outils de coupe.



(a)



(b)



(c)

Figure IV. 11 : Performance de prédiction de P_c pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.

IV. 3. 5. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (P_c)

La Figure (IV.12) présente les résultats de la surface de réponse en 3D de la puissance de coupe (P_c) en fonction des conditions de coupe (V_c , a_p et f).

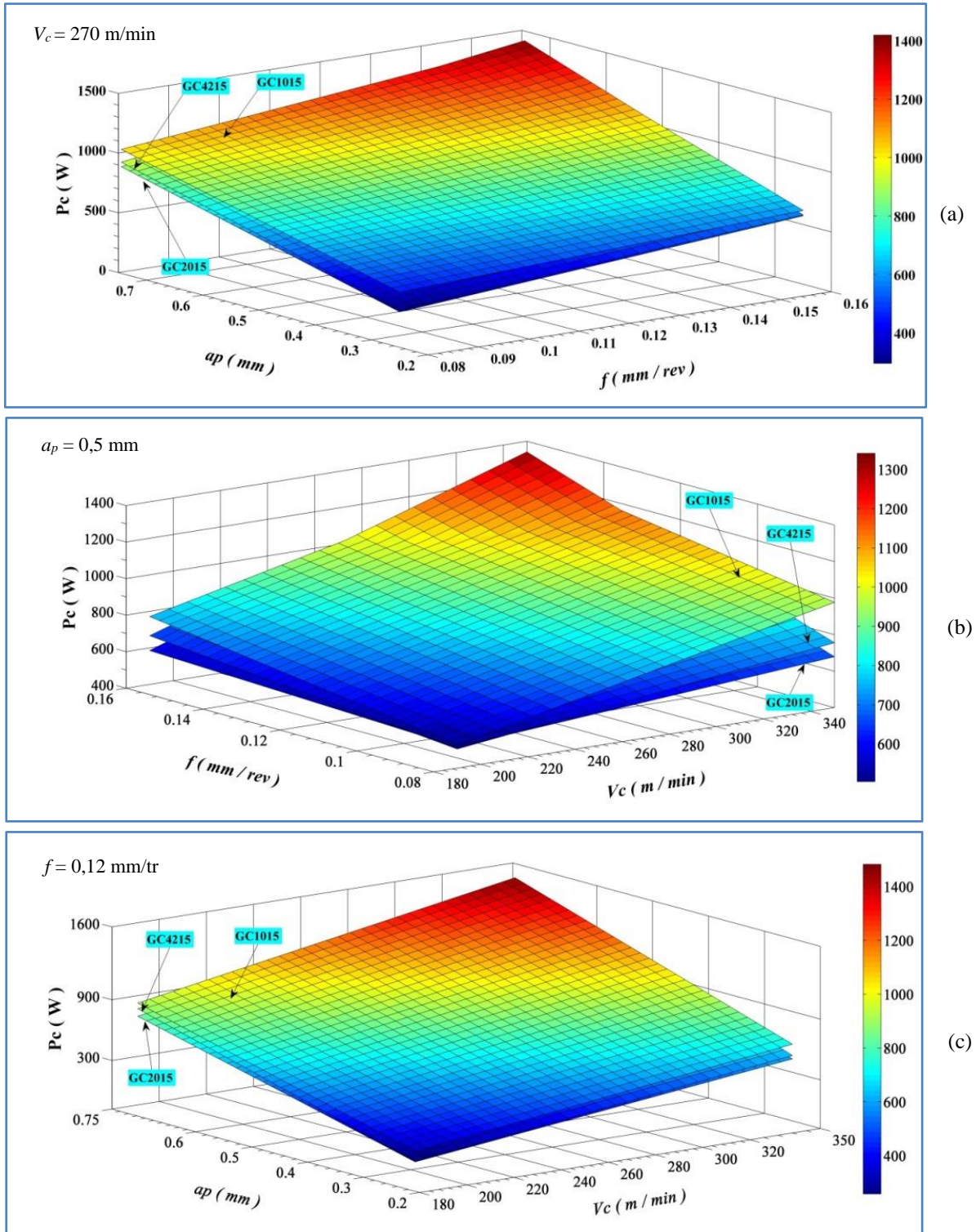


Figure IV. 12 : Courbes de surface 3D de la puissance de coupe (P_c) en fonction de V_c , f et a_p de T1, T2 et T3.

Comme on peut le voir à partir de cette figure, la puissance de coupe tend à augmenter considérablement avec l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) et de la vitesse de coupe (V_c). Par contre l'augmentation de l'avance par tour (f), engendre un accroissement moins important comparativement à la profondeur de passe (a_p) et à la vitesse de coupe (V_c). Avec l'augmentation des trois facteurs (V_c), (f) et (a_p), la puissance de coupe s'accroît puisqu'elle est étroitement liée à l'augmentation des efforts de coupe et aussi à la vitesse de coupe (Équation IV.5).

IV. 3. 6 Analyse des résultats de la pression de coupe en fonction de V_c , f et a_p

IV. 3. 6. 1 Analyse de variance pour (K_s).

Tableau IV. 10 : Analyse de la variance pour l'effort spécifique de coupe (K_s).

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont, %
Analyse de variance pour la plaquette T1						
<i>Régression</i>	6	1874150	312358	121,65	0,008	
V_c	1	1758	257	0,1	0,782	0,09
f	1	952017	134242	52,28	0,019	50,66
a_p	1	839750	48990	19,08	0,049	44,68
$V_c \times f$	1	24936	111	0,04	0,855	1,33
$V_c \times a_p$	1	9317	2520	0,98	0,426	0,50
$f \times a_p$	1	46373	46373	18,06	0,051	2,47
<i>Erreur</i>	2	5135	2568			0,27
<i>Total</i>	8	1879286				100
R-Sq = 99,73%			R-Sq (adj) = 98,91%			
Analyse de variance pour la plaquette T2						
<i>Régression</i>	6	1843549	307258	36,24	0,27	
V_c	1	28572	5931	0,70	0,491	1,54
f	1	948769	113184	13,35	0,067	51,00
a_p	1	709314	94827	11,18	0,079	38,12
$V_c \times f$	1	11358	9916	1,17	0,393	0,61
$V_c \times a_p$	1	25363	6037	0,71	0,488	1,36
$f \times a_p$	1	120172	120172	14,17	0,064	6,46
<i>Erreur</i>	2	16957	16957			0,91
<i>Total</i>	8	1860507				100
R-Sq = 99,09%			R-Sq (Adj) = 96,35%			
Analyse de variance pour la plaquette T3						
<i>Régression</i>	6	2383053	397176	173,58	0,006	
V_c	1	5524	141431	61,81	0,016	0,23
f	1	1399286	7799	3,41	0,206	58,61
a_p	1	823848	30179	13,19	0,068	34,50
$V_c \times f$	1	52046	73856	32,28	0,030	2,18
$V_c \times a_p$	1	58758	5051	2,21	0,276	2,46
$f \times a_p$	1	43590	43590	19,05	0,049	1,83
<i>Erreur</i>	2	5476	2288			0,19
<i>Total</i>	8	2387629				100
R-Sq = 99,81%			R-Sq (adj) = 99,23%			

Le Tableau (IV.10) présente les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour la pression spécifique de coupe (K_s). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux du régime de coupe ainsi que les interactions sur la pression spécifique de coupe (K_s). L'analyse des résultats montre que les paramètres significatifs sont l'avance par tour (f) avec une contribution de 50,66%, 51% et 58,61%, respectivement pour les outils de coupe T1, T2 et T3 suivie par (a_p) avec des contributions de 44,68%, 38,12% et 34,50% la vitesse de coupe est insignifiante pour la pression de coupe.

IV. 3. 6. 2 Analyse de régression de (K_s) en fonction de V_c , f et a_p

Les modèles mathématiques et leurs coefficients de détermination de la pression de coupe (K_s) pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3 sont présentés dans les Équations (IV.26), (IV.27) et (IV.28), respectivement.

$$k_{s.T1} = 6156 - 0,44 * V_c - 19175 * f - 4138 * a_p + 2,5 * V_c \times f + 1,88 * V_c \times a_p + 17996 * f \times a_p \quad (\text{IV.26})$$

$R^2 = 99,73\%$; R^2 ajusté était de 98,91 %.

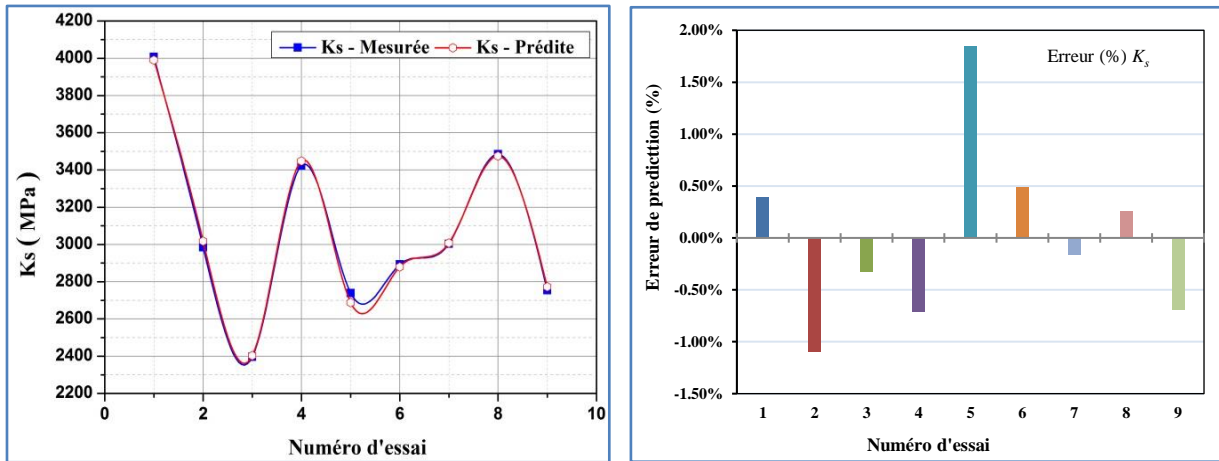
$$k_{s.T2} = 6309 + 2,12 * V_c - 17607 * f - 5756 * a_p - 23,4 * V_c \times f + 2,92 * V_c \times a_p + 28969 * f \times a_p \quad (\text{IV.27})$$

$R^2 = 99,09\%$; R^2 ajusté était de 96,35 %.

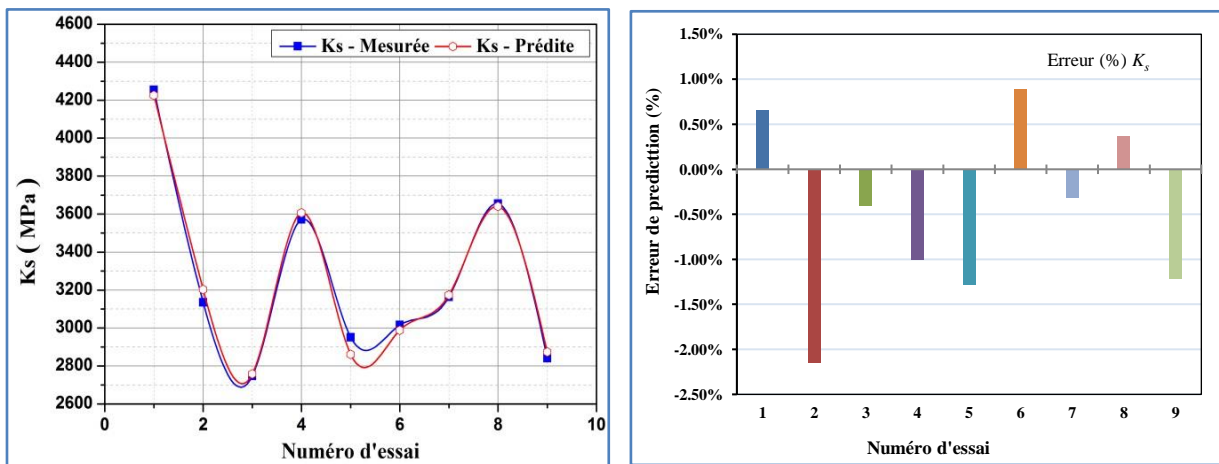
$$k_{s.T3} = 4363 + 10,34 * V_c - 4622 * f - 3247 * a_p - 63,7 * V_c \times f - 2,67 * V_c \times a_p + 17447 * f \times a_p \quad (\text{IV.28})$$

$R^2 = 99,81\%$; R^2 ajusté était de 99,23 %.

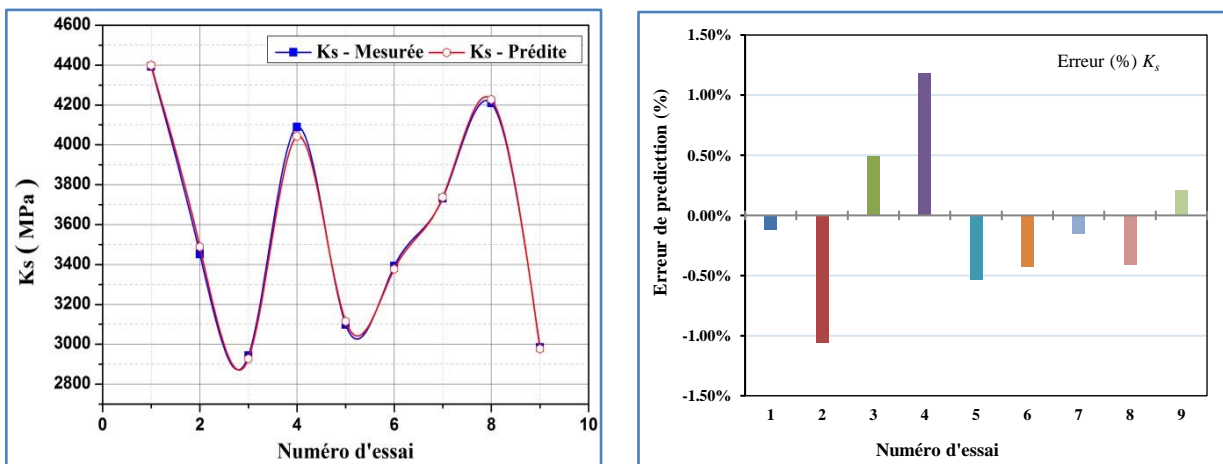
La Figure (IV.13) montre la comparaison entre les valeurs prédites et mesurées de la pression de coupe (K_s). De ces comparaisons, nous pouvons dire que les valeurs prédites sont très proches de celles enregistrées expérimentalement pour les trois plaquettes de coupe. Notons aussi, que les erreurs de prédiction sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de 1,84% pour les trois outils de coupe.



(a)



(b)



(c)

Figure IV. 13 : Performance de prédiction de K_s pour les trois plaquettes de coupe utilisées T1, T2 et T3, respectivement.

IV. 3. 6. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (K_s)

La Figure (IV.14) expose les diagrammes (3D) de la pression spécifique de coupe (K_s) en fonction des conditions de coupe (V_c , f et a_p) pour les trois plaquettes de coupe T1, T2 et T3.

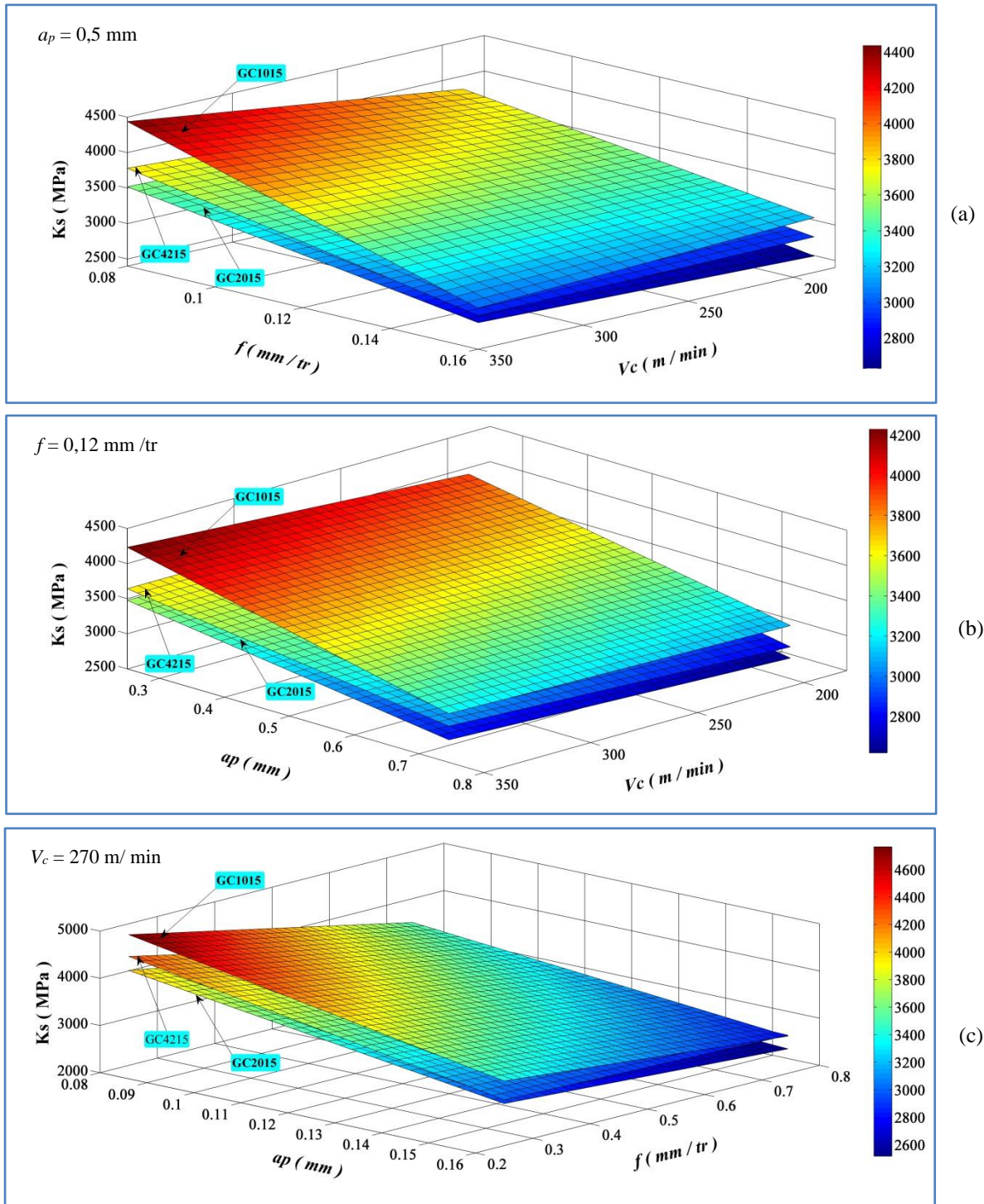


Figure IV. 14 : Courbes de surface 3D de l'effort spécifique de coupe (K_s) en fonction de V_c , f et a_p de T1, T2 et T3.

La Figure (IV.14-a) montre que l'avance par tour (f) a la plus grande influence sur la pression spécifique de coupe (K_s) vu sa pente élevée. Dans la Figure (IV.14-b), on remarque une légère diminution de (K_s) en fonction de la profondeur de passe (a_p). La Figure (IV.14-c), montre la forte pente de (f) et (a_p), et que l'augmentation de ces deux facteurs diminue la pression spécifique de coupe (Équation IV.4), ce qui est bénéfique à l'usinage.

IV. 3. 7 Analyse des résultats de (MRR) en fonction de V_c , f et a_p

IV. 3. 7. 1 Analyse de variance pour (MRR)

L'analyse de la variance (ANOVA) pour le taux d'enlèvement de matière (MRR) est présentée dans le Tableau (IV.11). On remarque clairement que la profondeur de coupe (a_p) est le paramètre qui présente la signification statistique la plus élevée 55,69%. Elle est suivie par l'avance par tour (f) qui est présente une contribution de 21,34%. La vitesse de coupe est en dernière position avec une contribution de 15,71%. L'interaction entre la vitesse de coupe et l'avance par tour est significative avec une contribution de (5,95%). Les interactions ($V_c \times a_p$ et $f \times a_p$) présentent une signification statistique presque négligeable (0,33% et 0,91%).

Tableau IV. 11 : Analyse de variance pour le taux d'enlèvement de la matière (MRR).

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F- value	P-value	Cont, (%)
Régression	6	527,962	87,9937	*	*	
V_c	1	82,959	6,6089	*	*	15,71
f	1	112,667	7,7649	*	*	21,34
a_p	1	294,000	0,6156	*	*	55,69
$V_c \times f$	1	31,412	8,4870	*	*	5,95
$V_c \times a_p$	1	1,755	5,8364	*	*	0,33
$f \times a_p$	1	5,169	5,1694	*	*	0,98
Erreur	2	0,000	0,000			
Total	8	527,962				100

R-Sq = 100,00% R-Sq (adj) = 100,00%

IV. 3. 7. 2 Analyse de régression de (MRR) en fonction de V_c , f et a_p

Le modèle mathématique du taux d'enlèvement de matière (MRR) et son coefficient de détermination est donné ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 MRR = & 14,0667 - 0,0706667 * V_c - 145,833 * f - 14,6667 * a_p + 0,683333 * V_c \times f \\
 & + 0,09066667 * V_c \times a_p + 190 * f \times a_p
 \end{aligned}
 \tag{IV.29}$$

R^2 égal à 100 % ; R^2 ajusté était de 100 %.

IV. 3. 7. 3 Graphiques de surfaces 3D pour (MRR)

La Figure (IV.15 a-b) montre l'évolution du taux d'enlèvement de matière (MRR) en fonction des paramètres de coupe (V_c , a_p et f).

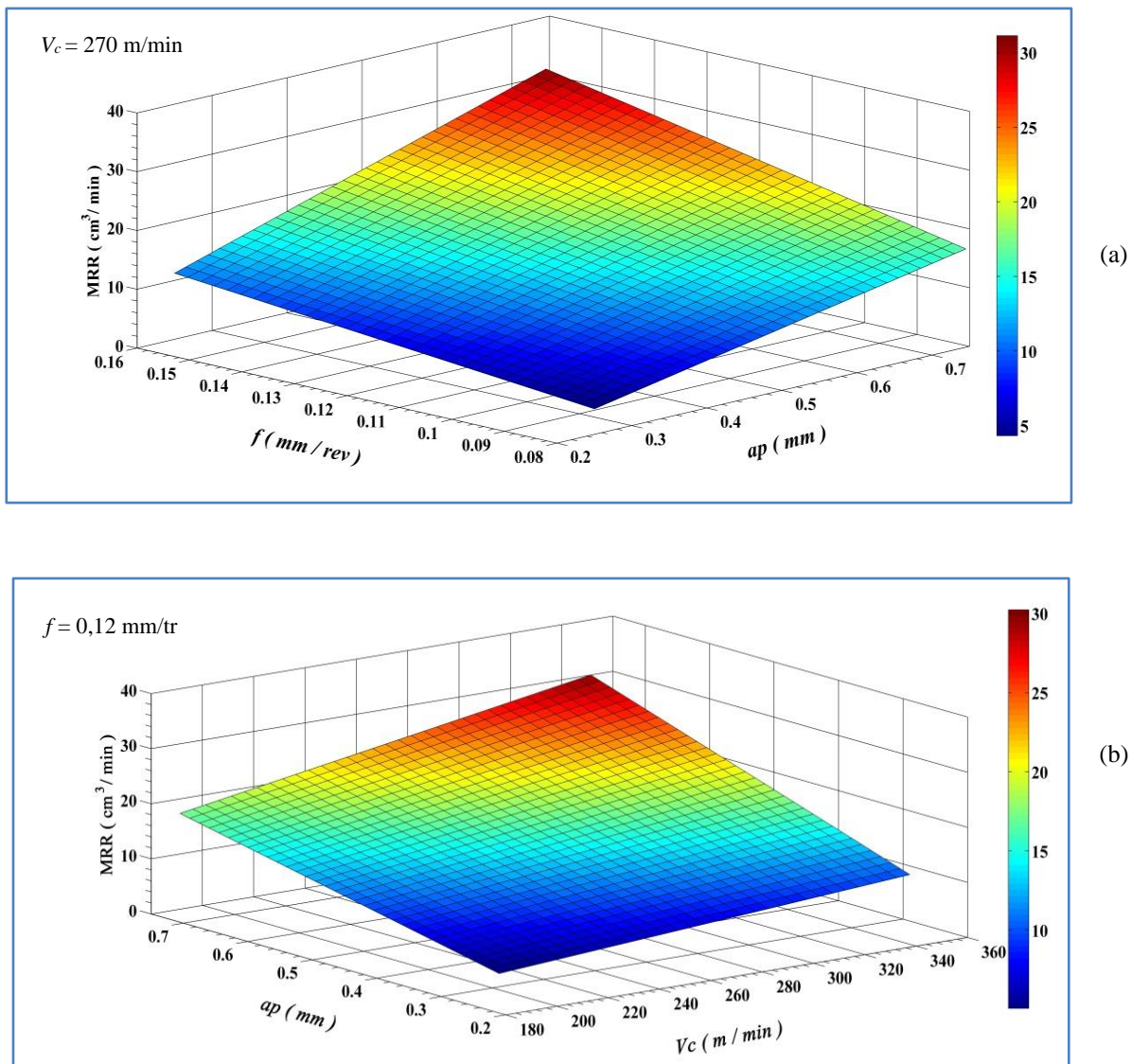


Figure IV. 15 : Courbes de surface 3D de taux d'enlèvement de matière (MRR) en fonction de V_c , f et a_p .

Il est clairement observé que la courbe de la surface de réponse pour le taux d'enlèvement de matière (MRR) tend à augmenter de manière significative avec l'augmentation de la profondeur (a_p), cependant elle tend à augmenter moins avec l'augmentation de l'avance par tour et de la vitesse de coupe. Il convient de noter que la combinaison des trois valeurs les plus élevées des paramètres (V_c), (f) et (a_p) produit un taux d'enlèvement de matière maximal.

IV. 3. 8 Tests de confirmation

Afin de vérifier l'adéquation des modèles mathématiques développés pour la rugosité de surface (R_a) et les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), trois nouveaux essais ont été réalisés pour chaque plaquette de coupe (GC2015, GC4215 et GC1015) avec des conditions de coupe comprises dans la plage des essais définis précédemment. Les conditions de coupe utilisées, les valeurs expérimentales et les valeurs prédites associées pour R_a , F_a , F_r et F_z sont présentées dans le Tableau (IV.12).

La comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales associées pour les trois plaquettes de coupe a été effectuée (Figures IV. 17-18). A partir des résultats obtenus, nous avons remarqué que les valeurs d'erreur relative sont très faibles, et ne dépassent pas la valeur de 3,63% pour la rugosité de surface, la valeur de 3,47% pour l'effort de coupe tangentiel, ce qui nous permet de dire que les modèles mathématiques obtenus ont une excellente précision.

Tableau IV. 12 : Testes de confirmation

Test N°	Paramètres de coupe			Rugosité de surface (R_a)			Effort de coupe axial (F_a)			Effort de coupe radial (F_r)			Effort de coupe tangentiel (F_z)		
	V_c	f	a_p	Mesuré	Prédite	Erreur %	Mesuré	Prédite	Erreur %	Mesuré	Prédite	Erreur %	Mesuré	Prédite	Erreur %
T1,															
1	260	0,11	0,3	0,66	0,6740	2,1212	64,26	61,7308	3,9358	96,17	98,3396	2,2560	109,6	106,3190	2,9936
2	350	0,09	0,4	0,49	0,5039	2,8367	83,57	84,2915	0,8633	106,81	111,3970	4,2945	115,51	111,4930	3,4776
3	260	0,14	0,5	0,87	0,8384	3,6321	102,43	105,2428	2,4760	130,14	131,8720	1,3308	187,66	189,8020	1,1414
T2															
1	260	0,11	0,3	0,76	0,7805	2,6973	52,15	53,3588	2,3179	91,68	87,6862	4,3562	112,47	114,4146	1,7289
2	350	0,09	0,4	0,55	0,5349	2,7454	77,49	73,6990	4,8922	102,61	99,5195	3,0118	129,67	126,1255	2,7334
3	260	0,14	0,5	0,99	1,0054	1,5555	92,43	94,7032	2,4593	120,49	119,6588	0,6898	209,45	204,5756	2,3272
T3															
1	260	0,11	0,3	0,81	0,8314	0,81	75,85	77,9692	2,7939	118,7	113,3396	4,5159	131,91	129,7210	1,6594
2	350	0,09	0,4	0,62	0,5985	0,62	100,62	97,2060	3,3929	122,52	119,9810	2,0723	148,73	152,4930	2,5300
3	260	0,14	0,5	1,12	1,0903	1,12	131,80	133,2428	1,0946	157,21	159,1304	1,2215	223,39	221,2040	0,9785

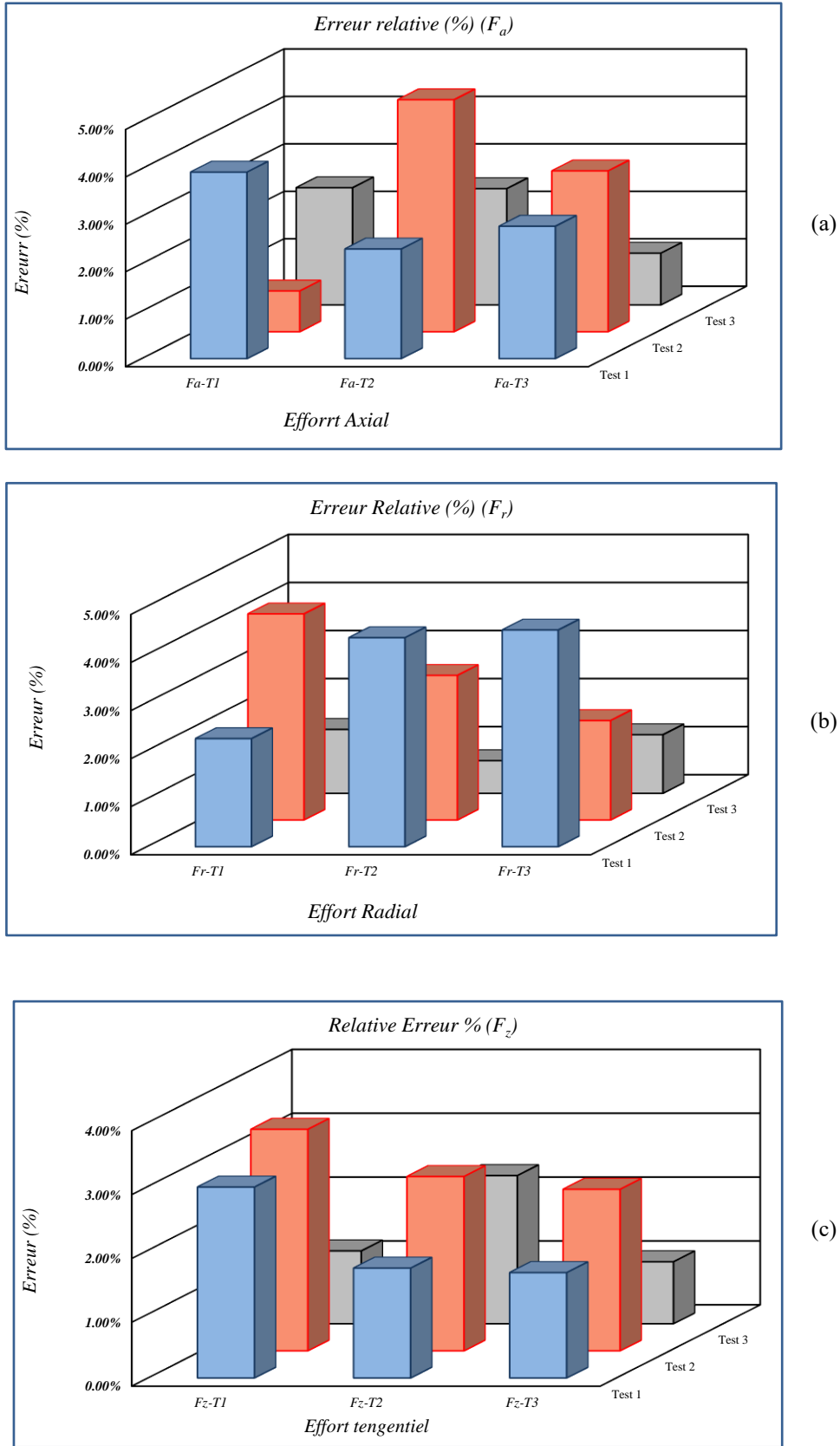


Figure IV. 16 : Erreurs relatives entre les valeurs expérimentales et prédites : a) F_a , b) F_r et c) F_z pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3).

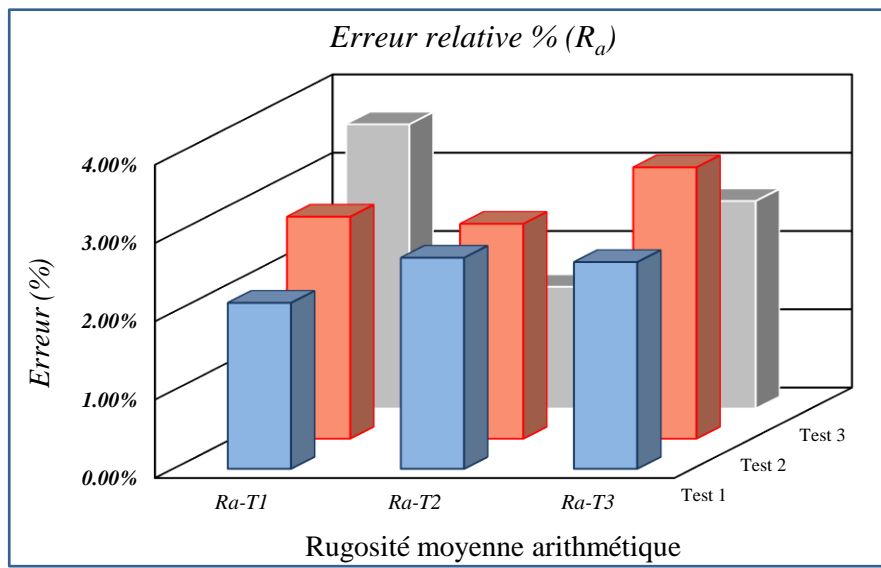


Figure IV. 17 : Erreurs relatives entre les valeurs expérimentales et prédites de R_a pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3).

IV. 4 Conclusions

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie de surface de réponse (RSM) en tournage de l'acier AISI 4140 avec les trois carbure revêtue (GC2015), (GC4215) et (GC1015) a permis d'obtenir à la fois des modèles mathématiques pour la rugosité (R_a), les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), la puissance de coupe (P_c) l'effort de coupe spécifique (K_s) et le volume de copeau enlevé (MRR) en fonction des paramètres de coupe. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- 1) L'effort de coupe la plus faible est générée par l'utilisation de la plaquette de coupe en CVD (T1), tandis que la plus élevée est générée par l'utilisation de la plaquette PVD (T3).
- 2) La valeur la plus faible de la rugosité de surface a été atteinte par la plaquette de coupe CVD (T1) tandis que la plus élevée a été produite par (T3). En conclusion, on peut conclure que la plaquette de coupe à revêtement CVD (TiCN-Al₂O₃-TiN) surpasse ses deux homologues en termes de rugosité de surface.
- 3) D'après les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) nous avons trouvé que :
 - L'avance par tour (f) a la plus forte influence sur la rugosité de surface.
 - Les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), sont fortement influencées par la profondeur de coupe (a_p) et l'avance par tour (f), tandis que la vitesse de coupe (V_c) a le moins d'effet pour les trois plaquettes testées.
 - La profondeur de coupe est le facteur principal qui affecte plus la puissance de coupe, suivi par la vitesse de coupe et l'avance pour les trois outils de coupe.
 - L'avance par tour et la profondeur de coupe sont les deux principaux facteurs affectant la pression spécifique de coupe (K_s)
 - Le taux d'enlèvement de la matière (MRR) est influencé principalement par (f) et (a_p).
- 4) Les modèles mathématique développés pour la rugosité de surface (R_a) les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), la puissance de coupe (P_c), la pression de coupe spécifique (K_s) et le taux d'enlèvement de la matière (MRR) en utilisant l'approche RSM, pour les trois outils utilisés (T1, T2 et T3), ont un coefficient de corrélation élevé (R^2) et des valeurs de probabilité (P-value) inférieures à 0,05. De plus, on note que les valeurs de pourcentage d'erreurs de prédiction pour les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z) sont très faibles et ne dépasse pas la

valeur de 3,37 % pour les trois outils de coupe. Les modèles mathématiques trouvés représentent un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent de faire des prédictions

- 5) D'après les tests de validation effectués, nous avons remarqué que les valeurs d'erreur relative sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de 4,89% pour tous les outils de coupe. Nous pouvons donc affirmer que les modèles mathématiques développés ont une excellente précision et peuvent être utilisés efficacement pour prédire les efforts d'usinage (F_a , F_r et F_z) des trois plaquettes de coupe T1, T2, T3.

CHAPITRE V

OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF DES PARAMÈTRES D'USINAGE EN UTILISANT DES MÉTHODES CONVENTIONNELLES ET NON-CONVENTIONNELLES

Dans ce chapitre, nous utilisons différentes méthodes d'optimisation multi-objectif conventionnelles et non conventionnelles (DF, MOALO, NAMDE, MOGWO, SHAMODE et NSGA-II) pour déterminer le régime optimal de trois outils de coupe (T1, T2 et T3) lors de l'usinage de l'Acier AISI 4140. Les paramètres de coupe considérés dans cette étude sont les suivants : V_c , f et a_p , et les paramètres technologiques optimisés comprennent : R_a , F_a , F_r , F_z , K_s , P_c et MRR.

V.1 Introduction

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques d'optimisations. Parmi ces méthodes, on peut citer ; la fonction de désirabilité (DF) qui représente une des méthode conventionnelle [150, 151], ainsi que des méthodes non conventionnelle telles que : MOALO [152, 153], NAMDE [154, 155] , MOGWO [156, 157], SHAMODE [158], NSGA-II [159], etc. Ces méthodes d'optimisation permet de sélectionner les conditions de coupe les plus adaptées pour atteindre les objectifs technologiques souhaités, ce qui a généralement un impact économique direct sur la production tel que : le temps technologique d'usinage ou le coût global d'opération [160]. L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation multi-objective des conditions de coupe en utilisant différentes méthodes d'optimisation conventionnelle et non conventionnelle.

Les chercheurs travaillant dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière cherchent à identifier les conditions d'usinage les plus efficaces pour répondre à des objectifs économiques, technologiques ou les deux simultanément. Le travail présenté dans ce chapitre s'inscrit dans ce contexte et vise à présenter différentes méthodes d'optimisation multi-objectif conventionnelle et non conventionnelle pour déterminer la combinaison optimale des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) lors du tournage de l'Acier AISI 4140, en tenant compte des situations et des contraintes spécifiques. Cette étude a également porté sur les paramètres technologiques (R_a , F_a , F_r , F_z , K_s , P_c et MRR).

Les méthodes d'optimisation utilisées dans ce chapitre sont présentées ci-dessous :

- Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode conventionnelle (DF).
 - ✓ La méthode de la fonction désirabilité (DF).
- Optimisation multi-objectif en utilisant les méthodes non-conventionnelles.
 - ✓ L'optimiseur multi-objectif de Fourmi Lion (MOALO).
 - ✓ Le nouvel algorithme d'évolution différentielle mixte adaptatif (NAMDE).
 - ✓ Une étude comparative entre quatre récentes méta-heuristiques algorithmes à savoir : L'optimiseur multi-objectif de Fourmi Lion (MOALO), l'optimiseur multi-objectif de type loup gris (MOGWO), la méthode d'évolution différentielle adaptative multi-objectifs basée sur l'histoire successive (SHAMODE), l'algorithme génétique de triage non dominé II (NSGA-II).

V. 2 Optimisation multi-objectif en utilisant la fonction désirabilité

V. 2. 1 Procédure adaptée pour la méthode de fonction désirabilité (DF)

L'approche de la fonction désirabilité est largement utilisée par les chercheurs pour l'optimisation multi-objective des réponses. L'utilisation considérable de cette approche est due en fait à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [161, 162].

La désirabilité permet d'évaluer en fonction des réponses calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés. La fonction d'objectif $F(x)$, définie par la relation (V.1) a été utilisée pour résoudre ce type de problème de conception.

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (\text{V.1})$$

$$F(x) = -DF$$

Où (d_i) et (w_i) , sont respectivement l'opportunité définie pour le i ème résultat visé et la pondération de d_i . L'opportunité (d_i) peut être définie sous différentes formes tout dépend de l'objectif visé de chaque résultat. Pour une valeur spécifique de désirabilité (d_i) (minimum ou un maximum), les désirabilités peuvent être calculées par les équations suivantes respectivement (V.2, V.3 et V.4).

$$Des(y) = \begin{cases} 0, & y < Low \\ \left(\frac{y - Low}{Tar - Low} \right)^w, & Low \leq y \leq Tar \\ 1, & y > Tar \end{cases} \quad (\text{V.2})$$

$$Des(y) = \begin{cases} 1, & y < Tar \\ \left(\frac{Up - y}{Up - Tar} \right)^w, & Tar \leq y \leq Up \\ 0, & y > Up \end{cases} \quad (\text{V.3})$$

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_2 \times \dots \times Des_i \times \dots \times Des_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n Des_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{V.4})$$

Où Y_i est la valeur trouvée de la i ème sortie pendant les processus d'optimisation, Low_i et $High_i$, sont respectivement les valeurs minimale et maximale des données expérimentales pour la sortie.

La Figure (V.1) représente la désirabilité en 2D. Elle a été mise au point à partir des équations (V.2 à V.4).

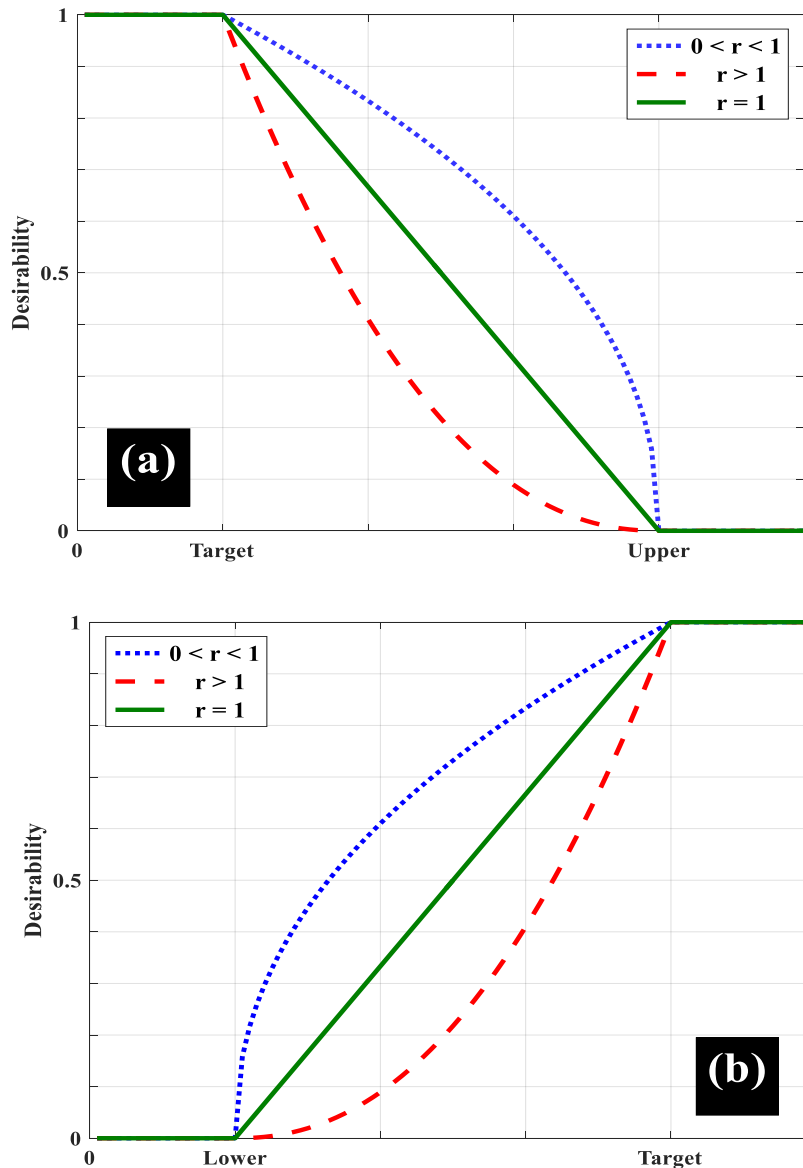


Figure V. 1: Diagramme de désirabilité 2D, (a) Minimum, (b) Maximum [163].

La Figure (V.1a) illustre la minimisation de la réponse, c'est-à-dire que lorsque la réponse est inférieure à la valeur cible, elle est évaluée à un niveau optimal, mais au-delà de la limite supérieure, elle devient nulle. En revanche, la Figure (V.1b) met en évidence la maximisation

de la réponse, dans laquelle la valeur optimale est atteinte lorsque la réponse est en dessous de la cible, mais devient nulle au-delà de la limite supérieure.

V. 2. 1. 1 Résultats

Dans ce cas d'optimisation, un avantage intéressant consiste à avoir le minimum de rugosité de surface (R_a) ainsi que l'effort tangentiel de coupe (F_z) et la puissance de coupe (P_c) et le maximum du débit du copeau enlevé (MRR) en même temps et c'est notre objectif dans cette partie. Nous avons attribué un degré d'importance de 5 à la rugosité de surface et au taux d'enlèvement de matière, tandis que la force et la puissance de coupe ont reçu un degré de 1. Les objectifs souhaités et les plages de variation des paramètres de coupe pour les trois outils utilisés sont résumés dans le Tableau (V.1).

Tableau V. 1 : Objectifs et plages de paramètres pour l'optimisation des conditions de coupe

Conditions de coupe & Réponses	Objectifs	Limite inférieur			Limite supérieur			Importance
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	
V_c (m/min)	Dans la gamme	190			350			3
f (mm/tr)	Dans la gamme	0,08			0,16			3
a_p (mm)	Dans la gamme	0,25			0,75			3
R_a (μm)	Minimisé	0,49	0,47	0,58	0,95	1,2	1,44	5
F_z (N)	Minimisé	80,13	85,09	87,87	287,57	329,68	353,05	1
P_c (W)	Minimisé	253,75	269,45	278,26	1285,08	1325,68	1392,24	1
MRR (cm ³ /min)	Maximisé	3,8	3,8	3,8	28	28	28	5

Le Tableau (V.2) présente les résultats des solutions proposées obtenus dans ce cas d'optimisation pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3).

Tableau V. 2 : Solutions pour l'optimisation pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3).

Sol N°	Paramètres de coupe			R_a (μm)	F_z (N)	P_c (W)	MRR (cm ³ /min)	Désirabilité	Observation
	V_c	f	a_p						
Outil de coupe T1									
1	349,999	0,080	0,747	0,499	178,672	1044,168	20,908	0,720	Choisi
2	349,999	0,080	0,719	0,495	172,294	1004,982	19,997	0,719	
3	341,407	0,080	0,750	0,496	181,457	1032,137	20,553	0,717	
Outil de coupe T2									
1	350,000	0,080	0,750	0,472	189,464	1106,226	21,000	0,726	Choisi
2	341,767	0,080	0,750	0,477	190,614	1087,231	20,566	0,720	
3	350,000	0,080	0,709	0,470	181,017	1050,544	19,682	0,719	
Outil de coupe T3									
1	318,119	0,080	0,750	0,583	223,861	1194,013	19,342	0,677	Choisi
2	330,061	0,080	0,729	0,581	218,867	1206,465	19,336	0,676	
3	303,989	0,080	0,750	0,584	224,125	1145,177	18,596	0,675	

La Figure (V.2) présente les résultats de l'optimisation pour les trois outils de coupe. Les valeurs optimales des paramètres de coupe et les paramètres technologiques optimisés. La

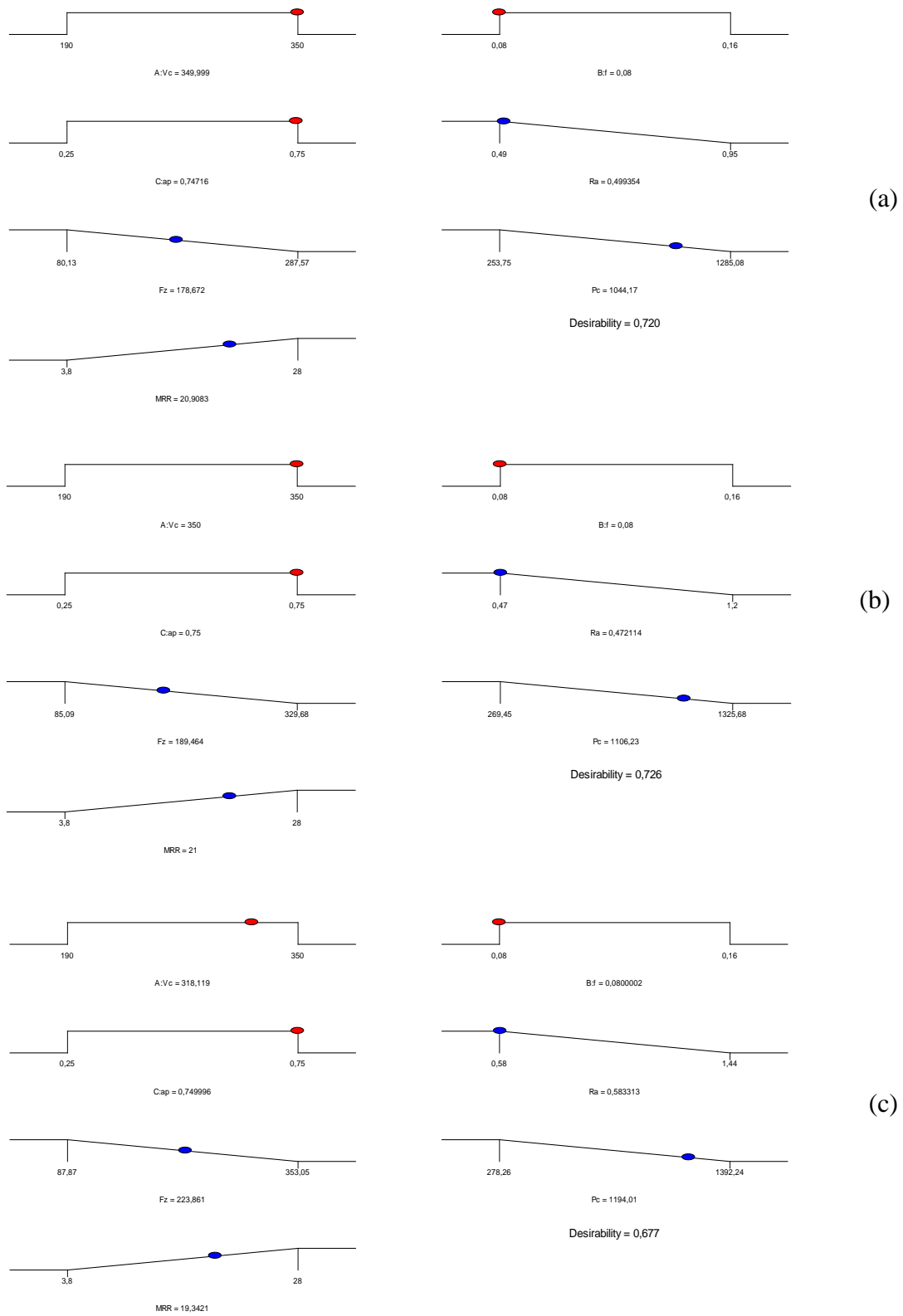


Figure V. 2 : Graphique de l'optimisation combinée de (R_a), (F_z), (P_c) et (MRR) pour :

(a) T1, (b) T2, (c) T3.

Figure (V.3) présente le graphique des barres analogiques des désirabilités pour les conditions de coupe (V_c, f et a_p) et les réponses (R_a, F_z, P_c et MRR), ainsi que les désirabilités combinées pour les trois outils de coupe (T1, T2, T3).

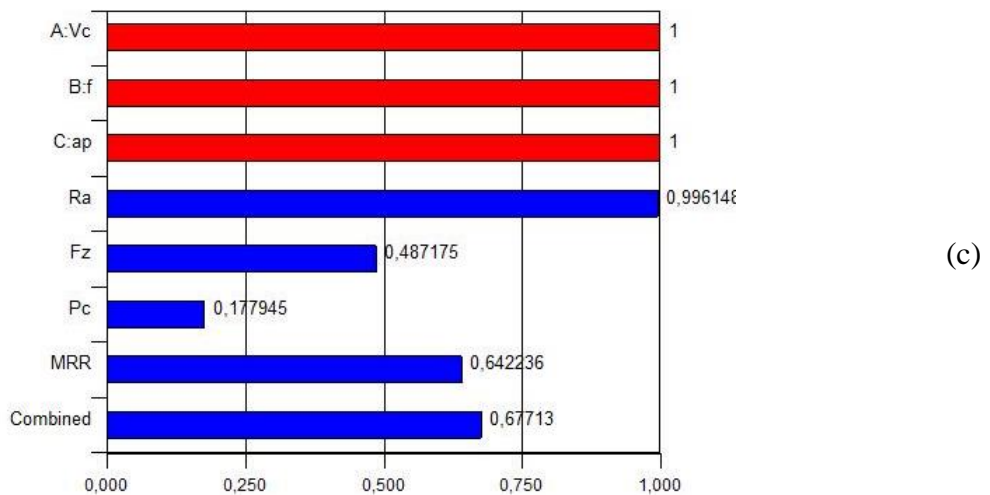
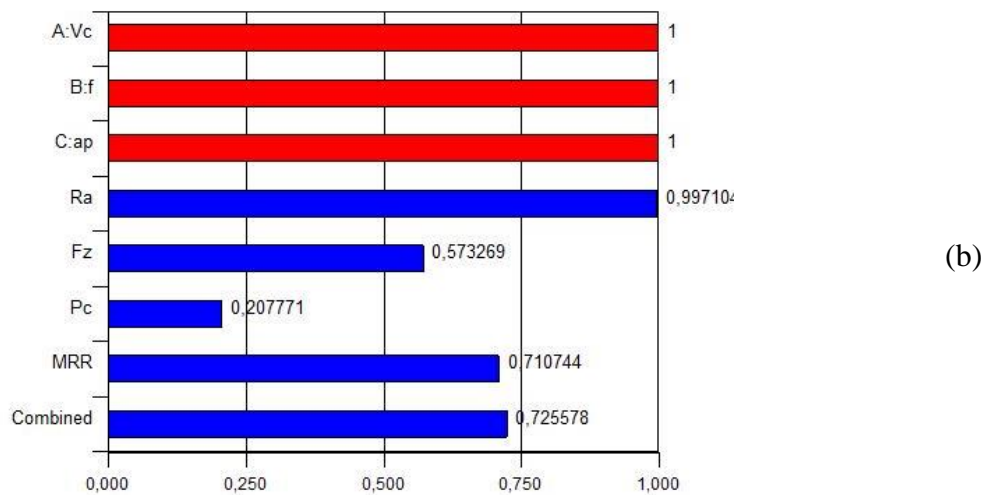
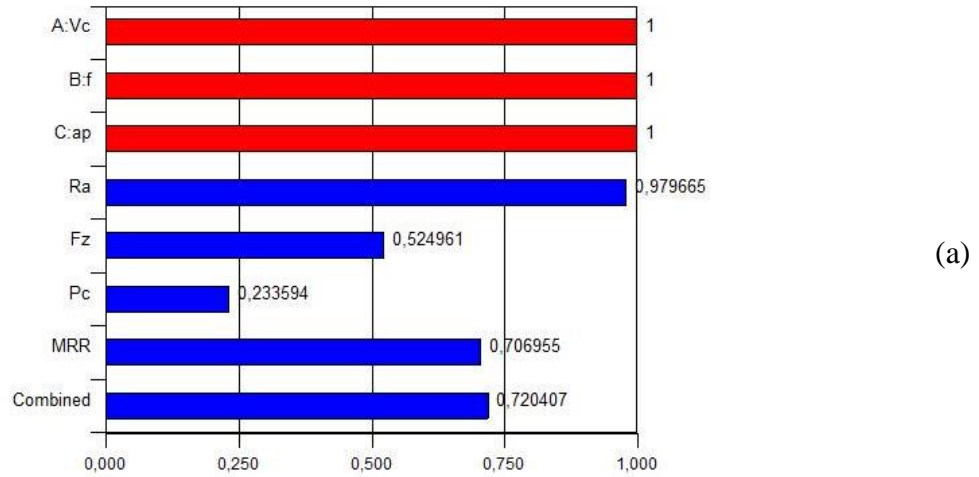


Figure V. 3 : Barres graphique de la désirabilité pour : (a) T1, (b) T2, (c) T3.

V. 3 Optimisation multi-objectif en utilisant les méthodes non-conventionnelles

Les techniques d'optimisation classiques ont démontré leur inefficacité lorsqu'il s'agit de résoudre des problèmes complexes impliquant des fonctions quadratiques, non linéaires ou des objectifs contradictoires. Pour surmonter ces désavantages, des approches innovantes appelées métaheuristiques ont été développées. Ces algorithmes émergents sont inspirés de la nature et reproduisent les principes de la physique, de la biologie et de l'intelligence en essaim, ce qui leur permet de résoudre une myriade de problèmes d'ingénierie complexes, chronophages et réels en une seule exécution [164]. Grâce à leur capacité à explorer l'espace des solutions de manière plus efficace et à éviter les pièges locaux, les métaheuristiques sont devenues une méthode de choix pour de nombreux problèmes d'optimisation difficiles.

Les méthodes méta-heuristiques multi-objectifs fonctionnent sur la base de l'utilisation d'un ensemble de solutions (individus) qui est traditionnellement appelé une population. La population est ensuite améliorée de manière itérative au moyen de mécanismes d'amélioration (par exemple, la reproduction et la sélection) jusqu'à ce qu'une condition de fin soit remplie. Pour l'optimisation multi-objective, les méta-heuristiques utilisant une population de solutions ont un certain avantage car on peut trier et trouver des solutions non dominées dans une population. Cette idée conduit à l'utilisation de Méta-heuristiques pour explorer un front de Pareto d'optimisation multi-objectif en une seule exécution. Plusieurs idées ont été utilisées pour traiter la recherche méta-heuristique multi-objective. Elles comprennent le concept de dominance de Pareto [165], l'élitisme [166] et le concept basé sur la décomposition [167]. La plupart des algorithmes exploitent le schéma de tri non dominé pour identifier les solutions non dominées. Pour un ensemble de solutions ou une population, tout individu qui n'est pas dominé par les autres est défendu comme une solution non dominée dans l'ensemble. Avec ces définitions, un ensemble de solutions non dominées peut être défini et amélioré itérativement pour atteindre le véritable front de Pareto.

V. 3. 1 Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode MOALO

MOALO est un nouvel algorithme inspiré de la nature, qui a été introduit par Mirjalili en 2017 [168]. Cet algorithme imite le comportement de chasse des lions fourmis et leurs interactions avec les proies correspondantes favorites. Le diagramme de suivi de MOALO est présenté dans la Figure (V. 4)

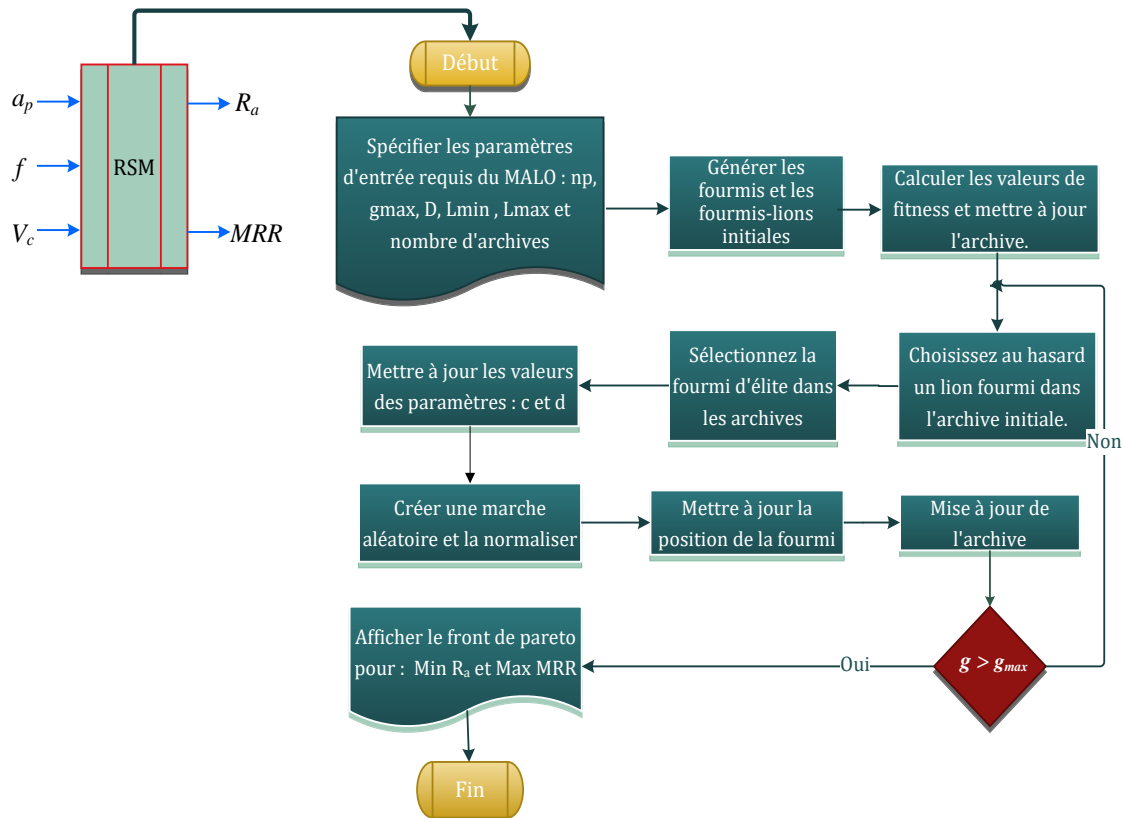


Figure V. 4 : Organigramme de l'approche MAOLA [169].

La technique de chasse des lions fourmis est très efficace, elle est supérieure à toute autre créature. Cinq caractéristiques principales sont observées dans la technique de chasse des lions-fourmis, à savoir la marche aléatoire des fourmis, la formation de pièges, la tromperie d'une fourmi dans un piège formé, la capture de la proie par différentes stratégies et la reformation des pièges [153]. Pour devenir plus performant, le fourmilier attrape sa nourriture en la chassant efficacement, alors que les fourmis sont censées se déplacer dans un espace de recherche. La marche libre des fourmis est aléatoire pour trouver la nourriture.

V. 3. 1. 1 Résultats

Dans ce cas d'optimisation, l'optimiseur fourmi-lion multi-objectif (MOALO) est intégré pour sélectionner les paramètres de coupe optimaux afin de minimiser la rugosité de surface (R_a) et de maximiser le taux d'enlèvement de matière (MMR) pendant le processus de tournage à sec de l'AISI 4140 avec trois outils de coupe différents (T1, T2 et T3).

Toutes les expériences ont été réalisées 50 fois indépendamment. De plus, la taille de la population (np) et le nombre maximum d'itérations (t_{max}) pour les cas étudiés sont $np=100$, $t_{max}=500$, respectivement. Les paramètres de l'algorithme étudié sont choisis sur la base

d'études antérieures [168]. Les résultats de la procédure d'optimisation sont donnés ci-dessous pour les trois outils de coupe.

➤ L'outil de coupe (T1)

Le Tableau (V.3) présente les trois meilleures solutions de Pareto obtenues par l'algorithme MOALO pour le premier outil de coupe (GC2015) ainsi que les valeurs des variables optimisées (V_c , a_p et f). L'historique des valeurs des fronts de Pareto obtenus est donné dans la Figure (V.5). Il ressort clairement du tableau que la première solution garantit une valeur minimale de rugosité ($V_c = 349,9812$ m/min, $a_p = 0,2794$ mm et $f = 0,0800$ mm/tr). En revanche, la valeur du deuxième objectif (MRR) est maximal pour la troisième solution ($V_c = 350$ m/min, $a_p = 0,75$ mm et $f = 0,1535$ mm/tr). Si l'on considère que les deux objectifs ont la même importance, la deuxième solution sera le choix approprié.

Tableau V. 3 : Résultats de l'optimisation de MOALO pour le premier outil de coupe

N°	$R_{a-GC2015}$ (μm)	MRR	V_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/tr)
1	0,43232459812	5,81750922879	349,98128950	0,27941053	0,0800137
2	0,53472978745	20,6829859660	347,30194229	0,69752015	0,0867127
3	0,98130724838	38,3510806111	350.00000000	0,75000000	0,1535733

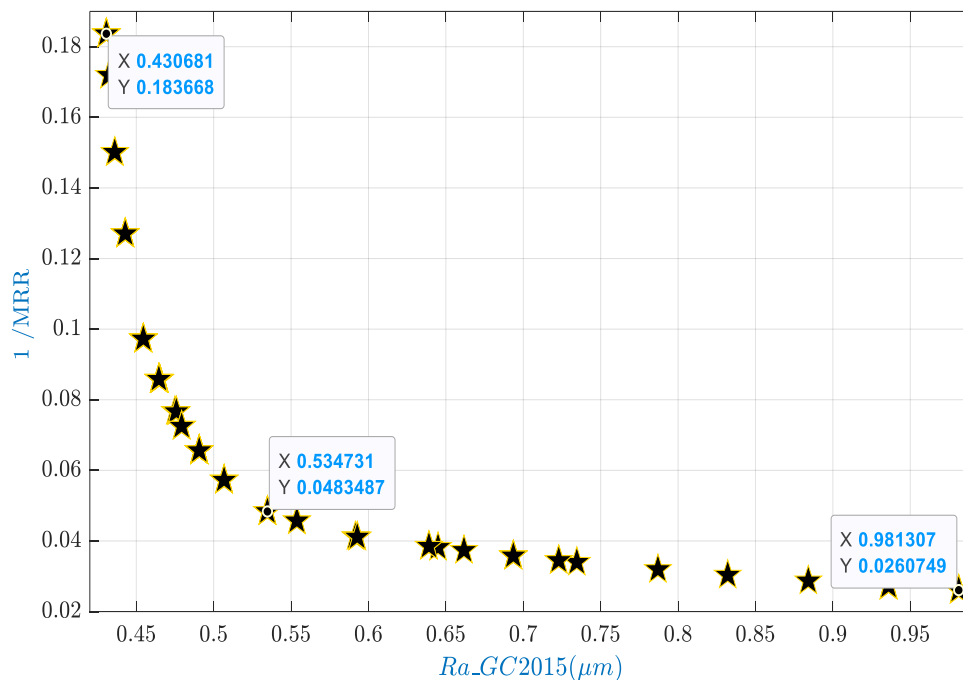


Figure V. 5 : Meilleurs fronts de Pareto atteints par MOALO pour l'outil de coupe (T1)

➤ L'outil de coupe (T2)

Le Tableau (V.4) présente les résultats concernant les meilleures valeurs des fonctions objectives pour le deuxième outil de coupe (GC4215). Comme pour le premier outil de coupe (T1), la première solution est utilisée pour minimiser les deux objectifs simultanément, la troisième garantit la valeur maximale du MRR. Cependant, la deuxième solution donne le même poids aux deux objectifs considérés. Le front de Pareto obtenu par MOALO est représenté sur la Figure (V.6) et confirme les valeurs données dans le tableau.

Tableau V. 4 : Résultats de l'optimisation de MOALO pour le deuxième outil de coupe.

N°	$R_{a-GC4215}$ (μm)	MRR	V_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/tr)
1	0,44947149617	5,16044976454	350,00000	0,259103897	0,080000000
2	0,54938740094	20,0826823981	349,77767	0,658018279	0,089442102
3	1,01917443823	35,4679185453	349,99849	0,749993667	0,141349723

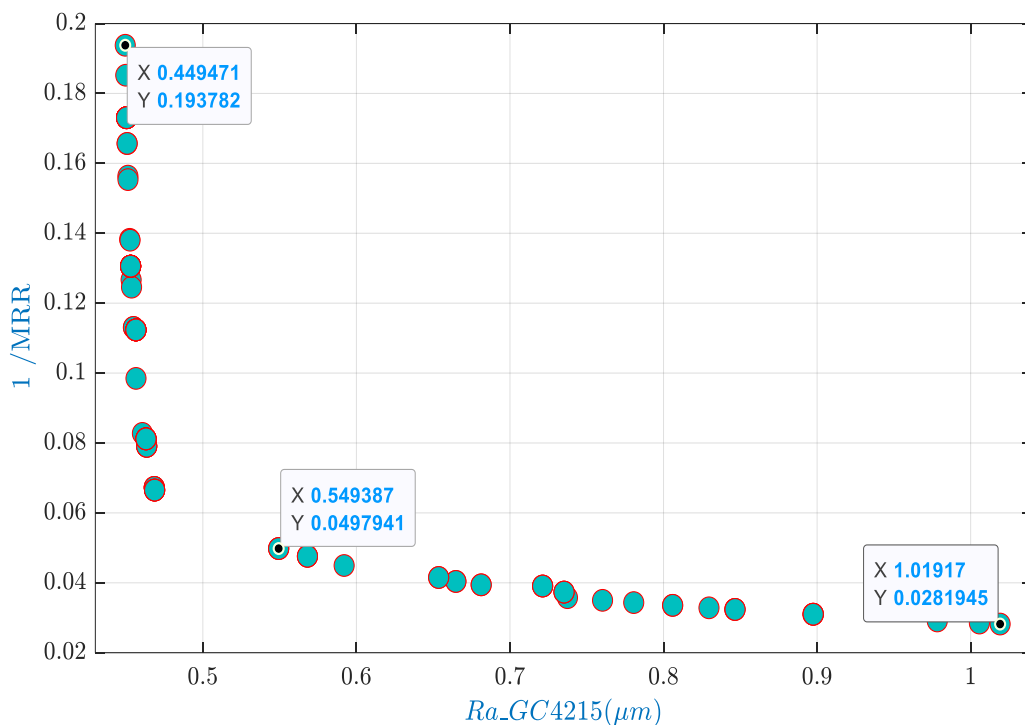


Figure V. 6 : Meilleurs fronts de Pareto atteints par MOALO pour le l'outil de coupe (T2)

➤ L'outil de coupe (T3)

Les meilleures valeurs des variables de conception et des fonctions objectives pour le dernier outil de coupe (GC1015) obtenues avec MOALO sont présentées dans le Tableau (V.5). Les meilleures valeurs de l'objectif sont : $R_a = 0,52028 \mu m$ et $MRR = 4,94209$ pour ($V_c = 350$ m/min, $a_p = 0,25233$ mm, $f = 0,08$ mm/tr), $R_a = 0,5855 \mu m$ et $MRR = 21,1387$ pour

($V_c = 350$ m/min, $a_p = 0,75$ mm, $f = 0,08058$ mm/tr), $R_a = 1,15047$ μm et $MRR = 38,74892$ pour ($V_c = 349,99406$ m/min, $a_p = 0,75$ mm, $f = 0,15526$ mm/tr). La Figure (V.7) montre le meilleur front de Pareto obtenu par MOALO pour le troisième outil de coupe.

Tableau V. 5 : Résultats de l'optimisation de MOALO pour le troisième outil de coupe

N°	$R_{a-GC1015}$ (μm)	MRR	V_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/tr)
1	0,52028553010	4,942091204621	350,000000	0,252336580	0,08000000
2	0,58555088680	21,13876813832	350,000000	0,750000000	0,08058835
3	1,15047278135	38,74892452368	349,994062	0,750000000	0,15526292

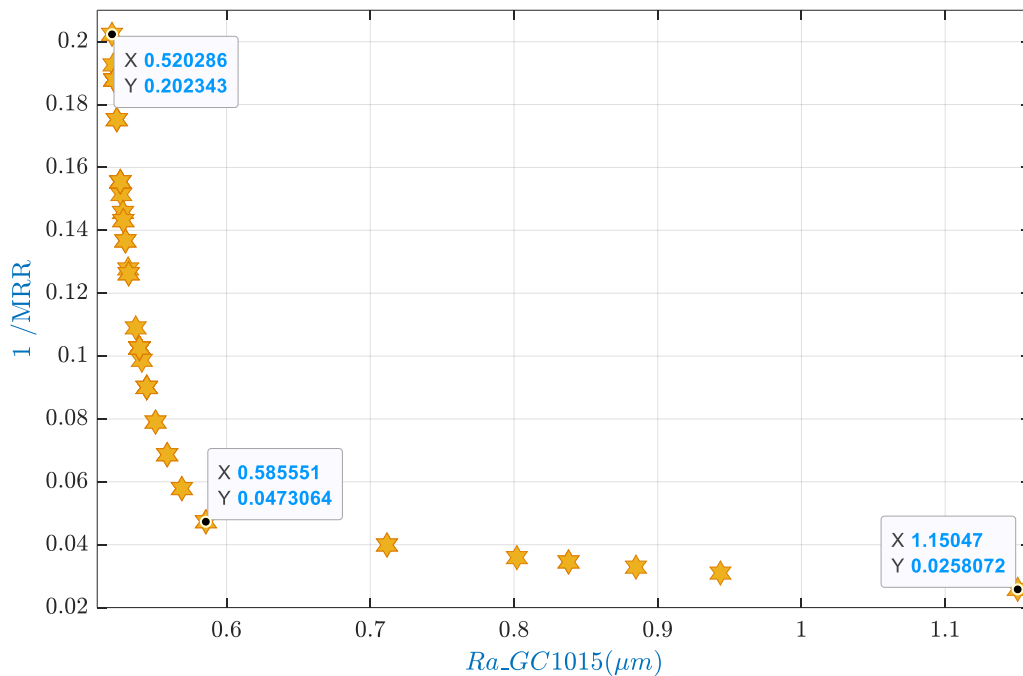


Figure V. 7 : Meilleurs fronts de Pareto atteints par MOALO pour l'outil de coupe (T3)

V. 3. 2 Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode NAMDE

Dans cette section, le nouvel algorithme d'évolution différentielle mixte adaptative (NAMDE) a été mis en œuvre pour l'optimisation multi-objectif [154]. Pendant le processus d'optimisation, l'objectif principal était de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe afin de minimiser à la fois l'effort de coupe tangentiel (F_z), la puissance de coupe (P_c) et de maximiser le taux d'enlèvement de matière (MRR) pendant le processus de tournage à sec de l' AISI 4140 avec trois outils de coupe (T1, T2 et T3). Ce cas d'optimisation est

recommandé pour réduire le coût global de la pièce usinée en minimisant la consommation d'énergie.

V. 3. 2. 1 Procédure d'optimisation

L'organigramme de la méthode utilisée est présenté à la Figure (V.8). Comme le montre cette figure, la méthode NAMDE se compose de quatre étapes principales : initialisation, mutation, croisement et sélection. Une brève description de chaque étape est donnée ci-dessous.

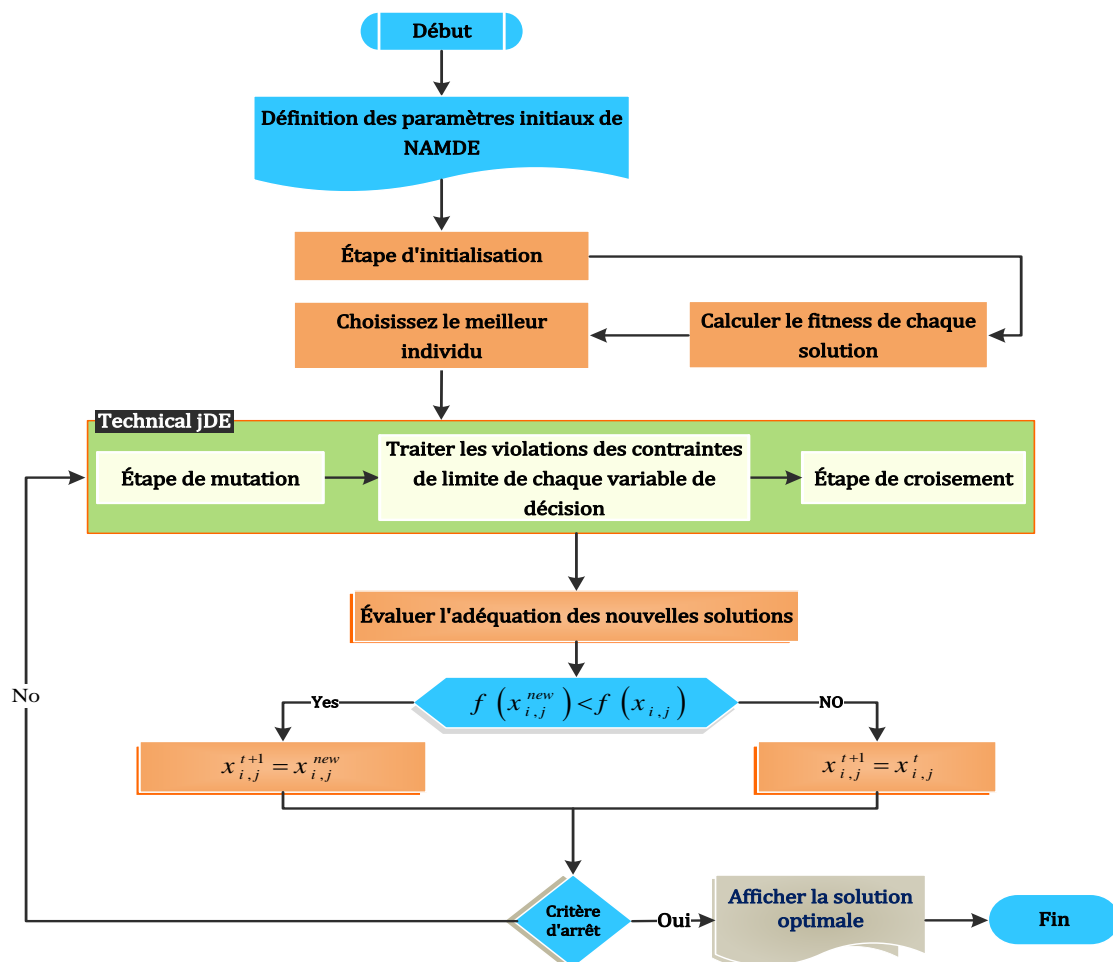


Figure V. 8 : Organigramme de l'approche NAMDE [170].

➤ Initialisation

Comme d'autres algorithmes évolutionnaires, le NAMDE commence le processus d'optimisation en générant aléatoirement une matrice de $(np \times n)$ individus.

$$x_{i,j}^{t=0} = x_i^L + rand_{i,j} \{0,1\} \times (x_i^U - x_i^L); i=1,\dots,n \text{ and } j=1,\dots,np \quad (V.5)$$

Où np est la taille de la population, et n est la dimension du problème d'optimisation. Dans notre cas, n est 3 paramètres. Après l'initialisation, les individus sont évalués et le meilleur est sélectionné par le mécanisme d'élitisme.

➤ **Mutation**

Dans la mutation, toutes les solutions initiales sont mises à jour. NAMDE utilise la stratégie DE/rand/2/bin pour créer le vecteur muté.

$$v_{i,j}^{t+1} = x_{i,r1}^t + F_{m1} \times \{x_{i,r2}^t - x_{i,r3}^t\} + F_{m2} \times \{x_{i,r4}^t - x_{i,r5}^t\} \quad (V.6)$$

Où F_{m1} et F_{m2} sont les facteurs d'échelle. r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 sont des indices mutuellement exclusifs et choisis aléatoirement parmi $[1, np]$.

➤ **Croisement**

L'opérateur de croisement, est utilisé pour améliorer la diversité de la population dans la génération actuelle [171].

$$x_{i,j}^{new} = \begin{cases} v_{i,j}^{t+1} & \text{if } (rand_{i,j} [0,1] \leq Cr) \vee (i = p_r) \\ x_{i,j}^t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (V.7)$$

Où C_r est le paramètre de croisement $\in [0,1]$, et p_r est un nombre entier créé aléatoirement dans la plage $\{1, \dots, n\}$. En outre, le NAMDE a utilisé la technique jDE [155] pour mettre à jour les valeurs de F_{m1}, F_{m2} et de C_r

$$x_{i,j}^{new} = \begin{cases} v_{i,j}^{t+1} & \text{if } (rand_{i,j} [0,1] \leq Cr) \vee (i = p_r) \\ x_{i,j}^t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (V.8)$$

➤ Sélection

Dans la phase de sélection, le vecteur cible est remplacé par le vecteur d'essai si la valeur de la fonction objective de $x_{i,j}^{new}$ est meilleure que celle de $x_{i,j}^t$:

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{i,j}^{new} & \text{if } f(x_{i,j}^{new}) \leq f(x_{i,j}^t) \\ x_{i,j}^t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{V.9})$$

V. 3. 2. 2 Formulation du problème

La formulation du problème a été donnée sous la forme suivante :

- Première plaquette de coupe (T1) :

$$F_1(x) = \begin{cases} \min F_{z-T1}(x) = 71,6 - 0,323 * V_c - 730 * f + 247,5 * a_p + 3,93 * V_c \times f - 0,321 * V_c \times a_p + 1133 * f \times a_p \\ \min P_{c-T1}(x) = 661 - 3,098 * V_c - 8119 * f + 215 * a_p + 38,57 * V_c \times f + 2,493 * V_c \times a_p + 3753 * f \times a_p \\ \max MRR(x) = 14,0667 - 0,070 * V_c - 145,83 * f - 14,66 * a_p + 0,683 * V_c \times f + 0,09 * V_c \times a_p + 190 * f \times a_p \end{cases} \quad (\text{V.10})$$

- Deuxième plaquette de coupe (T2) :

$$F_2(x) = \begin{cases} \min F_{z-T2}(x) = 37,8 - 0,0154 * V_c - 398 * f + 137,1 * a_p + 1,209 * V_c \times f - 0,3006 * V_c \times a_p + 2186 * f \times a_p \\ \min P_{c-T2}(x) = 544,6 - 2,136 * V_c - 7172 * f - 98 * a_p + 30,74 * V_c \times f + 2,606 * V_c \times a_p + 6854 * f \times a_p \\ \max MRR(x) = 14,0667 - 0,070 * V_c - 145,83 * f - 14,66 * a_p + 0,683 * V_c \times f + 0,09 * V_c \times a_p + 190 * f \times a_p \end{cases} \quad (\text{V.11})$$

- Troisième plaquette de coupe (T3) :

$$F_3(x) = \begin{cases} \min F_{z-T3}(x) = -48,4 + 0,332 * V_c + 336 * f + 179 * a_p - 1,34 * V_c \times f - 0,333 * V_c \times a_p + 1983 * f \times a_p \\ \min P_{c-T3}(x) = 128 - 0,214 * V_c - 3578 * f + 175 * a_p + 16,60 * V_c \times f - 3,111 * V_c \times a_p + 6586 * f \times a_p \\ \max MRR(x) = 14,0667 - 0,070 * V_c - 145,83 * f - 14,66 * a_p + 0,683 * V_c \times f + 0,09 * V_c \times a_p + 190 * f \times a_p \end{cases} \quad (\text{V.12})$$

Où $x = \{V_c, a_p, f\}$ est le vecteur des variables de conception. Les plages des variations des variables sont comme suite : $V_c \in [190, 350]$ m/min , $a_p \in [0, 25; 0, 75]$ mm et $f \in [0, 08; 0, 16]$ mm/tr

V. 3. 2. 3 Résultats

Les paramètres de meilleur ajustement de l'algorithme NAMDE, pour les trois outils de coupe sont sélectionnés après plusieurs expériences. Ils sont les suivants : taille de la population np

= 30 et $t_{max} = 833$. Les optimisations ont été exécutées sur un processeur Intel (R) Core (TM) i5-2410M @ 2x2.30 et 4.0GB de mémoire RAM, sous le système d'exploitation Microsoft Windows 7. Pour la même configuration, NAMDE a été exécuté 50 fois. Les résultats statistiques incluent les meilleures, moyennes et pires solutions ainsi que l'écart-type pour indiquer la robustesse de l'algorithme.

En outre, la méthode NAMDE a utilisé la méthode du facteur de pondération pour résoudre le problème. L'idée de base de cette méthode est de convertir les problèmes multi-objectifs en un problème unique en utilisant les facteurs de pondération (comme indiqué dans l'équation (V.13)). Comme on le sait, le choix des facteurs de pondération joue un rôle très important dans la méthodologie d'optimisations multi-objectives. Pour cette raison, nous donnons une importance égale aux objectifs pour les trois plaquettes de coupe (T1, T2 et T3).

$$F_{i=1,2,3} = \omega_1 \times F_{c-Ti} + \omega_2 \times P_{c-Ti} + \omega_3 \times MRR \quad (\text{V.13})$$

➤ L'outil de coupe (T1)

Les résultats de l'optimisation pour le premier outil de coupe (T1) sont donnés dans le Tableau (V.6). Les paramètres de coupe optimaux rapportés par le NAMDE proposé sont : $V_c = 190 \text{ m/min}$, $a_p = 0,44660017 \text{ mm}$ et $f = 0,16 \text{ mm/tr}$ pour $F_{z-T1} = 177,157079 \text{ N}$, $P_{z-T1} = 521,602619 \text{ W}$ et $MRR = 12,80 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Tableau V. 6 : Résultats d'optimisation pour la première plaquette de coupe (T1)

Min F_{z-T1}			Min P_{c-T1}			Max MRR		
177,15707936			521,60261912			12,80		
V_c	a_p	f	V_c	a_p	f	V_c	a_p	f
190	0,4466001	0,16	190	0,4466001	0,16	190	0,4466001	0,16

De même, le graphe de convergence de la meilleure valeur est donné dans la Figure (V.9). L'algorithme NAMDE a commencé à converger vers la meilleure valeur à partir de la 158e itération. Ainsi, le bon comportement de convergence de cette méthode est confirmé.

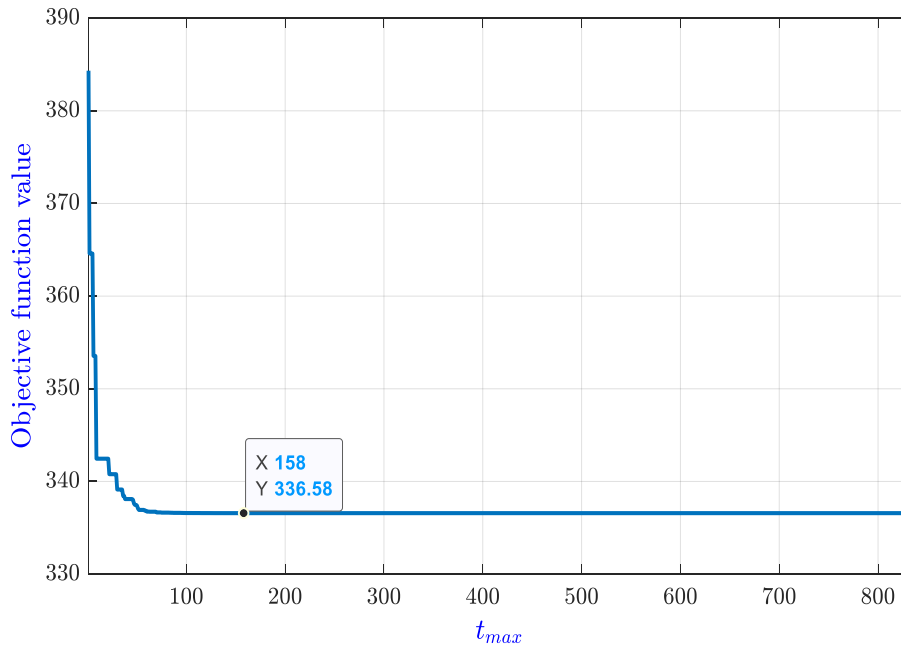


Figure V. 9 : Graphe de convergence des meilleures solutions pour l’outil de coupe (T1)

➤ **L’outil de coupe (T2)**

Les valeurs optimales des variables de conception et des fonctions objectives pour le deuxième outil de coupe (T2) obtenues avec NAMDE sont présentées dans le Tableau (V.7). Les meilleures valeurs d’objectif sont : $F_{z-T2} = 160,392945 N$, $P_{z-T2} = 659,674381 W$ et $MRR = 13,60 cm^3/min$ pour $V_c = 241,703054 m/min$, $a_p = 0,3299203 mm$ et $f = 0.16 mm/tr$, respectivement. De plus, le graphique de convergence pour la meilleure valeur est présenté dans la Figure (V.10). La figure montre clairement que NAMDE converge rapidement, où la solution proche est atteinte après 162 itérations.

Tableau V. 7 : Résultats de l’optimisation pour la deuxième plaquette de coupe (T2).

Min F_{z-T2}			Min P_{c-T2}			Max MRR		
160,3929452			659,6743817			13,60		
V_c	a_p	f	V_c	a_p	f	V_c	a_p	f
249,6469	0,34439	0,16	249,6469	0,34439	0,16	249,6469	0,34439	0,16

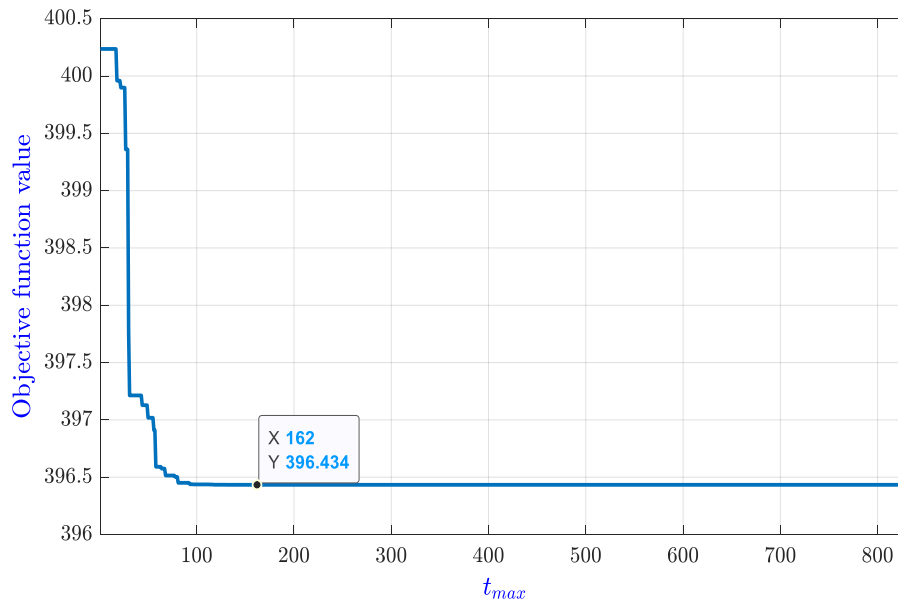


Figure V. 10 : *Grphe de convergence des meilleures solutions pour l'outil de coupe (T2).*

➤ L'outil de coupe (T3)

Le Tableau (V.8) représente les paramètres de coupe optimaux obtenus par NAMDE pour le dernier outil de coupe. A partir des données, les valeurs optimales des objectifs sont : $F_{z-T3} = 154,8595872 N$, $P_{c-T3} = 801,9243593W$ et $MRR = 14,70 cm^3/min$. La Figure (V.11) montre le comportement de convergence de NAMDE vers la meilleure solution. Comme on peut le voir sur cette figure, NAMDE converge rapidement et peut atteindre le quasi-optimum en seulement 142 itérations.

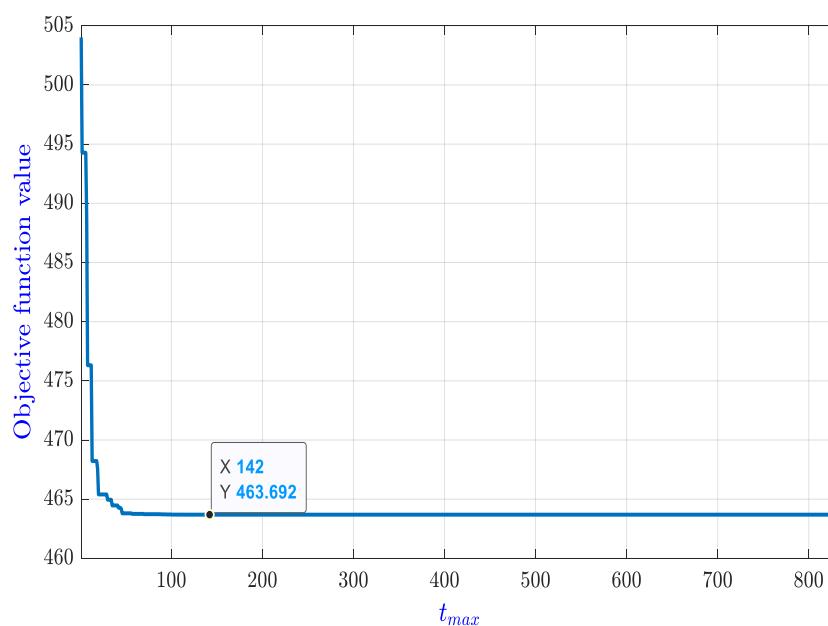


Figure V. 11 : *Grphe de convergence des meilleures solutions pour l'outil de coupe (T3)*

Tableau V. 8 : Résultats de l'optimisation pour la troisième plaquette de coupe (T3).

Min F_{z-T3}			Min P_{c-T3}			Max MRR		
154,8595872			801,9243593			14,70		
V_c	a_p	f	V_c	a_p	f	V_c	a_p	f
299,92123	0,28816	0,16	299,92123	0,28816	0,16	299,92123	0,28816	0,16

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, les processus d'optimisation ont été effectués 50 fois. Les résultats statistiques obtenus par NAMDE pour les trois outils de coupe sont présentés dans le Tableau (V.9). D'après ce tableau, la robustesse de l'algorithme utilisé pour résoudre les trois cas est clairement confirmée par les faibles valeurs de l'écart-type.

Tableau V. 9 : Résultats statistiques pour les trois cas

Cas	Meilleure	Moyenne	Pire	SD
Plaquette de coupe (T1)	336,579849249	336,579849249	336,579849249	5,742052E-14
Plaquette de coupe (T2)	396,433663490	396,433663490	396,433663490	4,664865E-14
Plaquette de coupe (T3)	463,691973284	463,691973284	463,691973284	4,593641E-14

V. 3. 3 Etude comparative entre quatre récentes méta-heuristiques algorithmes

Les problèmes d'optimisation de la mécanique dans le monde réel sont difficiles à résoudre pour plusieurs raisons, pour cela, une comparaison des algorithmes sur un problème donné peut nous donner un aperçu de leur performance, en trouvant le meilleur à utiliser pour assurer une performance maximale.

Cela nous motivés à effectuer une comparaison entre quatre méta-heuristiques récentes dans le domaine d'usinage, en particulière dans le choix des paramètres d'usinage optimaux afin de minimiser la rugosité de surface (R_a) et de maximiser le taux d'enlèvement de matière (MMR) lors du processus de tournage à sec de l'AISI 4140 avec trois outils de coupe différents (T1, T2 et T3). Les algorithmes considérés sont MOALO [152, 153], MOGWO [156, 157], SHAMODE [158] et NSGA-II [172, 173]. Dans notre cas nous avons étudié le comportement de convergence des algorithmes étudiés afin de confirmer la performance de recherche des algorithmes d'optimisation. L'analyse comparative des performances est faite sur la base de tracés de convergence.

Pour assurer une comparaison équitable, nous utilisons le même langage de programmation (MATLAB) et le même matériel tous les algorithmes. La taille de la population (np) et le nombre maximal d'itérations (Max_it) sont définis comme suit : $np = 100$, $Max_it = 200$.

Pour estimer les solutions optimales de Pareto pour le problème d'usinage discuté ci-dessus, nous présentons ci-dessous un aperçu de ces algorithmes

- Optimiseur multi-objectif du lion fourmi (MOALO) [168].

MOALO utilise les principes de relation des fourmis et des fourmilions dans la nature. Le mécanisme multi-objectifs de MOALO est similaire à celui de MOPSO: une archive pour stocker les solutions non-dominées pendant le processus d'optimisation et un mécanisme de sélection des leaders pour choisir les 'meilleures' solutions non-dominées pour la mise à jour de la position des autres solutions. Un mécanisme de niche est utilisé pour aider à choisir les leaders.

- Optimiseur multi-objectif de type loup gris (MOGWO) [174].

En tant qu'algorithme d'optimisation récent, le GWO imite la hiérarchie sociale et le mécanisme de chasse des loups gris dans la nature. Cet algorithme requiert les trois meilleures solutions (alpha, beta, et delta) pour mettre à jour la position des autres solutions. Pour résoudre des problèmes multi-objectifs, ces trois solutions sont sélectionnées parmi les solutions non dominées pendant le processus d'optimisation.

- Algorithme génétique de triage non dominé II (NSGA-II) [159].

NSGA-II est probablement l'algorithme évolutionnaire multi-objectif le plus cité. La méthode est basée sur une stratégie d'élitisme. Avec une population initiale, les opérateurs de GA à savoir le croisement et la mutation sont appliqués pour créer un ensemble de solutions de la progéniture. La génération suivante est classée en utilisant les opérateurs de tri non dominé et de comparaison de distance d'encombrement. Le processus est répété jusqu'à ce que le critère de fin soit atteint.

- Évolution différentielle adaptative multi-objectifs basée sur l'histoire successive (SHAMODE) [175].

L'optimiseur exploite la stratégie adaptative basée sur l'histoire successive pour régler les paramètres de contrôle de l'évolution différentielle. L'opérateur de tri non-dominé est utilisé pour collecter les solutions non-dominées pendant la recherche d'optimisation. La procédure

commence avec une population et une archive de Pareto initiale. La population et l'archive sont mises à jour de manière itérative en utilisant l'opérateur DE avec les paramètres auto-adaptatifs de l'opérateur DE jusqu'à atteindre le critère de fin.

V. 3. 3. 1 Résultats et discussion

➤ **L'outil de coupe (T1)**

L'historique des valeurs des fronts de Pareto obtenus de chaque algorithme est donné dans la Figure (V.12). On peut voir que l'algorithme (SHAMODE) montre leur caractéristique de convergence dominante, et elle est capable de converger vers le meilleur front de Pareto. Cependant, NSGA-II, MOGWO et MOALO n'ont pas suffisamment convergé. Le compromis pour les deux objectifs est donné dans la partie zoom dans la même figure citée précédemment.

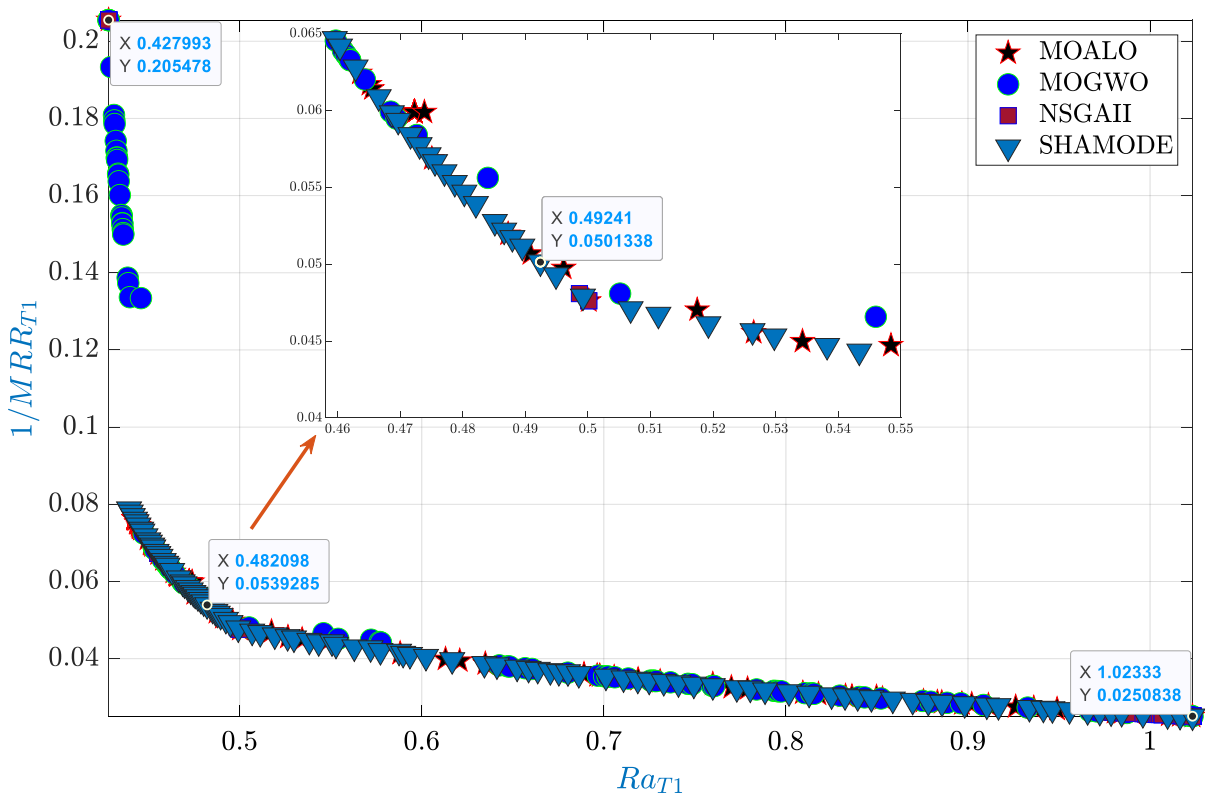


Figure V. 12 : Meilleurs fronts de Pareto obtenus par les quatre approches utilisées pour l'outil de coupe (T1).

Le Tableau (V.10) présente les trois meilleures solutions de Pareto obtenues par l'algorithme (SHAMODE) pour le premier outil de coupe ainsi que les valeurs des variables optimisées (V_c , a_p et f). Il ressort clairement du tableau précédent que la première solution

garantit une valeur minimale de rugosité ($V_c=350$ m/min, $a_p=0.25$ mm et $f=0,08$ mm/tr). Par contre, la valeur du deuxième objectif (MRR) est maximal pour la troisième solution ($V_c = 350$ m/min, $a_p = 0,75$ mm et $f = 0,16$ mm/tr). Si nous considérons que les deux objectifs ont la même importance, la deuxième solution sera le choix approprié.

Tableau V. 10 : Solutions optimales pour l'outil (T1)

N	Ra_{GC2015} (μm)	MRR	V_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/tr)
1	0,4279925	4,86670	350,00000	0,25000	0.0800000
2	0,4924102	19,9466	329,73924	0,74999	0,0800015
3	1,0233375	38,3510	350,00000	0,75000	0,1600000

➤ **L'outil de coupe (T2)**

Le Tableau (V.11) donne les résultats concernant les meilleures valeurs des objectifs pour le deuxième outil de coupe. Comme pour le premier outil de coupe, la première solution minimise le premier objectif, la troisième garantit la valeur maximale du MRR. Cependant, la deuxième solution donne le même poids aux deux solutions considérées. Le front de Pareto obtenu par les quatre algorithmes est représenté sur la Figure (V.13). Le compromis pour les deux objectifs est donné dans la partie zoom de la Figure (V.13).

Tableau V. 11 : Solutions optimales pour l'outil (T2)

N	Ra_{GC2015} (μm)	MRR	V_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/tr)
1	0,449060	4,86670	350,00000	0,25000	0,0800000
2	0,474857	21,0799	349,99321	0,74986	0,0803585
3	1,185620	39,8667	350,00000	0,75000	0,1600000

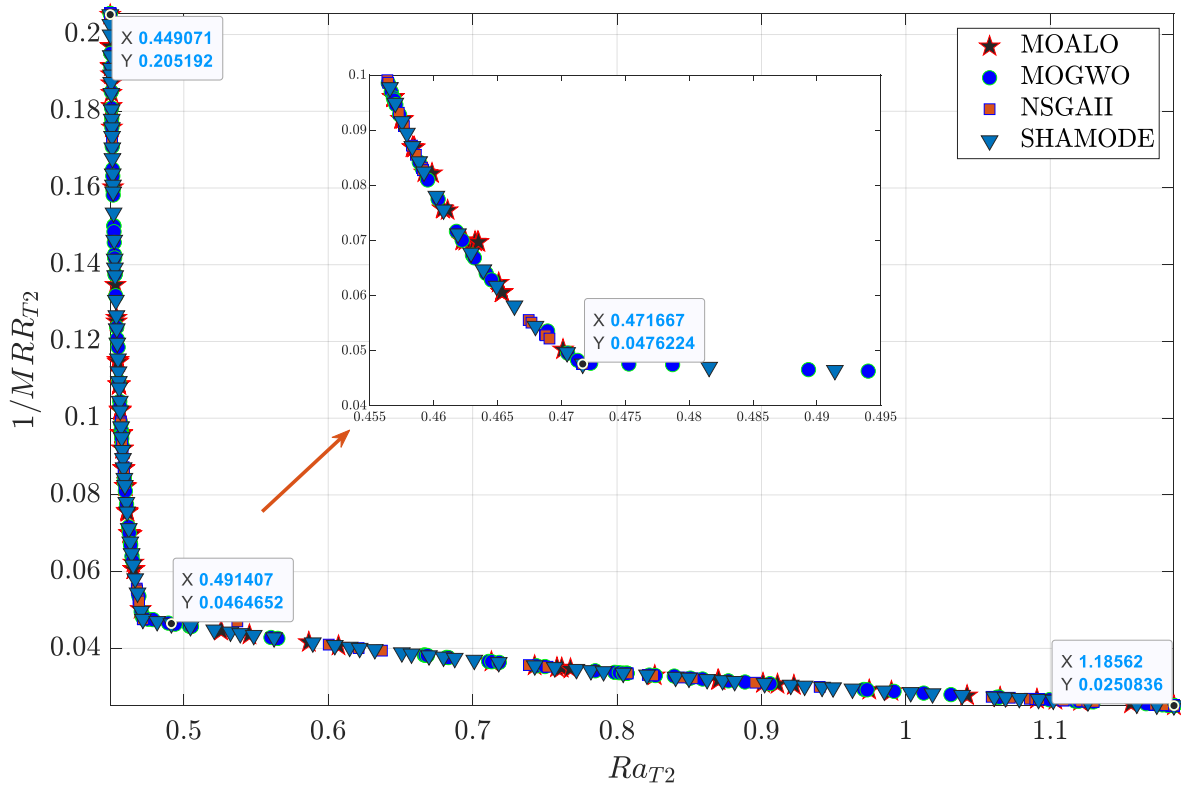


Figure V. 13 : Meilleurs fronts de Pareto obtenus par les quatre approches utilisées pour l'outil de coupe (T2).

➤ **L'outil de coupe (T3)**

Les meilleures valeurs des variables de conception et des fonctions objectives pour le dernier outil de coupe obtenues avec l'algorithme SHAMODE sont présentées dans le Tableau (V.12). Les meilleures valeurs de l'objectif sont : $Ra = 0,520000 \mu\text{m}$ et $MRR = 4,86669$ pour ($V_c = 350 \text{ m/min}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$), $Ra = 0,5777012 \mu\text{m}$ et $MRR = 20.1011$ pour ($V_c = 349,98144 \text{ m/min}$, $a_p = 0,722169 \text{ mm}$, $f = 0,08 \text{ mm/tr}$), $Ra = 1,1863 \mu\text{m}$ et $MRR = 39,8667$ pour ($V_c = 350 \text{ m/min}$, $a_p = 0,75 \text{ mm}$, $f = 0,16 \text{ mm/tr}$). La Figure (V.14) montre le comportement de convergence de chaque algorithme. Après un zoom avant, il est évident que l'algorithme (SHAMODE) a la trace de convergence rapide. Le compromis pour les deux objectifs est donné dans la partie zoom de la Figure (V.14).

Tableau V. 12 : Solutions optimales pour l'outil (T3)

N	$Ra_{GC2015} (\mu\text{m})$	MRR	$V_c \text{ (m/min)}$	$a_p \text{ (mm)}$	$f \text{ (mm/tr)}$
1	0,5200000	4,86669	350,00000	0,250000	0,0800000
2	0,5777012	20,1011	349,98144	0,722169	0,0800000
3	1,1863000	39,8667	350,00000	0,750000	0,1600000

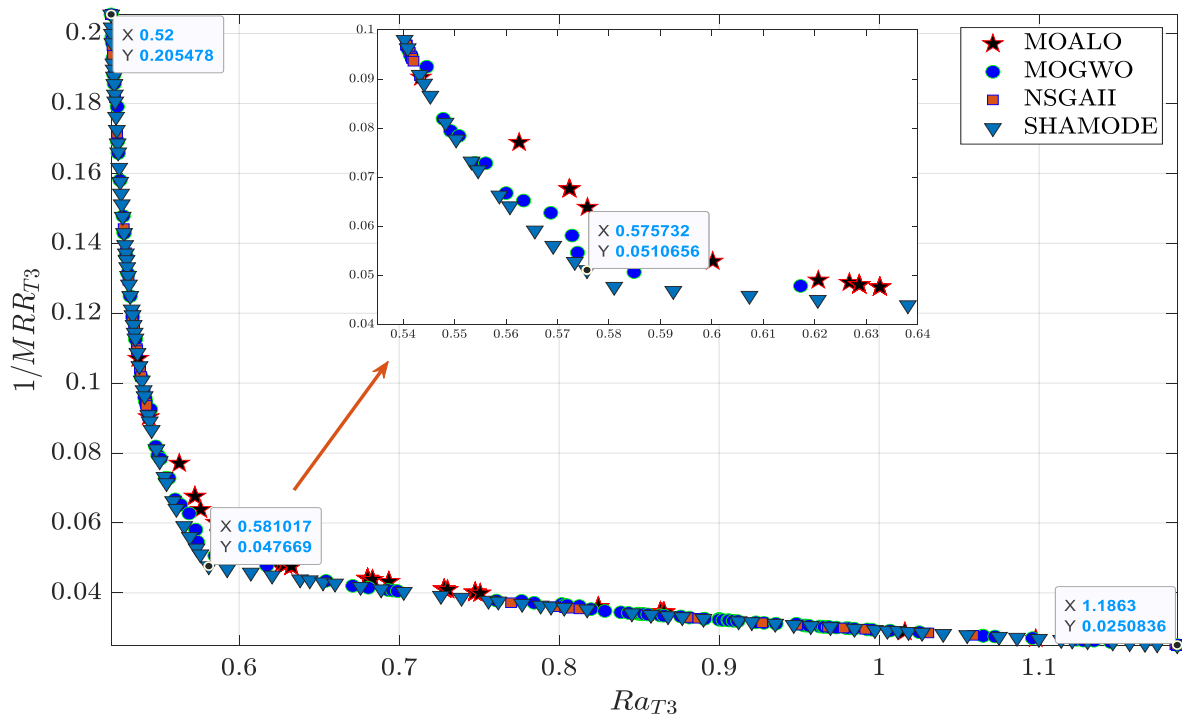


Figure V. 14 : Meilleurs fronts de Pareto obtenus par les quatre approches utilisées pour l'outil de coupe (T3).

V. 4 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l'application de diverses méthodes d'optimisation multi-objective en utilisant la méthode de désirabilité DF et 5 autres récents méta-heuristique multi-objectifs algorithmes (NAMDE, MOALO, NSGA-II, NAMDE et SHAMODE) respectivement pour optimiser les paramètres de coupe. Les conclusions importantes sont mentionnées dans les points spécifiques suivants :

- La méthode d'optimisation multi-objective de la fonction de désirabilité (DF) peut être appliquée efficacement pour résoudre les problèmes d'optimisation.
- Le nouvel algorithme d'évolution différentielle mixte adaptative (NAMDE) a été utilisé pour résoudre le problème complexe d'optimisation simultanée de plusieurs réponses en convertissant l'optimisation multi-objective en un seul objectif d'optimisation. L'efficacité et la robustesse de cette approche ont été confirmées par les faibles valeurs de l'écart-type obtenues.
- Les conditions de coupe optimales pour trouver la meilleure qualité de surface (R_a) et la meilleure productivité (MRR) ont été obtenues en utilisant l'optimiseur multi-objectif ant lion (MOALO) pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3), il a été observé que MOALO a également une convergence élevée.
- Sur la base des résultats de l'analyse comparative, l'évaluation des performances de chaque algorithme a été effectuée sur la base de la meilleure trace de convergence. La présente étude révèle que, parmi tous les algorithmes testés, SHAMODE s'avère être le meilleur en termes de convergence et fournit la solution optimale pour les trois outils de coupe.

**CONCLUSION GENERALE
ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté vise à examiner l'effet de différents types de matériaux de revêtement sur les performances d'usinage de plaquettes en carbure métallique. Quatre plaquettes de coupe de marks Sandvik avec différents matériaux de revêtement ont été sélectionnées pour le tournage a sec de l'acier AISI 4140. Trois plaquettes revêtues à savoir ; un revêtement monocouche applique par PVD (TiN), un revêtement multicouche applique par MTCVD (TiN/Al_2O_3) et un revêtement multicouche applique par CVD ($TiC/Al_2O_3/TiN$), ainsi qu'un outil non revêtu a été choisi comme référence.

L'usure en dépouille, la surface de la pièce usinée, les efforts de coupe, la puissance de coupe, la pression spécifique et le taux d'enlèvement de la matière ont été évalués.

Les conclusions tirées des travaux de recherche sont présentées ci-dessous :

- Les revêtements d'outils ont amélioré la résistance à l'usure des outils de coupe. Cela a été démontré par la diminution de l'usure sur la face de dépouille des outils revêtus par rapport à celle non revêtu. La comparaison en termes de ratio d'usure (V_B) illustre clairement la différence quantitative entre les plaquettes testées. Le rapport (V_{B-T2}/V_{B-T1}) a été trouvé pour atteindre 2,02 tandis que les rapports (V_{B-T3}/V_{B-T1}) et (V_{B-T4}/V_{B-T1}) atteignent 4,43 et 7,59 respectivement. La diminution de l'usure est due à propriétés de résistance à l'usure des matériaux TiN ainsi qu'à la stabilité chimique élevée de la couche Al_2O_3 .
- L'analyse des images SEM montrant l'usure sur les faces de dépouille des plaquettes de coupe testées permet de conclure que les mécanismes d'usure dominants sont l'abrasion, l'adhésion et l'écaillage pour les trois plaquettes de coupe revêtues (T1), (T2) et (T3). En revanche, pour la plaquette non revêtu (T4), seuls l'abrasion et l'écaillage sont les mécanismes d'usure dominants observés
- La valeur la plus faible pour la rugosité de surface a été présentée par la plaquette de coupe (T1-CVD) alors que la plus importante a été produite pour la plaquette non revêtu (T4). Les rapports (R_{a-T2}/R_{a-T1}), (R_{a-T3}/R_{a-T1}) et (R_{a-T4}/R_{a-T1}) ont atteint respectivement 1,38, 1,63 et 4,63. En conclusion, le matériau à triple revêtement ($TiCN-Al_2O_3-TiN$) présente une meilleure rugosité de surface que les deux autres plaquettes

- Les cartes topographiques tridimensionnelles de la surface usinée, obtenues par une plate-forme optique de métrologie modulaire, sont d'une grande importance dans l'étude de la rugosité de surface.
- D'après les résultats de l'ANOVA, les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z) sont fortement influencées par la profondeur de coupe (a_p) et l'avance par tour (f), tandis que la vitesse de coupe (V_c) a le moins d'effet pour les trois plaquettes testées.
- Les résultats expérimentaux du tournage de l'acier AISI 4140 avec des outils revêtus de PVD, CVD, MTCVD sur la rugosité de surface montrent que la profondeur de coupe est le paramètre le plus influent.
- Le paramètre influençant le taux d'enlèvement de métal sur l'acier AISI 4140 pour les outils PVD, CVD et MTCVD est la vitesse. De même que pour la puissance de coupe.
- L'étude a montré que l'effort de coupe tangentiel (F_z) est la composante la plus importante des forces de tournage, pour les trois outils de coupe testés. L'effort de coupe la plus faible est générée par l'utilisation de la plaquette CVD (T1), tandis que la plus élevée est générée par l'utilisation de la plaquette PVD (T3). Ceci est confirmé par les résultats des rapports de force tangentielle obtenus, et identifiés comme $(F_{z-T2}/F_{z-T1}) = 1,07$, et $(F_{z-T3}/F_{z-T1}) = 1,17$. Par conséquent, en termes de forces de coupe, le matériau à triple couches de revêtement ($TiCN-Al_2O_3-TiN$) est identifié comme le matériau leader.
- Les modèles empiriques développés pour les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z), la puissance de coupe (P_c) et le taux d'enlèvement de la matière (MRR) en utilisant l'approche RSM, pour les trois outils utilisés (T1, T2 et T3), ont un coefficient de corrélation élevé (R^2) et des valeurs de probabilité (P-value) inférieures à 0,05. De plus, on note que les valeurs de pourcentage d'erreurs de prédiction pour les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_z) sont très faibles et ne dépassent pas la valeur de 3.37 % pour les trois outils de coupe.
- D'après les tests de validation effectués, nous avons remarqué que les valeurs d'erreur relative sont très faibles, et ne dépassent pas la valeur de 4,89% pour tous les outils de coupe. Nous pouvons donc affirmer que les modèles mathématiques développés ont une excellente précision et peuvent être utilisés efficacement pour prédire les forces d'usinage (F_a , F_r et F_z) des trois plaquettes de coupe T1, T2, T3.
- Les conditions de coupe optimales tout en minimisant à la fois l'effort de coupe tangentiel (F_z) et la puissance de coupe (P_c) et en maximisant le taux d'enlèvement de

matière ont été obtenues en utilisant la méthode NAMDE. L'efficacité et la robustesse de cette approche ont été confirmées par les faibles valeurs de l'écart type obtenu.

- Les conditions de coupe optimales pour trouver la meilleure qualité de surface (R_a) et la meilleure productivité (MRR) ont été obtenues en utilisant l'optimiseur multi-objectif ant lion (MOALO) pour les trois outils de coupe (T1, T2 et T3), il a été observé que MOALO a également une convergence élevée.
- L'étude comparative des algorithmes utilisées (*MOALO*, *MOGWO*, *SHAMODE* et *NSGA-II*) pour l'optimisation de la rugosité de surface et maximisation de taux d'enlèvement de la matière a été réalisée sur la base du taux de convergence. La présente étude révèle que parmi tous les algorithmes testés, SHAMODE s'avère être le meilleur en termes de convergence et de solution optimale.

Les futurs travaux

Sur la base de l'étude actuelle, plusieurs sujets sont suggérés pour d'autres investigations expérimentales, notamment :

- Mener des études approfondies sur le comportement des revêtements multicouches et bicouches dans les opérations de tournage dur, afin de mieux comprendre leur performance et leur durabilité.
- Utiliser des méthodes avancées et précises pour mesurer les températures, car la température joue un rôle important dans la stabilisation des processus de coupe.
- Inclure des études sur les vibrations et la dynamique pour étudier leur impact sur la durée de vie et les performances globales de l'outil dans le processus de tournage.
- Évaluer l'utilisation d'un système cryogénique comme liquide de refroidissement pour améliorer les performances en termes d'usure de l'outil.
- Prendre en compte simultanément la durée de vie des outils, le coût de production et le temps de production lors de l'optimisation des performances du processus de production.
- Utiliser les récents algorithmes méta-heuristiques pour améliorer les performances de l'outil.

Références :

- [1] P. Jayaraman, "Studies on parametric optimization in turning of AA6063 T6 and AA6351 T6 alloys using various optimization techniques" 2017.
- [2] I.-C. GRUESCU. (2015). *Préparation de Production en Productique Mécanique - Étude de Fabrication et Analyse d'Usinage (3PM-EFAU)*. Available: https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/001_MOG_web.html. Consulté le 26 mars 2023
- [3] E. M. Trent and P. K. Wright, *Metal cutting*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [4] M. C. Shaw and J. Cookson, *Metal cutting principles*. Oxford university press New York, 2005.
- [5] V. Wagner, M. Baili, and G. Dessein, "The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during Ti-5553 dry cutting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 5, pp. 893-912, 2015.
- [6] Sandvik. (2019). *Sandvik Carbide Grades With Descriptions*. Available: <https://www.cets.com/resources/sandvik-carbide-grades-with-descriptions.html>. Consulté le 26 mars 2023
- [7] Y. Huang, Y. K. Chou, and S. Y. Liang, "CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, no. 5, pp. 443-453, 2007.
- [8] Z.-C. Lin and D.-Y. Chen, "A study of cutting with a CBN tool," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 49, no. 1-2, pp. 149-164, 1995.
- [9] A. E. DINIZ, F. C. MARCONDES, and N. L. COPPINI, "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", Ed," *São Paulo, Artliber Editora*, pp. 11-17, 2001.
- [10] S. F. Y. Schoefs, Jean-Jacques Léon, *Productique mécanique*. 1999.
- [11] Y.-C. Yen, J. Söhner, B. Lilly, and T. Altan, "Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis," *Journal of materials processing technology*, vol. 146, no. 1, pp. 82-91, 2004.
- [12] S. Miller, "Advanced materials mean advanced engines," *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 21, no. 2, pp. 117-129, 1996.
- [13] L. Čerče, F. Pušavec, and J. Kopač, "A new approach to spatial tool wear analysis and monitoring," *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 61, no. 9, pp. 489-497, 2015.
- [14] Z. Liu, X. Ai, H. Zhang, Z. Wang, and Y. Wan, "Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, no. 1-3, pp. 222-226, 2002.
- [15] R. L. Vaughn, "Modern metals machining technology," 1966.
- [16] U. Khandey, "Optimization of surface roughness, material removal rate and cutting tool flank wear in turning using extended taguchi approach," 2009.
- [17] S. Coromant, *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook*. Sandvik Coromant, 1994.
- [18] D. Ferraresi, *Fundamentos da usinagem dos metais*. Editora blucher, 2018.
- [19] A. K. Syed, J. Hardell, and B. Prakash, "Tribological behaviour of surface-treated and post-oxidized tool steels at room temperature and 400 C," *Estonian Journal of Engineering*, vol. 16, no. 2, p. 123, 2010.
- [20] Leonardo Roberto Silva, Odilon Soares Silva, Arthur Hermsdorff Cezar, Santos, and Matheus Barbosa de Medeiros Alvim, "Mecanismos de Desgaste de Ferramentas no Torneamento

- Com Alta Velocidade de Corte na Liga Ti-6Al-4V," *Nac. Eng. Mecanica*, pp. 4-13, 2016.
- [21] Sandvik, "Sandvik Coromant - Turning Tools (EN), 2019.
- [22] H. Chelladurai, V. Jain, and N. Vyas, "Development of a cutting tool condition monitoring system for high speed turning operation by vibration and strain analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, no. 5, pp. 471-485, 2008.
- [23] F. Klocke, *Manufacturing Processes: Turning, Milling, Drilling*. Springer, 2011.
- [24] H. Tönshoff, B. Denkena, T. Friemuth, and C. Spengler, "Influence of different grinding processes on coating adhesion on cutting tools," in *3rd International Conference "The coatings"*, Nov, 2002, vol. 28, p. 29.
- [25] V. Venkatesh, C. Ye, D. Quinto, and D. E. Hoy, "Performance studies of uncoated, CVD-coated and PVD-coated carbides in turning and milling," *CIRP annals*, vol. 40, no. 1, pp. 545-550, 1991.
- [26] K. Undercoffer, B. Downey, F. Battaglia, and W. Bryant, "The development of an improved multilayer CVD coating for metalcutting applications," *Le Journal de Physique Colloques*, vol. 50, no. C5, pp. C5-783-C5-792, 1989.
- [27] H. Prengel, W. Heinrich, G. Roder, and K. Wendt, "CVD coatings based on medium temperature CVD κ - and α -Al₂O₃," *Surface and Coatings Technology*, vol. 68, pp. 217-220, 1994.
- [28] S. Söderberg, M. Sjöstrand, and B. Ljungberg, "Advances in coating technology for metal cutting tools," *Metal Powder Report*, vol. 56, no. 4, pp. 24-30, 2001.
- [29] H. Prengel, A. Santhanam, R. Penich, P. Jindal, and K. Wendt, "Advanced PVD-TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools," *Surface and Coatings Technology*, vol. 94, pp. 597-602, 1997.
- [30] F. Jungblut, H. Brandle, and H. Schulz, "Dry chip removal and hard machining," *Metalloberflache(Germany)*, vol. 50, no. 12, pp. 984-986, 1996.
- [31] R. Rajasekar, "An experimental investigation on the influence of coating material on the machining characteristics of cutting tool inserts," 2019.
- [32] H. Prengel, P. Jindal, K. Wendt, A. Santhanam, P. Hegde, and R. Penich, "A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools," *Surface and coatings technology*, vol. 139, no. 1, pp. 25-34, 2001.
- [33] K. Tönshoff *et al.*, "Wear mechanisms of (Ti_{1-x}, Al_x) N coatings in dry drilling," *Surface and Coatings Technology*, vol. 94, pp. 603-609, 1997.
- [34] K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, N. Vidakis, K. Eftathiou, S. Kompogiannis, and G. Erkens, "Interpretation of PVD coated inserts wear phenomena in turning," *CIRP Annals*, vol. 49, no. 1, pp. 65-68, 2000.
- [35] N. Ånmark, A. Karasev, and P. G. Jönsson, "The effect of different non-metallic inclusions on the machinability of steels," *Materials*, vol. 8, no. 2, pp. 751-783, 2015.
- [36] R. V. Rao and O. Gandhi, "Digraph and matrix methods for the machinability evaluation of work materials," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 3, pp. 321-330, 2002.
- [37] A. Ahmad-Yazid, Z. Taha, and I. P. Almanar, "A review of cryogenic cooling in high speed machining (HSM) of mold and die steels," *Scientific Research and Essays*, vol. 5, no. 5, pp. 412-427, 2010.
- [38] J. Raja, B. Muralikrishnan, and S. Fu, "Recent advances in separation of roughness, waviness and form," *Precision Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 222-235, 2002.
- [39] V. Lajoie. (2014). *Etats De Surface*. Available: <https://docplayer.fr/5951355-6-etats-de-surface-6-2-defauts-de-rugosite.html>. Consulté le 26 mars 2023.

- [40] R. Yigit, E. Celik, F. Findik, and S. Koksal, "Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 26, no. 6, pp. 514-524, 2008.
- [41] R. F. de Avila, A. M. Abrao, and G. C. D. de Godoy, "The performance of TiN coated carbide tools when turning AISI 8620 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 179, no. 1-3, pp. 161-164, 2006.
- [42] J. Rech, "Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 16-17, pp. 5132-5139, 2006.
- [43] C. Lim, S. Lim, and K. Lee, "The performance of TiN-coated high speed steel tool inserts in turning," *Tribology International*, vol. 32, no. 7, pp. 393-398, 1999.
- [44] H. Gökkaya, "The effects of cutting tool coating on the surface roughness of AISI 1015 steel depending on cutting parameters," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol. 30, no. 5, pp. 307-316, 2006.
- [45] J. Wang, "The effect of the multi-layer surface coating of carbide inserts on the cutting forces in turning operations," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 97, no. 1-3, pp. 114-119, 2000.
- [46] R. YİĞİT, F. Findik, and E. Celik, "Performance of multilayer coated carbide tools when turning cast iron," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol. 33, no. 3, pp. 147-158, 2010.
- [47] D. Gillibrand, M. Sarwar, and C. Pierce, "The economic benefit of finish turning with coated carbide," *Surface and Coatings Technology*, vol. 86, pp. 809-813, 1996.
- [48] W. Grzesik, "The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 79, no. 1-3, pp. 133-143, 1998.
- [49] M. Noordin, V. Venkatesh, C. Chan, and A. Abdullah, "Performance evaluation of cemented carbide tools in turning AISI 1010 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 116, no. 1, pp. 16-21, 2001.
- [50] C. Che Haron, J. Ghani, and G. Ibrahim, "Surface integrity of AISI D2 when turned using coated and uncoated carbide tools," *International Journal of Precision Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 106-114, 2007.
- [51] C. C. Haron, A. Ginting, and J. Goh, "Wear of coated and uncoated carbides in turning tool steel," *Journal of materials processing technology*, vol. 116, no. 1, pp. 49-54, 2001.
- [52] Y. Isik, "Investigating the machinability of tool steels in turning operations," *Materials & design*, vol. 28, no. 5, pp. 1417-1424, 2007.
- [53] C. C. Haron, J. Ghani, G. Ibrahim, K. Husin, and T. Yong, "Performance of coated and uncoated carbide tools in turning AISI D2," in *Proceedings of the 1st International Conference & 7th AUN/SEED-Net Fieldwise Seminar on Manufacturing and Material Processing (ICMM)*, 2006, pp. 65-70.
- [54] A. K. Sahoo and B. Sahoo, "Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts," *Measurement*, vol. 45, no. 8, pp. 2153-2165, 2012.
- [55] A. Thakur, S. Gangopadhyay, K. P. Maity, and S. K. Sahoo, "Evaluation on effectiveness of CVD and PVD coated tools during dry machining of incoloy 825," *Tribology Transactions*, vol. 59, no. 6, pp. 1048-1058, 2016.
- [56] S. K. Khrais and Y. Lin, "Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel," *Wear*, vol. 262, no. 1-2, pp. 64-69, 2007.
- [57] E. Posti and I. Nieminen, "Influence of coating thickness on the life of TiN-coated high speed

- steel cutting tools," *Wear*, vol. 129, no. 2, pp. 273-283, 1989.
- [58] K. Tuffy, G. Byrne, and D. Dowling, "Determination of the optimum TiN coating thickness on WC inserts for machining carbon steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155, pp. 1861-1866, 2004.
- [59] C. Lim, S. Lim, and K. Lee, "Wear of TiC-coated carbide tools in dry turning," *Wear*, vol. 225, pp. 354-367, 1999.
- [60] H. Gökkaya and M. Nalbant, "The effects of cutting tool geometry and processing parameters on the surface roughness of AISI 1030 steel," *Materials & design*, vol. 28, no. 2, pp. 717-721, 2007.
- [61] G. Robinson and M. J. Jackson, "Machining Difficult-to-Machine Alloys and Specialty Metals Using Next Generation Coated Cutting Tools," in *4 th International Surface Engineering Congress*, 2005, pp. 10-12.
- [62] W. Bouzid Sai, "An investigation of tool wear in high-speed turning of AISI 4340 steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 330-334, 2005.
- [63] T. Yih-fong, "Parameter design optimisation of computerised numerical control turning tool steels for high dimensional precision and accuracy," *Materials & design*, vol. 27, no. 8, pp. 665-675, 2006.
- [64] C. Ducros and F. Sanchette, "Multilayered and nanolayered hard nitride thin films deposited by cathodic arc evaporation. Part 2: Mechanical properties and cutting performances," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, no. 3-4, pp. 1045-1052, 2006.
- [65] H. Scheerer, H. Hoche, E. Broszeit, B. Schramm, E. Abele, and C. Berger, "Effects of the chromium to aluminum content on the tribology in dry machining using (Cr, Al) N coated tools," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 1-4, pp. 203-207, 2005.
- [66] Y. Sahin, "The effects of various multilayer ceramic coatings on the wear of carbide cutting tools when machining metal matrix composites," *Surface and Coatings Technology*, vol. 199, no. 1, pp. 112-117, 2005.
- [67] Y. Sahin and G. Sur, "The effect of Al₂O₃, TiN and Ti (C, N) based CVD coatings on tool wear in machining metal matrix composites," *Surface and Coatings Technology*, vol. 179, no. 2-3, pp. 349-355, 2004.
- [68] F. A. Khalid, "A note on the comparison of microstructure and coating characteristics of hardmetal inserts," *Journal of materials processing technology*, vol. 122, no. 2-3, pp. 381-385, 2002.
- [69] I. Ciftci, "Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools," *Tribology international*, vol. 39, no. 6, pp. 565-569, 2006.
- [70] E. Ezugwu and K. Olajire, "Evaluation of machining performance of martensitic stainless steel (JETHETE)," *Tribology Letters*, vol. 12, no. 3, pp. 183-187, 2002.
- [71] A. E. Diniz and A. J. de Oliveira, "Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 10, pp. 1061-1067, 2004.
- [72] Y. Su and W. Kao, "Tribological behavior and wear mechanisms of TiN/TiCN/TiN multilayer coatings," *Journal of materials engineering and performance*, vol. 7, no. 5, pp. 601-612, 1998.
- [73] H. Sert, A. Can, K. Habali, and F. Okay, "Wear behavior of PVD TiAlN, CVD TiN coated and Cermet cutting tools," *Tribology in industry*, vol. 27, pp. 3-9, 2005.
- [74] R. Suresh, S. Basavarajappa, and G. Samuel, "Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool," *Measurement*, vol. 45, no. 7, pp. 1872-1884, 2012.
- [75] O. Keblouti, L. Boulanouar, M. W. Azizi, and A. Bouziane, "Multi response optimization of surface roughness in hard turning with coated carbide tool based on cutting parameters and tool

- vibration," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 70, no. 4, pp. 395-405, 2019.
- [76] A. Aggarwal, H. Singh, P. Kumar, and M. Singh, "Multicharacteristic optimisation of CNC turned parts using principal component analysis," *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 3, no. 1-2, pp. 208-223, 2008.
- [77] N. Dhar, N. S. Kishore, S. Paul, and A. Chattopadhyay, "The effects of cryogenic cooling on chips and cutting forces in turning AISI 1040 and AISI 4320 steels," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 216, no. 5, pp. 713-724, 2002.
- [78] C. R. V. Kumar and B. Ramamoorthy, "Performance of coated tools during hard turning under minimum fluid application," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, no. 1-3, pp. 210-216, 2007.
- [79] S. Kudapa, K. Narasimhan, P. Boppana, and W. Russell, "Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 120, pp. 259-264, 1999.
- [80] J. Lima, R. Avila, A. Abrao, M. Faustino, and J. P. Davim, "Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel," *Journal of materials processing technology*, vol. 169, no. 3, pp. 388-395, 2005.
- [81] M. Noordin, V. Venkatesh, and S. Sharif, "Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools," *Journal of materials processing technology*, vol. 185, no. 1-3, pp. 83-90, 2007.
- [82] A. Jaharah, C. Che Haron, M. Omar, and M. Ghazali, "Wear mechanism and failure mode of P10 TiN coated carbide tools," *International Journal of Precision Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 115-122, 2007.
- [83] M. Noordin, Y. Tang, and D. Kurniawan, "The use of TiAlN coated carbide tool when finish machining hardened stainless steel," *International Journal of Precision Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 21-29, 2007.
- [84] W. Sales, L. Costa, S. Santos, A. Diniz, J. Bonney, and E. Ezugwu, "Performance of coated, cemented carbide, mixed-ceramic and PCBN-H tools when turning W320 steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 7, pp. 660-669, 2009.
- [85] A. S. More, W. Jiang, W. Brown, and A. P. Malshe, "Tool wear and machining performance of cBN-TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 180, no. 1-3, pp. 253-262, 2006.
- [86] M. C. Cakir, C. Ensarioglu, and I. Demirayak, "Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material," *Journal of materials processing technology*, vol. 209, no. 1, pp. 102-109, 2009.
- [87] M. Noordin, D. Kurniawan, and S. Sharif, "Hard turning of stainless steel using wiper coated carbide tool," *International Journal of Precision Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 75-84, 2007.
- [88] W. Liew, Y. Lu, X. Ding, B. Ngoi, and S. Yuan, "Performance of uncoated and coated carbide tools in the ultra-precision machining of stainless steel," *Tribology Letters*, vol. 17, no. 4, pp. 851-857, 2004.
- [89] A. Bhattacharya, S. Das, P. Majumder, and A. Batish, "Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA," *Production Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 31-40, 2009.
- [90] C. R. V. Kumar, P. K. Nair, and B. Ramamoorthy, "Performance of TiCN and TiAlN tools in machining hardened steel under dry, wet and minimum fluid application," *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 3, no. 1-2, pp. 133-142, 2008.

- [91] W. Jiang, A. P. Malshe, and R. C. Goforth, "Cubic Boron Nitride (cBN) based nanocomposite coatings on cutting inserts with chip breakers for hard turning applications," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 5-6, pp. 1849-1854, 2005.
- [92] J. De Lima, R. De Avila, and A. Abrao, "Turning of hardened AISI 4340 steel using coated carbide inserts," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, no. 8, pp. 1359-1366, 2007.
- [93] L. Dash, S. Padhan, and S. R. Das, "Design optimization for analysis of surface integrity and chip morphology in hard turning," *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, vol. 76, no. 5, pp. 561-578, 2020.
- [94] M. Kam and M. Şeremet, "Experimental investigation of the effect of machinability on surface quality and vibration in hard turning of hardened AISI 4140 steels using ceramic cutting tools," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 235, no. 5, pp. 1565-1574, 2021.
- [95] A. Das, M. K. Gupta, S. R. Das, A. Panda, S. K. Patel, and S. Padhan, "Hard turning of AISI D6 steel with recently developed HSN2-TiAlxN and conventional TiCN coated carbide tools: comparative machinability investigation and sustainability assessment," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 4, pp. 1-25, 2022.
- [96] Das A, Das SR, Panda A, Patel SK, Experimental investigation into machinability of hardened AISI D6 steel using newly developed AlTiSiN coated carbide tools under sustainable finish dry hard turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 236, no. 5, pp. 1889-1905, 2022.
- [97] M. Nalbant, H. Gökkaya, and G. Sur, "Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning," *Materials & design*, vol. 28, no. 4, pp. 1379-1385, 2007.
- [98] M. Y. Noordin, V. C. Venkatesh, S. Sharif, S. Elting, and A. Abdullah, "Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel," *Journal of materials processing technology*, vol. 145, no. 1, pp. 46-58, 2004.
- [99] K. Risbood, U. Dixit, and A. Sahasrabudhe, "Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 132, no. 1-3, pp. 203-214, 2003.
- [100] P. Suresh, P. V. Rao, and S. Deshmukh, "A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 6, pp. 675-680, 2002.
- [101] S. Das and A. Chattopadhyay, "Application of the analytic hierarchy process for estimating the state of tool wear," *International journal of machine tools and manufacture*, vol. 43, no. 1, pp. 1-6, 2003.
- [102] I. Choudhury and M. El-Baradie, "Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 77, no. 1-3, pp. 319-326, 1998.
- [103] J. P. Davim, "A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments," *Journal of materials processing technology*, vol. 116, no. 2-3, pp. 305-308, 2001.
- [104] M. A. Dabnun, M. Hashmi, and M. El-Baradie, "Surface roughness prediction model by design of experiments for turning machinable glass-ceramic (Macor)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164, pp. 1289-1293, 2005.
- [105] I. P. Arbizu and C. L. Perez, "Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143, pp. 390-396, 2003.
- [106] C. X. Feng, "An experimental study of the impact of turning parameters on surface roughness,"

- in *Proceedings of the industrial engineering research conference*, 2001, no. 2036, pp. 1-7.
- [107] M. Nalbant, H. Gokkaya, and İ. Toktaş, "Comparison of regression and artificial neural network models for surface roughness prediction with the cutting parameters in CNC turning," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2007, 2007.
- [108] H. Singh and P. Kumar, "Optimizing feed force for turned parts through the Taguchi technique," *Sadhana*, vol. 31, no. 6, pp. 671-681, 2006.
- [109] T. Ozel, A. E. Correia, and J. P. Davim, "Neural network process modelling for turning of steel parts using conventional and wiper inserts," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 35, no. 1-2, pp. 246-258, 2009.
- [110] K. Bouacha, M. A. Yallese, S. Khameh, and S. Belhadi, "Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool," *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 45, pp. 160-178, 2014.
- [111] T. Mikołajczyk, "Modeling of minimal thickness cutting layer influence on surface roughness in turning," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 656, pp. 262-269: Trans Tech Publ.
- [112] T. Mikołajczyk, K. Nowicki, A. Bustillo, and D. Y. Pimenov, "Predicting tool life in turning operations using neural networks and image processing," *Mechanical systems and signal processing*, vol. 104, pp. 503-513, 2018.
- [113] E. Paese, M. Geier, F. R. Rodrigues, T. Mikołajczyk, and M. Mia, "Assessment of CVD-and PVD-Coated Carbides and PVD-Coated Cermet Inserts in the Optimization of Surface Roughness in Turning of AISI 1045 Steel," *Materials*, vol. 13, no. 22, p. 5231, 2020.
- [114] M. Elbah, F. Brahim, L. Hamdi, and M. A. Yallese, "Modelisation et optimisation des conditions des coupe en tournage dur par la technique de taguchi en utilisant la MSR," *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, vol. 83, no. 4, pp. 195-210, 2021.
- [115] P. Vats, T. Singh, V. Dubey, and A. Kumar Sharma, "Optimization of machining parameters in turning of AISI 1040 steel using hybrid MCDM technique," *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, pp. 1758-1765, 2022.
- [116] M. Özdemir, A. Şahinoğlu, M. Rafighi, and V. Yilmaz, "Analysis and optimisation of the cutting parameters based on machinability factors in turning AISI 4140 steel," *Canadian Metallurgical Quarterly*, pp. 1-11, 2022.
- [117] H. Aouici, M. Elbah, M. A. Yallese, B. Fnides, I. Meddour, and S. Benlahmidi, "Performance comparison of wiper and conventional ceramic inserts in hard turning of AISI 4140 steel: analysis of machining forces and flank wear," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 5-8, pp. 2221-2244, 2016.
- [118] Z. HESSAINIA, "Etude de l'impact des paramètres affectant la rugosité des surfaces et les efforts de coupe en usinage des pièces traitées thermiquement," 2014.
- [119] Sandvik, "La nouvelle nuance plus sûre GC4215 de SANDVIK COROMANT augmente la productivité en tournage des aciers," 2007.
- [120] B. Lakhdar, "Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13," 2015.
- [121] M. Nouioua, "Optimisation des paramètres de coupe lors de l'usinage à sec et avec une quantité minimale de lubrification," 2019.
- [122] A. Chabbi, "Modélisation et optimisation des paramètres d'usinage lors du tournage du polyacétal POM C," 2018.
- [123] M. K. BABOURI, "Surveillance de l'évolution de l'usure d'un outil de coupe en tournage," 2016.
- [124] M. Nouioua, M. A. Yallese, R. Khettabi, S. Belhadi, and T. Mabrouki, "Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, no. 9-12, pp. 3079-3094, 2017.

- [125] S. Luo, Y. Liao, and Y. Tsai, "Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools," *Journal of materials processing technology*, vol. 88, no. 1-3, pp. 114-121, 1999.
- [126] J. C. Aurich, T. Eyrich, and M. Zimmermann, "Effect of the coating system on the tool performance when turning heat treated AISI 4140," *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 214-219, 2012.
- [127] H. Bouchelaghem, M. A. Yallese, A. Amirat, and S. Belhadi, "Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel," *Mechanics*, vol. 65, no. 3, pp. 57-65, 2007.
- [128] O. KEBLOUTI, "Etude de l'impact du revêtement sur le comportement du Couple « Outil – Matière » en tournage ", 2017.
- [129] M. A. Yallese, L. Boulanouar, and K. Chaoui, "Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique," *Mechanics Industry*, vol. 5, 2004.
- [130] M. Elbah, H. Aouici, I. Meddour, M. A. Yallese, and L. Boulanouar, "Application of response surface methodology in describing the performance of mixed ceramic tool when turning AISI 4140 steel," *Mechanics & Industry*, vol. 17, no. 3, p. 309, 2016.
- [131] M. A. Yallese, K. Chaoui, N. Zeghib, L. Boulanouar, and J.-F. Rigal, "Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool," *journal of materials processing technology*, vol. 209, no. 2, pp. 1092-1104, 2009.
- [132] A. K. Sahoo, A. Panda, R. Kumar, R. K. Das, and D. Das, "Investigation on machinability characteristics during turning Al6063 alloy using uncoated carbide insert," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 9, pp. 18120-18128, 2018.
- [133] A. Panda, A. Sahoo, and A. Rout, "Statistical regression modeling and machinability study of hardened AISI 52100 steel using cemented carbide insert," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 8, no. 1, pp. 33-44, 2017.
- [134] O. ZERTI, "Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA," Guelma, 2018.
- [135] S. Boucherit, S. Berkani, M. A. Yallese, R. Khettabi, and T. Mabrouki, "Modeling and Optimization of Cutting Parameters during Machining of Austenitic Stainless Steel AISI304 Using RSM and Desirability Approach," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 10-26, 2020.
- [136] M. W. Azizi, O. KEBLOUTI, L. Boulanouar, and M. A. Yallese, "Design optimization in hard turning of E19 alloy steel by analysing surface roughness, tool vibration and productivity," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 73, no. 5, pp. 501-513, 2020.
- [137] N. Senthilkumar, T. Tamizharasan, and S. Gobikannan, "Application of response surface methodology and firefly algorithm for optimizing multiple responses in turning AISI 1045 steel," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 39, no. 11, pp. 8015-8030, 2014.
- [138] V. Gaitonde, S. Karnik, L. Figueira, and J. P. Davim, "Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts," *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* vol. 27, no. 4, pp. 754-763, 2009.
- [139] H. Aouici, B. Fnides, M. Elbah, S. Benlahmidi, H. Bensouilah, and M. A. Yallese, "Surface roughness evaluation of various cutting materials in hard turning of AISI H11," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 7, no. 2, pp. 339-352, 2016.
- [140] A. Kamoun, M. M. Chaabouni, and H. F. Ayedi, "Plans d'expériences et traitements de surface- Méthodologie des surfaces de réponses (MSR)" 2011.
- [141] W. Frifita, S. B. Salem, A. Haddad, and M. A. Yallese, "Optimization of machining parameters in turning of Inconel 718 Nickel-base super alloy," *Mechanics & Industry*, vol. 21, no. 2, p. 19, 2020.
- [142] P. J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design* (no. TS156 R12). McGraw-Hill New York, 1988.

- [143] Z. Hessainia, A. Yallese, L. Bouzid, and T. Mabrouki, "On the application of response surface methodology for predicting and optimizing surface roughness and cutting forces in hard turning by PVD coated insert," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 6, no. 2, pp. 267-284, 2015.
- [144] S. A. Mohd, S. Deepak, and S. Nikam, "Study of Cutting Forces and Surface Roughness in Turning of Bronze Filled Polytetrafluoroethylene," *International Journal of Advanced Mechanical Engineering.*, vol. 4, pp. 151-160, 2014.
- [145] L. St and S. Wold, "Analysis of variance (ANOVA)," *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, vol. 6, no. 4, pp. 259-272, 1989.
- [146] S. Chihaoui, M. A. Yallese, S. Belhadi, A. Belbah, K. Safi, and A. Haddad, "Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 113, no. 11, pp. 3643-3665, 2021.
- [147] B. Ben Fathallah, R. Saidi, S. Belhadi, M. A. Yallese, and T. Mabrouki, "Modelling of cutting forces and surface roughness evolutions during straight turning of Stellite 6 material based on response surface methodology, artificial neural networks and support vector machine approaches," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 15, no. 4, pp. 8540 - 8554, 2021.
- [148] Z. Cassier, Y. Prato, and P. Muñoz-Escalona, "Built-up edge effect on tool wear when turning steels at low cutting speed," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 13, no. 5, pp. 542-547, 2004.
- [149] T. Özel, Y. Karpat, L. Figueira, and J. P. Davim, "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts," *Journal of materials processing technology*, vol. 189, no. 1-3, pp. 192-198, 2007.
- [150] A. K. Sahoo and B. Sahoo, "Performance studies of multilayer hard surface coatings (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) of indexable carbide inserts in hard machining: Part-II (RSM, grey relational and techno economical approach)," *Measurement*, vol. 46, no. 8, pp. 2868-2884, 2013.
- [151] M. Nouioua, M. A. Yallese, R. Khettabi, S. Belhadi, M. L. Bouhalais, and F. Girardin, "Investigation of the performance of the MQL, dry, and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 5-8, pp. 2485-2504, 2017.
- [152] A. Laouissi, M. Nouioua, M. A. Yallese, H. Abderazek, H. Maouche, and M. L. Bouhalais, "Machinability study and ANN-MOALO-based multi-response optimization during Eco-Friendly machining of EN-GJL-250 cast iron," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 117, no. 3, pp. 1179-1192, 2021.
- [153] S. Mirjalili, "The ant lion optimizer," *Advances in engineering software*, vol. 83, pp. 80-98, 2015.
- [154] H. Abderazek, A. R. Yildiz, and S. M. Sait, "Mechanical engineering design optimisation using novel adaptive differential evolution algorithm," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 80, no. 2-4, pp. 285-329, 2019.
- [155] J. Brest, S. Greiner, B. Boskovic, M. Mernik, and V. Zumer, "Self-adapting control parameters in differential evolution: A comparative study on numerical benchmark problems," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 10, no. 6, pp. 646-657, 2006.
- [156] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [157] M. Nouioua, A. Laouissi, M. A. Yallese, R. Khettabi, and S. Belhadi, "Multi-response optimization using artificial neural network-based GWO algorithm for high machining performance with minimum quantity lubrication," *The International Journal of Advanced*

- Manufacturing Technology*, vol. 116, no. 11, pp. 3765-3778, 2021.
- [158] S. Anosri, N. Panagant, S. Bureerat, and N. Pholdee, "Success history based adaptive multi-objective differential evolution variants with an interval scheme for solving simultaneous topology, shape and sizing truss reliability optimisation," *Knowledge-Based Systems*, vol. 253, no. 11, p. 109-533, 2022.
- [159] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- [160] G. T. Danish M, Habib K, Abdul Rani AM, Saha BB "Effect of cryogenic cooling on the heat transfer during turning of AZ31C magnesium alloy. ," *Heat Transfer Eng*, vol. 40, no. 12 pp. 1023-1032, 2019.
- [161] I.-J. Jeong and K.-J. Kim, "An interactive desirability function method to multiresponse optimization," *European Journal of Operational Research*, vol. 195, no. 2, pp. 412-426, 2009.
- [162] N. R. Costa, J. Lourenço, and Z. L. Pereira, "Desirability function approach: a review and performance evaluation in adverse conditions," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 107, no. 2, pp. 234-244, 2011.
- [163] S. a. ali, "Etude de l'usage des aciers inoxydables lors du fraisage de face," 2017.
- [164] V. K. Patel and V. J. Savsani, "Heat transfer search (HTS): a novel optimization algorithm," *Information sciences*, vol. 324, pp. 217-246, 2015.
- [165] N. Pholdee and S. Bureerat, "Hybridisation of real-code population-based incremental learning and differential evolution for multiobjective design of trusses," *Information Sciences*, vol. 223, pp. 136-152, 2013.
- [166] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, and S. M. Mirjalili, "Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems," *Advances in Engineering Software*, vol. 114, pp. 163-191, 2017.
- [167] Q. Zhang and H. Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 11, no. 6, pp. 712-731, 2007.
- [168] S. Mirjalili, P. Jangir, and S. Saremi, "Multi-objective ant lion optimizer: a multi-objective optimization algorithm for solving engineering problems," *Applied Intelligence*, vol. 46, no. 1, pp. 79-95, 2017.
- [169] B. Hamadi, M. A. Yallese, L. Boulanouar, M. Nouioua, and A. Hammoudi, "RSM-based MOALO optimization and cutting inserts evaluation in dry turning of AISI 4140 steel," *Structural Engineering And Mechanics*, vol. 84, no. 1, pp. 17-33, 2022.
- [170] B. Hamadi, M. A. Yallese, L. Boulanouar, A. Hammoudi, and M. Nouioua, "Evaluation of the cutting performance of PVD, CVD and MTCVD carbide inserts in dry turning of AISI 4140 steel using RSM-based NAMDE optimization," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 8, pp. 1-26, 2022.
- [171] H. Abderazek, D. Ferhat, and A. Ivana, "Adaptive mixed differential evolution algorithm for bi-objective tooth profile spur gear optimization," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, no. 5, pp. 2063-2073, 2017.
- [172] A.-T. Nguyen, V.-H. Nguyen, T.-T. Le, and N.-T. Nguyen, "Multiobjective Optimization of Surface Roughness and Tool Wear in High-Speed Milling of AA6061 by Machine Learning and NSGA-II," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, p.21, 2022.
- [173] S. Chinchankar, J. K. Katiyar, and O. Manav, "Multi-objective optimization of turning of titanium alloy under minimum quantity lubrication," *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 243-260, 2022.
- [174] S. Z. Mirjalili, S. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, and I. Aljarah, "Grasshopper optimization

- algorithm for multi-objective optimization problems," *Applied Intelligence*, vol. 48, no. 4, pp. 805-820, 2018.
- [175] N. Panagant, S. Bureerat, and K. Tai, "A novel self-adaptive hybrid multi-objective meta-heuristic for reliability design of trusses with simultaneous topology, shape and sizing optimisation design variables," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 60, no. 5, pp. 1937-1955, 2019.

LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Les travaux de thèse réalisés ont donné lieu à des publications et à des communications avec comité de lecture.

Liste des publications dans des revues internationales.

1. **Hamadi, B.**, Yallese, M.A., Boulanouar, L. *et al.* Evaluation of the cutting performance of PVD, CVD and MTCVD carbide inserts in dry turning of AISI 4140 steel using RSM-based NAMDE optimization. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **44**, 342 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03633-5>.
2. **Billel Hamadi**, Mohamed Athmane Yallese, Lakhdar Boulanouar, et al. "RSM-based MOALO optimization and cutting inserts evaluation in dry turning of AISI 4140 steel". *Structural Engineering and Mechanics, An International Journal*. Volume 84, Number 1, October10 2022, pages 17-33. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.84.1.017>
3. **B. Hamadi**, M. A. Yallese, L. Boulanouar, A. Khellaf, and A. Haddad, "A Comparative Study of the Performance of Uncoated, PVD, CVD and MTCVD Coated Carbide Inserts in Dry Turning of AISI4140 Steel," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, <https://doi.org/10.3311/PPme.18591>

Liste des Publications Nationales.

1. **Hamadi, B.**, Boulanouar, L., Yallese, M. A., Bekkouche, H., Nouioua, M., & Achour, T. (2019). Étude Expérimentale de l'Usinabilité de l'acier 42 CrMo4 avec des Outils en Carbure revêtu et non revêtu. *Nature & Technology*, (21), 1-6.

Liste des Conférences Internationales et Nationales

1. **Billel Hamadi**, Lakhdar Boulanouar, M.A Yallese, Ahmed Khellaf, Mourad Nouioua, Redouan Zellagui, " Évaluation de la Rugosité de Surface des Outils en Carbure Revêtu et non Revêtu en Tournage de l'acier 42CrMo4v", la 4ème conférence internationale sur la maintenance et la sécurité industrielle (CIMSI'2017), 20 et 21 Novembre 2017, Université du 20 Août 1955 Skikda, Algérie.

2. **B. Hamadi**, L. Boulanouar, M.A. Yallese, " Etude de l'influence de revêtement des outils de coupe sur la rugosité de surface en tournage de l'acier 42crmo4v », 1ère Ecole d'automne sur les matériaux émergents (EAME 2017), 27 et 28 Novembre 2017, Université Sétif, Algérie.
3. **B. Hamadi**, L. Boulanouar, M.A. Yallese, H. Bekouche, " Étude Expérimentale de l'Usinabilité de l'acier 42CrMo4 avec des Outils en Carbure revêtu et non revêtu », The Second Students Symposium on Engineering Application of Mechanics (SSEAM'2), 13 et 14 décembre 2017, Université Chef, Algérie.
4. **BILLEL HAMADI**, L. Boulanouar, M. A. Yallese, T. Achour, « Etude de l'influence des paramètres des coupes sur la rugosité de surface de deux outils de coupe en tournage de l'acier 42CrMo4V », International Seminar in Industrial Engineering and Applied Mathematics (**ISIEAM'2018**), 23 et 24 octobre 2018, Université du 20 Août 1955 Skikda, Algérie.
5. **BILLEL HAMADI**, M.A. Yallese, Lakhdar Boulanouar, Toufik Achour, Adel Deliou, Sofiane Boulkroune, Alaeddine Lakhdari, « Application de la méthode de surface de réponse pour prédire la rugosité de surface dans le tournage avec un outil revêtu », International Conference on Industrials Metrology and Maintenance, 28 et 29 Octobre 2018, Université de Sétif, Algérie.

VITAE

Dr. HAMADI. Billel travaille actuellement en tant que chercheur permanent au Centre de Recherche en Mécanique de Constantine.

Il a étudié le génie mécanique de 1999 à 2001 et a obtenu son baccalauréat au lycée technique au ziadia à Constantine. Il a poursuivi ses études supérieures à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Constantine de 2001 à 2010 et il a obtenu le diplôme de DEUA en maintenance industrielle en 2003, le diplôme d'ingénieur en construction mécanique en 2007, le diplôme de Magister en mécanique de surface et de matériaux en 2010. Il a également étudié à la faculté de technologie de l'université de Badji mokhtar d'Annaba de 2016 à 2023 et a obtenu son doctorat en science dans la filière du génie mécanique.

Il a publié trois articles dans des revues internationales, un article dans une revue nationale et cinq communications lors de conférences internationales. Ses domaines d'intérêt comprennent l'usinage, le brunissage et l'optimisation.