

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR –ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat
Département de Génie Mécanique



جامعة باجي مختار- عنابة

Soutenu le:19/07/2017

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT en Sciences

**Etude de l'impact du revêtement sur le comportement du
Couple « Outil – Matière » en tournage**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Productique

Par

Kablouti Ouahid

Devant le jury:

Hamadache Hamid	Prof.	U. Badji Mokhtar- Annaba	Président
Boulanouar Lakhdar	Prof.	U. Badji Mokhtar- Annaba	Rapporteur
Amara Idris	Prof.	U. Mentouri Constantine	Examineur
Yaltese Mohamed Athmane	Prof.	U. du 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
Khettabi Riad	MC/A	U. du 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
Benghersallah Mohiédine	MC/A	U. Badji Mokhtar- Annaba	Examineur

ملخص

يرتكز هذا البحث على دراسة تأثير تغليف أدوات القطع وتأثير عناصر القطع على السلوك الديناميكي ونوعية سطح القطع المشغلة أثناء عملية خراطة الفولاذ (100Cr6) الغير مصلد من جهة ومن جهة أخرى أثناء عملية الخراطة للفولاذ (42CrMo4) المصلد (48 HRC) بواسطة أدوات القطع "سيرميت" المغلفة والغير المغلفة وبالإضافة إلى ذلك تم إجراء دراسة تحسين شروط القطع، للتوصل إلى العناصر التكنولوجية المثلى والتي تتلخص في مكونات قوة القطع، ومعايير خشونة السطح والإنتاجية. وأظهرت النتائج التجريبية أن للتغليف تأثير كبير على سلوك أدوات القطع. بالفعل، لقد أعطت أداة القطع "السيرميت" المغلفة قيم منخفضة من حيث خشونة السطح المشغل وقوى القطع مقارنة بأدوات السيرميت الغير مغلفة. ولقد تمت كذلك معالجة وتحليل النتائج والتي تم من خلالها اقتراح نماذج رياضية للتنبؤ. هذه الأخيرة تتميز بقيم معامل الارتباط (r) بين 0.95 و 0.97، الشيء الذي يبين مدى وقوة الارتباط والتوافق الموجودين بين القيم المحصل عليها تجريبيا وتلك التي تم حسابها بواسطة النماذج الرياضية المقترحة.

الكلمات المفاتيح: عملية تشغيل ، خشونة السطح، قوة القطع، النمذجة، تغليف أدوات القطع، ANOVA، RSM ، الاستخدام الأمثل للعناصر التكنولوجية.

Abstract

This work aims to study the impact of coating material and cutting parameters on the dynamic behavior and quality of machined surface. Firstly, on the turning of 100Cr6 steel and secondly, in hard turning of 42CrMo4 steel quenched at (48HRC) using uncoated and coated (with TiCN-TiN coating layer) cermet tools. In addition, an optimization study was conducted of cutting conditions, according to technological parameters which are the components of the cutting force, the criteria of surface roughness and productivity. Experimental results have shown that the coating has a considerable effect on the behavior of cutting tools. Indeed, the coated cermet is characterized by low values of surface roughness and cutting forces when compared to uncoated cermet tools. The results were processed and from which prediction models were determined. The values of the correlation coefficient (r) for all models were arranged in interval between 0.95 and 0.97, indicating good according between experimental and theoretical values.

Keywords: *machining processes, surface roughness, cutting force, Modeling, coating tools, ANOVA, RSM, and optimization.*

Résumé

Ce travail de recherche a pour but d'étudier l'impact du revêtement des outils de coupe, ainsi que l'effet des paramètres de coupe sur le comportement dynamique et sur la qualité de la surface usinée lors du tournage de l'acier 100Cr6 non trempé d'une part et d'autre part, lors du tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC) avec des outils de coupe en cermet revêtu et non revêtu. En plus, une étude d'optimisation des conditions de coupe a été menée, selon les objectifs liés aux paramètres technologiques qui sont les composantes de l'effort de coupe, les critères de la rugosité et la productivité. Les résultats expérimentaux ont montré que le revêtement a un effet considérable sur le comportement des outils de coupe. En effet, le cermet revêtu s'est caractérisé par la génération de faibles valeurs de la rugosité et des efforts de coupe par rapport aux outils cermet non revêtu. Les résultats obtenus ont été traités et analysés et à partir desquels des modèles de prédiction ont été déterminés. Les valeurs du coefficient de corrélation (r) pour tous les modèles déduits varient entre 0.95 et 0.97, ce qui exprime une très bonne corrélation entre les résultats obtenus expérimentalement et les valeurs prédites par les modèles mathématiques trouvés.

Mots-clés: Processus d'usinage, Rugosité, effort de coupe, Modélisation, Revêtement, ANOVA, RSM et Optimisation.

À ma mère et mon père pour leurs sacrifices
À mon épouse et mes enfants Soudjaine et Nazim
À mes frères et ma sœur
À toute ma famille
À tous mes amis

Remerciements

*Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur **Boulanouar Lakhdar**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar d'Annaba, à qui je tiens à exprimer m'a profonde gratitude pour toute la confiance qu'il m'a témoignée, les encouragements, les conseils tout au long du déroulement de ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au professeur **Hamadache Hamid** pour avoir bien voulu nous faire l'honneur de présider le jury de soutenance.*

*Je remercie également **Prof. Amara Idris, Prof. Yaltese Mohamed Athmane, MC/A Khettabi Riad** et **MC/A Benghersallah Mohiédine**, pour avoir bien accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury de soutenance.*

Enfin, je remercie tout le personnel technique et administratif du département de génie mécanique de l'université Badji Mokhtar Annaba, ainsi que celui du département de génie mécanique de l'université du 8 Mai 1945 Guelma. Je remercie tous ceux qui de loin ou de près ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

*Mes remerciements vont particulièrement à mon père et de même ordre à ma mère, qui m'ont constamment encouragé et soutenu tout au long de ces années. Les mots me manquent pour remercier, à sa juste valeur, mon épouse, pour son soutien moral et psychologique indispensable pour maintenir ce projet à flot au travers des aléas de la vie et pour avoir cru en mes capacités intellectuelles et à mon sens de l'organisation pour le réaliser. Je ne saurais terminer sans souligner le soutien amical et chaleureux de mes amis de tous les jours qui m'ont soutenu durant ce parcours doctoral. Je nommerai tout de même mes amis, Professeur **Rahmani Ahmed** et **Dr Azizi Mohamed Walid**, que je remercie spécialement pour leurs conseils et appui.*

Liste des figures

Figure I.1 Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux	16
Figure I.2 La coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique (arête/matière)	17
Figure I.3 Configuration de la coupe orthogonale 2D	19
Figure I.4 Les différentes configurations de copeau	19
Figure I.5 Les différentes étapes de la genèse du copeau en dent de scie du point de vue expérimental (essais Quick Stop Test)	20
Figure 1.6 Évolution de la morphologie d'un copeau d'acier 100 Cr 6 en fonction de la dureté macroscopique de la pièce et de la vitesse de coupe	21
Figure I. 7 Exemple de couches de revêtement déposées par la technique CVD sur un substrat en carbure, d'après le fabricant Sandvik Coromant.	22
Figure I. 8 Flux de chaleur transmis dans l'outil lors de l'usinage de l'acier 27MnCr5 avec des outils de coupe possédant différentes configurations	23
Figure I. 9 Variation de la conductivité thermique des revêtements TiN, TiAlCN et TiAlN on fonction de la température.	24
Figure I. 10 Variation de la conductivité thermique des revêtements AlTiN, TiAlSiN et CrAlSiN on fonction de la température.	24
Figure I. 11 Variation de la chaleur spécifique volumétrique de différents revêtements (TiN, TiAlCN, TiAlN, AlTiN, TiAlSiN et CrAlSiN) on fonction de la température.	24
Figure I. 12 Impact de différents types de revêtement (mono et multi couches) ainsi que de l'avance	25
Figure I. 13 Schéma illustrant la procédure de traitement des surfaces sur substrat WC/Co	26
Figure I. 14 Effet des paramètres de coupe sur les composantes de l'effort de coupe, en fonction de la dureté	27
Figure I. 15 Moyennes des résultats de la rugosité obtenus par les différents revêtements	28
Figure I. 16 Effet principale du rayon de bec, types de revêtement et l'avance sur la rugosité	29
Figure I.17 Micrographies avec MEB des plaquettes revêtus TiN avec $d = 0.2$ mm, $f = 0.05$ mm/rev,	30
Figure I.18 Micrographies avec MEB des plaquettes revêtus TiN avec $d = 0.5$ mm, $f = 0.2$ mm/rev, (a) à $v = 60$ m/min, (b) à $v = 120$ m/min, and (c) à $v = 150$ m/min.	30
Figure I.19 Illustration des résultats d'analyse par EDX et éléments de composition des plaquettes revêtus TiN avec $v = 60$ m/min, $f = 0.2$ mm/rev and $d = 0.5$ mm	31
Figure I. 20 Illustration des résultats d'analyse par EDX et éléments de composition des plaquettes revêtus TiN avec $v = 120$ m/min, $f = 0.2$ mm/rev and $d = 0.5$ mm	31
Figure I. 21 Procédés de fabrication de CVD et PVD	32
Figure 1.22 Différentes structures des revêtements	33
Figure 1. 23 : Schématisation de l'usure abrasive.	34
Figure 1. 24: Arête rapportée ou copeau adhérent	34
Figure 1. 25 : Modèle de diffusion dynamique entre l'outil et le copeau proposé par Trent : diffusion de W, Co et C dans le copeau et faible solubilité de TiC	35
Figure 1. 26 : Modèle de diffusion quasi-statique de diffusion entre l'outil et le copeau proposé par Qi et al. : diffusion de W, Co et C dans la couche de gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$)	35
Figure I.27 : Types ou modes d'usures selon H. OPITZ et W. KÖNIG Source : thèse de	36

REMADNA

Figure I.28 : Exemple d'usure par abrasion sur la face en dépouille	37
Figure I.29 : Usure en cratère de la surface d'attaque d'une plaquette en céramique mixte (CC650)	37
Figure I.30 : Formes d'usure des outils de coupe	38
Figure I.31 : Schéma de l'usure en dépouille et en cratère d'un outil selon la norme NFE 66 505	39
Figure I.32 : Principaux défauts de surface	40
Figure I.33 : Principaux critères de rugosité	41
Figure I.34 : Profil de rugosité en tournage	41
Figure I.35 : Décomposition de l'effort de coupe pendant l'opération de chariotage	43
Figure II.1: La boîte noire du processus.	47
Figure II.2 : Les niveaux et domaine de variation du facteur	48
Figure II.3: Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur	49
Figure II.4 : plan composite pour deux facteurs	52
Figure II.5 : plan de Box-Behnken pour trois facteurs	52
Figure III.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40	63
Figure III.2 : Éprouvette utilisée en tournage dur de l'acier 42CD4 trempé (48 HRC).	64
Figure III.3 : Cycles des traitements thermiques utilisés pour l'acier 42CD4.	65
Figure III.4 : Illustration des plaquettes utilisées	66
Figure III.5 : Porte plaquette de référence (CSBNR 25-25 M12)	67
Figure III.6 : (a) Rugosimètre Surfrest 201 (Mitutoyo), (b) Mesure de rugosité sans démontage de la pièce	67
Figure III.7 : Microscope optique (Motic)	68
Figure III.8 : Illustration du système de mesure des efforts de coupe par dynamomètres	68
Figure III.9 : Illustration schématique du plan d'expérience	69
Figure IV.1: Diagramme d'effet principal des facteurs (v , f et d) sur la rugosité (R_a) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu	77
Figure IV.2: Diagramme d'effet principal des facteurs (v , f et d) sur la rugosité (R_a) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu	77
Figure IV.3: diagramme de l'effet principal des facteurs (v , f et d) sur (F_a) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu	81
Figure IV.4: diagramme de l'effet principal des facteurs (v , f et d) sur (F_r) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu	81
Figure IV.5: diagramme de l'effet principal des facteurs (v , f et d) sur (F_t) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu	81
Figure IV.6: diagramme de l'effet principal des facteurs (v , f et d) sur (F_a) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu	81
Figure IV.7: diagramme de l'effet principal des facteurs (v , f et d) sur (F_r) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu	82
Figure IV.8: diagramme de l'effet principal des facteurs (v , f et d) sur (F_t) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu	82
Figure IV.9: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (R_a) obtenus avec le cermet revêtu et non revêtu	85
Figure IV.10: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (F_a , F_r et F_t) obtenues avec le	85

cermet revêtu

Figure IV.11: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (F_a , F_r et F_t) obtenues avec le cermet non revêtu.	85
Figure IV.12 : Probabilités normales des erreurs pour	86
Figure IV.13 : Illustration des résidus par essais	86
Figure IV.14 : Effet du revêtement sur la rugosité (R_a) et les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t)	88
Figure IV. 15: Surface de réponse de la variations de la rugosité (R_a) en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil cermet revetu et non revetu	89
Figure IV. 16: Surface de réponse de la variations de la rugosité (R_a) en fonction de (v et d) obtenus avec l'outil cermet revetu et non revetu	90
Figure IV. 17: Surface de réponse de la variations de la rugosité (R_a) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revetu et non revetu	90
Figure IV. 18: Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe axial (F_a) en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil cermet revetu et non revetu	91
Figure IV. 19: Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe axial (F_a) en fonction de (v et d) obtenus avec l'outil cermet revetu et non revetu	91
Figure IV.20 : Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe axial (F_a) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revetu et non revetu	91
Figure IV. 21: Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe radial (F_r) en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil cermet revetu et revetu	92
Figure IV.22 : Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe radial (F_r) en fonction de (v et d) obtenus avec l'outil cermet revetu et revetu	92
Figure IV. 23: Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe radial (F_r) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revetu et revetu	92
Figure IV. 24: Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe tangentiel (F_t) en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil cermet revetu et revetu	93
Figure IV. 25: Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe tangentiel (F_t) en fonction de (v et d) obtenus avec l'outil cermet revetu et revetu	93
Figure IV. 26: Surface de réponse de la variations de l'effort de coupe tangentiel (F_t) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revetu et revetu	93
Figure IV.27 : Contour et surface de réponse de la variations de la désirabilité en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil cermet revetu	97
Figure IV.28 : Contour et surface de réponse de la variations de la désirabilité en fonction de (v et d) obtenus avec l'outil cermet revetu	97
Figure IV.29 : Contour et surface de réponse de la variations de la désirabilité en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revetu	97
Figure IV.30 : Contour et surface de réponse de la variations de la désirabilité en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil cermet non revetu	98
Figure IV.31 : Contour et surface de réponse de la variations de la désirabilité en fonction de (v et d) obtenus avec l'outil cermet non revetu	98
Figure IV.32 : Contour et surface de réponse de la variations de la désirabilité en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet non revetu	98
Figure IV.33: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet revêtu en fonction de (V et f)	100
Figure IV.34: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet revêtu en fonction de (f et d)	100

Figure IV.35: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet revêtu en fonction de (V et d)	100
Figure IV.36: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet non revêtu en fonction de (V et f)	101
Figure IV.37: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet non revêtu en fonction de (f et d)	101
Figure IV.38: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet non revêtu en fonction de (V et d)	101
Figure IV.39: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Ra) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu	106
Figure IV.40: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Rt) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu	106
Figure IV.41: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Ra) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu	107
Figure IV.42: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Rt) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu	107
Figure IV.43 : micrographies de la partie active de l'outil cermet revêtu.	108
Figure IV.44 : micrographies de la partie active de l'outil cermet non revêtu.	109
Figure IV.45 : Graphe du test de normalité de la rugosité obtenu avec l'outil cermet revêtu	110
Figure IV.46 : Graphe du test de normalité de la rugosité obtenu avec l'outil cermet non revêtu	111
Figure IV.47: Surface de réponse de la variations de la rugosité (Ra) en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil cermet revetu.	112
Figure IV.48: Surface de réponse de la variations de la rugosité (Ra) en fonction de (v et d) obtenus avec l'outil cermet revetu	112
Figure IV.49: Surface de réponse de la variations de la rugosité (Ra) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revetu.	112
Figure IV.50: Surface de réponse de la variations de la rugosité (Ra) en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil non revetu	113
Figure IV.51: Surface de réponse de la variations de la rugosité (Ra) en fonction de (v et d) obtenus avec l'outil cermet non revetu	113
Figure IV. 52: Surface de réponse de la variations de la rugosité (Ra) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil non revetu	113
Figure IV.53: Effet principal de (v et f) sur la rugosité Ra	115
Figure IV.54 : Effet principal de (v et f) sur la rugosité Rt	115
Figure IV.55 : Effet de l'interaction des facteurs (v et f) sur la rugosité Ra	116
Figure IV.56 : Effet de l'interaction des facteurs (v et f) sur la rugosité Ra	116
Figure IV.57 : Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (V et f).	116
Figure IV.58 : Surface de réponse de la rugosité Rt en fonction de (V et f).	116
Figure IV.59 : Micrographies d'usure en épouille principale des paquettes carbure revêtu (TiCN+Al ₂ O ₃)	117

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Données techniques des carbures métalliques revêtus et non revêtus	28
Tableau I. 2 Tableau comparatif des modes de dépôt sous vide	31
Tableau I. 3 Propriétés des revêtements PVD et CVD	33
Tableau II.1 Calcul des niveaux des facteurs	51
Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier à roulement 100Cr6	64
Tableau III.2 : Propriétés mécaniques et thermiques de l'acier à roulement 100Cr6	64
Tableau III.3 : Composition Chimique de l'acier 42CD4	64
Tableau III.4 : Conditions de la trempe des éprouvettes de l'acier 42CD4	65
Tableau III.5 : Caractérisation et désignation des plaquettes utilisées	66
Tableau III.6 : Conditions de coupe du Plan factoriel complet ($N=3^3$, L27)	70
Tableau III.7 : Conditions de coupe du plan d'expérience de Box-Behnken	70
Tableau III.8 : Conditions de coupe du Plan factoriel complet ($N=2^4$, L16)	71
Tableau IV.1 : Résultats expérimentaux de la rugosité et des efforts de coupe	74
Tableau IV.2: Résultats d'ANOVA de la rugosité R_a obtenus avec cermet revêtu	75
Tableau IV.3: Résultats d'ANOVA de la rugosité R_a obtenus avec cermet non revêtu	76
Tableau IV.4: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (F_a) obtenus avec cermet revêtu	78
Tableau IV.5: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (F_r) obtenus avec cermet revêtu	78
Tableau IV.6: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (F_t) obtenus avec cermet revêtu	79
Tableau IV.7: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (F_a) obtenus avec cermet non revêtu	79
Tableau IV.8: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (F_r) obtenus avec cermet non revêtu	80
Tableau IV.9: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (F_t) obtenus avec cermet non revêtu	80
Tableau IV.10: Coefficients de détermination et de corrélation des modèles quadratique	84
Tableau IV.11: Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage	96
Tableau IV.12: Solutions optimales obtenu avec l'outil cermet revêtu	96
Tableau IV.13: Solutions optimales obtenu avec l'outil cermet non revêtu	96
Tableau IV.14: Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage	99
Tableau IV.15: Solutions optimales obtenu avec l'outil cermet revêtu	99
Tableau IV.16: Solutions optimales obtenu avec l'outil cermet non revêtu	99
Tableau IV.17: Conditions de coupe du plan d'expérience de Box-Behnken	102
Tableau IV.18: Résultats expérimentaux selon le plan Box-Behnken	102
Tableau IV.19: Résultats d'ANOVA de la rugosité (R_a) obtenu avec l'outil cermet revêtu	104
Tableau IV.20: Résultats d'ANOVA de la rugosité (R_t) obtenu avec l'outil cermet revêtu	104
Tableau IV.21: Résultats d'ANOVA de la rugosité (R_a) obtenu avec l'outil cermet non revêtu	105
Tableau IV.22: Résultats d'ANOVA de la rugosité (R_t) obtenu avec l'outil cermet non revêtu	105
Tableau IV.23: Conditions de coupe du Plan factoriel complet ($N=2^4$, L16)	114
Tableau IV.24: Résultats expérimentaux du Plan factoriel complet ($N=2^4$, L16)	115

Liste des abréviations et symboles

ANOVA :	Analyse de variance.
γ :	Angle d'attaque (degré).
α :	Angle de dépouille principal (degré).
χ :	Angle de direction principal (degré).
λ :	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).
f :	Avance par tour (mm/tr).
F :	Effort de coupe résultant (N).
R^2 :	Coefficient de détermination.
HRC :	Dureté Rockwell.
HV :	Dureté Vickers.
$F_a (F_x)$:	Effort de coupe axial (N).
$F_r (F_y)$:	Effort de coupe radial (N).
$F_t (F_z)$:	Effort de coupe tangentiel (N).
MSR :	Méthodologie de surface de réponse.
K :	Pression (effort spécifique) de coupe (N/mm^2).
K_a :	Pression (effort spécifique) de coupe axiale (N/mm^2).
K_r :	Pression (effort spécifique) de coupe radiale (N/mm^2).
K_c :	Pression (effort spécifique) de coupe tangentielle (N/mm^2).
P_c :	Puissance de coupe (Watt).
a_p :	Profondeur de passe (mm).
R_z :	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
r_ϵ :	Rayon de bec de l'outil (mm).
R_a :	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
R_t :	Rugosité totale (μm).
t :	Temps d'usinage (min).
TD	Tournage dur
VB :	Usure en dépouille (mm).
V_c :	Vitesse de coupe (m/min).

Remerciements	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	X
Liste des abréviations et symboles	XI

Table des matières

Introduction générale	10
-----------------------	----

Chapitre I Etude et analyse bibliographique

I.1 Introduction.....	13
I.2 Définitions de l'usinabilité	13
I.2.1 Critères d'évaluation de l'usinabilité	13
I.3 Evolution des techniques d'usinage	14
I.3.1 Usinage conventionnel	14
I.3.2 Tournage des métaux durs (TD).....	15
I.3.3 Usinage à grande vitesse UGV	15
I.4 Mécanismes et physique de la coupe des métaux	16
I.5 Morphologie de copeaux	19
I.6 Etat de l'art	21
I.6.1 Travaux de recherches sur l'impact du revêtement en usinage	21
I.6.2 Procédés de revêtements	33
I.6.3 Différentes structures des revêtements	33
I.6.3.1 Revêtements bicouches et multicouches	33
I.6.3.2 Revêtements multicouches et superlattice	33
I.6.3.3 Revêtements composites	33
I.7 Mécanismes d'endommagement des outils de coupe	34
I.7.1 Usure par abrasion	34
I.7.2 Usure par adhésion	34
I.7.3 Usure par diffusion	34
I.7.4 Déformation plastique de l'arête	35
I.7.5 Usure par fatigue thermomécanique	35
I.8 Principales formes d'usure des outils de coupe	36
I.8.1 Usure en dépouille	36
I.8.2 Usure en cratère	37
I.8.3 Fissuration de l'arête de coupe ou usure en peigne.....	37
I.8.4 Ecaillage de l'arête de coupe	37
I.8.5 Usure en entaille ou par oxydation	37
I.8.6 Rupture de la plaquette	37
I.9 Critères de surveillance de l'usure	38
I.10 Caractéristiques des surfaces usinées.....	39
I.10.1 Principaux défauts de surface	39
I.10.2 Principaux Critères de rugosité	40
I.10.3 Modèle théorique de la rugosité	40
I.11 Efforts de coupe	42
I.11.1 Intérêt de contrôler les efforts de coupe	43
I.12 Analyse Bibliographique	43
I.13 Position du problème	44

Chapitre II

Méthodes expérimentales d'analyse et d'optimisation multi objectif

II.1. Introduction	46
II.2 Les plans d'expériences	46
II.2.1 Aperçu historique	46
II.2.2 Principe des plans d'expériences	47
II.2.3 Vocabulaire de base des plans d'expérience	47
II.2.4 Notion d'espace expérimental	48
II.2.5 Codage de la matrice d'expériences	49
II.2.6 Méthode de Taguchi	50
II.2.6.1 Principe de la méthode de Taguchi	50
II.2.7 Méthodologie de surface de réponse	50
II.2.7.1 Les plans composites centrés	51
II.2.7.2 Les plans de Box-Behnken	52
II.2.8 Notion de modélisation mathématique	53
II.2.9 Analyse statistique des résultats	54
II.2.10 Qualité descriptive du modèle postulé	54
II.2.11 Analyse de la variance	56
II.3 Optimisation multicritères	57
II.3.1 Introduction	57
II.3.2 Méthode de la fonction de désirabilité	57
II.3.3 Méthode de Ch'ing	58
II.4 Conclusion	61

Chapitre III

Equipements et méthodologie de recherche

III.1 Introduction	63
III.2 Banc d'essais et équipements expérimentale	63
III.2.1 Machine outil	63
III.2.2 Matériaux à usinés	63
III.2.2.1 Traitement thermique de l'acier 42CD4	65
III.2.3 Plaquettes et porte-outil utilisé	65
III.2.4 Rugosimètre	67
III.2.5 Microscopes	67
III.2.6 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	68
III.3 Procédure expérimentale	69
III.3.1 Introduction	69
III.3.2 Démarche expérimentale	69
III.3.2.1 Plan Factoriel Complet (N= 3 ³ , L27)	70
III.3.2.2 Plan de Box-Behnken	70
III.3.2.3 Plan factoriel complet (N= 2 ⁴ , L16)	71
III.4 Conclusion	71

Chapitre IV

Résultats, Modélisation et optimisation des efforts de coupe et de la rugosité en tournage

Partie A : Tournage de l'acier 100Cr6 non trempé

IV.1 Introduction	73
IV.2 Résultats expérimentaux et discussions	73
IV.2.1 Analyse de l'effet des paramètres de coupe	74
IV.2.1.1 Résultats d'ANOVA de la rugosité (Ra)	74
IV.2.1.2 Résultats d'ANOVA des efforts de coupe	77
IV.2.2 Modélisation mathématique de la rugosité et des efforts de coupe	83
IV.2.2.1 Test d'adéquation des modèles quadratique	84
IV.2.3 Impact du revêtement sur la rugosité et les efforts de coupe	88
IV.2.4 Analyse des surfaces de réponse	89
IV.2.5 Optimisation multi objectif des conditions de coupe	95
IV.2.5.1 Optimisation multiobjectifs pour minimiser (Ra) et minimiser (F_{tot})	97
IV.2.5.2 Optimisation multiobjectifs pour minimiser (Ra) et maximiser (Q)	100
	106

Partie B: Tournage dur de l'acier 42CrMo4 (HRC48)

IV.3 Introduction	
IV.4 Analyse et discussions des résultats expérimentaux	106
IV.4.1 Analyse de l'effet des paramètres de coupe sur les critères de la rugosité	107
IV.4.2 Analyse des modèles quadratiques des critères de la rugosité	113
IV.4.3 Analyse des graphes de surface de réponse 3D	115
IV.4.4 Analyse des résultats de la rugosité en tournage dur avec carbure revêtu (TiCN+Al ₂ O ₃)	118
IV.5 Conclusion	121
V. Conclusion Générale.....	122
Références Bibliographiques.....	124
ANNEXE	129
Production dans le cadre de la thèse	

Introduction générale

Les outils de coupe revêtus constituent la majorité des applications du domaine de la mise en forme par enlèvement de matière. Ceux non revêtus leur emploi est devenu comme exceptionnel. Le marché des outils de coupe revêtus se trouve de plus en plus largement développé. En outre, de nombreux travaux de recherche de différentes ingénieries (fabricants, sciences des matériaux,) ont été entrepris, visant à développer des revêtements répondant aux besoins d'usinage des matériaux les plus difficiles à couper dans des conditions de coupe les plus extrêmes. Néanmoins, la coupe des métaux est un phénomène physique très complexe. En effet, le processus de coupe est un domaine qui fait intervenir plusieurs éléments, certains de ces éléments sont liés à la machine-outil et aux conditions de travail (la rigidité de la machine et les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), et d'autres sont liés à l'outil de coupe d'une part (le matériau et la géométrie de la partie active de l'outil coupant) et d'autre part ils peuvent être liés à la matière à usiner (les propriétés mécaniques et physico-chimiques, telle que la dureté, la résistance à la rupture et la composition chimique de la pièce). En prenant en compte ces aspects de nombreux points apparaissent importants à traiter. Dans le même contexte, nous avons axé notre travail de recherche sur l'étude de l'impact des couches minces de revêtements d'outils de coupe (cermet et carbure métallique) sur les différents paramètres technologiques liés au couple (Outil – Matière) lors du tournage à sec, de l'acier à roulement 100Cr6 (AISI 52100) à l'état recuit et en tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC). Ceci est dans le but d'optimiser les conditions de coupe et d'améliorer la productivité et la qualité d'usinage. Ainsi, cette thèse s'articule autour de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur le tournage des matériaux métalliques. Nous avons également examiné les

différents phénomènes régissant le processus de coupe, en particulier, l'usure des outils de coupe, les efforts de coupe et la rugosité des surfaces usinées.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté le fondement théorique des méthodes de planification d'expériences dont on a utilisé pour la réalisation et le traitement des résultats de nos travaux de recherche.

Dans le troisième chapitre, sont illustrés les moyens et les équipements ainsi que la méthodologie entreprise pour la réalisation de la partie expérimentale.

Le quatrième chapitre est composé de deux parties. La première partie est focalisé sur l'impact du revêtement des outils de coupe cermet, ainsi que l'effet des paramètres de coupe sur les composantes de l'effort de coupe et les critères de la rugosité des surfaces usinées, lors du tournage de l'acier 100Cr6 non trempé. Dans cette partie, est exposée également une étude d'optimisation des conditions de coupe, selon les objectifs liés aux paramètres technologiques qui sont les composantes de l'effort de coupe, les critères de la rugosité et la productivité de travail. En revanche, la deuxième partie présente l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux obtenus en tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC) avec des outils de coupe en cermet revêtu et non revêtu. Ceci est pour étudier l'effet des paramètres de coupe et l'impact du revêtement de l'outil de coupe sur la qualité de la surface usinée.

Enfin, quelques conclusions et recommandations sont données pour servir de base à d'autres éventuelles études dans ce domaine, suivi par une liste des références bibliographiques et des annexes.

Chapitre I
Etude et analyse bibliographique

I.1 Introduction

La coupe des métaux est un processus complexe car il est accompagné de plusieurs phénomènes mécaniques, thermiques et physicochimiques. Ces phénomènes sont à l'origine des déformations plastiques et à la création de la chaleur aux interfaces (Outil-Copeau) et (Outil-Pièce). Lors de la création du copeau la matière est fortement cisailée, ensuite le copeau s'écoule de manière continue sur la face de coupe de l'outil. Ces conditions donnent lieu aux diverses formes d'usure qui sont le résultat des différents mécanismes tels que l'adhésion, l'abrasion et la diffusion. À cet effet, la qualité de la surface usinée ainsi que le comportement de l'outil de coupe à l'usure dépendent largement des conditions dans lesquelles s'effectue la coupe. Depuis leur apparition, les techniques de mise en forme par enlèvement de matière ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, qui ont pour objectif le développement des revêtements afin d'améliorer ces conditions de coupe. L'objectif de ce chapitre bibliographique est de présenter les principaux aspects associés à la coupe des métaux. Ensuite un état de l'art de la technique des revêtements pour outils de coupe sera présenté, ainsi que ses récentes évolutions techniques, que ce soit en termes de composition ou de structure. Nous verrons notamment les différents mécanismes d'endommagement des outils qui ont lieu lors d'une opération de coupe.

I.2 Définitions de l'usinabilité

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée [1]. Beaucoup de chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux ont défini l'usinabilité sous différentes formes, selon Berard Gruber [2] l'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable, l'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou moins grande, d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et à des cotes fixes. Selon Poulachon [3] la notion d'usinabilité décrit l'aptitude d'un matériau, compte tenu de toutes ses propriétés, à être mis en forme par outil coupant.

I.2.1 Critères d'évaluation de l'usinabilité

Les critères d'évaluation de l'usinabilité sont différents d'un chercheur à un autre. Selon Czaplicki [1] les critères de l'usinabilité sont la durée de vie de l'outil permettant la production maximale,

ensuite les efforts de coupe donnant une indication sur la puissance nécessaire à la broche de la machine-outil et enfin, le fini des surfaces usinées permettant de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée. D'une autre façon, les américains évaluent l'usinabilité d'un matériau en pour cent [4] c'est le % USA qui est défini comme étant la vitesse de coupe relative pour usiner un alliage dans des conditions de coupe déterminées par exemple le % USA = $(V_c/55) 100\%$, où (V_c) et la vitesse de coupe correspondant à l'usinage du matériau envisagé dans les conditions donnant une vitesse de coupe égale à 55m/min pour l'acier étalon AISI B1112. Les principaux critères selon Mathon [5] sont la rugosité de la surface usinée, définissant l'aptitude au fini de surface, suivi par la force de coupe définissant la résistance de la coupe, en dernier lieu la durée de vie de l'outil, ou la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée d'outil donnée ou l'usure pour un temps donné. Par contre d'autres chercheur comme Robelet [6] prennent l'usure comme l'effet le plus observable, suivi par l'effort de coupe et enfin la température de coupe. La majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suit :

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

L'absence de la température de coupe prouve qu'il s'agit d'un effet perturbateur lié fortement avec les critères d'usure et de l'effort de coupe.

I.3 Evolution des techniques d'usinage

L'évolution technique d'usinage a été pour une grande part dans l'augmentation des vitesses de coupe et de la productivité de l'usinage ; tout en permettant aussi une amélioration de la qualité des usinages. Cependant pour des débits de copeaux important avec des vitesses de coupe élevées, le principal problème dépend à la fois de l'outil, de la matière à usinées et des moyens de production proprement dit. Ceci a donné naissance à de nouveaux processus et techniques d'usinage.

I.3.1 Usinage conventionnel

L'usinage dit « conventionnel » est réalisé à faible vitesse de rotation de broche (inférieure à 5000 tr/min). Les vitesses de coupe correspondantes sont de l'ordre de 40 à 400 m/min selon la nature du matériau usiné. La dynamique et les caractéristiques des machines outils permettent d'obtenir des qualités d'usinage moyennes. Les usinages conventionnels sont réalisés par des machines manuelles mais aussi par les machines à commande numériques qui les remplacent de plus en plus. Les outils utilisés pour les usinages conventionnels sont réalisés dans une très vaste gamme de matière. La plupart sont en « carbure » (carbure de tungstène) ou en aciers « rapides ». Des outils en Nitrures de

Bore Cubiques (CBN), Céramiques ou « Cermets » (Carbures de Titane) sont également utilisés pour ces usinages.

I.3.2 Tournage des métaux durs (TD)

Les pièces en acier de dureté supérieure à 45 HRC (ce qui correspond environ à 600 HV ou 570 HB ou encore à une résistance mécanique $R_m=1900$ MPa) sont de plus en plus usinées en tournage à leur géométrie finale par outil coupant et non par rectification. L'usinage est habituellement réalisé avec une plaquette d'outil comportant un insert polycristallin en nitrure de bore cubique (CBN). L'outil choisi possède un rayon de bec assez grand ce qui permet d'approcher au mieux les états de surfaces obtenus en rectification. Le choix de la machine outil a son importance. Une machine très rigide permet d'atteindre de bonnes qualités de l'état de surface. Néanmoins il a été montré par Remadna en 2001 [7] que sur des tours conventionnels et à commande numérique, les états de surface obtenus étaient très proches de ceux obtenus sur des machines dédiées au TD. Ainsi de nos jours, les performances des machines outils sont telles qu'il n'est pas forcément nécessaire de rigidifier une machine pour le TD. Le tournage dur peut aussi être réalisé avec des vitesses de coupe élevées. Le copeau obtenu en TD avec des vitesses de coupe conventionnelles présente une morphologie identique à celle obtenue en UGV, si bien que l'on associe souvent le tournage dur et l'usinage à grande vitesse (UGV). Il est alors important de savoir que les paramètres caractéristiques de l'usinage d'une matière donnée avec un outil donné ou Couple Outil Matière, sont difficiles à atteindre aux plages de l'UGV. Par exemple Remadna en 1999 [8] a montré que pour des essais avec des vitesses de l'ordre de 350 m/min, la durée de vie de la plaquette CBN était très réduite.

I.3.3 Usinage à grande vitesse UGV

L'Usinage à Grande Vitesse (UGV) est de plus en plus présent dans de nombreux secteurs industriels. Cela est inhérent notamment à l'apparition sur le marché d'une offre complète permettant de développer des machines outils de plus en plus performantes. L'UGV est caractérisé par des vitesses de broche supérieures à 5000 tr/min et souvent de plus en plus proche des 20 000 tr/min. A titre d'exemple, nous trouvons dans l'industrie aéronautique des opérations d'UGV dans la masse pour les pièces de structures d'avion. Les techniques UGV permettent d'obtenir des usinages de parois minces non réalisables en usinage conventionnel.

Pour l'industrie, le passage à la grande vitesse est une action globale et complexe impliquant tous les aspects de la production. L'UGV apporte des avantages souvent décisifs en termes de productivité, de coût de fabrication et de qualité des produits. Mais il est aussi générateur de contraintes. Le coût des équipements, les dangers liés aux : grandes vitesses de rotation et d'avance

rendent inadmissibles les mises au point par tâtonnements. La programmation des trajectoires, le choix des outils et des conditions de coupe doit être sans défaut. Il est aujourd'hui possible d'usiner des pièces mécaniques sur de larges plages de vitesses de coupe. Selon le matériau utilisé, ces plages varient, mais il est toujours possible de distinguer trois zones de vitesses de coupe distinctes (Figure I.1):

- une zone de vitesse correspondant aux vitesses de coupe de " l'usinage conventionnel"
- une zone de vitesses de coupe inexploitable (conditions de coupe dégradées)
- une zone de vitesses de coupe correspondant à "l'Usinage Grande Vitesse"

Par exemple, lors d'usinage d'acier à des vitesses de coupe de 30 à 200 m/min, on parle d'usinage conventionnel, alors que des vitesses de coupe de 500 à 2000 m/min correspondent au domaine de l'UGV.

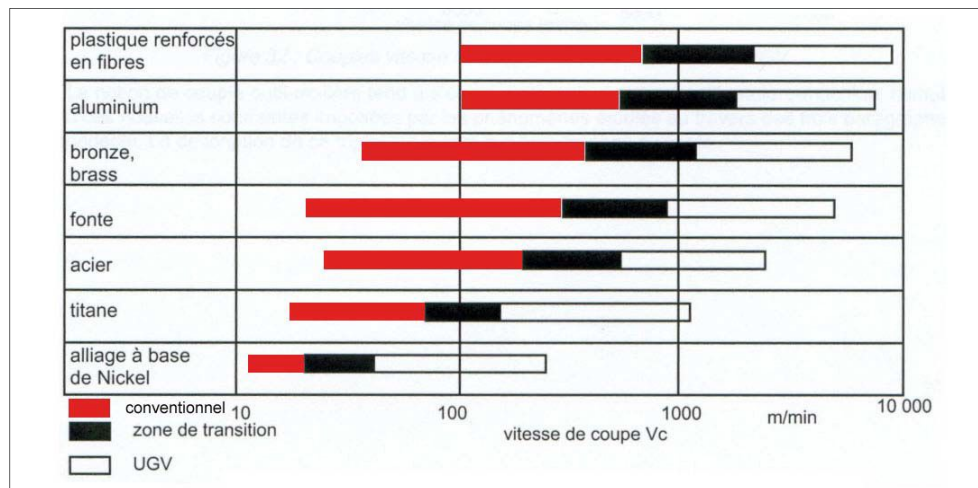


Figure I.1 : Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux [19].

En augmentant V_c au delà des limites de vitesse de l'usinage conventionnel, on commence par traverser une zone de vitesses inexploitable appelée « Vallée de la mort » dans laquelle les conditions de coupe sont dégradées (usure rapide de l'outil, mauvais état de surface...), puis on arrive dans le domaine de l'UGV où les conditions de coupe sont excellentes. La limite entre les zones est arbitraire. La plage de vitesses de coupe caractéristique de l'UGV dépend également de l'opération effectuée (Fraisage, Tournage...).

I.4 Mécanismes et physique de la coupe des métaux

L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil de coupe. Dans le cas de la coupe orthogonale en régime stationnaire, la force exercée par l'outil lors de son engagement dans la matière provoque, à l'échelle mésoscopique, une forte compression de la matière (une déformation plastique et un échauffement considérable) et engendre des zones de cisaillement entre les faces de

l'outil et la matière. La compréhension de ces phénomènes n'est pas facile parce qu'il s'agit d'un problème pluridisciplinaire (Figure I.2) faisant intervenir les sciences telles que [9] :

- La métallurgie (transformations structurales, dislocations, fissuration. . .) ;
- La thermodynamique (l'échauffement, écoulement) ;
- La tribologie (frottement, contact, usure. . .) ;
- La métrologie (dimensionnelle, macro et micro géométrique, intégrité des surfaces) ;
- La mécanique des matériaux (loi de comportements de type viscoplastique à des températures et des vitesses de déformation importantes) ;
- La mécanique des milieux continus (contraintes résiduelles, déformations, vitesse de déformation)
- La mécanique des solides (efforts, dynamique, vibrations. . .).

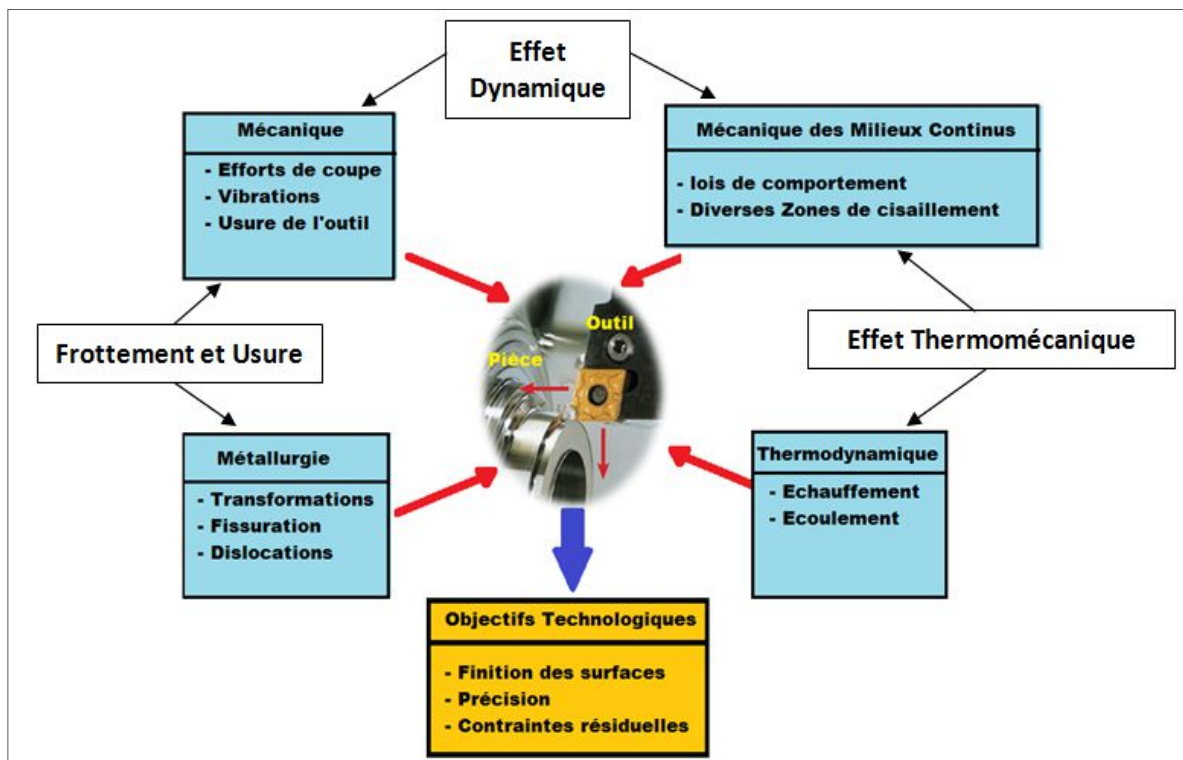


Figure I.2 : La coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique (arête/matière).

Des études numériques et expérimentales menées par Jawa et al. [10] ont montré que la formation de copeau se caractérise par l'apparition des quatre zones sollicitant l'outil (Figure I.3).

Zone 1 : C'est la zone de séparation en deux parties de la matière engendrée par l'arête de l'outil. Cette zone peut donner naissance à des phénomènes de soudures locales de la matière usinée sur l'outil (arête rapportée), à des vitesses de coupe trop basses. Ces soudures locales se créent et

disparaissent fréquemment, entraînant avec elles des morceaux d'outils. Cette forme d'usure provoque principalement des micro-écaillages de l'arête de coupe. Ce phénomène d'usure est quasiment inévitable lors des opérations d'usinage à très basse vitesse de coupe, alors que Rech et al. [11] ont constaté que c'est un phénomène limité à des vitesses de coupe élevées.

Zone 2 : Elle est dite zone de cisaillement primaire. C'est la zone de formation du copeau, la matière change de direction et passe de la vitesse de coupe V_C à la vitesse d'écoulement du copeau V_{cop} . Elle est le siège de sollicitations intenses qui s'étendent de la pointe de l'outil jusqu'à la surface libre du copeau et se manifeste sous forme d'importantes déformations plastiques créatrices de chaleur dont l'intensité conditionne une grande partie du flux de chaleur transmis à l'outil.

Zone 3 : D'un point de vue macroscopique, il doit être noté que la vitesse de frottement du copeau sur la face de coupe n'est pas égale à la vitesse de coupe. En effet, le copeau possède une section h différente de l'épaisseur initiale f . Le ratio entre les deux valeurs correspond au rapport de compression [12]. À l'échelle microscopique, les phénomènes d'adhésion ralentissent encore d'avantage l'écoulement de la matière ce qui donne lieu à un cisaillement plastique de la matière. Ce phénomène se dénomme « cisaillement secondaire ». Dans cette zone, la matière est soumise à de forts taux de cisaillement et subit une forte élévation de température en plus de celle subie lors du passage dans la zone de cisaillement primaire. Cette zone donne lieu à divers phénomènes d'usure : une usure par abrasion, causée par la présence des particules dures à l'interface outil copeau, et une usure par diffusion des composés de l'outil vers le copeau qui est activée thermiquement. L'ensemble de ces deux phénomènes d'usure est responsable de l'apparition d'un cratère sur la face de coupe de l'outil.

Zone 4 : au niveau du rayon d'arête de l'outil et de sa face de dépouille, des phénomènes de frottement se produisent également. La vitesse de frottement macroscopique est ici égale à la vitesse de coupe. À l'échelle microscopique, les phénomènes d'adhésion conduisent là aussi à un cisaillement plastique important. Cette zone, dénommée « cisaillement tertiaire ». Les phénomènes sont bien moins intenses que dans la zone 3, mais sont responsables de la qualité de la surface usinée et notamment de sa rugosité et des contraintes résiduelles.

Les contraintes mécaniques couplées avec l'élévation de la température font de ces zones des sièges pour plusieurs phénomènes physiques et chimiques qui conduisent à des modifications de structures, des durcissements, des phénomènes de frottement, des soudures, des processus d'adhésion et diffusion ainsi qu'à des réactions chimiques dans les couches limites et les points de contact, causant, par conséquent, la dégradation rapide de l'outil. Ces phénomènes dépendent

généralement des conditions de coupe et surtout de la température. Cette constatation a été faite depuis les travaux de Taylor [13] en 1907.

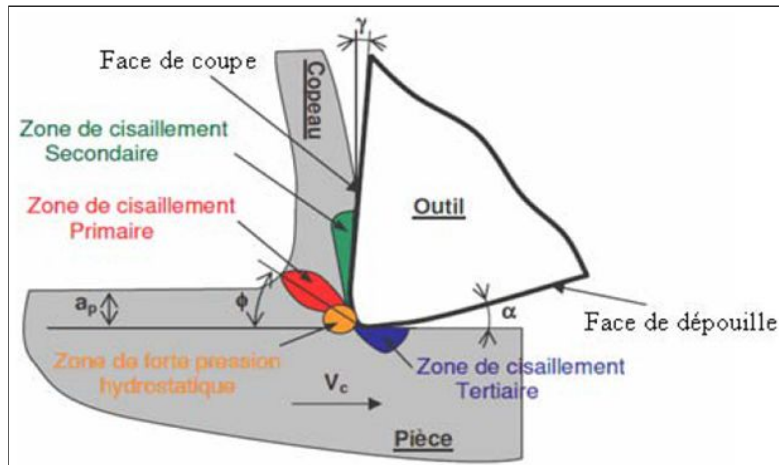


Figure I.3 : Configuration de la coupe orthogonale 2D [44].

I.5 Morphologie de copeaux

La plupart des études s'accordent sur une classification des copeaux en trois familles que sont les copeaux continus (Figure I.4a), les copeaux à arête rapportée (Figure I.4b) et les copeaux discontinus ou fragmentés (Figure I.4c). La formation d'un type de copeau est conditionnée d'une part par les paramètres de coupe utilisés et, d'autre part, par la rhéologie du matériau usiné et la nature de l'interface de contact outil/matière [14].

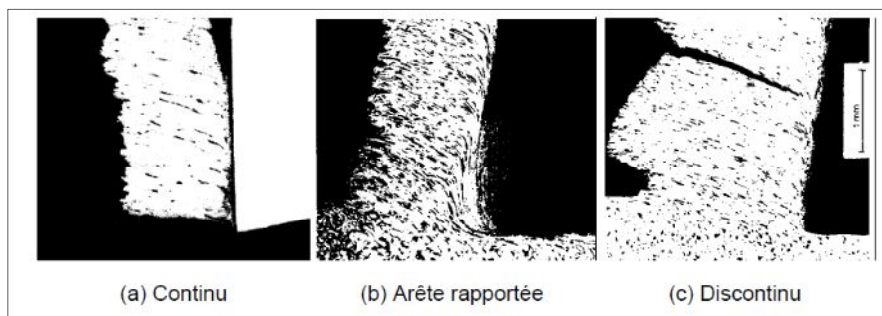


Figure I.4 : Les différentes configurations de copeau [14].

Le copeau continu est caractérisé par un processus de déformation plastique dans la zone de cisaillement primaire. La contrainte de cisaillement n'atteignant pas la limite à rupture du métal, le copeau s'écoule de manière continue. C'est la configuration qui, de par sa simplicité, a été la plus modélisée dans la littérature.

Le copeau à arête rapportée est quant à lui caractérisé par l'apparition d'un amas de matière écrouie sur la face de coupe de l'outil. Cette accumulation forme alors une nouvelle arête de coupe qui donne son nom à cette configuration de copeau. Cette configuration de copeau est rencontrée

lorsque les vitesses de coupe sont faibles. Abstraction faite de l'arête rapportée, le copeau en lui-même est en général continu.

Le copeau discontinu ou segmenté est caractérisé par sa rupture périodique et par l'apparition de segments. La contrainte de cisaillement atteint, dans la zone de cisaillement primaire, la limite à rupture du matériau et une fissure se propage de la surface de la pièce vers la pointe de l'outil. Il s'agit d'un phénomène cyclique.

On parle aussi de copeaux ondulants ou festonnés, de copeaux à localisation de déformation ou encore de copeaux à dents de scies comme il est montré par la figure I.5. La segmentation des copeaux est très influencée par les phénomènes de fissuration et de rupture, d'instabilité et de localisation des déformations plastiques. La coupe est alors qualifiée d'instable.

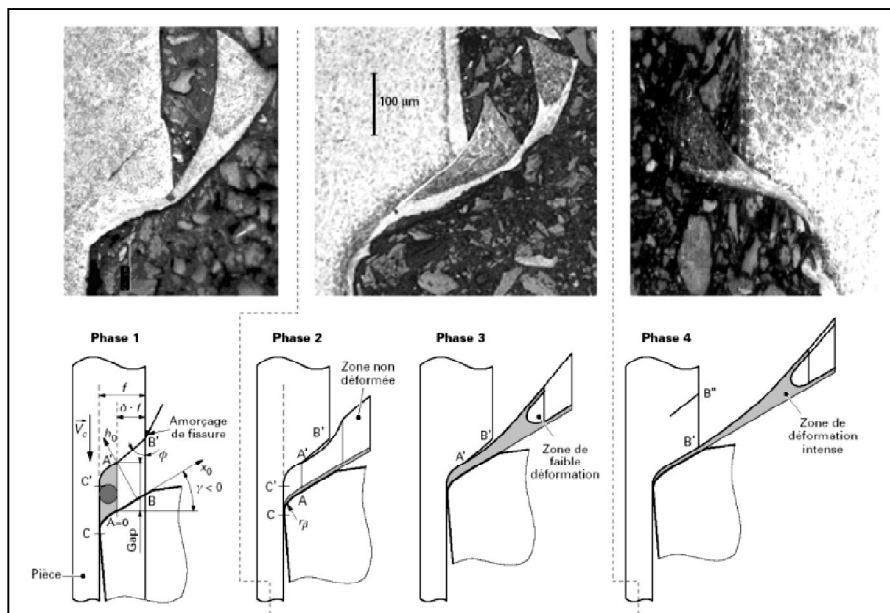


Figure I.5 : Différentes étapes de la genèse du copeau en dent de scie du point de vue expérimental (essais Quick Stop Test), [3].

Selon les travaux de Poulachon et al. [15], les propriétés thermomécaniques des matériaux usinés ont un effet sur la morphologie des copeaux comme il est montré par la figure 1.6. On présente les différentes morphologies de copeaux obtenus lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 (AISI 52100) ayant subi différents traitements thermiques, menant à une modification de sa dureté de Vickers. L'équilibre entre les effets d'écrouissage et d'adoucissement thermique semble être obtenu pour une valeur de dureté de 400 HV car jusqu'à cette valeur, l'épaisseur du copeau est constante.

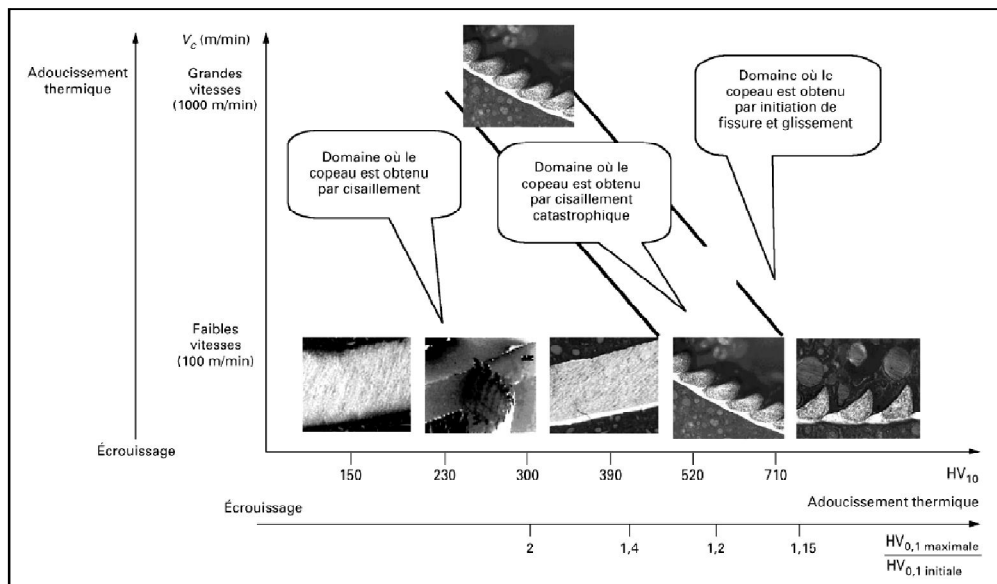


Figure 1.6 : Évolution de la morphologie d'un copeau d'acier 100 Cr 6 en fonction de la dureté macroscopique de la pièce et de la vitesse de coupe [3].

La segmentation de copeau trouve diverses interprétations dans la littérature. Nouari et al. [16] lors de leurs travaux sur l'usinage d'alliage de titane ont lié la segmentation de copeaux à l'adoucissement thermique du matériau usiné. Une élévation de la vitesse entraîne une augmentation de la quantité de chaleur générée par déformation plastique. Il s'en suit un adoucissement thermique, et lors de l'usinage de matériaux à faibles conductivités thermiques, la dissipation de chaleur se fait difficilement. Nous assistons ainsi à une localisation de la déformation plastique du matériau usiné et donc à l'apparition de bandes de cisaillement adiabatiques, [17]. Ce lien entre la segmentation des copeaux et la formation de bandes de cisaillement adiabatiques a également été abordé dans d'autres travaux, [18, 19].

D'autres auteurs [20-22] abordent la question de la segmentation de copeau lors de l'usinage d'aciers durs en le liant au phénomène de fissuration en amont de l'outil. Cette fissure part de la surface de la matière usinée, puis va se propager vers la pointe de l'outil de coupe pour ainsi former un copeau segmenté.

I.6 Etat de l'art

I.6.1 Travaux de recherches sur l'impact du revêtement en usinage

Actuellement, les revêtements occupent des domaines très importants dans l'industrie automobile, aéronautique ainsi qu'en usinage. Dans ce dernier domaine, ils sont notamment utilisés pour améliorer la qualité des produits fabriqués et accroître la productivité. Les techniques de revêtement (Figure I.7) consistent à déposer sur le substrat de la partie active de l'outil de coupe des couches minces (mono ou multicouches) ayant des épaisseurs allant jusqu'à 15 μm . Ceci dans le but

d'améliorer d'une part le comportement à l'usure (par adhésion, abrasion, oxydation ou diffusion) des outils et d'autre part le revêtement joue le rôle d'une barrière thermique et chimique pour protéger le substrat constituant la partie active de l'outil, notamment lors de l'usinage aux températures de coupe élevées. Il contribue également à la diminution du coefficient de frottement aux interfaces de la triade "Outil-Pièce-Copeau".

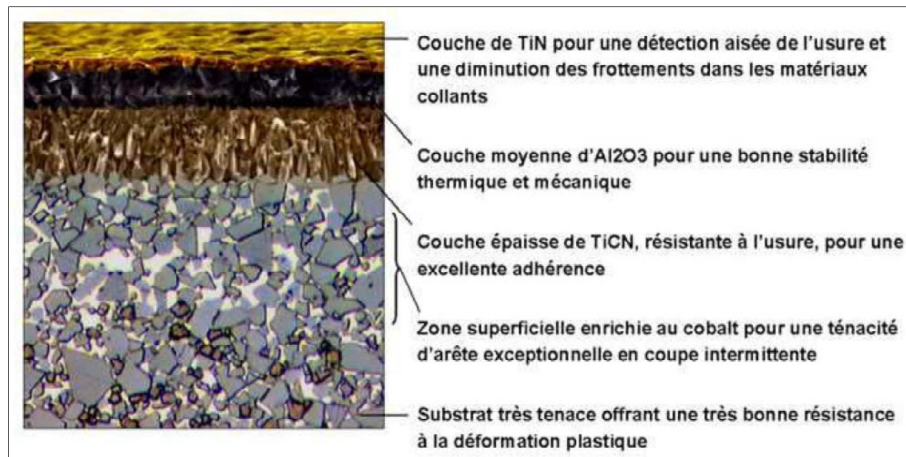


Figure I. 7 : Exemple de couches de revêtement [54].

Actuellement, les revêtements les plus utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane, les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al₂O₃). Ils peuvent être monocouche (TiCN) ou multicouches (TiCN- Al₂O₃-TiN). La nature du dépôt choisi dépend du but recherché: résistance à l'usure et à l'oxydation, tenue à la température ou réduction du frottement [24]. Selon GRZESIK [25] les revêtements peuvent être classés en 4 groupes.

- Les revêtements à base de titane (TiC, TiN, TiB₂, TiCN).
- Les revêtements céramiques.
- Les revêtements de diamant (PCBN).
- Les revêtements autolubrifiants avec MoS₂ ou WC.

Ainsi, on peut retenir globalement que :

- Nitrure de titane (TiN) : Se caractérise par une grande résistance à l'abrasion. C'est Pourquoi il est souvent utilisé comme couche externe. De plus, il tolère des dépôts plus épais sans nuire à sa tenue en service. Le TiN est inert vis-à-vis des aciers. Le frottement du métal sur le revêtement TiN est plus faible, ce que minimise le risque de formation d'arête rapportée.
- Carbure de titane (TiC) : Il adhère mieux au substrat. Il constitue ainsi une excellente base d'application de couches de revêtements supplémentaires. Par contre, il est fragile, ce qui exige que sa couche ne doit pas excéder 5 microns.

• Oxyde d'aluminium (Al_2O_3) : Est déposé en couche intermédiaire comme barrière de diffusion à la chaleur. Il conserve sa dureté à hautes températures, offrant une excellente résistance à l'usure, ainsi qu'une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation à des vitesses et des températures de coupe très élevées. Un inconvénient majeur dans le cas des revêtements multicouches des plaquettes de finition est la perte de l'acuité d'arête. Pour cette raison, les métallurgistes ont mis au point des revêtements en couches minces de 1 à 2 microns.

Les revêtements sont depuis quelques années un nouvel axe de recherche dans le monde industriel afin d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Ils prennent une place de plus en plus importante dans le monde de l'usinage. Diverses études ont montré le rôle bénéfique du revêtement des outils de coupe, [26-29]. Certaines ont montré le lien qui existe entre la température d'interface outil-copeau et la conductivité thermique des revêtements [30, 31]. Ces études ont indiqué que les propriétés thermiques des revêtements (ou couches minces) pour outils de coupe ont un impact majeur sur le processus d'usinage et l'usure des outils de coupe. En effet, un revêtement à faible conductivité thermique agit comme une barrière thermique en usinage à grande vitesse, éloignant ainsi plus de chaleur au copeau. D'autre part, un revêtement ayant une conductivité thermique élevée permet le transfert latéral de la chaleur vers le substrat de l'outil de coupe. Ainsi, plus le revêtement est isolant, plus la température d'interface est grande.

Les travaux de Rech et al. [27] illustrent les effets de certaines couches de revêtement en usinage de l'acier 27MnCr5. Leurs résultats obtenus (Figure I.8) montrent que l'utilisation des revêtements permet de faire baisser la quantité de chaleur allant dans les outils revêtus. En effet, le cas avec un outil sans revêtement présente le flux de chaleur le plus élevé de tous les cas. L'écart atteint environ 15 W entre l'outil non revêtu et les deux outils de coupe revêtus TiN et $(Ti,Al)N+MoS_2$. La couche de revêtement (MoS_2) est utilisée pour améliorer les conditions de frottement, si bien qu'une réduction notable du flux de chaleur pénétrant dans l'outil est observée.

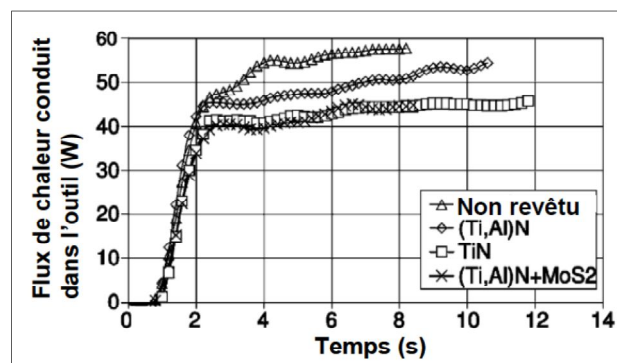


Figure I. 8 : Flux de chaleur transmis dans les différents outils de coupe testés

($V_c = 200$ m/min, $f = 0.1$ mm/tr, $ap = 3$ mm) [27]

Par ailleurs, Martana et Bene [32] ont trouvé que la conductivité thermique des matériaux de revêtement augmente avec l'élévation de la température (Figure I.9). Ont observé aussi que le

revêtement CrAlSiN présente la plus faible conductivité thermique et une faible augmentation de celle-ci avec l'accroissement de la température dans une plage de températures de 20°C à 500°C (Figure I.10). Leurs résultats ont prouvé également que la chaleur spécifique volumétrique pour les différents revêtements a augmenté avec l'augmentation de la température (Figure I.11). Par ailleurs, la conductivité thermique des revêtements TiAlSiN et CrAlSiN est également inférieure à La conductivité thermique du revêtement Al₂O₃ déposé en multicouches (par exemple TiC / Al₂O₃ / TiN). Néanmoins, ces revêtements ont une dureté et une résistance à l'oxydation élevées à des températures élevées. Avec leur faible conductivité thermique, ils sont des matériaux très recommandés pour les outils de coupe. Ils peuvent être utilisés comme couches simples pour la coupe continue ou en multicouches pour des procédés discontinus [32].

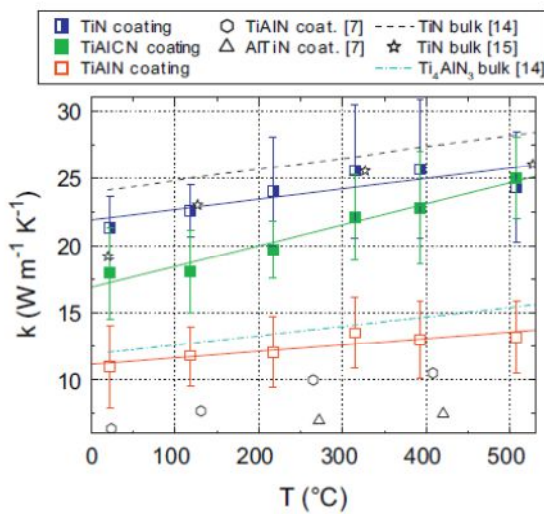


Figure I. 9 : Variation de la conductivité thermique des revêtements TiN, TiAlCN et TiAlN on fonction de la température. [32]

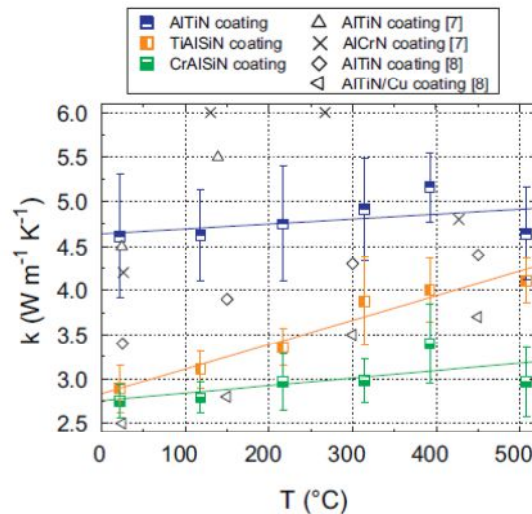


Figure I. 10 : Variation de la conductivité thermique des revêtements AlTiN, TiAlSiN et CrAlSiN on fonction de la température. [32]

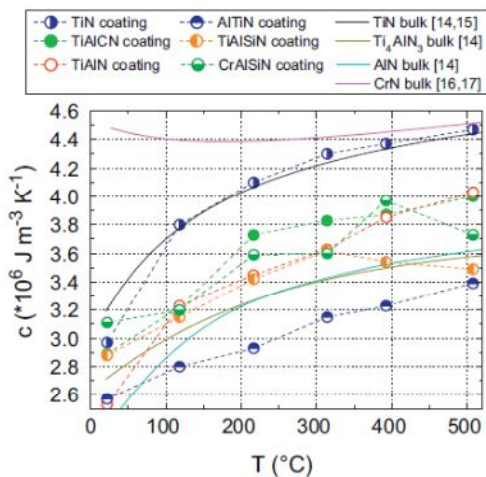


Figure I. 11 : Variation de la chaleur spécifique volumétrique des différents revêtements on fonction de la température. [32]

Les investigations menées par Grzesik [33] ont permis de mettre en évidence le rôle crucial des différents types de revêtements (mono et multicouches) lors de l'usinage à sec de deux nuances d'aciers (figure I. 12): l'acier AISI 1045 à base de carbone et l'acier inoxydable AISI 304. Les types de revêtement utilisés sont: Monocouche (TiC), Bicouches (TiC/TiN) et Tri-couches

(TiC/Al₂O₃/TiN). Ces études ont montré que la présence de la couche d'Al₂O₃ joue un rôle de barrière d'isolation. Par conséquent, la quantité de chaleur produite à l'interface "Outil-copeau" sera évacuée aisément à travers le copeau, ce qui conduit à son adoucissement. Il a été constaté également qu'aux avances élevées lors de l'usinage de l'acier AISI 304 avec un outil à triple revêtement (TiC/Al₂O₃/TiN), la présence de la couche d'Al₂O₃ a entraîné une baisse de la pression spécifique. Les résultats expérimentaux comparatifs des valeurs des coefficients de frottement montrent que celles des couples "TiC/Al₂O₃/TiN – AISI 1045" et "TiC/Al₂O₃/TiN – AISI 304" sont généralement inférieures à celles des autres couples (Outils-Matière) testés. Ces observations montrent que le choix d'un bon revêtement adapté est capital pour le bon déroulement de l'usinage. Cependant, un cas d'usinage avec un outil de coupe non revêtu et des conditions de coupe identiques aurait permis une meilleure illustration de l'effet positif de la présence des revêtements.

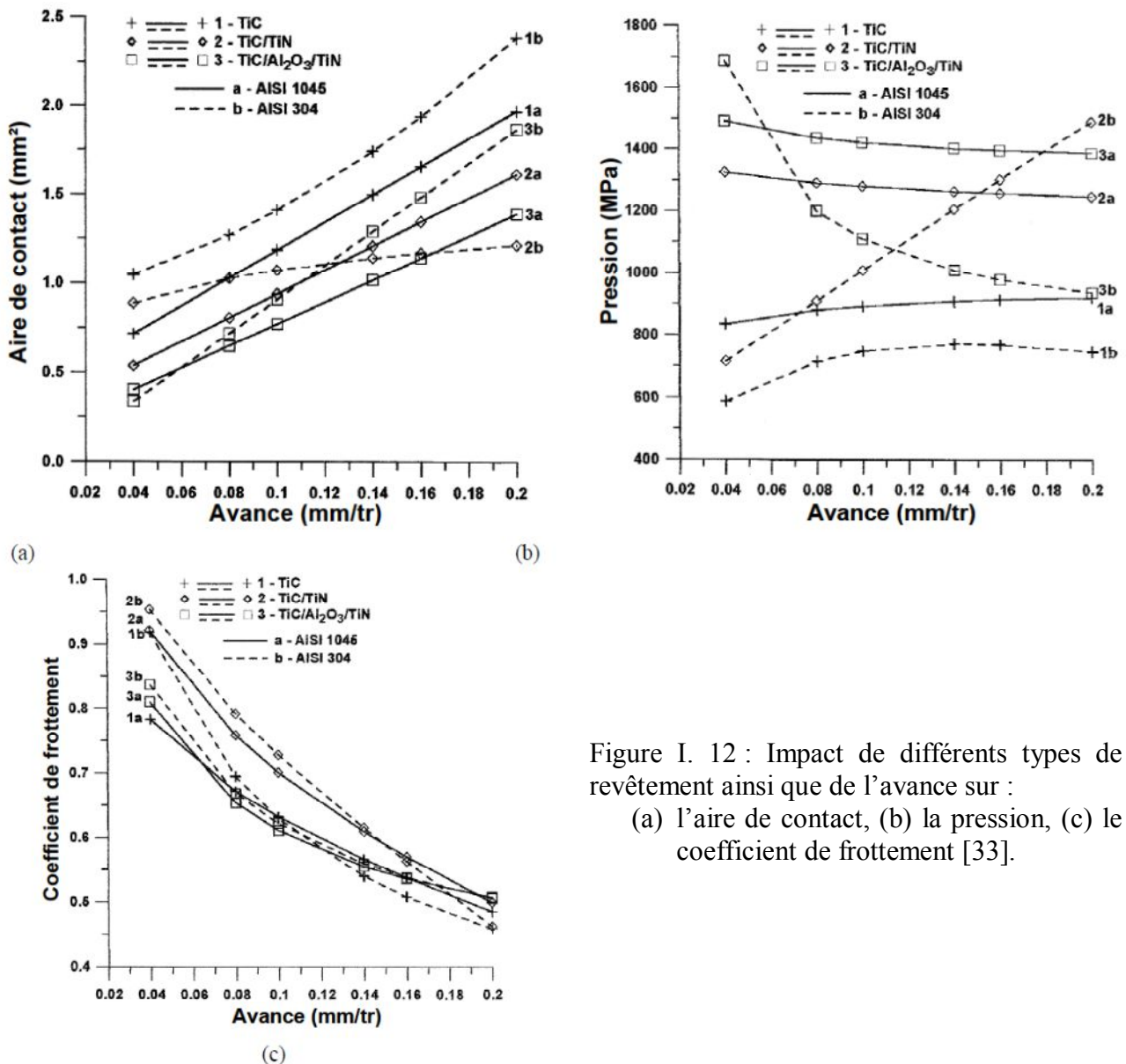


Figure I. 12 : Impact de différents types de revêtement ainsi que de l'avance sur :
 (a) l'aire de contact, (b) la pression, (c) le coefficient de frottement [33].

Récemment, la technique de surfaces texturées a été utilisée pour améliorer les propriétés tribologiques des surfaces de contacts, cette technique a permis d'améliorer la résistance à l'usure, le

coefficient de frottement, etc., et il a été utilisé dans de nombreux domaines principalement des roulements, chemises de cylindres du moteur et des bagues d'étanchéité. Des tentatives d'extension de cette technique à des outils de coupe peuvent également être une technique prometteuse pour améliorer les performances d'outil de coupe. À cet effet, plusieurs auteurs ont exploré de plus en plus les avantages de cette technique sur la face de coupe d'un outil [34, 35].

A cet esprit, le phénomène tribologique à l'interface "Outil-Pièce" a été également étudié lors d'une opération de tournage dur de l'acier AISI 1045 par Zhang et al. [36]. Ils ont développé deux nouveaux types d'outils en carbure métallique revêtus (Figure I. 13). Le premier type consiste à réaliser des textures à l'échelle nanométrique avec rayon laser sur la face de coupe du substrat WC/Co. Ensuite, ils ont déposé une couche de revêtement de Ti55Al45N par la technique d'évaporation par arc cathodique. Pour le second type, ils ont inversé les séquences. Suite à la réalisation des essais avec ces deux types d'outils développés, ils ont constaté une diminution significative des efforts et de la température de coupe ainsi que le coefficient de frottement à l'interface (outil / copeaux). Ils ont expliqué ceci par la diminution du frottement à l'interface (outil / copeaux), grâce aux nano-textures réalisées sur la face de coupe.

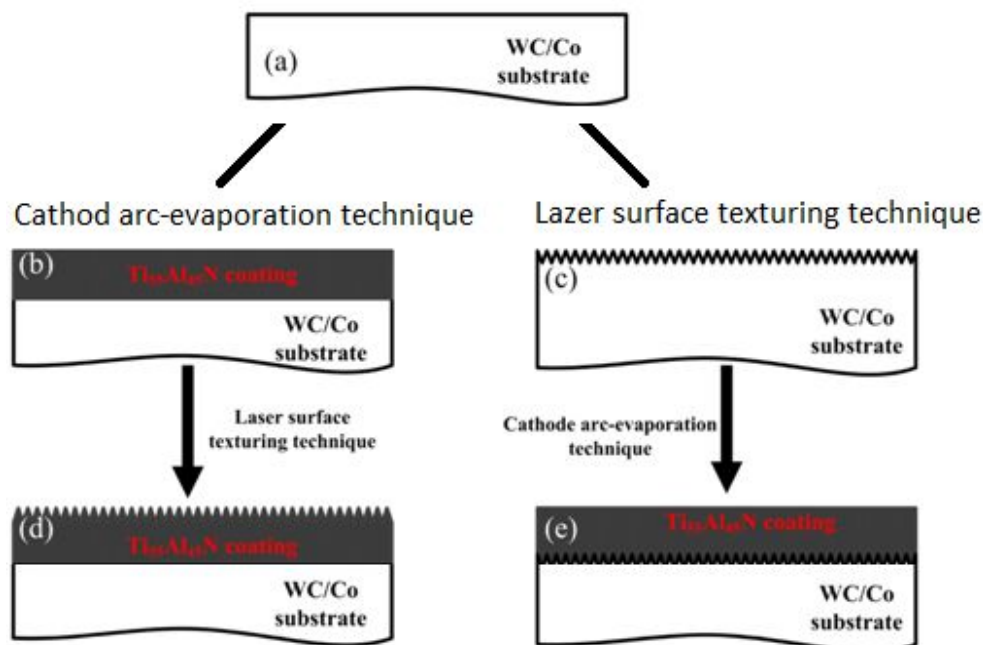


Figure I. 13 : Schéma illustrant la procédure de traitement des surfaces sur substrat WC/Co (a) carbure de tungstène polie, (b) carbure de tungstène revêtus (c) carbure de tungstène texturé, (d) revêtus puis texturée, et (e) échantillon texturée puis revêtus. [36]

Cependant d'autres travaux de recherches sont orientés vers l'étude du comportement des actions mécanique, l'usure des outils de coupe ainsi que la qualité des surfaces usinées, en tournage dur avec des outils de coupe carbure métallique revêtus. On peut citer les travaux de Chinchanikar et Choudhury [37]. En effet, leurs résultats ont montré que les valeurs des trois composantes de l'effort de coupe tangentiel (P1), axiale (P2) et radiale (P3) étaient très élevées lors du tournage dur

également pour les deux duretés (35 HRC et 45 HRC), ont observé aussi que l'amplitude de la composante tangentielle de l'effort de coupe est prépondérante, suivi par l'effort axial et enfin l'effort radial (Figure I. 14). Ont affirmé que l'avance est un facteur prédominant sur la variation de la rugosité, alors que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur la durée de vie (pour les deux duretés (35 HRC et 45 HRC)). Leurs résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) indiquent que l'avance et la profondeur de passe sont les deux facteurs les plus significatifs qui influent sur la rugosité de la surface usinée. Ils ont conclu que la profondeur de passe affecte la plupart du temps l'effort de coupe avec une contribution presque de 60 à 70 % puis l'avance avec une contribution presque de 25 à 30% .

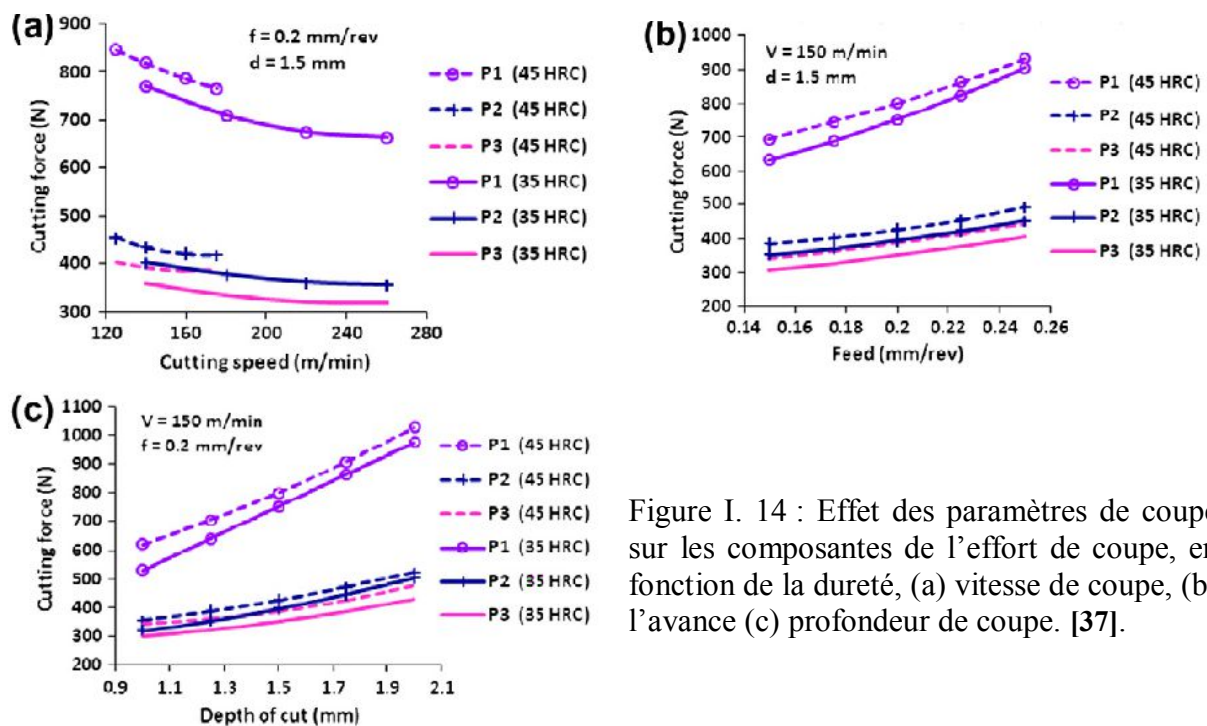


Figure I. 14 : Effet des paramètres de coupe sur les composantes de l'effort de coupe, en fonction de la dureté, (a) vitesse de coupe, (b) l'avance (c) profondeur de coupe. [37].

Gokkaya et Nalbant [38] Ont étudié l'effet du type de revêtement, le type de la technique de déposition de ces matériaux et les paramètres de coupe (la vitesse de coupe et l'avance) sur la rugosité des surfaces usinées. Les expériences ont été effectuées en utilisant un plan d'expérience basé sur la variation de Cinq vitesses de coupe (50, 73, 102, 145, 205 m/min), de deux avances (0.24 and 0.32 mm/tr) et quatre différents outils de coupe : un outil carbure non revêtus comme référence, deux outils carbure revêtus avec AlTiN et avec TiAlN déposé par la technique PVD, et une autre revêtue avec trois couches composées de TiN (TiN, Al₂O₃, TiC) déposé par la technique CVD. Les données techniques des carbures métalliques revêtus et non revêtus sont illustrées par le tableau I. 1.

Tableau I. 1 : données techniques des carbures métalliques revêtus et non revêtus [38].

Coated material	Coating method	Material quality ISO (Grade)	Hardness (HV)	Coefficient of friction	Thermal conductivity W/m*K
TiN (TiN, Al ₂ O ₃ , TiC)	CVD	P10	2500	0.35	27
TiAlN	PVD	P20	3100	0.4	28
AlTiN	PVD	P20	3200	0.47	29
Wc-Co	Uncoated	P20	1800	0.6	38

Leurs résultats de la rugosité obtenus en usinage avec les différents matériaux de revêtements testés sont illustrés par la figure I. 15. Les auteurs ont constaté que la rugosité a été très élevée on usinage qu'avec le carbure non revêtu (4.25 μm) par rapport aux outils carbures revêtus qui ont permis d'obtenir des rugosités à des valeurs basses. Ainsi, ils ont observé que le revêtement (TiN) a conduit à une meilleure valeur de la moyenne de rugosité (2.77 μm), par rapport aux revêtements (TiAlN) et (AlTiN) qui ont permis d'obtenir les valeurs suivantes (3.46 μm et 3.74 μm) respectivement. Ils ont conclu que les valeurs élevées du coefficient de frottement et de la conductivité thermique du revêtement (TiN) ont eu comme conséquence de meilleure moyenne de rugosité de la surface usinée.

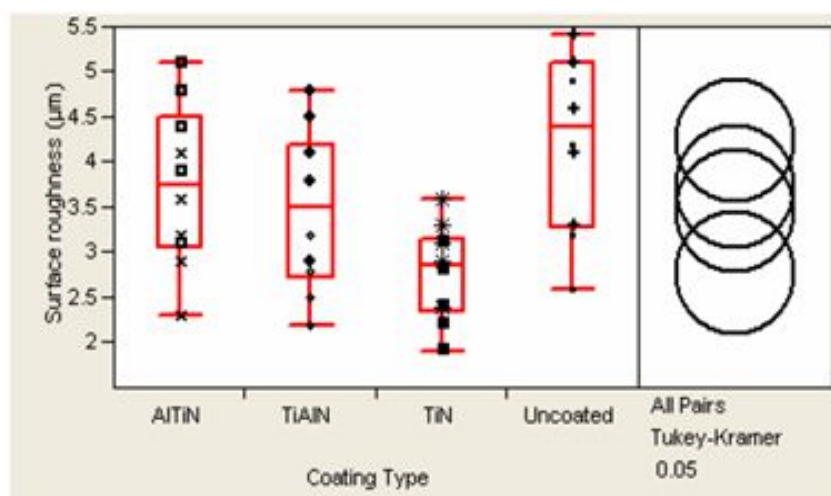


Figure I. 15 : Moyennes des résultats de la rugosité obtenus par les différents revêtements [38].

L'étude comparative menée par Cakir et al. [39], entre deux types de revêtements, le premier est un carbure revêtu avec une couche de (TiAlN) déposé par le procédé PVD, le deuxième est un carbure revêtu tri couches (TiCN/Al₂O₃/TiN) déposées par le procédé CVD, dans leurs études ont observé que les valeurs inférieures de la rugosité sont obtenues en utilisant le revêtement (TiAlN).

Kumar et al. [40] ont conduit une étude expérimentale pour quantifier l'influence des revêtements d'outil de coupe PVD, CVD et céramique sur la qualité des surfaces usinées lors d'une opération de tournage dur de l'acier AISI 4140 trempé, à deux différentes duretés (35 HRC et 40 HRC), ont

adopte un plan d'expérience factoriel complet du type L27 à trois niveaux de variations pour évaluer l'influence des paramètres de coupe (l'avance, rayon du bec de l'outil et le type de revêtement) sur la rugosité (Ra) des surfaces usinées, ont utilisé l'analyse de la variance (ANOVA) pour tester la signification de l'effet des paramètres étudiés. Leurs résultats indiquent que l'avance a un effet le plus significatif suivi par celui du rayon du bec de l'outil et du type de revêtement seul l'interaction entre l'avance et le rayon du bec de l'outil, a statistiquement un effet significatif (Figure I. 16).

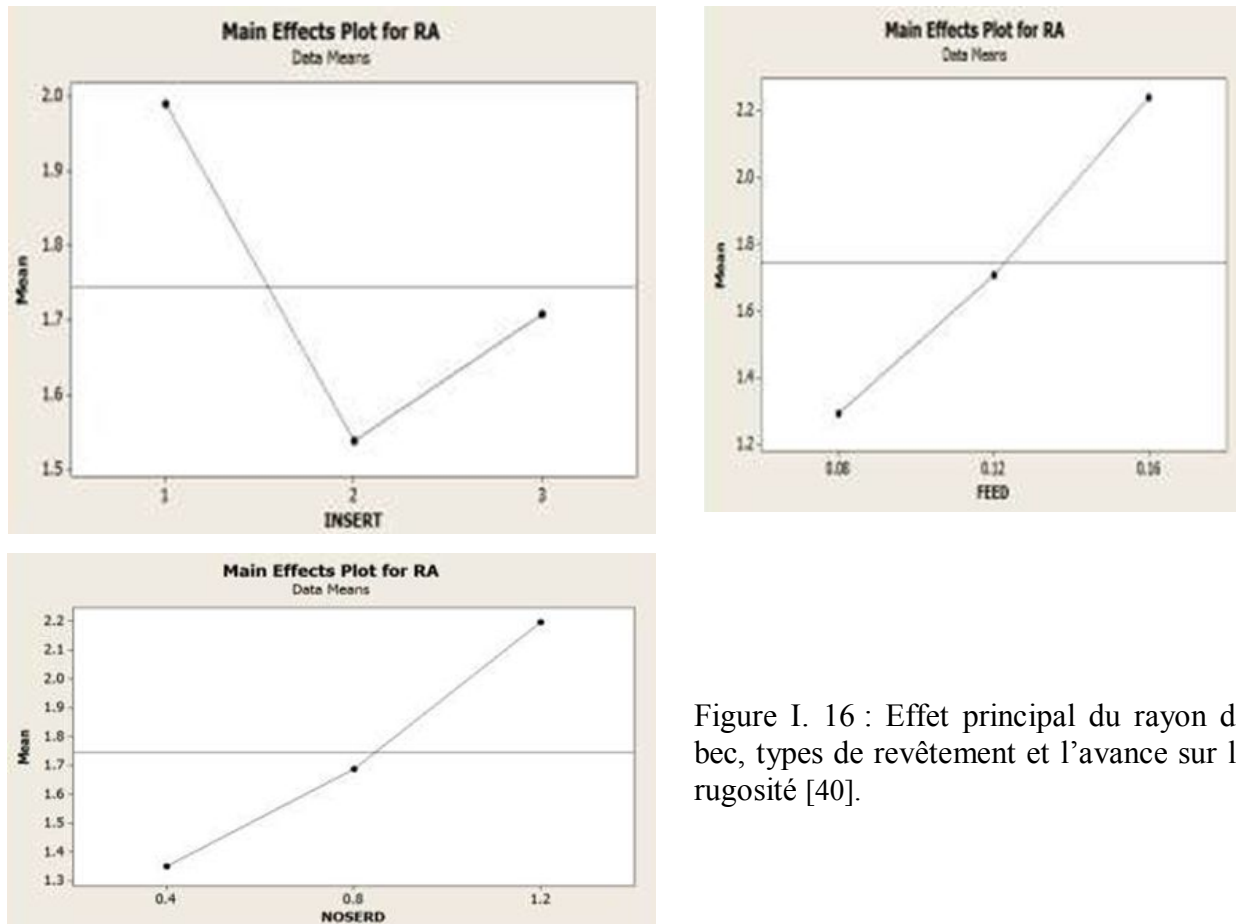


Figure I. 16 : Effet principal du rayon de bec, types de revêtement et l'avance sur la rugosité [40].

Noo et al. [41] ont exploré les performances de l'outil en carbure de tungstène multicouche lors de l'usinage de l'acier AISI 1045, utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR). Les résultats expérimentaux ont indiqué que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface et la force tangentielle. Cependant, il y a d'autres facteurs qui fournissent les contributions secondaires aux indicateurs de performance.

Sahoo et al. [42] ont évalué les performances des outils de coupe carbure revêtu multicouche (TiN / TiCN / Al₂O₃ / TiN) sous l'effet des différents paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) lors d'une opération de tournage dur de l'Acier AISI 4340 (47 ± 1 HRC) à sec. Ont analysé les caractéristiques d'usinabilité telles que l'usure en dépouille, la morphologie des copeaux, la rugosité de la surface usinée et les efforts de coupe. Ont constaté que les outils de

coupe carbure revêtu multicouche (TiN / TiCN / Al₂O₃ / TiN) produisent une meilleure qualité de la surface usinée. Ont observé selon les micrographies obtenues avec (MEB), les principaux mécanismes d'usure en tournage dur avec carbure revêtus multicouches, ont été l'abrasion et l'écaillage. L'usure rainurage et l'usure en entaille ont également été observées sur les faces de dépouille. Ont aussi confirmé avec l'analyse EDX la présence de tous les éléments de revêtement dans les inserts. En effet, leurs micrographies obtenues avec (MEB) des plaquettes revêtues usées (Figure I.17) révèlent aucun écaillage ou de fracture à une faible avance (0,05 mm / rev) et une faible profondeur de coupe (0,2 mm), lorsque l'usinage est effectué dans une plage des vitesses de coupe de 60, 120 et 150 m / min. ont observé que l'usure par l'abrasion a été le mécanisme dominant en raison de l'existence de particules dures (Chrome) dans la pièce. À une avance élevée de (0,2 mm / rev) et une profondeur de coupe de (0,5 mm), l'usure par écaillage est observé à la vitesse de coupe de 150 m / min seulement (Figure I.18). Les résultats d'analyse avec l'EDX (Figure I.19 et I.20) des plaquettes revêtues qu'ont été testés sous des conditions d'avance élevées et de profondeur de passe élevé à des vitesses de coupe de 60 et 120 m/mn ont témoigné la présence de particules de Fer sur les faces de dépouilles ces particules sont issues du matériau de la pièce.

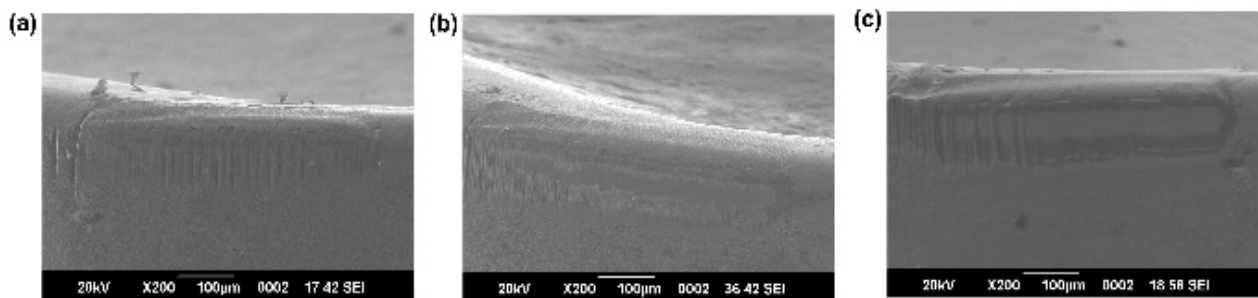


Figure I.17 : Micrographies avec MEB des plaquettes revêtus TiN avec $d = 0.2$ mm, $f = 0.05$ mm/rev, (a) à $v = 60$ m/min, (b) à $v = 120$ m/min, and (c) à $v = 150$ m/min. [42].

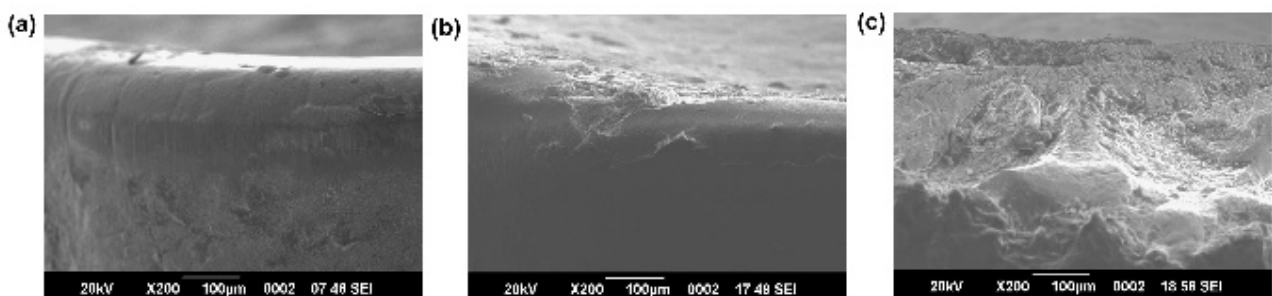


Figure I.18 : Micrographies avec MEB des plaquettes revêtus TiN avec $d = 0.5$ mm, $f = 0.2$ mm/rev, (a) à $v = 60$ m/min, (b) à $v = 120$ m/min, and (c) à $v = 150$ m/min. [42].

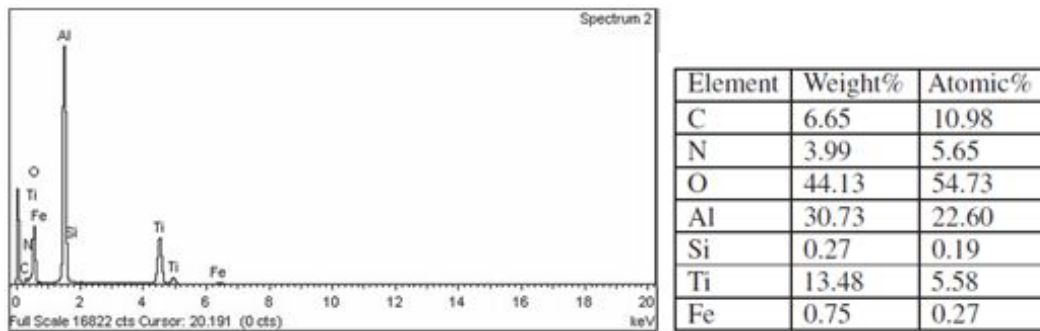


Figure I.19 : Illustration des résultats d’analyse par EDX et éléments de composition des plaquettes revêtus TiN avec $v = 60$ m/min, $f = 0.2$ mm/rev and $d = 0.5$ mm [42].

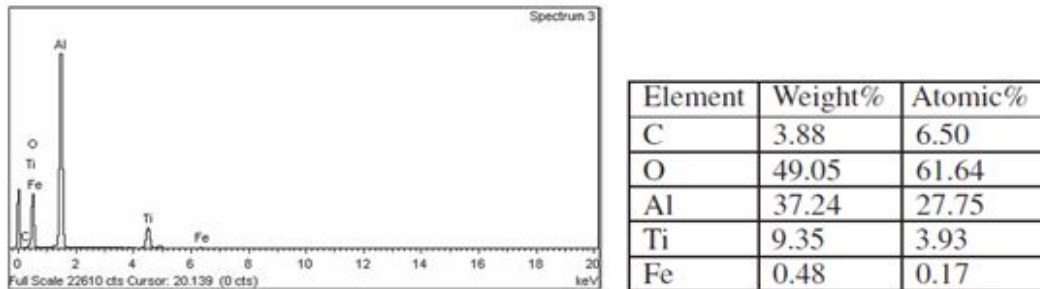


Figure I. 20 : Illustration des résultats d’analyse par EDX et éléments de composition des plaquettes revêtus TiN avec $v = 120$ m/min, $f = 0.2$ mm/rev and $d = 0.5$ mm [42].

I.6.2 Procédés de revêtements

Le choix du revêtement dépend du but recherché : résistance à l’usure et / ou à l’oxydation, tenue à la température, réduction du frottement etc. Il y a deux types de dépôt de revêtement: les revêtements déposés par voie physique (Physical Vapor Deposition : PVD) et les revêtements déposés par voie chimique (Chemical Vapor Deposition : CVD). Chacune de ces familles possède une variété importante de sous-familles en constante évolution depuis quelques années. La figure (figure 2.11) montre les procédés de fabrication de CVD et PVD. La société française du vide [43] a établi un tableau comparatif de mode de dépôt de revêtement, (Tableau I. 2).

Tableau I. 2 : Tableau comparatif des modes de dépôt sous vide [43].

caractéristiques	Modes de dépôt	Vitesse de dépôt	Types de dépôt	Dépôt sur formes complexes	Dépôt sur surface poreuse	Perturbation à l’interface de croissance	Chauffage du substrat par moyens externes
Dépôt CVD	Réaction chimique	200 à 2500 A/mn	Atomes	Bons résultats	Résultats moyens et limités	Oui	Oui
Dépôt PVD	Energie thermique	Jusqu’à 75 μ m/mn	Atomes et ions	Peut recommandée	Résultats médiocres	Non	Oui

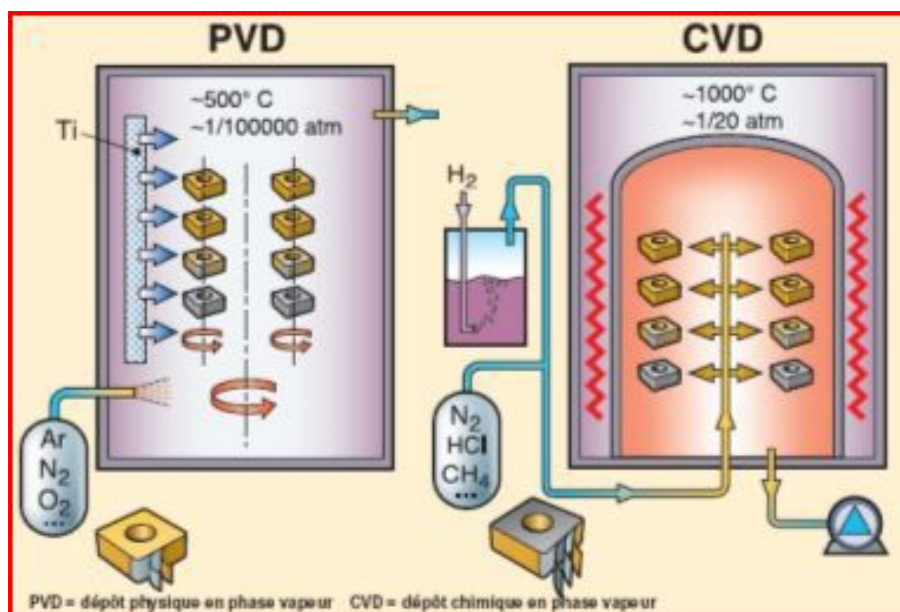


Figure I. 21 : Procédés de fabrication de CVD et PVD [44].

Ainsi, les procédés PVD sont basés sur trois types de technologie : l'évaporation, la pulvérisation et le dépôt ionique (ou 'ion-plating'). Chacune de ces sous-familles connaît également des variantes basées sur des moyens différents d'aboutir à l'évaporation ou à la pulvérisation des sources de matière : faisceau d'ions, effet joule, diode, etc. [44]. L'ensemble de ces procédés permet de déposer des couches de compositions et d'aspects très voisins. Cependant, les modalités de dépôts peuvent entraîner des différences très importantes en termes de texture, adhésion, dureté, etc.

Le CVD est un procédé fondamentalement différent des procédés précédents puisqu'il est basé sur une série de réactions chimiques dans une enceinte placée à haute température de l'ordre de 950 à 1000 °C. Ce procédé permet de réaliser une très grande variété de couches, ainsi que des couches à gradient de composition (passage continu d'une couche de TiC à une couche de Ti(C, N) et enfin une couche de TiN), et des revêtements multicouches en faisant varier dans le temps la composition des gaz (TiC, Ti(C, N), Al₂O₃, TiN). La première couche déposée sur les substrats carbures est souvent du TiC, car il possède une très grande affinité avec le carbure (même nature chimique que les composés du substrat fritté). Ce procédé est extrêmement utilisé pour le dépôt sur des outils en carbure, mais n'est quasiment pas utilisé pour le revêtement d'outils en acier rapide. En effet, les très hautes températures provoquent un revenu de l'acier rapide, ce qui lui fait perdre ses propriétés mécaniques [44]. Les propriétés traditionnelles, les coefficients de frottement des revêtements CVD et PVD sont classés sur le tableau (I. 3).

Tableau I. 3 : Propriétés des revêtements PVD et CVD [44].

Revêtements	Types d dépôt	Dureté VHN (50GF)	Coefficient de frottement	Température oxydation	Résistance à la corrosion
TiN	PVD	2900	0.65	500°C	Bon
AlTiN	PVD	4500	0.42	800°C	Bon
CrN	PVD	2500	0.55	700°C	Excellente
TiC	CVD	3200	0.60	350°C	Bon
TiC/TiN	CVD	3000	0.65	500°C	Bon
TiCN	PVD	4000	0.45	400°C	Bon
MoST	PVD	2000	0.01	450°C	Bon

I.6.3 Différentes structures des revêtements

I.6.3.1 Revêtements bicouches et multicouches

Ces revêtements utilisent des structures sandwich avec des couches de l'ordre de 1 μm d'épaisseur ou des centaines de couches de quelques nanomètres. Les matériaux peuvent être choisis pour leurs duretés ou pour leurs propriétés lubrifiantes ou pour leurs propriétés réfractaires. Le revêtement bicouches est de type (TiCN- Al_2O_3), le revêtement multicouche comme le revêtement (TiCN- Al_2O_3 -TiN) (Figure 1.22 a).

I.6.3.2 Revêtements multicouches et superlattice

Il est également possible d'associer des multicouches et des super-lattices. Par exemple : association d'une monocouche de (Ti, Al) N avec un super-lattice de WC/C (Figure 1.22 b).

I.6.3.3 Revêtements composites

L'idée de ces revêtements est d'introduire des hétérogénéités dans une couche massive afin d'améliorer sa dureté et/ou d'apporter au fur et à mesure de l'usure des éléments complémentaires (ex : effet lubrifiant). Une application de ce concept est l'association de WC/C dans une matrice carbone.

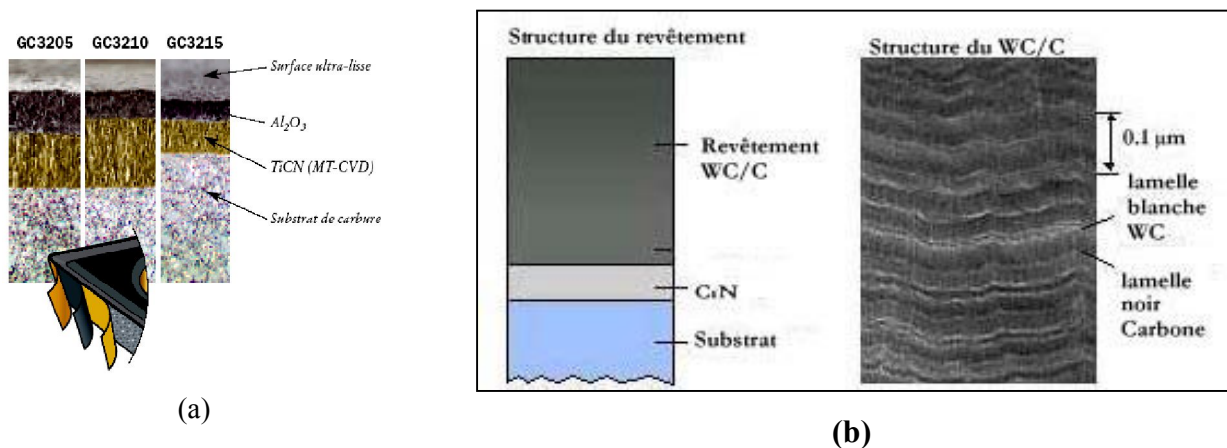


Figure 1.22 : Différentes structures des revêtements, (a) Structure d'un revêtement bicouche, (b) monocouche surmonté d'une couche super-lattice [27].

I.7 Mécanismes d'endommagement des outils de coupe

Les principaux mécanismes d'usure des outils de coupe identifiés dans la littérature sont : l'abrasion, la diffusion, l'oxydation, l'adhésion et la fatigue qui peuvent être accompagnées d'écaillages, de fractures, d'usure en entaille ou des déformations plastiques.

I.7.1 Usure par abrasion

L'usure par abrasion apparaît à la fois sur la face de coupe et sur la face de dépouille des outils. L'abrasion se caractérise par la présence de rayures, de griffures et d'arrachements de petites particules. Cette usure vient de la présence de particules dures dans la matière usinée, issues notamment du traitement de désoxydation des aciers (grains d'alumine : Al_2O_3). Ces particules se comportent comme un outil abrasif à la surface de coupe de l'outil et enlèvent des micros-copeaux (figure 1.23).

I.7.2 Usure par adhésion

L'usure par adhésion apparaît sur la face de coupe des outils sous l'effet de la pression de contact entre l'outil et le copeau se créent des microsoudures de la matière usinée par écrasement ou par des phénomènes de solubilité. S'il y a une affinité entre les éléments chimiques des corps en contact, il y a adsorption (soudure froide) ou solubilité (soudure chaude). Lorsque les microsoudures formées se rompent, des fragments de matière provenant du copeau restent accrochés sur la face de coupe de l'outil. Dans certaines conditions, notamment à faibles vitesses de coupe, ces fragments s'accumulent de manière importante pour former un dépôt macroscopique (figure 1.24) que l'on appelle arête rapportée « Built-Up Edge ». Ce phénomène d'arête rapportée se crée et disparaît fréquemment, entraînant avec lui des morceaux de l'outil [45].

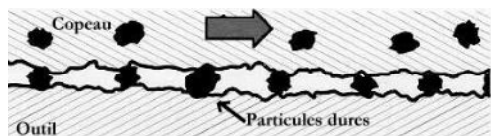


Figure 1. 23 : Schématisation de l'usure abrasive.

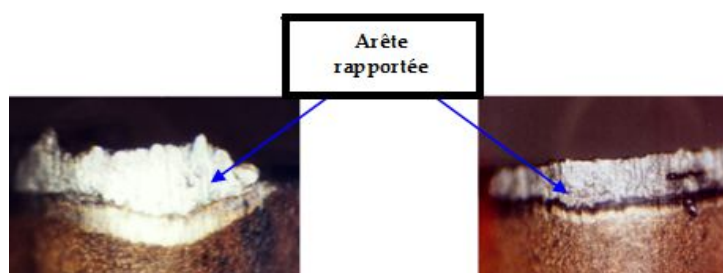


Figure 1. 24: Arête rapportée ou copeau adhérent [46].

I.7.3 Usure par diffusion

La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène d'usure qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de fortes pressions car le copeau applique des contraintes sur l'outil. Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse

relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau ou vice-versa [47, 48].

Des modèles phénoménologiques de diffusion dynamique et quasi-statique ont été proposés par Trent [49] (Figure 1. 25) et Qi et al. [50] (Figure 1. 26). Dans le cas du modèle de diffusion dynamique, Trent [49] a mis en évidence ces mécanismes lors de l'usinage de l'acier avec des outils en carbure WC-TiC-Co. Par contre, le modèle de Qi et al. [50] a été proposé suite à une étude statique, c'est-à-dire maintien en contact permanent sous une pression et une température fixées, d'un échantillon de carbure WC-TiC-Co et d'un échantillon d'acier.

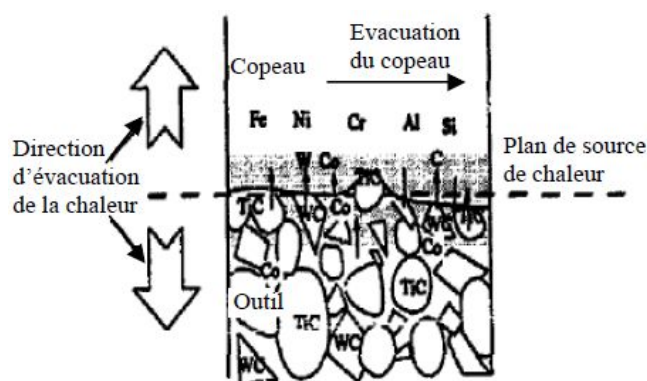


Figure 1. 25 : Modèle de diffusion dynamique entre l'outil et le copeau proposé par Trent : diffusion de W, Co et C dans le copeau et faible solubilité de TiC, [49].

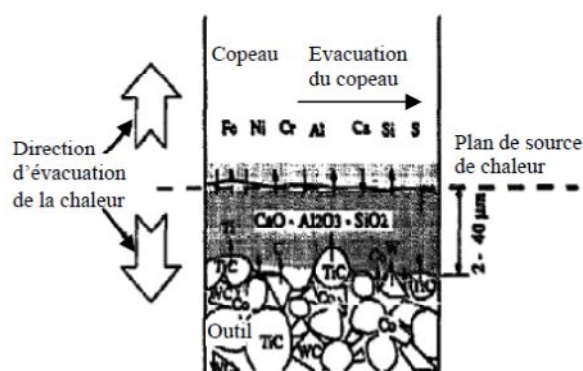


Figure 1. 26 : Modèle de diffusion quasi-statique de diffusion entre l'outil et le copeau proposé par Qi et al. : diffusion de W, Co et C dans la couche de gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$) [50]

1.7.4 Déformation plastique de l'arête

Les déformations plastiques se produisent sous l'effet combiné des grandes pressions et à des températures très élevées générées pendant l'usinage. Elles apparaissent au niveau de la pointe de l'outil et sur la face de coupe de celui-ci. Les conditions d'usinage sévères (grandes vitesses de coupe et grandes avances) ainsi que la dureté élevée de certaines pièces sont donc favorables à l'apparition du phénomène de la déformation plastique. Les dimensions et la géométrie des outils (acuité de l'arête) sont les principaux paramètres pour prévenir l'usure par déformation plastique [51].

1.7.5 Usure par fatigue thermomécanique

Le phénomène de fatigue est généralement dû à deux types de sollicitations : mécanique et thermique. La fatigue thermique est provoquée par la variation périodique de la température imposée à l'outil dont la dilatation est empêchée. Dans ces conditions, les contraintes créées par les gradients thermiques entre la couche superficielle et celles sous-jacentes, provoquent des

fissurations et des écaillages. La fatigue mécanique est due aux vibrations, au frottement, et sollicite l'outil en compression et traction alternées.

L'ensemble des mécanismes de dégradation des outils de coupe est influencé par la température. Une cartographie des modes d'usure en fonction de la température établie par Opitz et König [7] est illustrée sur la figure 1. 27. Selon ce schéma, les modes d'usure observés à toute température sont l'adhésion et l'abrasion. L'abrasion induisant des volumes de matière enlevée plus importants que l'adhésion aux faibles températures ; la tendance est inversée aux températures moyennes. Aux hautes températures apparaissent l'usure par fatigue ou affaiblissement plastique et la diffusion. [52].

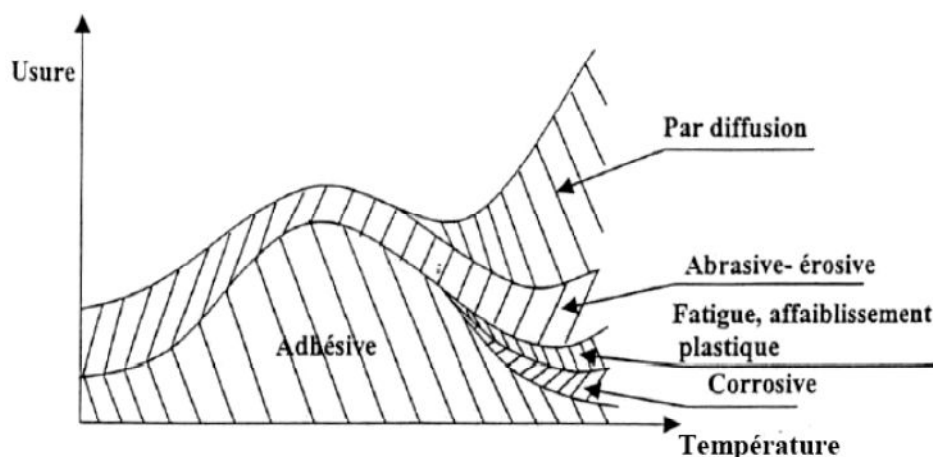


Figure I.27 : Types ou modes d'usures selon H. OPITZ et W. KÖNIG Source : thèse de REMADNA [7].

I.8 Principales formes d'usure des outils de coupe

L'usure se manifeste principalement sous deux formes : usure en cratère sur la face de coupe ou usure en dépouille sur la face de dépouille de l'outil [46].

I.8.1 Usure en dépouille

Elle est surtout le produit de l'abrasion due aux frottements entre la pièce et la face en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par une nouvelle face de dépouille taillée depuis l'arête. L'usure en dépouille est le plus fréquent des modes d'usure et représente l'usure optimale si elle est uniforme.

La figure I.28 illustre un exemple d'usure par abrasion sur la face en dépouille d'un outil de coupe en céramique GC650. Cette observation est obtenue par LABIDI [53]. Lors d'usinages de l'acier X210Cr12 à différentes vitesses de coupe et différentes avances et une profondeur de passe de 0.5mm.

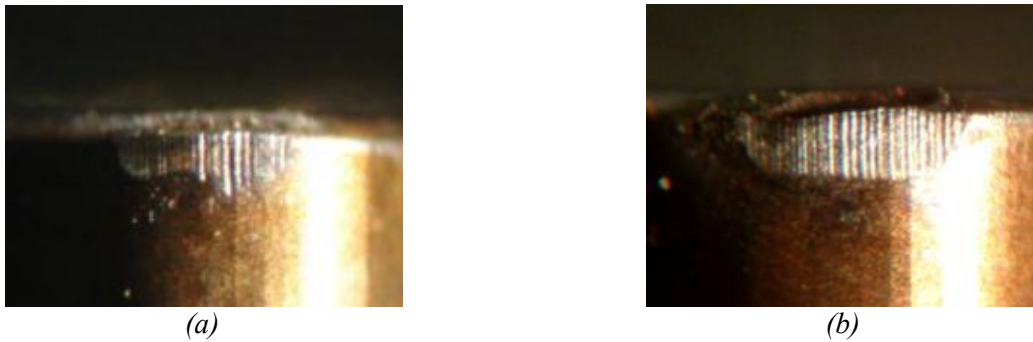


Figure I.28 : Exemple d'usure par abrasion sur la face en dépouille (a) : $V_c = 80\text{m/min}$ et $f = 0,08\text{mm/tr}$ $t = 2800\text{s}$, $VB = 0,23\text{mm}$; (b) : $V_c = 140\text{m/min}$ et $f = 0,11\text{mm/tr}$ $t = 1690\text{s}$, $VB = 0,30\text{mm}$. [53].

I.8.2 Usure en cratère

Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe. Lorsqu'il y a affinité chimique, il y a dissolution ou diffusion des éléments de l'outil vers la pièce et vice-versa. Il semble que ces mécanismes soient responsables de la formation d'un cratère comme le montre la figure I.29 [46], dans le cas de tournage dur de l'acier AISI52100 avec une plaquette en céramique mixte (CC650).



Figure I.29 : Usure en cratère de la surface d'attaque d'une plaquette en céramique mixte (CC650) [46].

I.8.3 Fissuration de l'arête de coupe ou usure en peigne

Légères fissures sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe occasionnée par les chocs thermiques résultant des interruptions de coupe, en particulier dans le cas du fraisage. Ces derniers peuvent présenter un risque de rupture (Figure I.30-a) [54].

I.8.4 Ecaillage de l'arête de coupe

C'est une destruction de l'arête de coupe par arrachement de petits fragments de l'outil. Elle est généralement accompagnée d'une usure de la face de dépouille et de ce fait n'est pas toujours reconnaissable. Elle est générée par les chocs thermiques et les vibrations. Elle peut générer des ruptures. Les écaillages en dehors de la partie active de l'arête proviennent de l'impact de copeaux par suite d'une mauvaise évacuation. Cette usure est souvent due aux chocs thermiques ou à l'arête trop fragile (Figure I.30-b) [54].

I.8.5 Usure en entaille ou par oxydation

Elle apparaît ponctuellement au niveau du point de contact entre l'arête principale de coupe et la surface de la pièce mais elle peut aussi apparaître sur la face de dépouille secondaire. Elle est due à l'écroutissage ou l'oxydation de la pièce (Figure I.30-c) [54].

I.8.6 Rupture de la plaquette

Une rupture de la plaquette signifie en général détérioration de l'outil et de la pièce. Ses causes sont multiples et dépendent de la machine et de la pièce. Elle est souvent le résultat d'entailles sur l'arête de coupe, d'une cratérisation ou d'une usure trop importante (Figure I.30- d) [54].

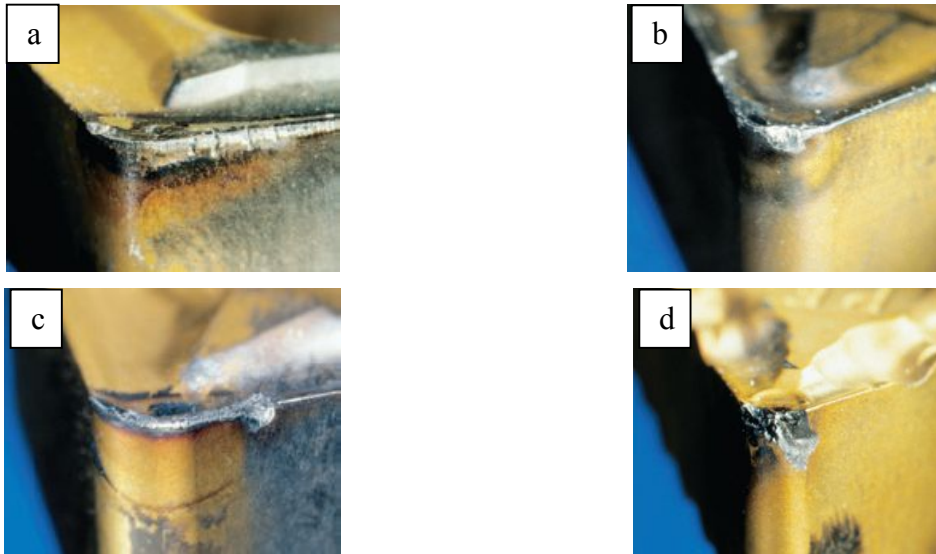


Figure I.30 : Formes d'usure des outils de coupe [54].

I.9 Critères de surveillance de l'usure

L'usure est souvent définie comme la quantité de matière perdue par l'outil. Lorsque l'usure se caractérise par la formation d'un cratère (formé par abrasion, adhésion ou diffusion) sur la face de coupe ou l'apparition de bandes striées sur la face en dépouille, des critères de durée de vie peuvent être établis à partir d'observations directes sur l'outil [55].

Sur la face de coupe, deux mesures sont habituellement faites pour évaluer le niveau de l'usure en cratère. La première est la profondeur du cratère notée KT et la deuxième est la distance du centre du cratère à partir de l'arête de l'outil notée KM (Figure I.31).

Le frottement de la pièce contre la face en dépouille fait apparaître une zone d'usure frontale, dont la hauteur VB est plus ou moins régulière. Une entaille de hauteur VN peut également apparaître sur l'arête tranchante de l'outil affaiblissant considérablement cette dernière.

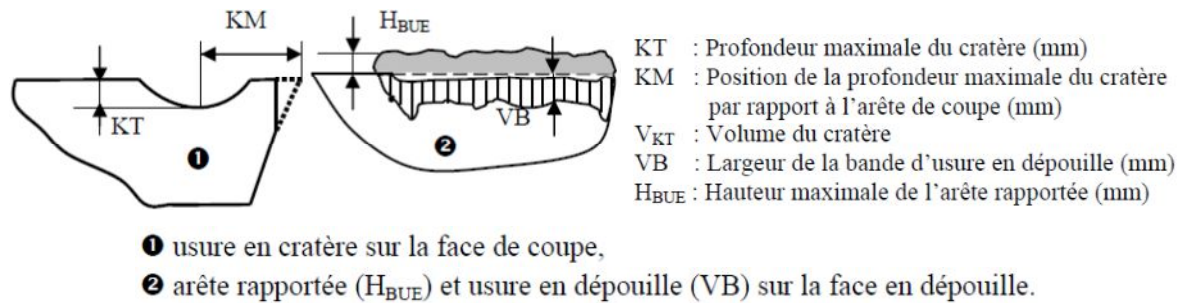


Figure I.31 : Schéma de l'usure en dépouille et en cratère d'un outil selon la norme NFE 66 505 [44].

Il est également possible d'évaluer l'état d'endommagement d'un outil de coupe à partir de critères indirects basé sur les performances ou la qualité de l'usinage. Ainsi, l'état de surface et les tolérances géométriques des pièces peuvent servir d'indicateurs du niveau d'usure [56, 57]. Les critères préférables et recommandé par la norme (I.S.O) pour les carbures métallique et céramiques pour toutes conditions de coupe, en usinage d'aciers ou fonte est l'usure frontale VB (VB_{max}), ou en cratère KT.

- La largeur de la bande d'usure frontale [VB] = 0.3mm si elle est uniforme.
- La largeur maximale de cette bande [VB_{max}] = 0.5mm si elle est irrégulière.

Dans certains cas, on peut faire recours à des critères complémentaires telle que la profondeur KT du cratère pour les carbures métallique qui se calcule d'après cette formule : $KT = (0.1 + 0.3f)$ mm, ou f est l'avance en mm/tr.

I.10 Caractéristiques des surfaces usinées

I.10.1 Principaux défauts de surface

En général les défauts de surface jouent un rôle important pour une pièce à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique. On ne s'intéresse ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (Figure I.32).

- **Défauts du premier ordre** : ce sont des défauts de forme (écart de rectitude, écart de circularité), défaut aperiodique.
- **Défaut du deuxième ordre** : ils sont caractérisés par une ligne ondulée à un caractère périodique du essentiellement à des vibrations de basses fréquences de la pièce et de l'outil générateur.
- **Défaut du troisième et quatrième ordre** : ils caractérisent la rugosité de la surface, les défauts du 3ème ordre sont constitués par des stries ou sillons, ce type de défaut à un caractère périodique ou pseudo périodique. Par contre les défauts du quatrième ordre sont constitués par des arrachements, fente, piqûre... etc. ce type de défaut à un caractère aperiodique.

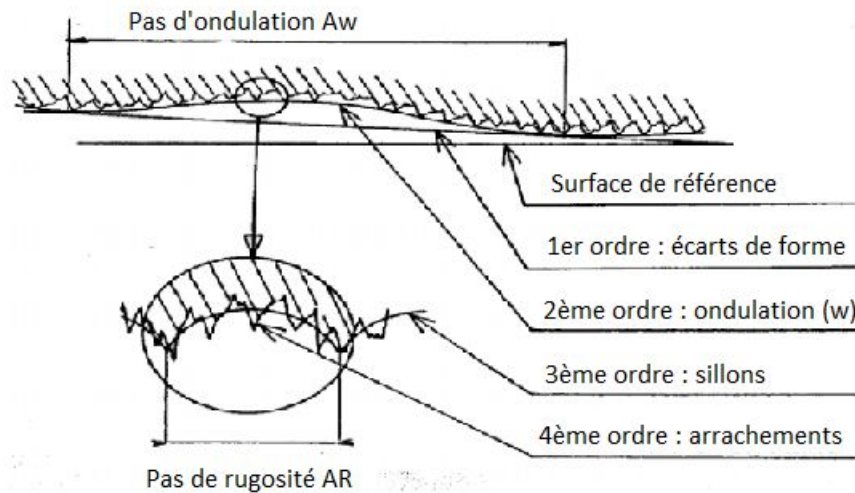


Figure I.32 : Principaux défauts de surface.

I.10.2 Principaux Critères de rugosité

La rugosité est le paramètre mesurable le plus utilisé afin de définir un état de surface et est considérée comme la première approche de qualification. Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité.

- **Rugosité moyenne arithmétique Ra**

C'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la "ligne centrale". On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité (Figure I.33).

- **Rugosité totale Rt**

C'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux.

- **Rugosité Rz**

C'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 longueurs

- **Rugosité Rp**

C'est la hauteur maximale de saillie de rugosité. Rp est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

- **Rugosité Rmax**

C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité Rmax étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

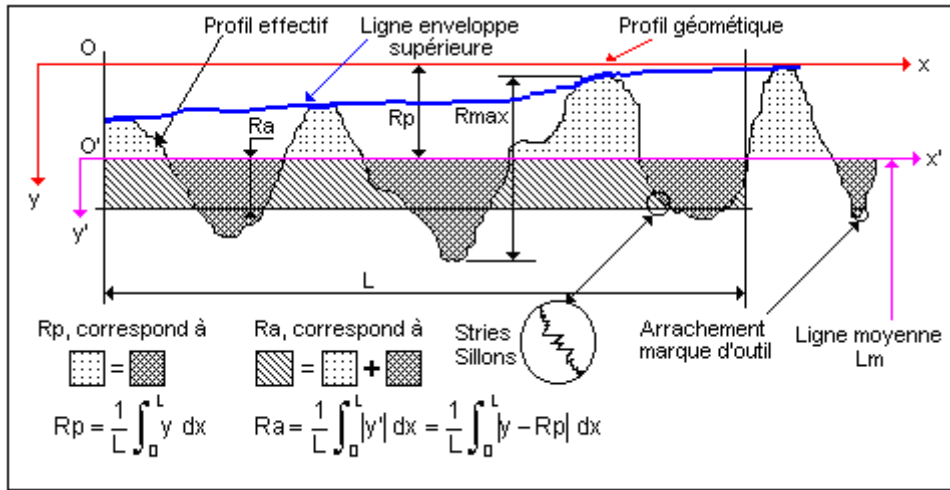


Figure I.33 : Principaux critères de rugosité.

I.10.3 Modèle théorique de la rugosité

La modélisation du profil de rugosité en tournage se fait par une succession d’arcs de cercles ayant pour rayon le rayon de bec de l’outil et dont le pas correspond à l’avance par tour de l’outil (figure I-30). La rugosité dépend principalement de l’avance et du rayon de bec de l’outil. Cela a amené à définir une relation entre ces facteurs et les paramètres de la rugosité. On définit alors la hauteur maximale du profil de rugosité R_t et la rugosité arithmétique moyenne R_a par les formules suivantes:

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r} \tag{I.1}$$

$$R_t = 125 \frac{f^2}{r} \tag{I.2}$$

Le paramètre avance est considéré comme étant dominant sur l’état de rugosité : augmenter l’avance par tour conduit à une augmentation de la hauteur R_{max} et à la rugosité R_a , (Figure I.34)

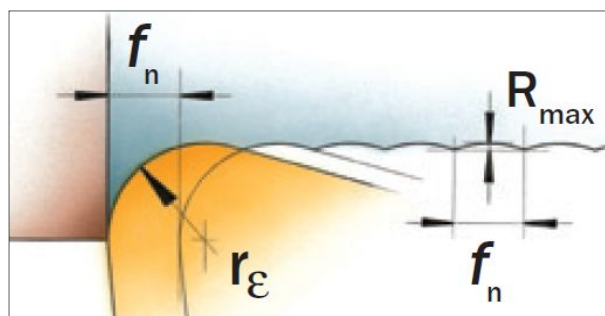


Figure I.34 : Profil de rugosité en tournage [54].

En pratique, les opérations d’usinage font inévitablement intervenir les paramètres d’usinage, et la rugosité obtenue diffère de la rugosité théorique. Selon la littérature scientifique la rugosité est influencée par plusieurs paramètres d’usines qui sont liées à des couples outil/matière donnés et pour

chaque couple outil/matière, il y a une influence significative des paramètres de coupe, des paramètres géométriques de l'outil et de la machine-outil. L'optimisation de ces paramètres de coupe peut cependant permettre à des améliorations de la qualité des surfaces usinées. En effet, les travaux de Ebrahimi et al.[58] met en évidence l'effet de l'usure de l'outil de coupe et ont affirmé que l'usure est un paramètre joue un rôle très important sur la rugosité de la pièce usinée puisque l'outil imprime sa forme à la surface usinée. Un bec d'outil altéré limitera la valeur de R_{\max} (et de R_a) mais son arête sera détériorée et conduira à des altérations dans le sillon. D'autres travaux de YALLESE [59] montrent que la rugosité est améliorée à des vitesses de coupe élevées surtout pour les vitesses allant jusqu'à 120 m/min. ces travaux ont montré qu'au-delà de cette limite, la rugosité se stabilise à cause de la diminution des efforts de coupe aux grandes vitesses traduisant ainsi une stabilité relative du système usinant. Par contre, les augmentations de la profondeur de passe et de l'avance contribuent à l'élévation de la rugosité. Ainsi, il est possible de mettre au point expérimentalement d'autres relations mathématiques entre la rugosité obtenue par usinage et les paramètres usuels de coupe [60]. Ces relations sont en général de la forme suivante :

$$R_a = K_1 \cdot r_e^{k_2} \cdot HB^{k_3} \cdot ap^{k_4} \cdot f^{k_5} \cdot Vc^{k_6} \quad (I.3)$$

Avec les k_i des coefficients déterminés pour les conditions expérimentales choisies. En générale, $k_4 = 0$ et pour un matériau et un outil bien spécifique, il vient que :

$$R_a = C f^{k_5} \cdot Vc^{k_6} \quad (I.4)$$

ou : C est une constante et $k_6 < 0$ et $k_5 > 0$

I.11 Efforts de coupe

Les déformations et les frottements engendrés lors de la formation du copeau à l'interface outil/copeau donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage, selon la norme ISO/TC29/GT20 ces composantes sont (Figure I.35) :

- **Ft** : Composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort longitudinal ou effort principal de coupe, est la composante ayant la plus grande valeur absolue ;
- **Fa** : Composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe ;
- **Fr** : Composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres composantes, appelée effort de refoulement ou effort radial. Elle n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale pure.
- **L'effort global de coupe Fc** peut donc être défini par l'équation suivante :

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad (I.7)$$

La mesure des efforts de coupe se fait à l'aide d'une table dynamométrique de marque Kistler. Pour ce faire, on mesure les déformations imposées par les efforts de coupe sur la table à l'aide de capteurs piézoélectriques précontraints dans les trois directions de l'espace. Les tables dynamométriques présentent des qualités appréciées en usinage à cause de leur sensibilité, leur précision et surtout leur grande rigidité qui leur permet de les utiliser sans perturber l'opération d'usinage [61].

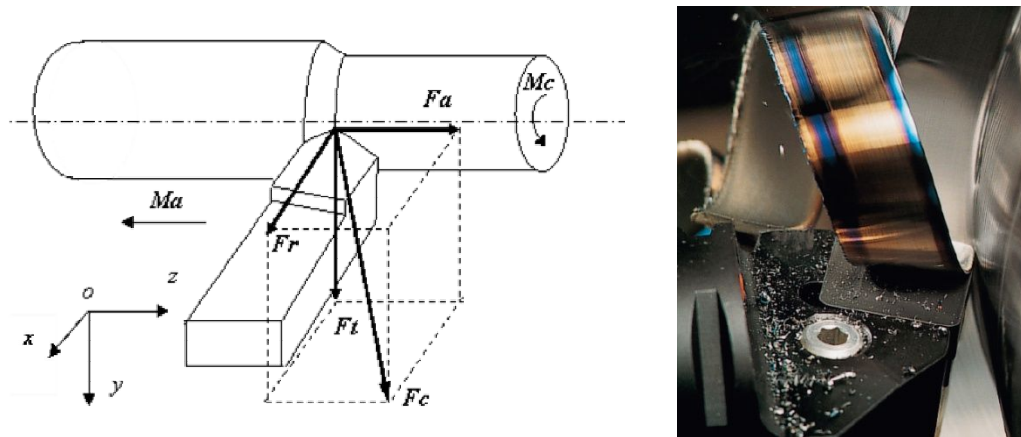


Figure I.35 : Décomposition de l'effort de coupe pendant l'opération de chariotage [54].

I.11.1 Intérêt de contrôler les efforts de coupe

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

Pour conclure sur ce point concernant les efforts de coupe, on peut dire d'une manière générale, que la tendance est de minimiser les efforts de coupe lors de l'usinage des pièces. Ceci conduit à :

- Un faible fléchissement de la pièce, ce qui augmente la précision géométrique.
- A une consommation de la moindre puissance développée par la machine outil.
- Des faibles déformations statiques et dynamiques du système usinant MODOP.
- Améliorer l'état de surface des pièces usinées.

I.12 Analyse Bibliographique

L'analyse de la bibliographique nous a permis de constater que pour satisfaire les exigences économiques et techniques dans le secteur d'usinage, un outil de coupe doit être tenace pour résister aux chocs rencontrés lors de l'usinage, il ne doit pas se déformer plastiquement et sa déformation élastique doit être minimale afin de garantir une bonne précision de coupe, il doit être dur pour résister à l'usure et doit supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe. Malheureusement, ces propriétés ne vont en général pas de pair et l'amélioration de l'une d'entre elles se fait au détriment des autres. L'association de ces qualités au sein d'un seul matériau est ainsi difficile à obtenir.

Pour résoudre ces problèmes les chercheurs sont orientés vers la solution de déposer des couches de revêtements réfractaires [p.ex. TiC, TiN, Al₂O₃] ; qui sont déposées par différents procédés : "Chemical Vapour Deposition" (CVD) ou "Physical Vapour Deposition" (PVD). Ces couches jouent également un rôle d'une barrière qui supporte toutes ces sévères sollicitations. Ceci afin d'améliorer la résistance à l'usure et la ténacité des outils de coupe.

Les études entreprises jusqu'à présent sur le comportement des différentes couches de revêtements étaient essentiellement basées sur les mécanismes d'usure (nature et évolution de l'usure, l'effet mutuel aux interfaces outil / pièce), sur la détermination de la durée de vie des outils revêtus, ainsi que sur les performances économiques (productivité, taux d'enlèvement de matière,...).

I.13 Position du problème

En se basant sur l'étude et l'analyse bibliographique, il ressort que le couple « Outil – Matière » lors de l'usinage travaille dans des conditions de travail beaucoup plus sévères que celles d'un couple de pièces mécaniques ordinaires travaillant dans un dispositif ou dans une machine. En effet, le processus d'usinage est accompagné de plusieurs phénomènes très complexes, tels que : déformations plastiques intenses, grand dégagement de chaleur aux interfaces, où les températures peuvent atteindre 1000°C et plus (frottements internes et externes), usure de différentes natures (abrasion, adhésion et diffusion) etc. A cet effet il devient nécessaire de consolider superficiellement l'outil de coupe par des couches de revêtement ayant des qualités et des performances de coupe plus élevées que celles du substrat du matériau à outil de base. C'est dans cet esprit que ce travail a été réalisé. Il a pour objectif d'étudier l'impact du revêtement sur le couple « Outil – Matière ». Autrement dit, sur le comportement dynamique ainsi que sur la qualité de la surface usiné en tournage à sec de l'acier à roulement 100Cr6 (AISI 52100) et en tournage dur de l'acier 42CrMo4 (AISI 4140) trempé (48 HRC) avec des outils de coupe cermets revêtus et non revêtu.

Chapitre II
Méthodes expérimentales d'analyse et
d'optimisation multi objectif

II.1 Introduction

Les plans d'expériences bénéficient aujourd'hui d'une large audience et leur pratique se développe dans plusieurs domaines de recherche. La méthodologie expérimentale classique consiste à fixer le niveau de toutes les variables sauf une et à mesurer la réponse du système pour différentes valeurs de cette variable, elle conduit en général à de nombreux essais inutiles et à un volume de résultats difficiles à exploiter. L'utilisation des plans d'expériences sert à optimiser cette organisation afin d'obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences.

Dans ce chapitre, nous allons donc à présenter les plans d'expériences, afin de montrer leur utilité et ce qu'ils peuvent apporter dans le domaine du traitement des données expérimental. Nous présenterons ensuite les plans qui ont été utilisés lors de nos travaux de recherche. Suivie par la description de l'approche théorique proposée pour la résolution de problèmes d'optimisation multi objectifs, nous avons utilisé la technique de désirabilité pour la recherche de la solution « optimale ». Ainsi, les bases théoriques de cette approche seront également présentées dans ce chapitre.

II.2 Les plans d'expériences

II.2.1 Aperçu historique

Les plans d'expériences sont issus de méthodes mathématiques et statistiques appliquées à l'expérimentation. Historiquement, les premiers scientifiques à s'être posé le problème de l'organisation des essais sont des agronomes. Ils avaient en effet beaucoup de paramètres à étudier et n'avaient pas la possibilité de multiplier le nombre d'expériences. De plus, la durée des expériences constituait une contrainte supplémentaire forte. C'est *Fisher* [62, 63], qui, pour la première fois en 1925, proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois. Cette méthode fut reprise puis développée par des statisticiens et des mathématiciens qui définirent des tables d'expériences permettant de réduire considérablement le nombre d'expériences à effectuer sans diminuer la pertinence de la campagne d'essais. Toute fois, les plans d'expériences n'apportent une information optimale que dans le cas où le modèle du procédé prend une structure simple, c'est-à-dire linéaire (plans factoriels) où polynomiale. Les grandes entreprises se sont ensuite intéressées à cette méthodologie dans le cadre de l'approche qualité à la suite des travaux du Docteur *Taguchi*, [64]. Il a fortement contribué à l'expansion de l'utilisation des plans d'expériences en milieu industriel au Japon dans les années 1960. *Fedorov* [65] et *Box* [66] furent parmi les premiers à s'intéresser à la planification d'expériences pour l'estimation de paramètres dans le cas de modèles non linéaires. Au cours de ces dernières années, cette méthodologie, du fait de la pertinence des informations apportées, s'est développée dans la plupart des secteurs d'activité.

II.2.2 Principe des plans d'expériences

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux d'un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats. Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers [67].

L'idée essentielle qui doit mener la démarche expérimentale de l'expérimentateur est que l'on met en œuvre un plan d'expériences afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées. On ne pourra donc pas utiliser le même plan pour étudier efficacement les effets des paramètres tout en cherchant un optimum [68]. Afin d'obtenir des informations pertinentes, une démarche méthodologique doit être suivie :

- définitions des objectifs et critères,
- définition des facteurs étudiés et du domaine expérimental,
- construction du plan d'expériences,
- expérimentation,
- analyse des résultats,
- conduite éventuelle d'essais supplémentaires,
- validation des résultats,
- conclusion de l'étude.

II.2.3 Vocabulaire de base des plans d'expérience

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs [69].

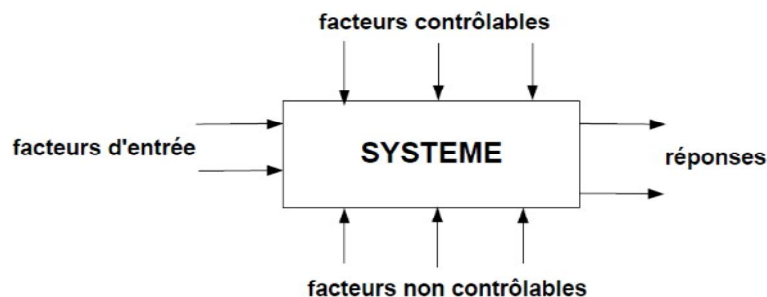


Figure II.1: Boîte noire du processus.

Parmi les facteurs on distinguera (Figure II.1):

- Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix de l'expérimentateur

- Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix de l'expérimentateur
- les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence

Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée. Un facteur est une grandeur le plus souvent mesurable mais il peut s'agir d'une grandeur qualitative comme les différents lots d'une matière première.

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai; le plan vise à déterminer quels facteurs l'influencent ou quelle est son évolution en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est le plus souvent mesurable mais elle peut également être qualitative. Dans ce cas ce peut être par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface ou une appréciation bon, moyen ou mauvais sur un produit alimentaire [69].

II.2.4 Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs facteurs. Ces facteurs peuvent être représentés par un axe gradué et orienté (Figure II.2). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut. Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1 [69].

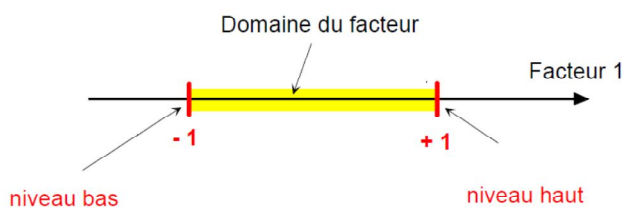


Figure II.2 : Niveaux et domaine de variation du facteur.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1. S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. Ainsi, cet espace formé avec les deux facteurs est appelé l'espace expérimental.

Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux. Le regroupement des

domaines des facteurs définit le «domaine d'étude». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.3) [69].

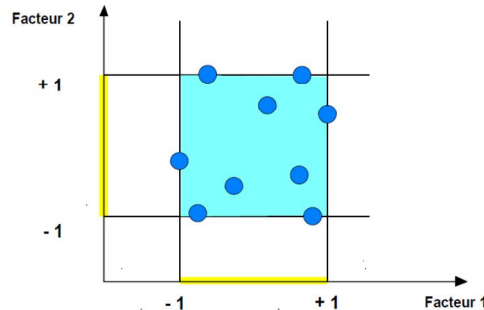


Figure II.3: Points expérimentaux disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

II.2.5 Codage de la matrice d'expériences

Les paramètres de réglage d'un processus traduisent le plus souvent des grandeurs différentes. Il convient donc de standardiser les variations de ces paramètres pour avoir accès aux outils généraux de construction des plans d'expériences. Pour cela on utilise une relation de codage unique définie à partir de la transformation bijective définissant la valeur (x_i) à partir de la relation (II.1) que l'on peut retrouver dans l'ensemble des ouvrages traitant des plans pour étude de surface de réponses comme par exemple [69] :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\max i} + u_{\min i}}{2}\right)}{\left(\frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2}\right)} \quad (\text{II.1})$$

$u_{\max i}$ et $u_{\min i}$ étant les bornes définies par l'utilisateur et u_i le niveau réel donnée au facteur i lors de l'expérimentation.

Il s'agit d'une relation de centrage et de réduction de la variable (u). Le numérateur de la relation précédente traduit un centrage par rapport au milieu de l'intervalle de variation des facteurs. Le dénominateur traduit une réduction par rapport à la moitié de l'étendue de ce même intervalle. Le facteur codé (x), transformé du facteur (u), est sans dimension et ses valeurs sont comprises dans l'intervalle borné $[-1 ; 1]$.

Cette partie est consacrée à la présentation des notions de base des plans d'expériences. Il existe de nombreux plans qui permettent de réaliser une telle étude et de nombreux ouvrages détaillent leur utilisation [70].

Nous nous contenterons ici de présenter la méthode de Taguchi et la méthodologie de surfaces de

réponses qui sont les plus utilisés et qui ont donné de bons résultats dans plusieurs études.

II.2.6 Méthode de Taguchi

Le docteur Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, il a notamment mis au point une méthode nommée ‘‘méthode Taguchi’’ qui permet de maîtriser la qualité dès la conception des produits. L’utilisation du plan fractionnaire permet de diminuer considérablement le nombre d’expériences à réaliser pour identifier les coefficients d’un modèle. La mise au point de plans fractionnaires adaptés à un modèle est une procédure longue et peut s’avérer complexe. Taguchi a mis au point une méthode originale permettant, à partir de quelques tables standard, de résoudre facilement la plupart des problèmes industriels en matière de plan d’expériences. Ces tables standard de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées. Et les interactions d’ordre supérieur à deux seront toujours considérées comme négligeables [70].

II.2.6.1 Principe de la méthode de Taguchi

Afin de choisir une table existante, il faut calculer le nombre d’essais minimum à effectuer. Ce calcul est basé sur la notion de degré de liberté (*ddl*) qui est défini mathématiquement comme suit [47] :

- le *ddl* d’un facteur est égal au nombre de ces niveaux moins un ;
- le *ddl* d’une interaction est égal au produit des *ddl* des facteurs la composant ;
- le *ddl* d’un modèle est égal à la somme des *ddl* des facteurs et des interactions ;
- le *ddl* d’un plan est égal au nombre d’essais moins un.

Il s’agit alors de choisir la plus petite matrice d’expériences compatibles avec le modèle choisi, c'est-à-dire le nombre de *ddl* du plan doit être supérieur ou égal à celui du modèle. Les tableaux de Taguchi sont désignés par trois symboles. Par exemple, la table L8 (2^7) comporte 8 essais pour étudier un problème possédant au maximum 7 facteurs avec deux niveaux chacun. La table L36 ($2^{11} \times 3^{12}$) comporte 36 essais pour étudier 11 facteurs à deux niveaux et 12 autres facteurs à trois niveaux [47].

II.2.7 Méthodologie de surface de réponse

La Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR) [71] est une collection de stratégies expérimentales de méthodes mathématiques et statistiques qui permet à un expérimentateur de choisir la meilleure des combinaisons des niveaux des paramètres qui optimise un processus. L’objectif visé lors d’une étude de surface de réponse peut être de différentes natures [69]:

- Optimiser (maximiser/minimiser) une ou plusieurs variables de réponse,
- Trouver un compromis satisfaisant entre plusieurs variables de réponse,

- Construire une cartographie de la variation d'une réponse dans un plan,

Historiquement, cette technique s'est appuyée sur l'usage de modèles de nature polynomiale. La modélisation d'une surface de réponse à partir d'un polynôme d'approximation nécessite de disposer de réponses sous forme de grandeurs quantitatives à variation si possible continue. Le nombre de réponses est spécifique à chaque étude, on parle d'optimisation multicritères dès que l'on caractérise les objectifs d'un problème à partir d'au moins deux réponses [69].

La méthodologie de surface de réponse constitué de deux types de plans de surface de réponse, le premier type est le plan composite centré, ce type de plan composé de 2 jusqu'à 10 facteurs numérique, le seconde types sont les plan de Box-Behnken qui permettent d'étudier un nombre de facteurs de 3, 4, 5, 6, 7, 9, jusqu' à 10 facteurs numérique.

II.2.7.1 Les plans composites centrés

Les Plans Composites Centraux sont un bon complément des plans orthogonaux, de par leurs propriétés statistiques, mais aussi parce qu'ils sont meilleurs que les plans orthogonaux pour certains problèmes [64, 69]. Ils sont développés, en particulier, dans la Méthodologie des Surfaces de Réponse, et ils permettent l'étude d'un modèle quadratique, dans la plupart des cas des phénomènes non linéaires. Un plan composite est constitué de trois parties :

1. Un plan factoriel dont les facteurs prennent deux niveaux.
2. Au moins un point expérimental situé au centre du domaine d'étude.
3. Des points axiaux. Ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des facteurs. Ces points représentent 2 essais par facteur, usuellement notés (+ α et - α).

La Figure (II.4) représente un plan composite pour deux facteurs. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux d'un plan factoriel (2²). Le point E est le point central. Ce point peut avoir été répliqué une ou plusieurs fois. Les points F, G, H et I sont les points axiaux. Ces quatre derniers points forment ce que l'on appelle le plan en étoile, ce qui donne un domaine de variation des facteurs entre [-α; + α]. Ainsi, un facteur variant dans l'intervalle [Min ; Max] sera découpé en 5 niveaux : [- α, -1, 0, +1, +α] calculés selon le tableau II.1. Le paramètre (α) est supérieur à 1 et est calculé grâce à la formule (II.2) :

$$\delta = \sqrt[4]{N_F} \tag{II.2}$$

Tableau II.1 : Calcul des niveaux des facteurs

Niveau	-α	-1	0	+1	+α
Valeurs réelles	Min	$\frac{Min + Max}{2} - \frac{1}{\alpha} \left(Max - \frac{Min + Max}{2} \right)$	$\frac{Min + Max}{2}$	$\frac{Min + Max}{2} + \frac{1}{\alpha} \left(Max - \frac{Min + Max}{2} \right)$	Max

Le nombre total des essais N peut être calculé grâce à la formule suivante :

$$N = N_F + N_\alpha + n_0 = 2^k + 2 \cdot k + n_0 \tag{II.3}$$

Où :

- $N_F = 2^k$ est le nombre des essais pour le plan factoriel 2^k .
- $N_\alpha = 2k$ est le nombre des essais appelé en étoile.
- n_0 est le nombre des essais au centre du domaine pour estimer la variance de répétabilité.

Les plans composites prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont insuffisamment expliqués par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences correspondant aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble de toutes les expériences.

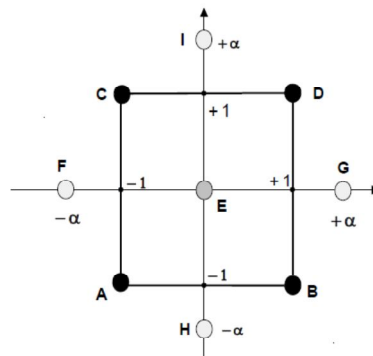


Figure II.4 : Plan composite pour deux facteurs. [64]

II.2.7.2 Les plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (Figure II.5). Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central. Dans la pratique on réalise souvent 3 ou 4 points au centre.

Les plans de Box-Behnken [64] répondent à un critère d'optimisation particulier : l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère (ou une hyper sphère) centrée à l'origine du domaine expérimental. C'est le critère d'iso-variance par rotation. Le plus connu des plans de Box-Behnken est celui qui permet d'étudier trois facteurs.

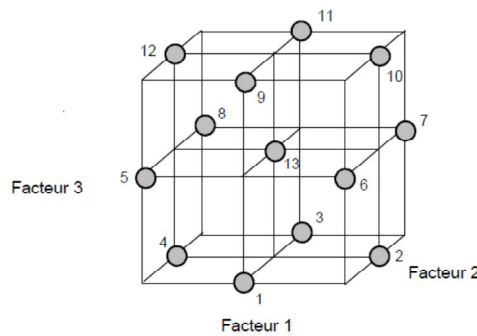


Figure II.5 : Plan de Box-Behnken pour trois facteurs [64]

II.2.8 Notion de modélisation mathématique

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé [71]. On recherche donc classiquement un modèle de la forme suivante:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (\text{II.4})$$

Dans lequel, (a) représente les coefficients du modèle à identifier (a_0 la constante, a_i les coefficients associés aux facteurs, a_{ii} les coefficients associés aux termes quadratiques et a_{ij} les coefficients associés aux interactions d'ordre 1), k désigne le nombre de facteurs x_i pris en considération dans le modèle.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé (modèle postulé) ou (modèle a priori). Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit [69].

Le premier complément est le "manque d'ajustement". Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (lack of fit en anglais).

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, notée (e). Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j + e \quad (\text{II.5})$$

II.2.9 Analyse statistique des résultats

Les valeurs expérimentales introduites dans le modèle sont entachées d'erreurs (somme d'erreurs systématiques et aléatoires) qui se transmettent aux coefficients a_i du modèle puis aux valeurs estimées. Des tests statistiques permettent d'évaluer la qualité du modèle (descriptive et prédictive), sa validation (Analyse de la variance) et la significativité des coefficients (test de Student). Cette étude peut être décomposée en trois étapes :

- l'analyse globale du système,

- l'étude des coefficients du modèle,
- l'analyse des résidus.

L'objectif de l'analyse globale des résultats est de définir la qualité descriptive du modèle au moyen d'un tableau d'analyse de la variance (tableau *ANOVA*). Pour ce faire, plusieurs grandeurs doivent être préalablement définies.

II.2.10 Qualité descriptive du modèle postulé

Les résultats obtenus peuvent alors être représentés graphiquement afin de comparer dans un premier temps les réponses expérimentales et les réponses estimées. Pour cela, il est nécessaire de tracer le graphe d'adéquation du modèle (*réponses estimées = f (réponses expérimentales)*). Si le nuage de points est aligné sur la droite d'équation $y = x$, la qualité descriptive du modèle sera a priori plutôt bonne. En plus, la qualité descriptive du modèle polynômial est exprimée par les coefficients de détermination R^2 et $R^2_{ajusté}$ donnés par les équations (II.6) et (II.7), respectivement. La signification statistique doit être vérifiée avec la précision d'adéquation [72], Eqs. (II.8) et (II.9), et par le F-test.

$$R^2 = 1 - \frac{SCRES}{SCM + SCRES} = \frac{SCM}{SCT} \quad (II.6)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\frac{SCRES}{DLRES}}{\frac{SCM + SCRES}{DLM + DLRES}} \quad (II.7)$$

$$\text{Précision d'adéquation} = \frac{\max(\hat{Y}) - \min(\hat{Y})}{\sqrt{\bar{V}(\hat{Y})}} \quad (II.8)$$

$$\bar{V}(\hat{Y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V(\hat{Y}) = \frac{p\sigma}{N} \quad (II.9)$$

Où (p) est le nombre de paramètres du modèle, $(\sigma)^2$ la moyenne carrée résiduelle et (N) est le nombre d'expériences.

Soit (SCT) la somme des carrés totale, c'est-à-dire la somme des carrés des écarts entre les mesures de la réponse et leur moyenne :

$$SCT = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (\text{II.10})$$

Cette somme peut être décomposée comme une somme de deux termes, SCM , la somme des carrés due à la régression ou variation expliquée par le modèle et $SCRES$, la somme des carrés des résidus ou variation inexpliquée par le modèle :

$$SCT = SCM + SCRES \quad (\text{II.11})$$

SCM est la somme des carrés des erreurs entre les réponses estimées et la moyenne des réponses mesurées :

$$SCM = \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (\text{II.12})$$

$SCRES$ est la somme du carré des écarts entre les réponses mesurées et estimées :

$$SCRES = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{II.13})$$

Quand ($R^2 = 1$), les estimations (\hat{Y}) coïncident avec les mesures alors que pour ($R^2 = 0$), les données ne sont pas du tout alignées. Le coefficient de détermination indique donc le degré d'alignement des données sur le modèle de régression. Ainsi, pour ($R^2 = 0.8$), ce la veut dire que (80%) de la variation des essais est expliquée par le modèle.

Cependant, en présence de plusieurs variables explicatives, ce qui est souvent le cas pour les régressions multiples, le coefficient de détermination augmente naturellement et ne permet pas de comparer significativement différents modèles [72]. Il est donc usuel d'introduire et d'utiliser le critère du ($R^2_{ajusté}$). Le ($R^2_{ajusté}$), est maximal quand l'estimateur des erreurs (s^2), d'équation (II.14), est minimal.

$$s^2 = \frac{SCRES}{N - P} \quad (\text{II.14})$$

La qualité du modèle sera donc d'autant meilleure que ($R^2_{ajusté}$) sera proche de l'unité.

II.2.11 Analyse de la variance

L'analyse de la variance (ANOVA ou Analysis Of Variance) permet de comparer les variances des valeurs calculées par le modèle et les résidus. Dans notre étude (l'ANOVA) a été utilisée pour quantifier l'effet des paramètres de coupe et ces interactions sur la qualité des surfaces usinées et les composantes de l'effort de coupe. Les principales composantes de (l'ANOVA) sont arrangees

dans un tableau qui sont comme suit:

La source de variation, le degré de liberté, la somme des carrés, p-values et en fin le pourcentage de contribution, les valeurs de (p) sont utilisés pour déterminer la signification statistique de l'effet de tous les facteurs sur la réponse si ces valeurs sont inférieures à ($\alpha=0.05$ dans un intervalle de confiance IC=95%). Le pourcentage de contribution est calculé par Eq. (II.15) [63]:

$$PC = \frac{SC_p}{SC_T} \quad (II.15)$$

Le degré de liberté est calculé par la formule suivante :

$$DF_p = (\text{nombre de niveau du facteur} - 1) = 2 \quad (II.16)$$

La somme des carrés (SC_p) pour chaque paramètre est calculée par Eq. (II.17):

$$SC_p = \sum_{j=1}^t \frac{(X_j)^2}{t} - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m X_i \right)^2 \quad (II.17)$$

La somme des carrés totale (SC_T) est calculée par Eq. (II.18) et la somme des carrés d'erreurs (SC_e) est donné par Eq. (II.19)

$$SS_T = \sum_{i=1}^m X_i^2 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m X_i \right)^2 \quad (II.18)$$

$$SS_e = SS_T - SS_V - SS_f - SS_p \quad (II.19)$$

II.3 Optimisation multicritères

II.3.1 Introduction

L'optimisation numérique est une approche de recherche de la meilleure solution s'appliquant tant en ingénierie. Un grand nombre d'algorithmes relatifs à cette problématique a été développé pour des modèles à objectif unique. Toutefois, dans l'analyse des données industrielles il y a beaucoup de réponses (variables) qui devront être étudiées en même temps, due à cette complexité, les chercheurs ont axé leurs travaux sur des algorithmes d'optimisation pour des problèmes multiobjectifs, il s'agit donc d'établir un compromis qui minimise un certain nombre d'objectifs tout en dégradant les performances sur d'autres objectifs. Finalement, la solution acceptée va assurer une satisfaction globale sur le processus parce qu'elle répondra à plusieurs objectifs en même temps [47].

Pour mener à bien un tel processus d'optimisation il faut passer par une phase d'expérimentation qui est coûteuse en temps et en argent. Il est donc important de mettre en place un processus

d'expérimentation efficace, qui permet de retirer le maximum d'informations. Plusieurs chercheurs ont appliqué les plans d'expériences, plus précisément, la méthode des surfaces de réponse, à l'optimisation dans le domaine d'usinage. Nous orienterons nos travaux de recherche dans cet axe.

Le but de ce paragraphe est de présenter la méthode d'optimisation multicritères, qui sera appliquée dans notre travail afin d'étudier l'impact des revêtements d'outil de coupe sur ces performances en usinage des aciers trempe et non trempe.

II.3.2 Méthode de la fonction de désirabilité

La principale méthode présente dans la littérature pour l'optimisation de la conception de système complexe avec la RSM est l'optimisation par la fonction de désirabilité [47]. Cette méthode est choisie par de nombreux auteurs, car elle est simple, rapide et surtout elle est intégrée aux logiciels de plans d'expériences, pour servir à la phase d'optimisation. Parmi ces travaux on peut citer ceux de Derringer et Suich [73] qui ont défini une fonction de désirabilité pour transformer plusieurs variables de réponse en réponse simple permettant ainsi de transformer un problème multiréponses en un problème à réponse unique qui peut être aisément optimisé. Cette méthode de résolution se retrouve également dans d'autres travaux tels que celle d'Abdul-Wahad et Abdo [74] qui ont réalisé une optimisation bi-objective d'une installation de dessalement de l'eau de mer.

Dans le même contexte, Khuri et Conlon [75] ont optimisé simultanément plusieurs réponses en utilisant des modèles de régression polynomiale. Ils ont, premièrement, défini une fonction de distance en considérant la solution idéale et ont, par la suite, déterminé la solution optimale en minimisant cette fonction. Dans ce cas, le problème multiréponses a également été réduit avec succès à un problème à réponse unique.

II.3.3 Méthode de Ch'ing

Le principe de la méthode consiste à proposer pour chaque réponse $Y_j(x)$, $j = 1, 2, \dots, p$, une fonction $d_j(Y_j(x))$ qui peut prendre des valeurs entre 0 et 1, ces valeurs mesurent la sensibilité de la réponse et qui s'appelle fonction de désirabilité. Ici (x) signifie le vecteur des facteurs ou des variables indépendantes $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Après avoir défini les fonctions pour chaque réponse individuellement, une fonction objective globale est définie comme une moyenne géométrique des différentes désirabilités [47].

$$D(x) = \left[d_1(Y_1(x)) \cdot d_2(Y_2(x)) \cdot \dots \cdot d_p(Y_p(x)) \right]^{\frac{1}{p}} \quad (\text{II.20})$$

La fonction de désirabilité $d_j(Y_j(x))$ a été proposée originalement par [76] sous la forme suivante:

$$d_j(Y_j(x)) = e^{\frac{Y_j(x)}{J}} \quad (\text{II.21})$$

$$d_j(Y_j(x)) = e^{-|Y_j(x)|} \quad (II.22)$$

En suite, deux autres fonctions ont été proposées par [73] Puisque les transformations (II.21 ou II.22) ne sont pas très flexibles dans le sens où ces fonctions ne peuvent pas garantir une variété de formes, ces fonctions sont comme suit:

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_j(x) \leq Y_{\min j} \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_j} \right)^r & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 1 & \text{si } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (II.23)$$

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{T_j - Y_{\min j}} \right)^s & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\max j}}{T_j - Y_{\max j}} \right)^t & \text{si } T_j \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \text{si } Y_j(x) \notin [Y_{\min j}; Y_{\max j}] \end{cases} \quad (II.24)$$

Dans les équations (II.23) et (II.24), r , s et t sont des variables définies par l'utilisateur en fonction de leur expérience permettant à celui-ci d'indiquer les limites de la fonction de désirabilité autour de la valeur cible (T_j) pour une réponse j .

Les quantités $Y_{\min j}$ et $Y_{\max j}$ représentent les limites de désirabilité pour la réponse j . L'approche de la fonction de désirabilité repose en effet sur l'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse pour la modélisation polynomiale de chaque réponse $Y_j(x)$, par une substitution des polynômes dans les équations (II.23), (II.24), afin de faire encore une substitution par les désirabilités individuelles dans l'équation (II.20). Finalement, il reste une seule fonction objective pour chercher la solution x , tout en maximisant la désirabilité totale $D(x)$.

En revanche, dans certains travaux a été souligné que l'existence de points de discontinuité dans la fonction de désirabilité ne permet pas l'utilisation des algorithmes à base de gradient pour

l'optimisation [77]. A cet effet, Castillo [77] a proposé une nouvelle fonction de désirabilité permettant l'application de l'algorithme généralisé du gradient réduit (Generalized Reduced Gradient GRG). Ils ont utilisé une fonction de désirabilité continue par intervalles pour laquelle le point de discontinuité a été corrigé en utilisant un polynôme quadratique de la forme :

$$f(Y) = A + BY + CY^2 + DY^3 + EY^4 \quad (\text{II.25})$$

Pour laquelle A, B, C, D et E sont des paramètres. Ils ont proposé cinq conditions à satisfaire par l'équation (II.25). L'approche proposée par CH'N 05 [78] n'a aucun point de discontinuité dans la fonction de désirabilité. Par ailleurs, cette approche permet l'utilisation de l'algorithme GRG qui trouve les configurations optimales pour les p réponses.

Pour la méthodologie de la surface de réponse l'utilisation des variables codées (ou des variables centrées réduites) pour trouver le modèle de régression pour p variables est une pratique courante [47]. La relation la plus répandue pour la transformation des variables réelles en variable codées a été proposée par [79] :

$$x = \frac{2 \cdot t - (u + l)}{u - l} \quad (\text{II.26})$$

Pour laquelle :

- u est la valeur supérieure pour t
- l est la valeur inférieure pour t
- t est la valeur cible étudiée avec $l \leq t \leq u$
- x est la valeur codée qui correspond à t .

Dans une démarche d'optimisation globale, nous proposons pour notre travail l'application de la technique de Ch'ng afin d'optimiser plusieurs réponses simultanément. La clef de la méthode consiste en l'addition de 1 dans la relation du changement de variables réelles en variables codées. Cette modification donne la nouvelle forme de la fonction de désirabilité :

$$d^*(Y) = \frac{2 \cdot Y - (USL + LSL)}{USL - LSL} + 1 = \left(\frac{2}{USL - LSL} \right) \cdot Y + \left(\frac{-2LSL}{USL - LSL} \right) \quad (\text{II.27})$$

Pour laquelle :

- USL est la valeur limite supérieure pour la réponse Y
- LSL est la valeur limite inférieure pour la réponse Y
- Y est la réponse ou une caractéristique de qualité avec $LSL \leq Y \leq USL$
- $d^*(Y)$ est la désirabilité proposée pour la fonction objectif avec $0 \leq d^*(Y) \leq USL$

La fonction de désirabilité $d^*(Y)$ proposée par cette méthode est utilisée pour transformer la qualité de la réponse par une valeur de désirabilité souhaitée.

$$0 \leq d^*(Y) \leq 2 \quad (\text{II.28})$$

La désirabilité totale proposée par CH'N 05 [78] est obtenue par une somme pondérée avec les poids e_i (degré d'importance) de chaque réponse individuelle.

$$\text{DESIRABILITE TOTALE} = \frac{\sum_{i=1}^p e_i \cdot |d_i(Y_i) - d_i(T_i)|}{p} \quad (\text{II.29})$$

Pour laquelle :

- $d_i(Y_i)$ est la désirabilité individuelle pour la réponse Y_i
- $d_i(T_i)$ est la désirabilité individuelle ciblée T_i pour chaque réponse
- e_i est le degré d'importance pour chaque réponse individuelle, avec la relation :

$$\sum_{i=1}^p e_i = 1 \quad (\text{II.30})$$

L'utilisation de cette approche d'optimisation est conseillée pour des phénomènes à caractère fortement non linéaire comme c'est le cas de la modélisation du processus d'usinage.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les notions théoriques de base qui semble nécessaire à la compréhension de la méthodologie des plans d'expériences ont été présentées ainsi qu'une présentation du fondement théorique de la méthode d'optimisation avec la fonction de désirabilité.

La méthodologie des plans d'expériences a été présentée dans ce chapitre en mettant l'accent sur les plans qui ont été utilisés pendant ces travaux de doctorat. Notre choix s'est porté sur trois types de plans, le premier est un plan factoriel complet composé de trois facteurs à trois niveaux avec 27 combinaisons, le deuxième est un plan de surface de réponse du type Box-Behnken, et enfin un plan factoriel complet composé de deux facteurs à quatre niveaux avec 16 combinaisons.

Chapitre III
Equipements et méthodologie de recherche

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela pour qualifier et quantifier l'impacte du revêtement sur le couple outil / matière lors du tournage de l'acier à roulement 100Cr6 (AISI 52100) avec des outils cermet revêtu et non revêtu. La méthodologie entreprise pour la réalisation des expériences ainsi que les équipements utilisés seront exposés.

III.2 Banc d'essais et équipements expérimentaux

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences. Un banc d'essais comportant un tour à charioter et à fileter, une plate forme Kistler pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée, un microscope pour contrôler et mesurer l'usure sur les plaquettes de coupe testées.

III.2.1 Machine outil

Les essais de chariotage ont été réalisés sur un tour conventionnel de la société chèque « TOS TRENCIN » modèle SN40 avec les caractéristiques suivantes (figure III-1):

- Puissance du moteur électrique: 6.6 kW
- Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont :
(45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400 et 2000) tr/min.
- Les avances disponibles sur la machine sont :
(0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24;...0,8) mm/tr.

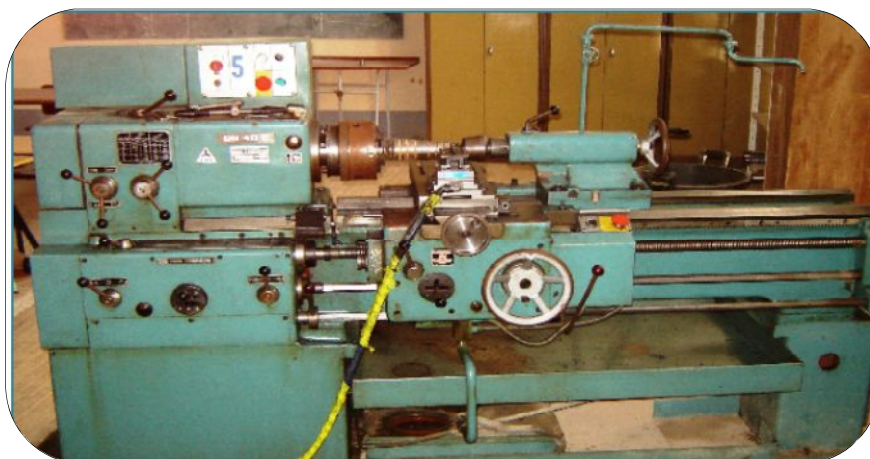


Figure III.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40

III.2.2 Matériaux à usiner

Les essais d'usinage ont été réalisés à sec sur deux nuances d'acier :

Le premier acier est le 100Cr6 est un acier faiblement allié souvent utilisé pour la fabrication de roulements à billes. Cet acier est connu sous d'autres normes à l'étranger, (SAE 52100 (Etats-Unis) et AISI 52100 (Europe)). Les éprouvettes étaient sous forme des rondins, d'un diamètre de 60 mm, la longueur a été choisie égale à 350 mm, découpée à partir des barres laminées de 6 m de longueur. Ces éprouvettes ont été utilisées pour étudier l'impacte du revêtement sur le couple (outil / matière) lors de l'usinage avec des outils de coupe cermets

revêtus et non revêtus en tournage conventionnel. Sa composition chimique est donnée dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier à roulement 100Cr6

Éléments (%) en Masse	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu
	1.09	0.256	0.35	1.382	0.077	0.017	0.005	0.150

Le 100Cr6 Parmi, ces principales caractéristiques mécaniques, on peut relever une limite d'élasticité σ_0 de 2360 MPa à 20 °C et une dureté de 285 HB à l'état recuit. Les principales propriétés mécaniques et thermiques de cet acier à la température ambiante sont données dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques et thermiques de l'acier à roulement 100Cr6

Grandeur	Symbole	Valeur	Unité
Module d'élasticité	E	210	GPa
Coefficient de Poisson	ν	0.3	-
Masse volumique	ρ	7827	Kg.cm ⁻³
Capacité thermique massique	C_p	458	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
Conductivité thermique	σ_{th}	43	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹

Le second matériau est l'acier 42 CrMo4, Les éprouvettes sont coupées sur des barres laminées à chaud et qui possèdent un diamètre de 60 mm et une longueur L= 3m. Pour quantifier l'impact du revêtement et les conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) en tournage dur sur le comportement à l'usure des outils de coupe et la qualité des surfaces usinées nous avons usiné des barres de diamètre $\Phi = 59$ mm et de longueur de L= 250 mm. Ces barres sont divisées en onze paliers de 15 mm de longueur chacune, ces éprouvettes ont subi un traitement thermique pour augmenter la dureté jusqu'à (48 HRC) (Figure III.2). La composition chimique de cet acier est donnée dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Composition Chimique de l'acier 42CrMo4

Eléments	C	Si	Mn	Cr	Mo	S
Analyse de référence	0,40	-	0,83	1.05	0.18	0.022
Min	0,38	< =	0,60	0.9	0.15	0.02
Maxi	0,45	0,40	0,90	1.25	0,03	0.04



Figure III.2 : Éprouvette utilisée en tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC).

III.2.2.1 Traitement thermique de l'acier 42CrMo4

Afin de réaliser des essais de tournage dur pour tester des outils de coupe carbure revêtus et cermets revêtus et non revêtus nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu (Figure III.3), pour augmenter la dureté des éprouvettes (Tableau III.4). Lors de la trempe, un réchauffage des éprouvettes ramène une dernière fois le métal en phase austénitique (compte tenu de la concentration en carbone et en chrome, la température est de 850°C). Le carbone et le chrome de la cémentite sont remis en solution solide dans le fer gamma. Puis le métal subit un refroidissement rapide, qui a pour effet de provoquer la formation d'une martensite. Le revenu à 200 °C assure la précipitation du carbone, et donne au métal son faciès métallographique final, une martensite fine parsemée de fins carbures de type cémentite (Fe Cr) 3C et libérée des contraintes internes

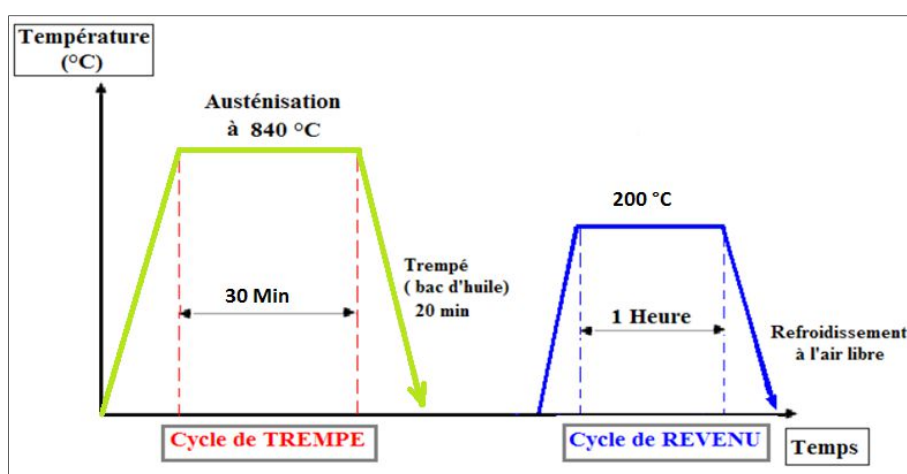


Figure III.3 : Cycles des traitements thermiques utilisés pour l'acier 42CrMo4.

Tableau III.4 : Conditions de la trempe des éprouvettes de l'acier 42CrMo4

Matériau	Dureté avant traitement	Traitement thermique			Dureté après traitement
		Austénisation	Trempe	Revenu	
Acier 42CrMo4	27 HRC	Maintien à 840°C/60Min	Refroidissement rapide / bac d'huile 20 Min	A l'air 200°C	48 HRC

III.2.3 Plaquettes et porte-outil utilisés :

Pour étudier l'effet du revêtement sur les efforts de coupe et la rugosité en tournage à sec de l'acier AISI 52100 et en tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC) nous avons utilisé trois types d'insert dont le premier insert est de la nuance GC 1525 fabriquées par la firme SANDVIK Coromant, est un cermet revêtu par deux couches minces séquentielles composé de (TiCN/TiN), avec une épaisseur totale de 3 µm, composé d'une couche principale de carbonitride de titane suivi d'une fine couche de nitrure de titane (TiN) (Tableau III.5). Ces couches minces ont été déposées par la technique (PVD).

Le second insert est de la nuance CT 1550 fabriquées par la firme SANDVIK Coromant, est un cermet non revêtu. Les deux nuances ont un substrat identique et une même géométrie de désignation comme suit (CNMG 12 04 08). Pour négliger l'effet de l'usure nous avons utilisé une nouvelle arête pour chaque essai des plans d'expériences. Leurs géométries et désignation ont illustré dans (Tableau III.5).

En plus une troisième plaquette de nuance GC3210 fabriquée par la firme SANDVIK Coromant, est une plaquette de carbure métallique revêtu par deux principales couches séquentielles composé de $(Ti(C, N)+Al_2O_3)$ avec une épaisseur totale de 15 μm composé d'une couche de carbonitrurer de titane suivi d'une couche d'alumine (Al_2O_3), sur sa face de dépouille seulement une fine couche de nitrure de titane (TiN) à été déposée pour facilité la détectassions de l'usure (Figure III.4). Cette nuance a été utilisée seulement pour la réalisation des essais de tournage dur de l'acier AISI 4140 trempé (48 HRC), afin d'étudier son comportement à l'usure et la rugosité des surfaces usinées. Le choix de la porte plaquette s'est orienté sur un porte-outil de référence (CSBNR 25-25 M12) dont les caractéristiques géométriques sont : $\chi = 75^\circ$ $\lambda = -6^\circ$ $\gamma = -6^\circ$ (Figure 3.5).



Figure III.4 : Illustration des plaquettes utilisées [54]

Tableau III.5 : Caractérisation et désignation des plaquettes utilisées.

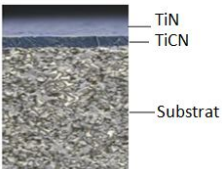
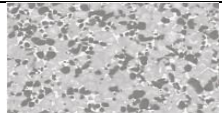
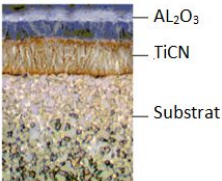
plaquettes	Composition	Désignation (SANDVIK)	Micrographies de la structure
Cermet revêtu GC1525	Deux couches minces composées de (TiCN/TiN) épaisseur totale de 3 μm , déposée par la technique (PVD)	SNMG 12 04 08	
Cermet non revêtu CT1550	Substrat sans revêtement identique à celui du cermet revêtu GC1525	SNMG 12 04 08	
Carbure revêtu GC 3210	Deux couches minces composées de $(Ti(C, N)+Al_2O_3)$ épaisseur totale de 15 μm déposée par la technique (CVD)	SNMG 12 04 08	



Figure 3.5 : Porte plaquette de référence (CSBNR 25-25 M12)

III.2.4 Rugosimètre

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) nous avons utilisé un rugosimètre portable avec affichage digital, (MITUTOYO / S J. 201 M), (Figure III.6). Ce dernier est constitué d'un palpeur qui se déplace linéairement sur la surface mesure. La longueur de palpation est de 4mm avec une longueur de base de (0.8*5). À fin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précisions, la rugosité a été mesurée en même temps que celles des efforts de coupe et chaque essai ont fait l'objet de trois mesures prises sur une même surface orientée à 120° .

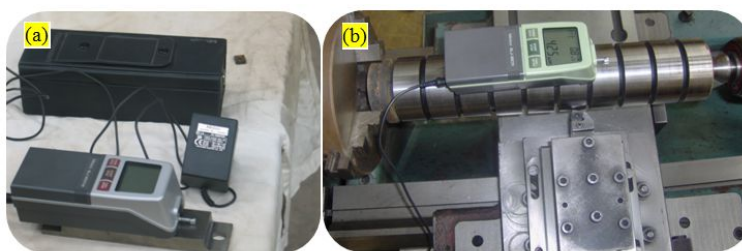


Figure III.6 : (a) Rugosimètre SurfTest 201 (Mitutoyo) ;
(b) Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

III.2.5 Microscopes

Le suivi de l'usure a été réalisé avec un microscope optique à $5\mu\text{m}$ de précision doté de deux chariots à mouvements croisés. Pour une analyse plus approfondie nous avons utilisé un microscope optique (Motic) équipé d'une caméra. L'acquisition des données sur PC se fait à l'aide d'un logiciel Motic Images 2000 (Figure III.7). Ce dernier permet de mesurer les grandeurs de l'usure sur la surface en dépouille principale, la surface en dépouille auxiliaire, et l'usure en cratère sur la surface d'attaque. Les agrandissements possibles sont (G/4, G/10, G/40 et G/100).

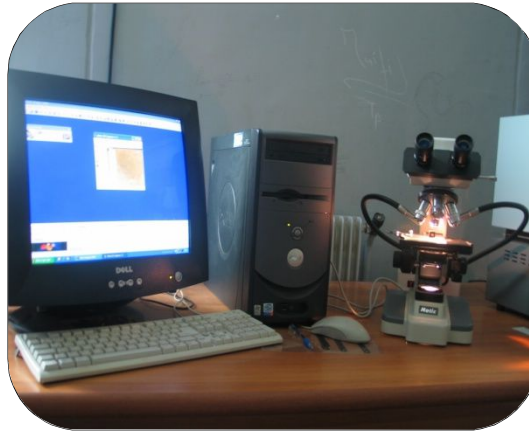


Figure III.7 : Microscope optique (Motic)

III.2.6 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

La mesure des efforts de coupe en cours d'usinage consiste en une chaîne d'acquisition composée d'un dynamomètre Kistler 9257 B et d'un amplificateur de charge à trois canaux. Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (Figure III.8). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz. Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (*DYNOWARE*) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimé en trois composantes.

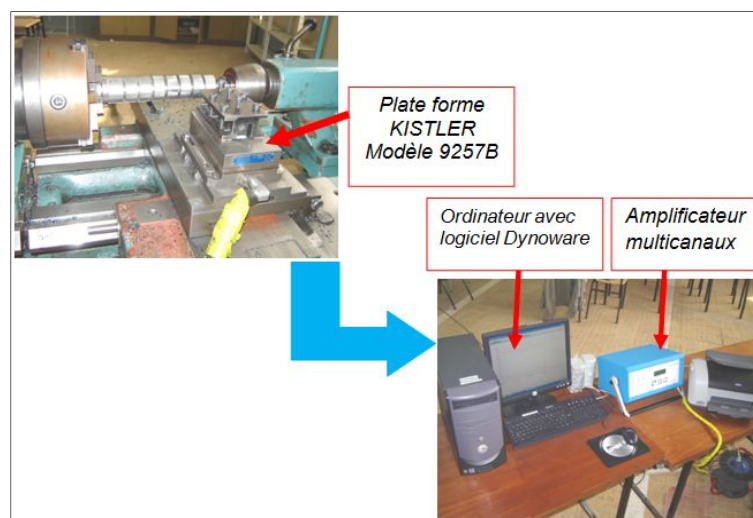


Figure III.8 : Illustration du système de mesure des efforts de coupe par dynamomètres

III.3 Procédure expérimentale

III.3.1 Introduction

L'étude expérimentale du phénomène de coupe est très complexe, en effet, le processus de coupe est un domaine qui fait intervenir plusieurs éléments, certains de ces éléments peuvent être liés à la machine du procédé (les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) et la rigidité de la machine), et d'autres sont liés à l'outil de coupe (la géométrie de la partie active de l'outil coupant), comme peuvent être liées à la matière à usiné (la dureté de la pièce). Il est sur ce qui concerne notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Dans un même contexte, nous avons axé nos travaux de recherche à l'étude de l'impact des couches minces de différents revêtements d'outils de coupe cermet et carbure métallique sur leurs performances dans une opération de tournage à sec.

III.3.2 Démarche expérimentale

Lors nos travaux de recherche nous avons adopté une démarche expérimentale selon la perspective de ce travail, cette démarche consiste à prendre en compte les conditions de coupe qui sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe en tant que facteur variable liés à la machine. En outre, le revêtement de l'outil de coupe en tant que facteurs variable lié à l'outil de coupe. Tous ces facteurs seront considérés des paramètres d'entrée du processus de coupe relative à notre étude. Les paramètres de sorties du processus d'usinage qui seront étudiés sont le comportement à l'usure de l'outil de coupe, en plus les efforts de coupe, et enfin les critères de la rugosité des surfaces usinées sous l'effet du revêtement de l'outil de coupe, cette organisation a été illustré schématiquement par la figure III.9. Trois types de plans expérimentaux ont été choisis pour planifier nous compagnes des essais expérimentaux. La planification de ces trois plans expérimentaux, ainsi que l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel Design-Expert version 10. C'est un logiciel puissant et spécialisé pour la planification et l'analyse statistique de données expérimentales.

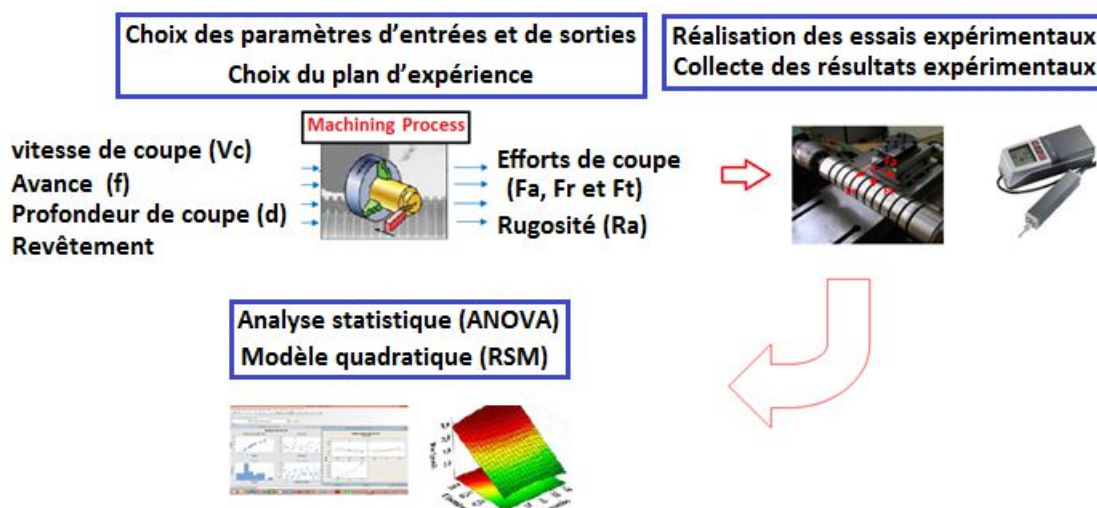


Figure III.9 : Illustration schématique du plan d'expérience

III.3.2.1 Plan Factoriel Complet ($N=3^3$, L27)

Ce plan a été utilisé pour les essais de tournage de l'acier 100Cr6 non trempé. Ce plan est du type factoriel complet, ce dernier a été construit avec la variation de trois facteurs qui sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe à trois niveaux (haut, moyen et bas), afin d'étudier l'évolution des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_f et F_t) et les critères de la rugosité (R_a , R_z et R_t) dans une opération de tournage à sec de l'acier AISI 52100 à son état recuit. Ce plan correspond à la table orthogonale de (Taguchi L27) et requies 27 combinaisons différentes l'une à l'autre. Les conditions de coupe sont représentées par le tableau III.6.

Tableau III.6 : Conditions de coupe du Plan factoriel complet ($N=3^3$, L27)

niveau	Vitesse de coupe v (m/min)	Vitesse d'avance f (mm/rev)	Profondeur de passe d (mm)
Bas	150	0.08	0.15
Moyen	200	0.12	0.30
Haut	250	0.16	0.45

III.3.2.2 Plan de Box-Behnken

Ce plan a été utilisé pour les essais de tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC). Est un plan de surface de réponse qui ne contient pas un plan factoriel fractionnaire ou un plan factoriel imbriqué. Ce type de plan a été choisi afin d'étudier les performances des outils de coupe cermets revêtus et non revêtus, dans une opération de tournage dur (TD) de l'acier trempé 42CrMo4 (48 HRC). Ce plan a été construit avec la variation de trois facteurs qui sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe à leurs trois niveaux (hauts, moyens et bas). Ce plan possède 12 points expérimentaux, en plus les trois points expérimentaux (03) ajoutés au centre du domaine d'étude, donc $12 + 3$ essais, soit 15 essais comme nombre total des essais semblent nécessaire à notre plan d'expérience du type Box-Behnken, pour le cas de trois facteurs variables. Les conditions de coupe sont représentées par le tableau III.7.

Tableau III.7 : Conditions de coupe du plan d'expérience de Box-Behnken.

niveau	Vitesse de coupe v (m/min)	Vitesse d'avance f (mm/tr)	Profondeur de passe d (mm)
Bas	60	0.08	0.25
Moyen	90	0.12	0.50
Haut	120	0.16	0.75

III.3.2.3 Plan factoriel complet ($N=2^4$, L16)

Ce plan a été utilisé pour les essais de tournage dur de l'acier trempé 42CrMo4 (48 HRC). Est un plan du type factoriel complet ($N=2^4$, L16), ce dernier a été construit avec la variation de deux facteurs qui sont la vitesse de coupe et l'avance, à quatre niveaux (1, 2, 3, et 4), tout en maintenant la profondeur de coupe constante à une valeur de ($d=0.25$ mm). Cette planification d'expérience a été utilisée afin d'étudier l'évolution des critères de la rugosité (R_a , R_z et R_t) dans une opération de tournage dur (TD) de l'acier trempé 42CrMo4 (48 HRC). Ce plan correspond à la table orthogonale de (Taguchi L16) et requiert 16 combinaisons différentes l'une à l'autre. Les conditions de coupe de ce plan sont représentées par le tableau III.8.

Tableau III.8 : Conditions de coupe du Plan factoriel complet ($N=2^4$, L16)

Niveau	N (tr/min)	Vitesse de coupe v (m/min)	Vitesse d'avance f (mm/rev)
Niveau 1	250	45	0.08
Niveau 2	355	65	0.12
Niveau 3	500	90	0.16
Niveau 4	710	130	0.18

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'étude expérimentale lors de l'usinage de l'acier 100 Cr6 et le tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé, avec des outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. Ces essais ont été menés pour évaluer la rugosité moyenne (R_a) des pièces usinées et les efforts de coupe produits. Dans ce chapitre, les caractéristiques physiques et métallurgiques de l'acier étudié ont été présentées, ainsi que les conditions de traitement thermique des éprouvettes et les différents équipements utilisés (machine-outil, plaquette de coupe, porte-outil, dynamomètre, microscope optique et rugosimètre). La planification des expériences et les conditions de coupe ont été aussi indiquées dans ce chapitre.

Chapitre IV

*Résultats, Modélisation et
optimisation des efforts de coupe et
de la rugosité en tournage*

Partie A : Tournage de l'acier 100Cr6 non trempé

IV.1 Introduction

Cette partie concerne l'étude de l'effet du revêtement d'outils de coupe cermet et les paramètres de coupe sur les composantes de l'effort de coupe et les critères de la rugosité, dans une opération de tournage de l'acier 100Cr6 non trempé. En plus, une étude d'optimisation des conditions de coupe a été menée, selon les objectifs liés aux paramètres technologiques qui sont les composantes de l'effort de coupe, les critères de la rugosité et la productivité. Dans ce chapitre des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés ont été déterminés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les paramètres technologiques étudiés. Dans cette étude l'analyse de la variance (ANOVA) a été appliquée pour quantifier l'effet des facteurs variables sur les paramètres technologiques étudiés. Pour le traitement statistique des résultats le logiciel « Design-Expert » a été utilisé.

IV.2 Résultats expérimentaux et discussions

Dans cette partie, un plan factoriel complet, a été construit basé sur la variation de trois facteurs qui sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe à trois niveaux (hauts, moyens et bas). Ce plan correspond à la table orthogonale de (Taguchi L27) et requiert (27) différentes combinaisons (nombre des essais expérimentaux). Ce plan a été utilisé pour les essais de tournage de l'acier 100Cr6 non trempé avec des outils de coupe cermets revêtus et non revêtus. Les essais réalisés selon cette méthode de planification des expériences conformément au plan factoriel complet de type ($N = 3^3$), ont permis l'obtention des résultats expérimentaux de la rugosité arithmétique (R_a) et des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) qui sont présentés par le tableau IV.1.

Pour déterminer les facteurs qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés nous avons utilisé la méthode de l'analyse de la variance (ANOVA). Cette analyse a été exécutée dans un intervalle de confiance de (95%) avec un seuil d'alpha de ($\alpha=0.05$).

Le test de signification se fait au moyen du tableau de l'ANOVA, ce test consiste à comparer les valeurs de (p) si ces valeurs sont inférieures à ($\alpha=0.05$), c'est une condition qui doit être vérifiée pour indiquer la signification d'un tel facteur. Ainsi que les pourcentages de contribution de chaque facteur et de ses interactions ont été utilisés pour quantifier leurs effets

sur les réponses de la rugosité arithmétique (Ra) et les composantes de l'effort de coupe (Fa, Fr et Ft).

Tableau IV.1 : Résultats expérimentaux de la rugosité et des efforts de coupe

V (m/min)	f (mm/tr)	d (mm)	Cermet revêtu GC1525				Cermet non revêtu CT5015			
			Fa (N)	Fr (N)	Ft (N)	Ra (µm)	Fa (N)	Fr (N)	Ft (N)	Ra (µm)
150	0.08	0.15	48.78	106.65	92.37	0.47	26.74	98.50	60.33	0.96
		0.3	52.12	104.90	89.16	0.45	69.49	128.57	95.03	0.8
		0.45	76.83	131.45	129.35	0.51	113.01	165.04	148.22	0.6
	0.12	0.15	53.14	108.53	117.65	0.78	46.60	119.56	78.65	0.77
		0.3	65.34	114.25	136.24	0.89	76.57	160.59	138.04	0.9
		0.45	102.24	162.04	187.13	0.84	129.13	195.12	190.15	0.96
	0.16	0.15	70.34	127.91	137.54	1.15	43.52	132.53	88.89	1.39
		0.3	83.28	158.70	148.13	1.18	81.32	175.13	174.19	1.45
		0.45	127.96	187.70	211.59	1.42	146.82	244.63	241.24	1.46
200	0.08	0.15	43.05	88.41	78.30	0.52	37.12	88.44	53.55	0.4
		0.3	53.82	110.37	104.31	0.4	70.28	126.06	98.54	0.42
		0.45	69.13	143.15	103.67	0.51	111.24	142.98	149.41	0.47
	0.12	0.15	46.11	88.02	120.49	0.7	46.66	108.76	88.73	0.72
		0.3	54.67	107.77	118.49	0.82	65.15	144.21	145.84	0.74
		0.45	89.91	127.84	161.24	0.7	94.91	155.90	181.57	0.93
	0.16	0.15	48.27	108.91	140.93	1.06	41.06	102.04	89.19	1.37
		0.3	62.89	127.37	149.46	1.06	76.10	150.93	178.32	1.37
		0.45	110.81	169.54	212.82	1.3	108.12	176.50	225.57	1.44
250	0.08	0.15	47.52	107.29	69.76	0.49	37.59	95.14	69.75	0.32
		0.3	74.66	115.53	122.98	0.39	54.41	107.01	99.29	0.37
		0.45	89.87	141.56	138.00	0.5	95.51	124.58	144.59	0.37
	0.12	0.15	43.88	85.18	112.92	0.46	25.47	77.47	74.98	0.57
		0.3	46.50	102.21	124.55	0.75	57.64	117.12	125.01	0.72
		0.45	72.53	144.55	164.30	0.58	108.06	162.28	198.91	0.83
	0.16	0.15	50.35	108.29	127.92	1.02	39.22	92.78	97.91	1.26
		0.3	71.33	128.96	147.20	0.9	84.21	79.65	88.96	1.27
		0.45	123.36	155.66	220.28	1.15	111.50	186.04	233.37	1.3

IV.2.1 Analyse de l'effet des paramètres de coupe

IV.2.1.1 Résultats d'ANOVA de la rugosité (Ra)

Cette campagne d'essais a été réalisée conjointement avec les essais des efforts de coupe. Le relevé des valeurs de la rugosité a été effectué selon un plan factoriel complet. Autrement dit, nous avons procédé à la mesure des critères de la rugosité (Ra, Rt et Rz) juste après le relevé à chaque essai d'effort de coupe. L'analyse des résultats expérimentaux sera basée sur les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) et les diagrammes de l'effet principal des

facteurs étudiés sur la rugosité Ra obtenue avec les outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) présentée par le tableau IV.2, ont permis de constater que la vitesse de coupe (V), l'avance (f), la profondeur de coupe et le terme quadratique de la profondeur de coupe (d^2) ont tous un effet significatif sur la rugosité de la surface (Ra). Le pourcentage de contribution est un paramètre qui donne une meilleure compréhension pour l'interprétation des résultats. En effet, sa valeur de l'avance a été de 93.95%, ce qui nous a permis de constater que l'avance est un facteur le plus influent sur les valeurs de la rugosité. Le second facteur qui semble à un effet sur le critère de la rugosité est la vitesse de coupe avec un pourcentage de contribution de (2.32%), en outre, les résultats de l'analyse d'ANOVA ont indiqué nettement que l'effet de la profondeur de passe sur la rugosité (Ra) a été très faible.

Tableau IV.2: Résultats d'ANOVA de la rugosité Ra obtenus avec cermet revêtu

Source	SC	DDL	CM	F Value	p-value	Cont %	Remarque
Model	4,26	9	0,47	212,47	< 0,0001	99,06	significatif
A-v	0,1	1	0,1	45,43	< 0,0001	2,327	significatif
B-f	4,04	1	4,04	1813,69	< 0,0001	93,954	significatif
C-d	0,055	1	0,055	24,6	0,0001	1,275	significatif
AB	8,33E-04	1	8,33E-04	0,37	0,549	0,019	Non significatif
AC	2,08E-04	1	2,08E-04	0,093	0,7635	0,004	Non significatif
BC	3,33E-05	1	3,33E-05	0,015	0,9041	0,007	significatif
A ²	2,18E-03	1	2,18E-03	0,98	0,3362	0,057	Non significatif
B ²	0,06	1	0,06	26,82	< 0,0001	1,395	Non significatif
C ²	5,14E-04	1	5,14E-04	0,23	0,6371	0,011	significatif
Résidus	0,038	17	2,23E-03	-	-	0,883	-
Total	4,3	26	-	-	-	-	-

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Ra obtenue avec les outils de coupe cermet non revêtu sont présentés par le tableau IV.3. l'analyse de ces résultats ont permis de constater que la vitesse de coupe (V), l'avance (f), l'effet de l'interaction de l'avance et la vitesse de coupe ($V*f$) et le terme quadratique de l'avance (f^2) ont tous un effet significatif sur la rugosité de la surface (Ra). En effet leurs valeurs de (p-value) ont été inférieurs au seuil de signification ($\alpha=0.05$). Il est à noter que l'avance a été le facteur prépondérant, est apparu que ce facteur est le plus influant sur les valeurs de la rugosité avec un pourcentage de contribution de (82,09%), suivie par celui de la vitesse de coupe (V) avec un pourcentage de (7.41%).

Tableau IV.3: Résultats d'ANOVA de la rugosité Ra obtenus avec cermet non revêtu

Source	SC	DDL	CM	F Value	p-value	Cont %	Remarque
Model	3,75	9	0,42	45,4	< 0.0001	95,90	significatif
A-v	0,29	1	0,29	31,45	< 0.0001	7,416	significatif
B-f	3,21	1	3,21	349,43	< 0.0001	82,09	significatif
C-d	0,02	1	0,02	2,18	0,1583	0,511	Non significatif
AB	0,057	1	0,057	6,25	0,0229	1,457	significatif
AC	0,017	1	0,017	1,84	0,193	0,434	Non significatif
BC	0,015	1	0,015	1,6	0,2229	0,383	Non significatif
A2	6,23E-03	1	6,23E-03	0,68	0,4216	0,159	Non significatif
B2	0,14	1	0,14	15,14	0,0012	3,580	significatif
C2	2,96E-05	1	2,96E-05	3,23E-03	0,9554	0,000	not significatif
Résidus	0,16	17	9,18E-03	-	-	4,092	-
Total	3,91	26	-	-	-	-	-

D'autre part l'analyse des graphes des principaux effets sont illustrée par la figure (IV.1) et la figure (IV.2) des deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu respectivement de la rugosité (Ra) en relation avec les facteurs considérés. L'analyse de ces représentations montre que l'effet de la vitesse de coupe est significatif. En effet, une augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de la surface usinée, ceci est expliqué par la stabilisation du système usinant pour les vitesses de coupe élevées. Une diminution de la vitesse d'avance permet d'améliorer les valeurs de la rugosité de la surface usinée par contre sans augmentation l'état de surface sera médiocre, alors que la profondeur de passe n'a pas d'effets significatifs (pente faible). Selon l'analyse des diagrammes présentés par les figures (IV.1 et IV.2) qui montrent l'effet principal des facteurs étudiés sur la rugosité de la surface usinée. Il est clair que la rugosité de la surface usinée est proportionnelle à l'augmentation de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe et inversement proportionnelle à la vitesse de coupe.

Ce résultat peut être expliqué par le phénomène du rainurage de Sillons hélicoïdalement sur les surfaces finies engendrées par l'accroissement de l'avance combiné avec le mouvement du couple (outil et pièce) comme indiqué par d'autres études expérimentales de Bouzid et al. (2014) Bouchelaghem et al. (2007). D'un autre côté, ce phénomène est expliqué par la décroissance de l'avance qui a conduit à une décroissance des efforts de coupe qui en résultent de légères vibrations du système usinant par conséquent l'état des surfaces usinées s'améliore. Des travaux de recherche similaires ont été faits dans le même contexte, par exemple, yallese et al. (2009) et Hessainia et al. (2015), ont trouvé que la rugosité s'améliore suite à la décroissance des efforts de coupe lors de l'usinage à des vitesses de coupe élevées.

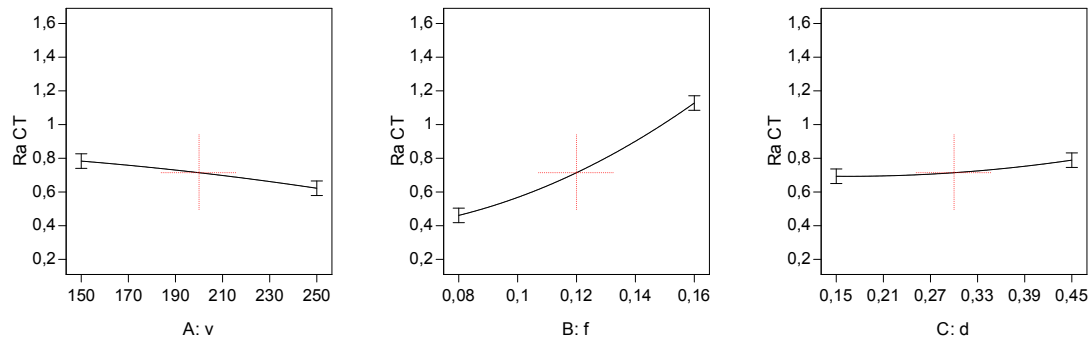


Figure IV.1: Diagramme d'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Ra) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu

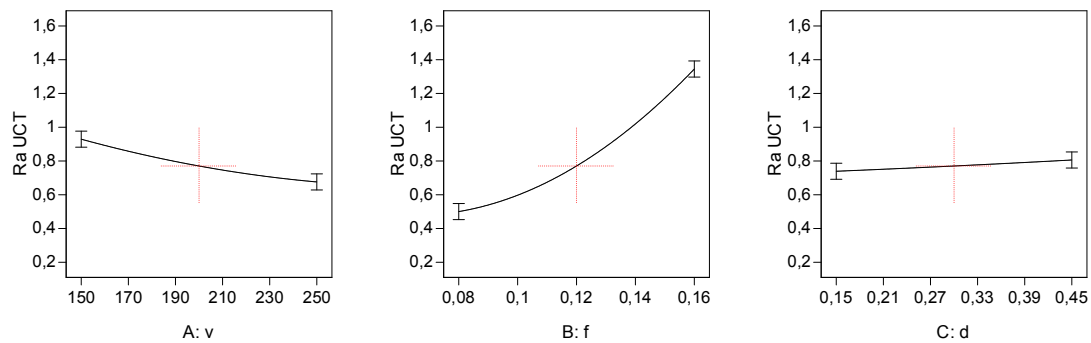


Figure IV.2: Diagramme d'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Ra) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu

IV.2.1.2 Résultats d'ANOVA des efforts de coupe

Les essais de l'évolution des composantes de l'effort de coupe ont été réalisés dans les mêmes conditions de travail que les essais de la rugosité. Afin d'évaluer l'influence des revêtements sur le comportement dynamique lors de l'usinage de l'acier 100Cr6, deux matériaux de coupe ont été utilisés. Autrement dit, ils ont été effectués avec deux matériaux à outils de coupe cermet revêtu et non revêtu de géométrie et de substrat identique seulement différents du revêtement. L'analyse des données expérimentales des trois composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) enregistré avec l'outil de coupe cermet revêtu a permis de constater qu'ont été obtenue dans des intervalles de leurs valeurs minimales et maximales de [43.05 N, 127.96N], [85.18 N, 187.7N] et [69.76 N, 220.28N] respectivement. En outre, les moyens des trois composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) ont été de (69.58 N, 124.54 N et 135.80N) respectivement. Alors que la composante axiale a donné la plus petite valeur, par contre la composante tangentielle la plus grande valeur suivie par celle de l'effort radial.

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour l'outil de coupe cermet revêtu sont présentes par les tableaux (IV.4, IV.5 et IV.6) pour les trois composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) respectivement. L'analyse de ces résultats montre que l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe est relativement minime. Par contre, l'avance et la

profondeur de passe ont une influence plus importante sur les efforts de coupe. Avec leur accroissement les efforts de coupe augmentent. On notera toutefois que la profondeur de passe semble être le facteur prépondérant. Ceci est aussi car avec leur augmentation, la section du copeau augmente. En effet, les valeurs du pourcentage de contribution de l'effort axial (F_a) indiquent clairement que la profondeur de passe est le facteur le plus significatif avec une contribution de 60.72%, et que l'avance est le second facteur significatif avec une contribution de 13.356% puis l'effet de l'interaction de l'avance et la profondeur de passe (F^*d) avec une contribution de 5.03%. En revanche, la composante de l'effort radial (F_r), a été influence de (58.82% et 15.61%) suivi par celui du terme quadratique de l'avance (F^2). Finalement concernant la composante de l'effort de coupe tangentiel (F_t), les valeurs du pourcentage de contribution de la profondeur de passe et l'avance ont été de (46.01% et 40.14%), respectivement. Par contre les autres termes leurs effets ont été inférieurs à 5%.

Tableau IV.4: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (F_a) obtenus avec cermet revêtu

Source	SC	DDL	CM	F Value	p-value	Cont %	Remarque
Model	14322,8711	9	1591,43012	23,5783328	< 0.0001	92,58	significatif
A-v	200,20005	1	200,20005	2,96612673	0,1031	1,29	Non significatif
B-f	2065,31645	1	2065,31645	30,5993446	< 0.0001	13,35	significatif
C-d	9393,63556	1	9393,63556	139,174358	< 0.0001	60,72	significatif
AB	418,4283	1	418,4283	6,19935592	0,0234	2,70	significatif
AC	7,1148	1	7,1148	0,10541155	0,7493	0,04	Non significatif
BC	779,079675	1	779,079675	11,5426996	0,0034	5,03	significatif
A ²	377,150817	1	377,150817	5,58779639	0,0302	2,43	significatif
B ²	449,108017	1	449,108017	6,65390089	0,0194	2,90	significatif
C ²	632,8374	1	632,8374	9,37600129	0,0070	4,09	significatif
Résidus	1147,4226	17	67,4954472				
Total	15470,2937	26					

Tableau IV.5: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (F_r) obtenus avec cermet revêtu

Source	SC	DDL	CM	F Value	p-value	Cont %	Remarque
Model	17012,1071	9	1890,23412	40,0835024	< 0.0001	95,49	significatif
A-v	708,133889	1	708,133889	15,0163867	0,0012	3,97	significatif
B-f	2780,83961	1	2780,83961	58,9693043	< 0.0001	15,61	significatif
C-d	10478,6939	1	10478,6939	222,206735	< 0.0001	58,82	significatif
AB	880,3107	1	880,3107	18,667495	0,0004	4,94	significatif
AC	0,705675	1	0,705675	0,01496424	0,9040	0,003	Non significatif
BC	242,820033	1	242,820033	5,14913856	0,0365	1,36	significatif
A ²	408,925185	1	408,925185	8,6714939	0,0090	2,29	significatif
B ²	1080,66787	1	1080,66787	22,9161841	0,0001	6,06	significatif
C ²	431,010252	1	431,010252	9,13982045	0,0076	2,41	significatif
Résidus	801,675955	17	47,1574091				
Total	17813,7831	26					

Tableau IV.6: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (Ft) obtenus avec cermet revêtu

Source	SC	DDL	CM	F Value	p-value	Cont %	Remarque
Model	36032,3087	9	4003,58985	23,3690415	< 0.0001	92,52	significatif
A-v	25,0868056	1	25,0868056	0,14643223	0,7067	0,06	Non significatif
B-f	17921,6623	1	17921,6623	104,609135	< 0.0001	46,01	significatif
C-d	15635,0139	1	15635,0139	91,261918	< 0.0001	40,14	significatif
AB	39,3132	1	39,3132	0,22947201	0,6380	0,10	Non significatif
AC	82,530075	1	82,530075	0,48172985	0,4970	0,21	Non significatif
BC	966,787008	1	966,787008	5,64315691	0,0295	2,48	significatif
A^2	176,58375	1	176,58375	1,03072321	0,3242	0,45	Non significatif
B^2	71,7604167	1	71,7604167	0,41886712	0,5261	0,18	Non significatif
C^2	1113,57127	1	1113,57127	6,49993984	0,0207	2,85	significatif
Résidus	2912,44412	17	171,320242				
Total	38944,7528	26					

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour l'outil de coupe cermet non revêtu sont présentes par les tableaux (IV.7, IV.8 et IV.9) pour les trois composantes de l'effort de coupe (Fa, Fr et Ft) respectivement. L'analyse de ces résultats fait ressortir que la composante de l'effort de coupe axial (Fa) a été influence seulement par l'avance avec un pourcentage de contribution de 86.81% et les autres termes ont été inférieurs à 5%. Ensuite la composante de l'effort de coupe radiale (Fr) a été influencé par l'avance et la vitesse de coupe avec un pourcentage de contribution de (54,72% et 19.17%) respectivement. Puis la composante de l'effort de coupe tangentiel (Ft) influence par la profondeur de passe et l'avance avec un pourcentage de contribution de (71,34% et 17.37%) respectivement. L'analyse de ces résultats a montré également que la composante tangentielle (Ft) est la plus importante, suivie par la composante radiale (Fr) et enfin la composante axiale (Fa). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus en tournage classique.

Tableau IV.7: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (Fa) obtenus avec cermet non revêtu

Source	SC	DDL	CM	F Value	p-value	Cont %	Remarque
Model	25906,6058	9	2878,51176	39,461567	< 0.0001	95,43	significatif
A-v	1129,55045	1	1129,55045	15,4850265	0,0010	4,16	significatif
B-f	485,4728	1	485,4728	6,65535493	0,0194	1,78	significatif
C-d	23567,6524	1	23567,6524	323,08935	< 0.0001	86,81	significatif
AB	5,33333333	1	5,33333333	0,07311476	0,7901	0,01	Non significatif
AC	109,868008	1	109,868008	1,50618241	0,2364	0,40	Non significatif
BC	186,677408	1	186,677408	2,55916379	0,1280	0,68	Non significatif
A^2	86,9696463	1	86,9696463	1,19226837	0,2901	0,32	Non significatif
B^2	90,4298963	1	90,4298963	1,239705	0,2810	0,33	Non significatif
C^2	244,651919	1	244,651919	3,35393734	0,0846	0,90	Non significatif
Résidus	1240,05972	17	72,9446897				
Total	27146,6655	26					

Tableau IV.8: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (Fr) obtenus avec cermet non revêtu

Source	SC	DDL	CM	F Value	p-value	Cont %	Remarque
Model	37662,6438	9	4184,7382	19,543737	< 0.0001	91,18	significatif
A-v	7921,20889	1	7921,20889	36,9939567	< 0.0001	19,17	significatif
B-f	3869,36045	1	3869,36045	18,0708469	< 0.0001	9,36	significatif
C-d	22602,9235	1	22602,9235	105,561106	< 0.0001	54,72	significatif
AB	1374,73613	1	1374,73613	6,42034943	0,0214	3,32	significatif
AC	181,663008	1	181,663008	0,84841008	0,3698	0,43	Non significatif
BC	1393,2075	1	1393,2075	6,50661516	0,0206	3,37	Non significatif
A^2	91,0001852	1	91,0001852	0,42499282	0,5231	0,22	Non significatif
B^2	79,376313	1	79,376313	0,37070653	0,5506	0,19	Non significatif
C^2	149,167824	1	149,167824	0,69664973	0,4154	0,36	Non significatif
Résidus	3640,0689	17	214,1217				
Total	41302,7127	26					

Tableau IV.9: Résultats d'ANOVA de l'effort de coupe (Ft) obtenus avec cermet non revêtu

Source	SC	DDL	CM	F Value	p-value	Cont %	Remarque
Model	74663,0863	9	8295,89848	28,5437263	< 0.0001	93,79	significatif
A-v	373,282272	1	373,282272	1,28435359	0,2728	0,46	Non significatif
B-f	13829,5081	1	13829,5081	47,5832357	< 0.0001	17,37	significatif
C-d	56790,1168	1	56790,1168	195,397949	< 0.0001	71,34	significatif
AB	738,371408	1	738,371408	2,54051703	0,1293	0,92	Non significatif
AC	25,5500083	1	25,5500083	0,08791	0,7704	0,03	Non significatif
BC	2285,28	1	2285,28	7,86297071	0,0121	2,87	significatif
A^2	101,215646	1	101,215646	0,34825302	0,5628	0,12	Non significatif
B^2	213,646446	1	213,646446	0,73509406	0,4031	0,26	Non significatif
C^2	306,115646	1	306,115646	1,05325315	0,3191	0,38	Non significatif
Résidus	4940,85015	17	290,638244				
Total	79603,9364	26					

Les figures (IV.3 – IV.8) montrent les diagrammes de l'effet principal des différents facteurs des éléments du régime de coupe (v, f et d) sur les trois composantes de l'effort de coupe (Fa, Fr et Ft) obtenues avec les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. D'une part, l'analyse de ces figures, fait ressortir que l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à la diminution des efforts de coupe. Ceci est interprété par l'augmentation de la température dans la zone de coupe qui à son tour joue un rôle d'adoucissement de la matière à enlever. D'autre part, l'augmentation de l'avance et de la profondeur de passe contribue à l'accroissement des efforts de coupe. Ceci est interprété par l'augmentation de la section du copeau ($S = f \times ap$). Par conséquent la plus grande influence est affectée à la profondeur de passe suivi par l'avance. Par contre la vitesse de coupe a une influence relativement faible.

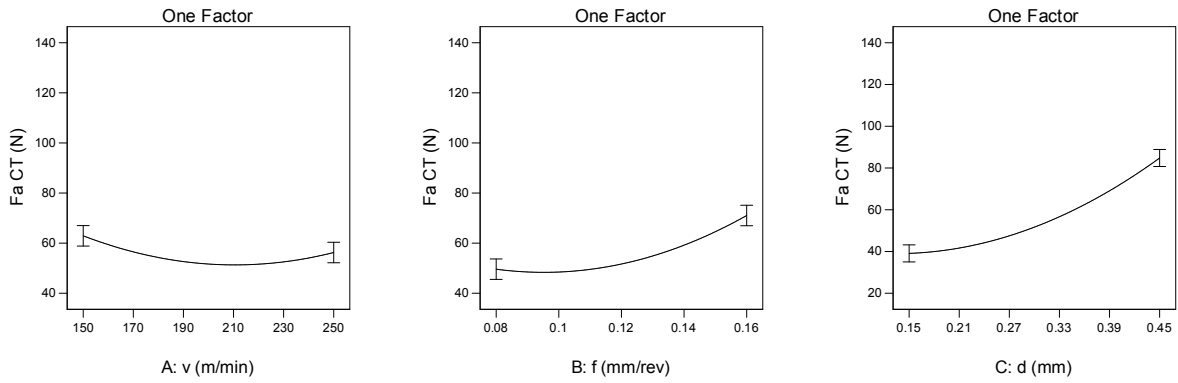


Figure IV.3: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur (F_a) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu

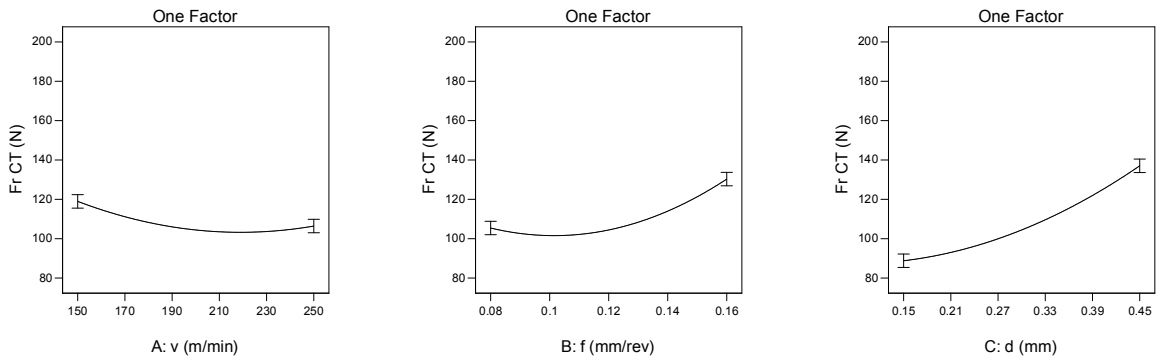


Figure IV.4: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur (F_r) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu

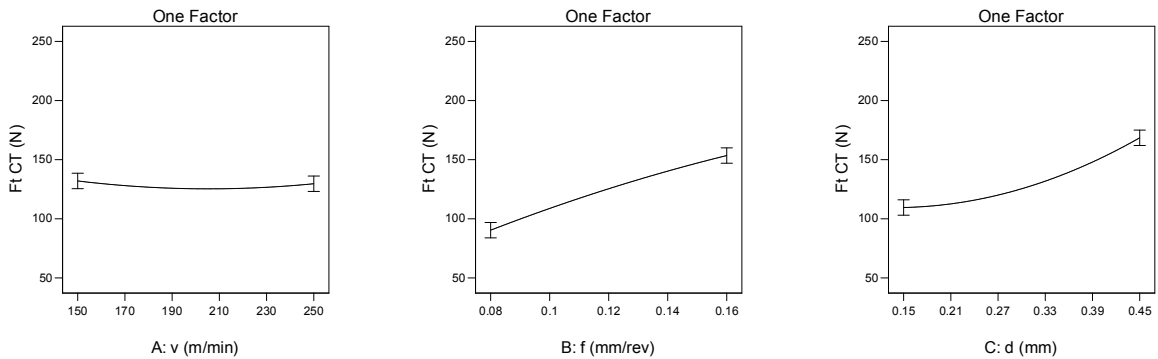


Figure IV.5: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur (F_t) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu

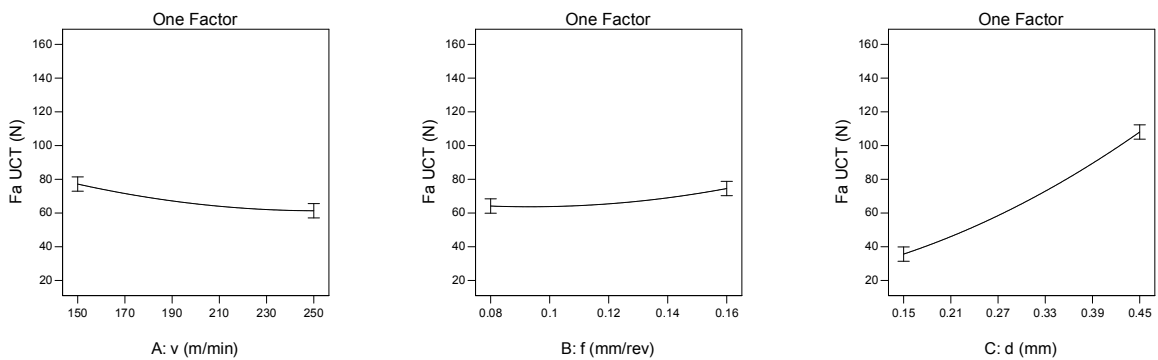


Figure IV.6: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur (F_a) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu

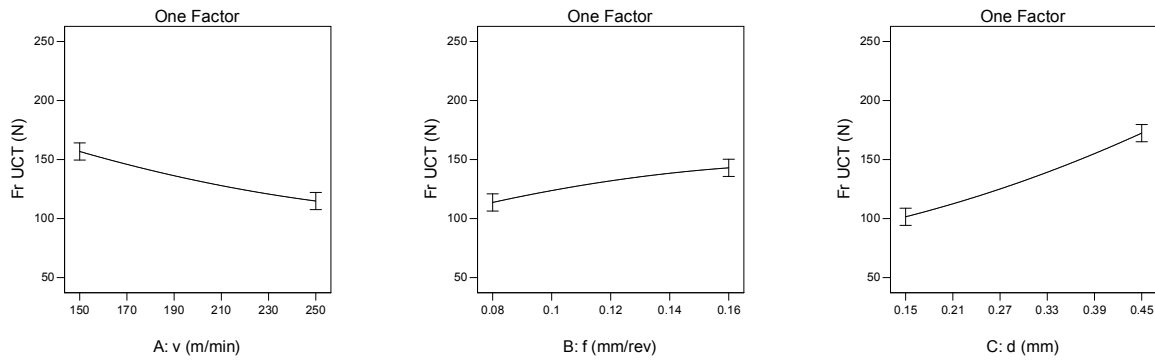


Figure IV.7: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur (F_r) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu

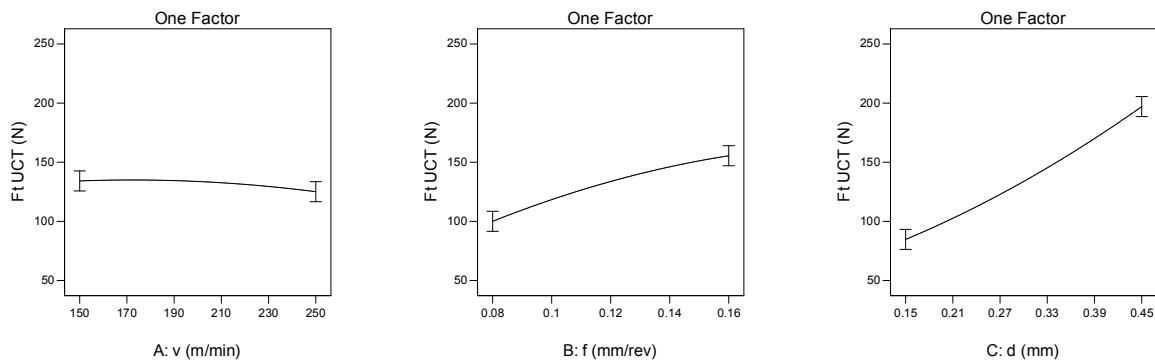


Figure IV.8: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur (F_t) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu

IV.2.2 Modélisation mathématique de la rugosité et des efforts de coupe

Cette partie consistera l'obtention des modèles quadratiques qui relient les réponses de la rugosité (R_a) et les composantes de l'effort de coupe aux facteurs étudiés (v, f et d). L'intérêt de rechercher ces modèles mathématiques est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé modèle postulé. Autrement dit, on cherchera donc un modèle de la forme suivante:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (IV.1)$$

Dans lequel, (a) représente les coefficients du modèle à identifier (a_0) la constante, (a_i) les coefficients associés aux facteurs, (a_{ii}) les coefficients associés aux termes quadratiques et a_{ij} les coefficients associés aux interactions d'ordre (1). Le nombre (k) désigne le nombre de facteurs (x_i) pris en considération dans le modèle. Sachant que ces coefficients du modèle ont été déterminés on utilisant le logiciel « Design-Expert »

Les équations des modèles adaptés en terme de facteurs réels pour la rugosité de la surface usinée de l'acier 100Cr6 avec des outils de coupe cermet revêtu et non revêtu sont données ci-dessous.

$$Ra_{coated} = 0.178 + 0.004 v - 0.917f - 1.148 d - 4.667e-006 v^2 - 0.026v.f - 0.002v.d + 50 f^2 + 8.333f.d + 1.185 d^2 \quad (IV.2)$$

$$Ra_{uncoated} = 3.178 - 0.013v - 20.94f - 1.537d + 1.289e-005v^2 + 0.0346v.f + 0.005v.d + 95.13 f^2 + 5.833f.d + 0.098 d^2 \quad (IV.3)$$

Les équations des modèles adaptés en terme de facteurs réels pour les composantes de l'effort de coupe (Fa, Fr et Ft) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu sont données ci-dessous.

$$Fa = 216.64 - 1.012v - 842.33f - 303.2 d + 0.0032 v^2 - 2.955 v.f + 0.103v.d + 5407.2ff + 1342.92f.d + 456.444 d^2 \quad (IV.4)$$

$$Fr = 256.91 - 0.942v - 1070.76 f - 161.59d + 0.003 v^2 - 4.28v.f + 0.03v.d + 8387.85ff + 749.7 f.d + 376.69 d^2 \quad (IV.5)$$

$$Ft = 139.81 - 0.888v + 1039.81f - 416.257d + 0.0022v^2 - 0.91 v.f + 0.35 v.d - 2161.5f^2 + 1495.9 f.d + 605.4d^2, \quad (IV.6)$$

Les équations des modèles adaptés en terme de facteurs réels pour les composantes de l'effort de coupe (Fa, Fr et Ft) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu sont données ci-dessous.

$$Fa = 41.35 - 0.265v - 205.26f + 204.79 d + 0.001v^2 - 0.625v.f - 0.659v.d + 1627.8f^2 + 337.92 f.d + 227.01d^2, \quad (IV.7)$$

$$Fr = 55.62 - 0.245 v + 1443.71 f - 8.47 d + 0.0016 v^2 - 5.352v.f - 0.519 v.d - 2273.26f^2 + 1795.8 f.d + 221.605d^2, \quad (IV.8)$$

$$Ft = -157.39 + 1.11 v + 1682.46f - 53.1 d - 0.002 v^2 - 3.922 v.f - 0.194 v.d - 3729.5 f^2 + 2300 f.d + 317.5 d^2, \quad (IV.9)$$

IV.2.2.1 Test d'adéquation des modèles quadratiques

Les résultats de la méthode d'ANOVA du test d'adéquation des modèles postulés de la rugosité et des composantes de l'effort de coupe, obtenus avec l'outil de coupe cermet revêtu et non revêtu sont présentés par le tableau (IV.10). Ces résultats indiquent que les valeurs de (p-value = 0.000) qu'ont été inférieures au seuil de signification statistique qui est ($\alpha=0.05$) ce qui justifie l'adéquation des relations entre les réponses et les facteurs de prédiction dans leurs limites de validité. En plus, les coefficients de détermination (R^2) des modèles ont été considérés. Les valeurs de ($R^2_{\text{cermet revêtu}} = 0.9466$ et $R^2_{\text{cermet non revêtu}} = 0.9601$) des modèles postulés de la rugosité (Ra) indiquent que 94.66% et 96.01% de toutes les variations sont expliqués par les modèles d'outil de coupe cermet revêtu et non revêtu respectivement. Les valeurs prévues et ajustées des coefficients de détermination R^2 des différents modèles pour les composantes d'effort de coupe (Fa, Fr et Ft) obtenue avec les outils de coupe cermet revêtu

et non revêtu étaient dans l'excellent accord, ce qui justifie leur adéquation avec les résultats obtenus expérimentalement.

Tableau IV.10 : Coefficients de détermination et de corrélation des modèles quadratiques

	Model	p-value	R ² (%)	R ² _{pred} (%)	Coefficient de corrélation (r)	Ration du carré moyen (e)
Cermet revêtu	Ra	0.000	94.66	87.25	0.97	2.06
	Fa	0.000	92.58	81.01	0.96	1.88
	Fr	0.000	95.50	87.28	0.97	0.85
	Ft	0.000	92.52	81.28	0.96	1.76
Cermet Non revêtu	Ra	0.000	96.01	88.11	0.97	2
	Fa	0.000	95.13	87.96	0.97	2.65
	Fr	0.000	91.19	75.87	0.95	2.12
	Ft	0.000	93.79	84.04	0.96	2.58

En plus, l'adéquation des modèles peuvent être estimée par la détermination du coefficient de corrélation (r) et le carre de la moyenne du pourcentage de déviation (e) entre les valeurs expérimentales et théoriques, ainsi leurs valeurs ont été présentées par le tableau IV.10. Le coefficient de corrélation (r) pour « N » nombre d'observation est calculé comme suit :

$$r = \frac{N \sum X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sqrt{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \sqrt{N \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}} \quad (IV.10)$$

Le pourcentage de déviation (e_i) est calculé par la formule suivante:

$$e_i = \frac{X_i - Y_i}{X_i} \times 100 \quad (IV.11)$$

Aussi, la carre de la moyenne du pourcentage de déviation (e) est calculée par la formule suivante:

$$e = \sqrt{\frac{\sum (e_i)^2}{N}} \quad (IV.12)$$

Les valeurs du coefficient de corrélation (r) pour tous les modèles ont été arrange dans intervalle entre 0.95 et 0.97, ce qui indique une bonne accordance entre les valeurs expérimentales et théoriques. La carre de la moyenne du pourcentage de déviation (e) du modèle mathématique de l'effort radial a donné la plus petite valeur de (e=0.85). pour la rugosité (Ra) obtenue avec les outils de coupe cermet revêtu et non revêtu ont été de 2.06% et 2.65%, respectivement. Les figures (IV.9 – VI.11) montrent les courbes de comparaisons

entre les valeurs prédites de la rugosité (Ra) ainsi que les composantes de l'effort de coupe par les modèles et les valeurs expérimentales obtenus avec les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu.

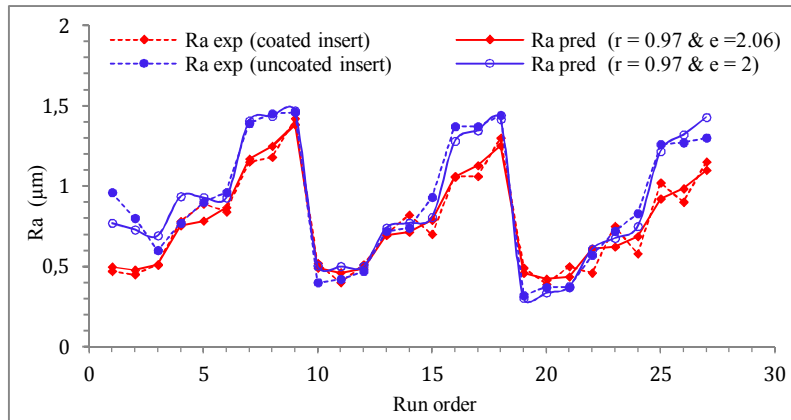


Figure IV.9: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra) obtenus avec le cermet revêtu et non revêtu.

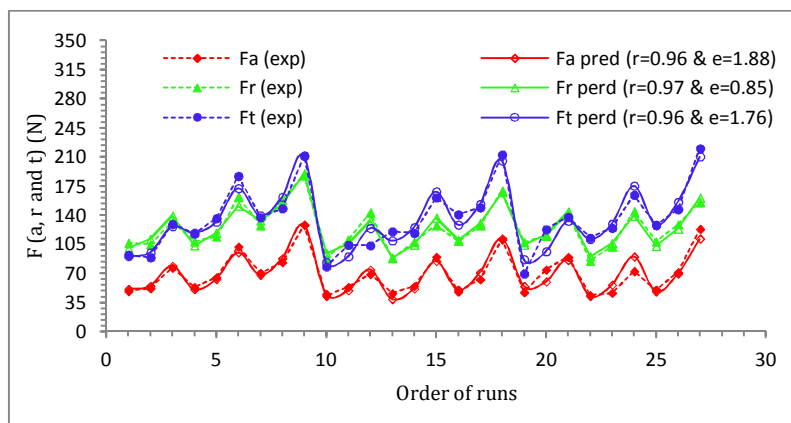


Figure IV.10: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Fa, Fr et Ft) obtenues avec le cermet revêtu.

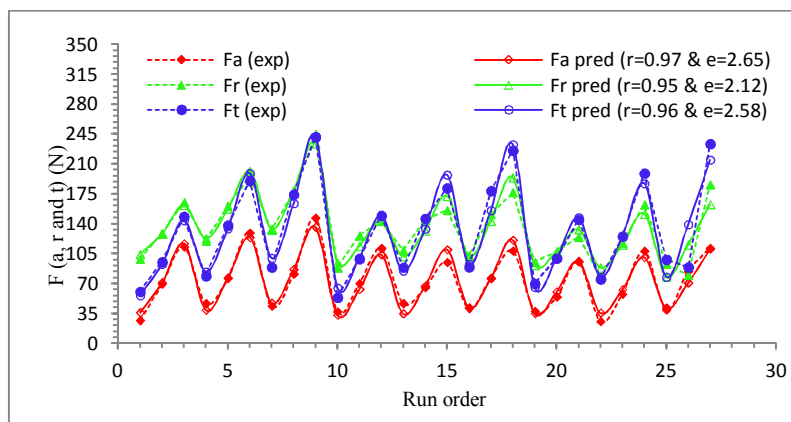
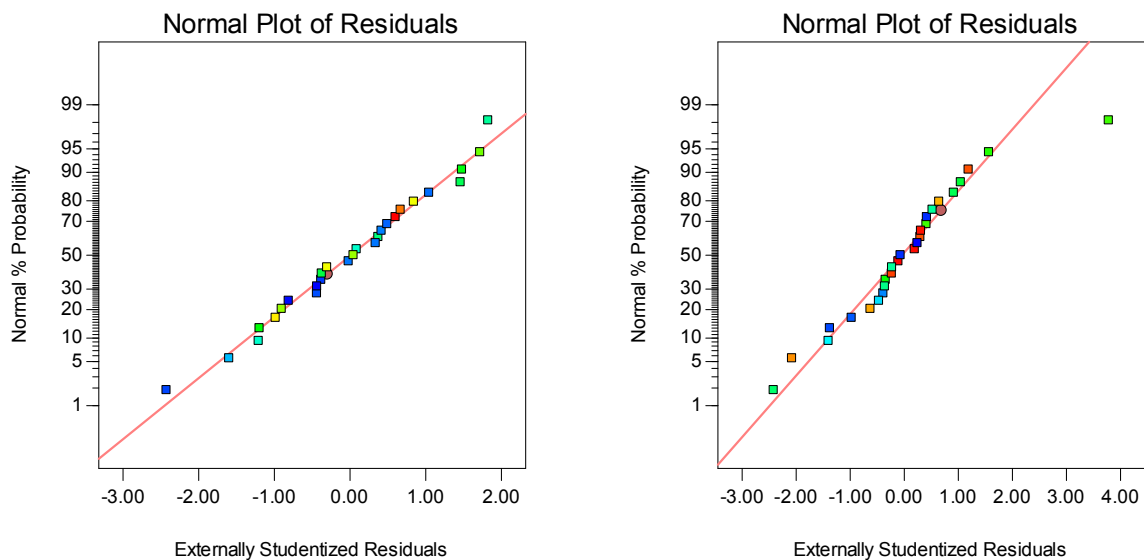
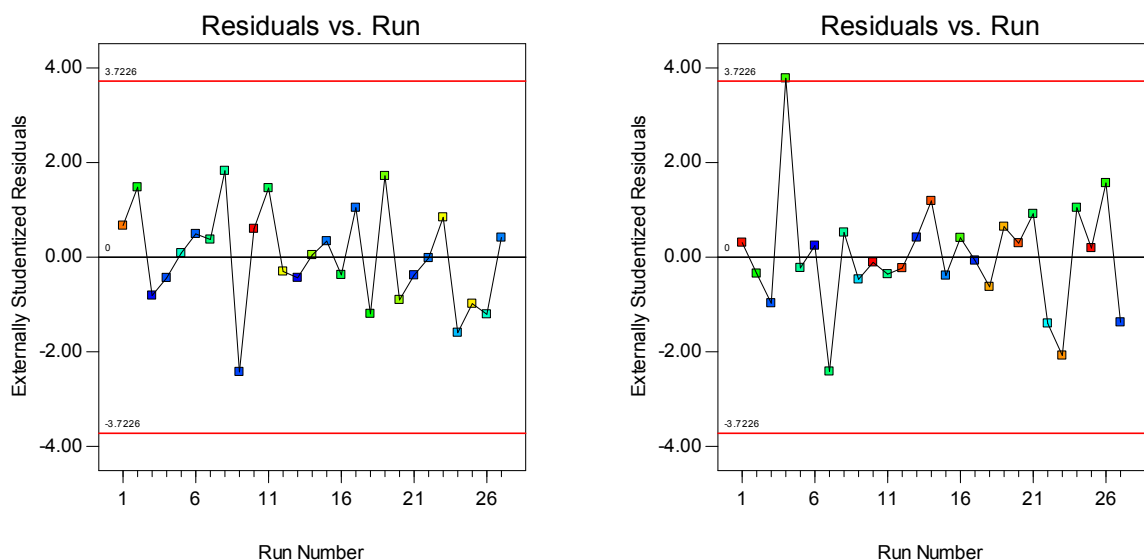


Figure IV.11: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Fa, Fr et Ft) obtenues avec le cermet non revêtu.

Les graphiques des probabilités normales des résidus pour, Ra obtenu avec l'outil cermet revêtu et non revêtu sont illustrés dans les figures (IV.12 a et b), ces figures indiquent que les résidus se trouvent très proches par rapport la ligne droite de la normalité, et la normalité semble acceptable, en plus les figures (IV.13 a et b) sont une illustration des résidus par essais. En effet, ont indiqué une distribution acceptable par rapport la ligne moyenne.



(a) (b)
 Figure IV.12 : Probabilités normales des erreurs pour,
 (a): Ra obtenue avec l'outil cermet revêtu;
 (b): Ra obtenue avec l'outil cermet non revêtu



(a) (b)
 Figure IV.13: Illustration des résidus par essais,
 (a): pour Ra obtenue avec l'outil cermet revêtu;
 (b): pour Ra obtenue avec l'outil cermet non revêtu

IV.2.3 Impact du revêtement sur la rugosité et les efforts de coupe

L'objectif de ce travail est l'étude de l'impact du revêtement sur la qualité des surfaces usinées ainsi que sur les efforts de coupe dans une opération de tournage à sec de l'acier 100Cr6. Pour cette raison les essais expérimentaux ont été réalisés avec deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu de géométrie et de substrat identique seulement différents du revêtement. En plus, l'effet de l'usure a été négligé par l'utilisation de nouvelle arête de coupe pour chaque essai. Les figures (IV.14 a - d) sont des illustrations de comparaison entre les résultats expérimentaux de la rugosité (R_a) et des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t) obtenue avec les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. Selon la figure (IV.14 a) le cermet revêtu (TiCN/TiN), semblé donne la meilleure qualité puisqu'il a atteint des valeurs les plus faibles par rapport aux autres plaquettes cermet non revêtu. Cela peut être expliqué par le fait qu'en travaillant avec des vitesses de coupe élevées les conditions de formation et d'évacuation du copeau s'améliorent grâce à la présence de la couche de revêtement du (TiCN), et par conséquent les efforts de coupe diminuent ce qui permet de travailler dans un système stable. En outre, L'analyse comparative de l'impact du revêtement sur le comportement dynamique illustré par les figures (IV.14 a, b et c), montrent que les outils cermets revêtus (TiCN/TiN) donnent des efforts de coupe plus faibles par rapport aux outils cermets non revêtus. Ceci pour toute la plage de vitesse de coupe testée. Les performances du revêtement sont surtout remarquées pour les grandes vitesses de coupe, où les plaquettes cermet revêtu (TiCN/TiN) ont donné les plus faibles valeurs des efforts. L'explication de la variabilité de ces résultats réside dans le fait que le comportement à l'usure de ces matériaux est différent. Plus le matériau est résistant à l'usure plus les surfaces de contact et de frottement à l'interface (outil / pièce) sont moindres. Par conséquent les efforts engendrés sont plus faibles [37, 30].

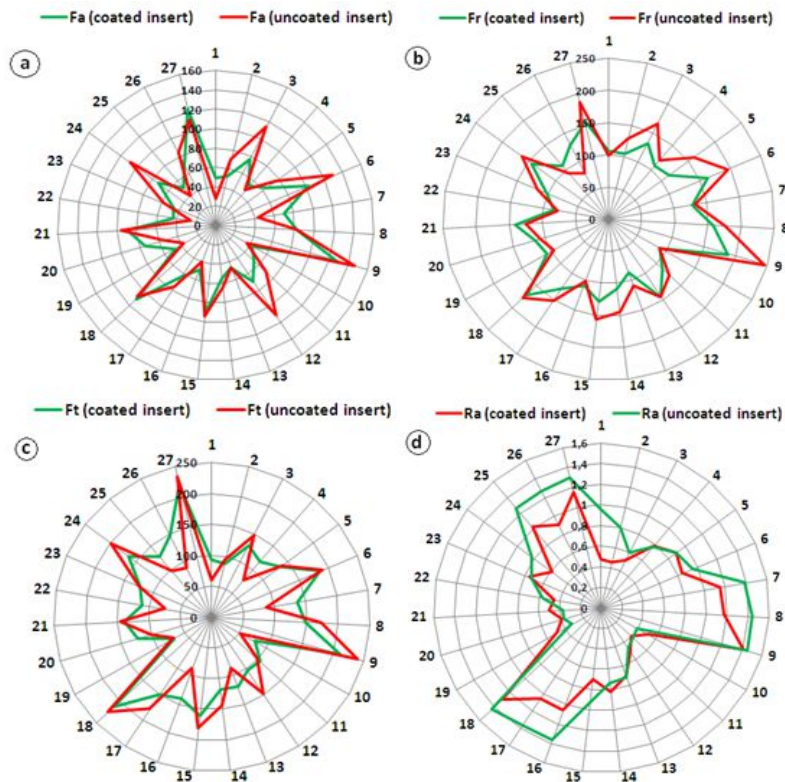


Figure IV.14 : Effet du revêtement sur la rugosité (Ra) et les efforts de coupe (Fa, Fr et Ft)

IV.2.4 Analyse des surfaces de réponse

Les surfaces de réponse sont un bon moyen d'analyse graphique le plus explicatif, cette méthode de représentation graphique est beaucoup utilisée dans le domaine de la modélisation de l'espace expérimental. Sont utilisées pour déterminer la relation entre trois variables, leur déduction basée sur l'interpolation pour produire des surfaces continues dans un repère de trois dimensions, dont on affecte les deux facteurs variables aux axes (x et y) et l'axe (z) représente les valeurs de la réponse étudiée. Dans notre étude nous avons utilisé cette technique de représentation pour construire une cartographie de la variation de la rugosité des surfaces usinées et des composantes de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 non trempé en utilisant le logiciel « Design Expert version 10 ». Les figures (IV.15, IV.16 et IV.17) montrent la variation du critère de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres de coupe notamment la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. La figure (IV.15) est une comparaison entre les résultats de la rugosité (Ra) en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance (v et f) obtenus avec un outil cermet revêtu et non revêtu. L'analyse de cette figure fait ressortir que l'avance a un effet significatif sur la rugosité de la surface usinée et sa variation est très élevée une fois comparée avec les autres paramètres de coupe. D'après ces résultats nous pouvons constater aussi que la vitesse de coupe et la vitesse d'avance ont des influences inverses sur la qualité de l'état de

surface. En effet l'augmentation de la vitesse de coupe améliore légèrement l'état de surface. Par contre, avec l'accroissement de la vitesse d'avance l'état de surface se dégrade. D'un autre côté la figure (IV.15) montre que l'outil cermet revêtu a donné des valeurs de la rugosité (R_a) inférieures à celles obtenues avec un outil cermet non revêtu. En effet, pour une vitesse d'avance élevée de ($f=0.16$ mm/tr) l'outil cermet a donné une rugosité près de ($R_a=1\mu\text{m}$), par contre l'outil cermet non revêtu a donné une rugosité de ($R_a=1.40\mu\text{m}$).

La figure (IV.16) est une comparaison entre les résultats de la rugosité (R_a) en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe (v et d) obtenus avec un outil de coupe cermet revêtu et un outil de coupe cermet non revêtu. D'après ces résultats nous constatons que la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont des influences inverses sur la qualité de l'état de surface. En effet l'augmentation de la vitesse de coupe améliore légèrement l'état de surface. Par contre, avec l'accroissement de la profondeur de passe l'état de surface se dégrade. Cependant, dans tous les cas, les variations de la rugosité R_a , sont minimales, comparées avec celles dues à l'avance. La figure (IV.17) est une comparaison entre les résultats de la rugosité (R_a) en fonction de la vitesse d'avance et la profondeur de passe (f et d) obtenus avec un outil de coupe cermet revêtu et un outil de coupe cermet non revêtu.

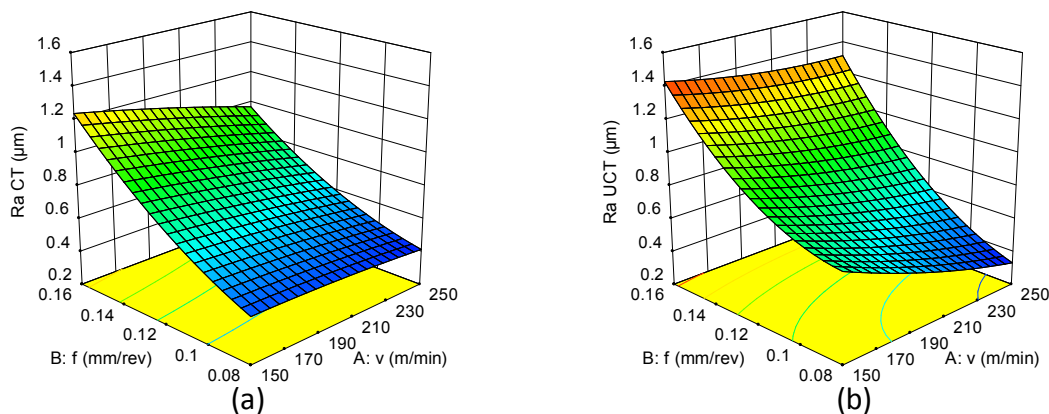


Figure IV. 15: Variations de la rugosité (R_a) en fonction de (V et f).
(a) obtenu avec l'outil cermet revetu et (b) avec l'outil cermet non revetu

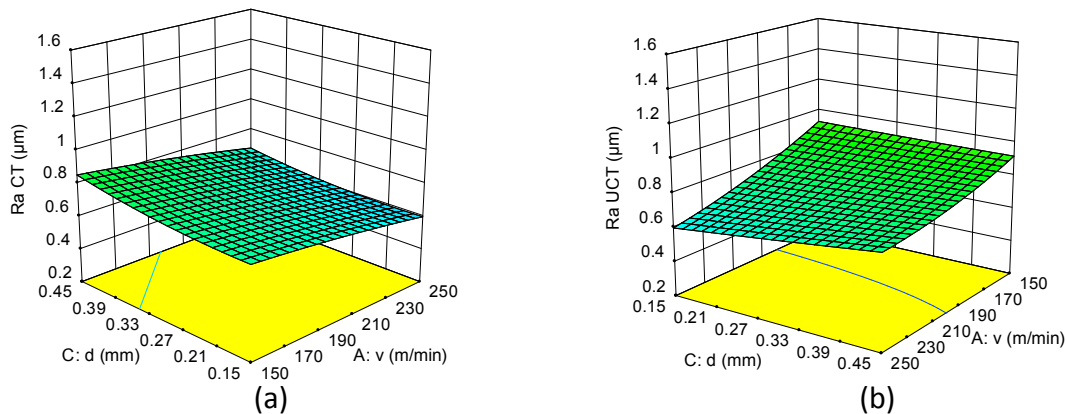


Figure IV. 16: Variations de la rugosité (Ra) en fonction de (V et d).
(a) obtenus avec l'outil cermet revêtu et (b) avec l'outil cermet non revêtu

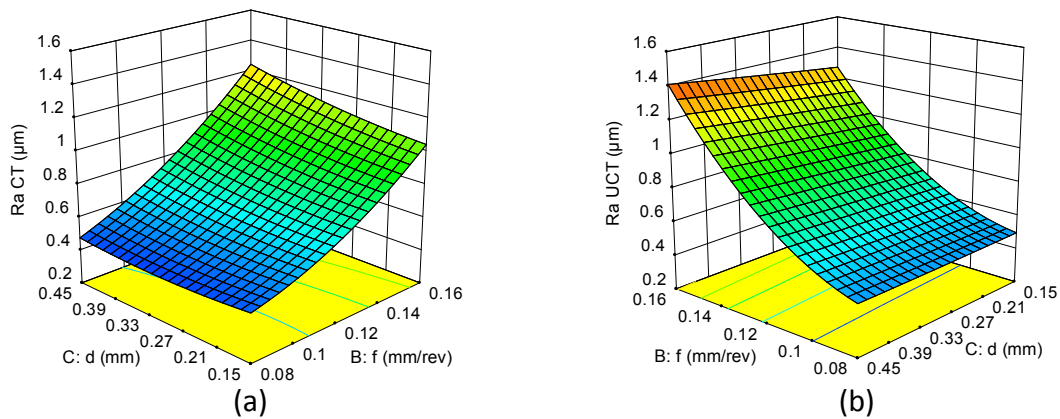


Figure IV. 17: Variations de la rugosité (Ra) en fonction de (f et d).
(a) obtenus avec l'outil cermet revêtu et (b) avec l'outil cermet non revêtu

Les figures (IV.18 - IV.26) montrent la variation des composantes de l'effort de coupe (axial, radial et tangentiel) en fonction des paramètres de coupe notamment la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Ces figures sont une comparaison entre les résultats obtenus avec un outil de coupe cermet revêtu et non revêtu. Globalement, ces figures montrent que l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à la diminution des efforts de coupe, alors que l'augmentation de l'avance et de la profondeur de passe contribue à l'accroissement des efforts de coupe. Ceci est interprété par l'augmentation de la section du copeau ($S = f \times a_p$). Par conséquent la plus grande influence est affectée à la profondeur de passe suivi par l'avance. Par contre la vitesse de coupe a une influence relativement faible. Les figures (IV.18) montrent les résultats de la composante de l'effort de coupe axial (F_a) en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour une profondeur de passe fixé à une valeur moyenne. L'analyse de ces illustrations indique que l'outil cermet revêtu permis de donner des valeurs inférieures à celle-ci de l'outil de coupe non revêtu.

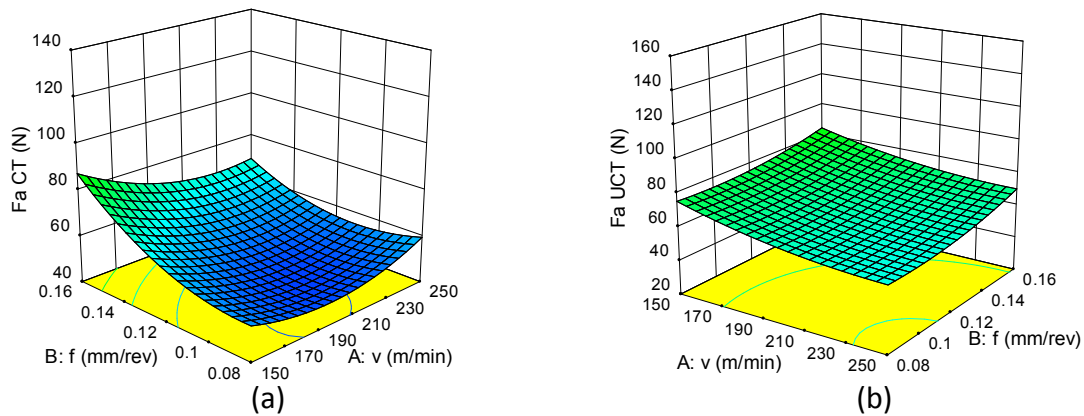


Figure IV. 18 : Variations de l'effort de coupe axial (F_a) en fonction de (V et f).
 (a) obtenus avec l'outil cermet revetu et (b) avec l'outil cermet non revetu

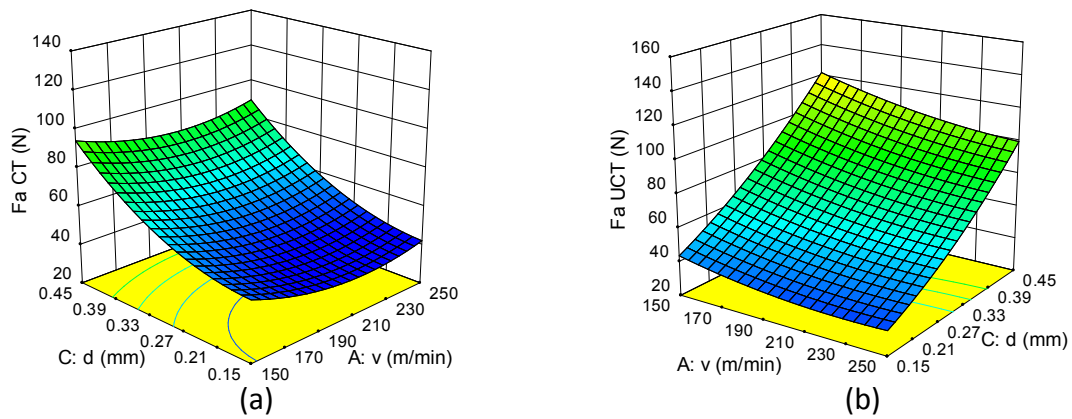


Figure IV. 19: Variations de l'effort de coupe axial (F_a) en fonction de (V et d).
 (a) obtenus avec l'outil cermet revetu et (b) avec l'outil cermet non revetu

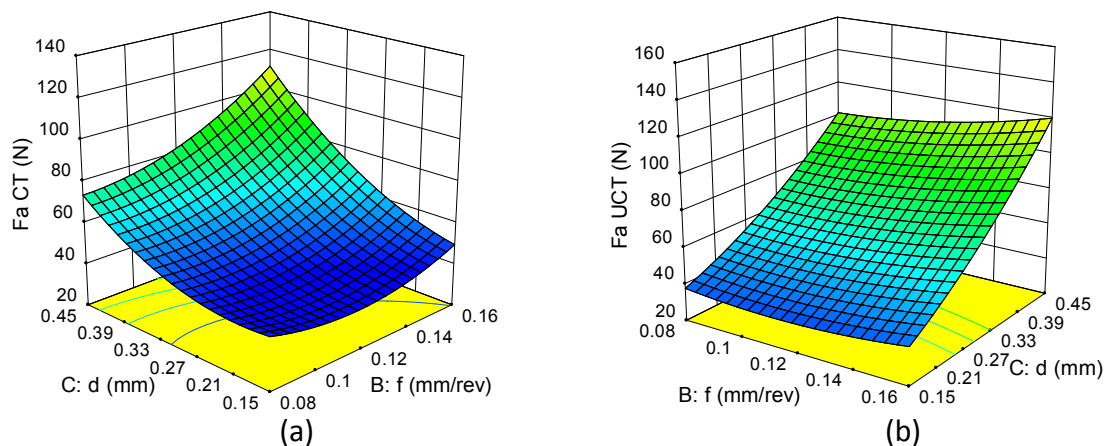


Figure IV.20 : Variations de l'effort de coupe axial (F_a) en fonction de (f et d).
 (a) obtenus avec l'outil cermet revetu et (b) avec l'outil cermet non revetu

Les figures (IV.21 – IV.23) montrent les résultats de la composante de l'effort de coupe radiale (F_r) en fonction des paramètres de coupe, obtenus avec l'outil cermet revêtu et non revêtu.

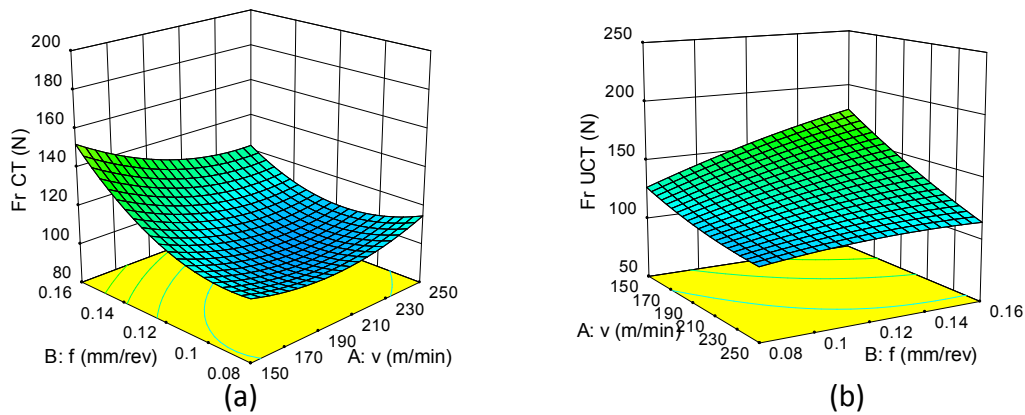


Figure IV. 21: Variation de l'effort de coupe radiale (F_r) en fonction de (V et f).
(a) obtenus avec l'outil cermet revêtu et (b) avec l'outil cermet non revêtu

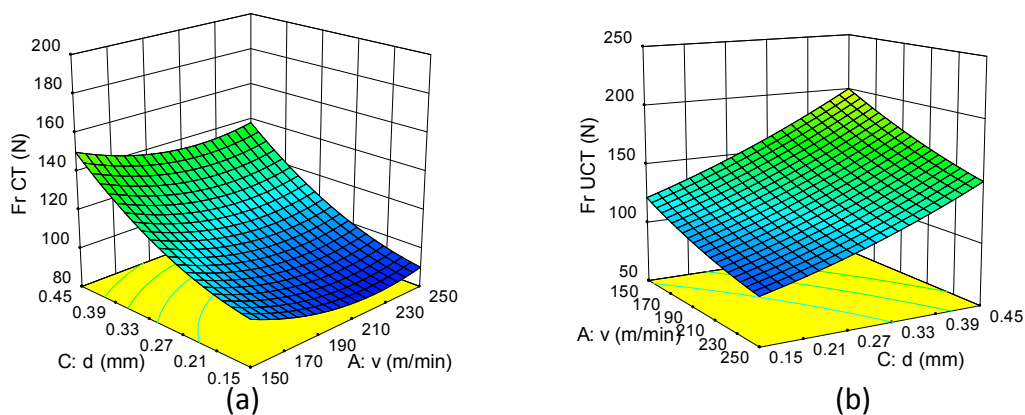


Figure IV.22 : Variation de l'effort de coupe radiale (F_r) en fonction de (V et d).
(a) obtenus avec l'outil cermet revêtu et (b) avec l'outil cermet non revêtu

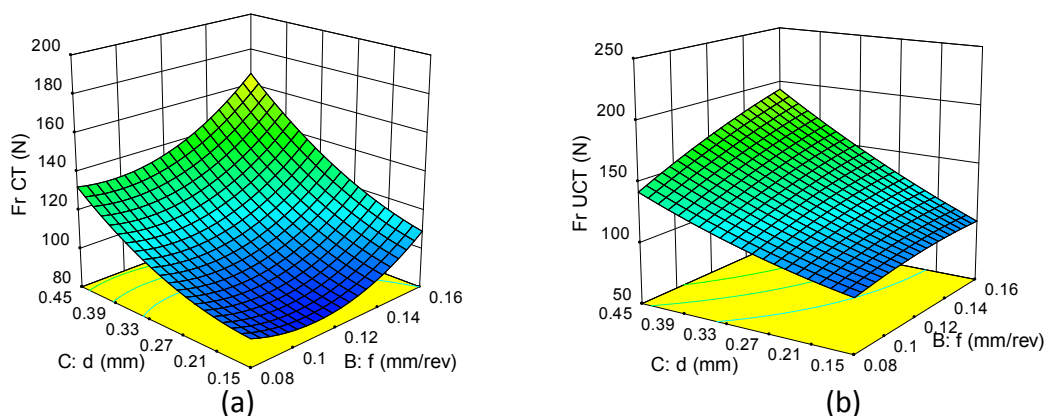


Figure IV. 23: Variation de l'effort de coupe radiale (F_r) en fonction de (f et d).
(a) obtenus avec l'outil cermet revêtu et (b) avec l'outil cermet non revêtu

Les figures (IV.24 – IV.26) montrent les résultats de la comparaison obtenus avec l'outil cermet revêtu et non revêtu, de la composante de l'effort de coupe tangentiel (F_t) en fonction des paramètres de coupe.

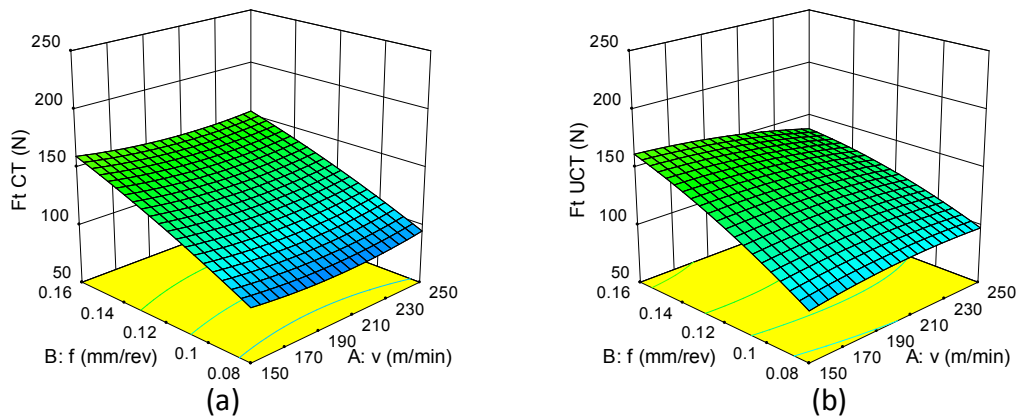


Figure IV. 24: Variation de l'effort de coupe tangentiel (F_t) en fonction de (v et f).
(a) obtenus avec l'outil cermet revêtu et (b) avec l'outil cermet non revêtu

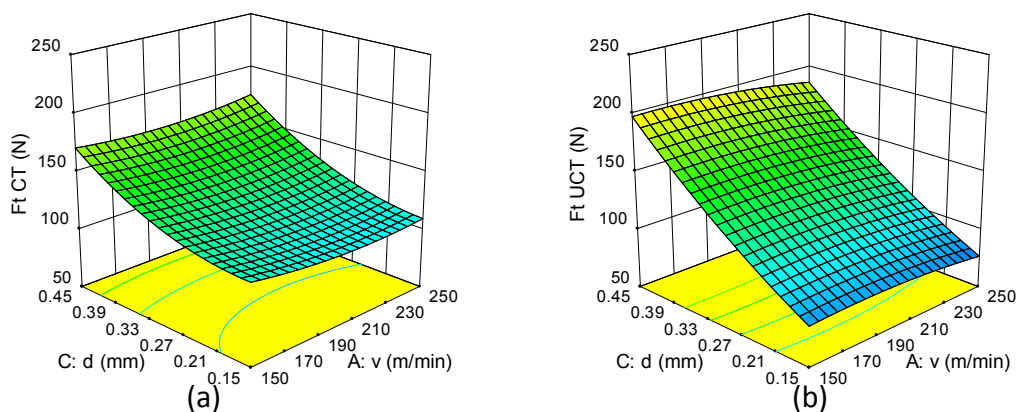


Figure IV. 25: Variation de l'effort de coupe tangentiel (F_t) en fonction de (v et d).
(a) obtenus avec l'outil cermet revêtu et (b) avec l'outil cermet non revêtu

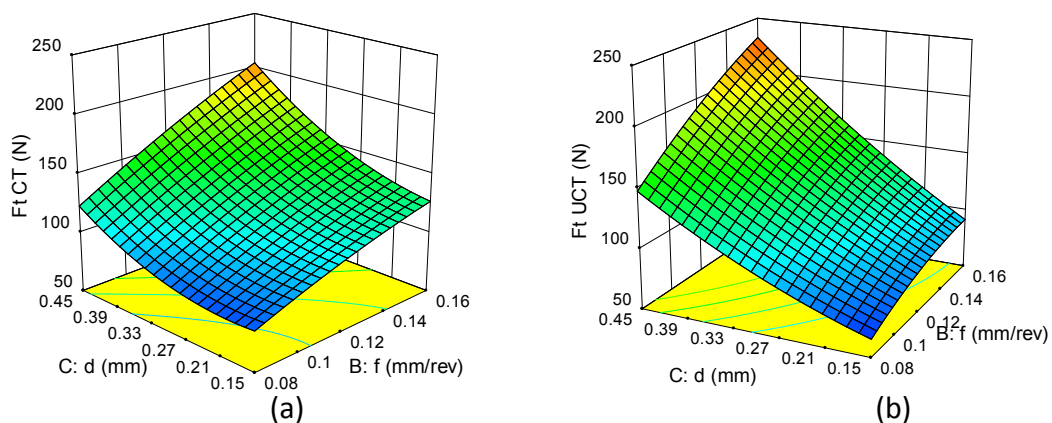


Figure IV. 26: Variation de l'effort de coupe tangentiel (F_t) en fonction de (f et d).
(a) obtenus avec l'outil cermet revêtu et (b) avec l'outil cermet non revêtu

IV.2.5 Optimisation multi objectif des conditions de coupe

La fonction de désirabilité est une technique récente très utilisée pour l'optimisation simultanée de plusieurs réponses. Cette technique consiste à réunir plusieurs équations exprimant des réponses différentes et ayant des facteurs communs, en une seule fonction, nommée la réponse composite ou fonction de désirabilité. Par la suite, après avoir imposé les critères avec laquelle la réponse doit rester près de la zone désirée, il suffit d'appliquer les techniques de surface de réponse dédiées à l'optimisation.

L'objectif de notre travail est de rechercher les valeurs optimales des paramètres de coupe (V , f , d) qui peuvent produire la meilleure qualité de la surface usinée (R_a) d'une part, avec un minimum d'effort de coupe (F_{tot}) qui représente la résultante des trois composantes de l'effort de coupe afin d'améliorer la qualité des surfaces usinées en tournage. Et d'autre part, avec le maximum de volume de copeaux enlève afin d'améliorer la productivité en tournage.

Dans notre travail, ceci revient à la minimisation simultanée des réponses (R_a , F_{tot}) illustrées par le système suivant:

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (IV.13)$$

$$F(x) = -DF$$

Dans l'équation (IV.13) w_i , d_i et i sont des variables ciblés par l'utilisateur en fonction de leur expérience permettant à celui-ci d'indiquer les limites de la fonction de désirabilité autour de la valeur cible (T_i) pour une réponse i .

- Pour atteindre une valeur spécifique de T_i , la fonction élémentaire de désirabilité d_i calculée par les équations suivantes :

$$d_i = 0 \quad \text{Si} \quad Y_i \leq \text{Min}_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Min}_i}{T_i - \text{Min}_i} \right] \quad \text{Si} \quad \text{Min}_i \leq Y_i \leq T_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Max}_i}{T_i - \text{Max}_i} \right] \quad \text{Si} \quad T_i \leq Y_i \leq \text{Max}_i$$

$$d_i = 0 \quad \text{Si} \quad Y_i \geq \text{Max}_i$$

(IV.14)

Les quantités Min_i et Max_i représentent les limites de désirabilité pour la réponse i . L'approche de la fonction de désirabilité repose en effet sur l'utilisation de la méthode de la surface de

réponse pour la modélisation polynomiale de chaque réponse $Y_i(x)$, par une substitution des polynômes dans les équations (IV.14) et (IV.15), afin de faire encore une substitution par les désirabilités individuelles dans l'équation (IV.13). Finalement, il reste une seule fonction objective pour chercher la solution x , tout en maximisant la désirabilité totale $F(x)$.

- Pour une maximisation, la fonction élémentaire de désirabilité pour la réponse Y_i calculé par les équations suivantes :

$$di=0 \quad \text{Si} \quad Y_i \leq Min_i$$

$$di = \left[\frac{Y_i - Min_i}{Max_i - Min_i} \right] \quad \text{Si} \quad Min_i \leq Y_i \leq Max_i \quad (IV.15)$$

$$di=1 \quad \text{Si} \quad Y_i \geq Max_i$$

- Pour une minimisation, la fonction élémentaire de désirabilité pour la réponse Y_i calculé par les équations suivantes :

$$di=1 \quad \text{Si} \quad Y_i \leq Min_i$$

$$di = \left[\frac{Max_i - Y_i}{Max_i - Min_i} \right] \quad \text{Si} \quad Min_i \leq Y_i \leq Max_i \quad (IV.16)$$

$$di=0 \quad \text{Si} \quad Y_i \geq Max_i$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^p w_i \cdot |d_i(Y_i) - d_i(T_i)|}{p} \quad (IV.17)$$

Avec :

– $d_i(Y_i)$ est la désirabilité individuelle pour la réponse Y_i

– $d_i(T_i)$ est la désirabilité individuelle ciblée T_i pour chaque réponse

Dans notre étude la fonction de désirabilité globale sera évaluée par l'entremise de l'équation (V.10), où le degré d'importance W_i sont tels que:

$$\sum_{i=1}^p w_i = 1 \quad (IV.18)$$

Où : W_i est le degré d'importance pour chaque réponse individuelle.

IV.2.5.1 Optimisation multi objectifs pour minimiser (Ra) et minimiser (F_{tot})

L’objectif de cette partie est de minimiser la rugosité (Ra) et minimiser la résultante de l’effort de coupe (F_{tot}) lors l’usinage de l’acier 100Cr6 non trempé avec les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. L’équation de la résultante de l’effort de coupe (F_{tot}) s’écrit

$$F_{tot} = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \tag{IV-19}$$

Les contraintes utilisées par le processus d’optimisation des paramètres de coupe (V, f, d) qui peuvent produire la meilleure qualité de la surface usinée (Ra) avec un minimum d’effort de coupe résultant sont illustrés dans le tableau (IV.11).

Tableau IV.11 : Contraintes d’optimisation des paramètres d’usinage

Conditions	Objectifs	Limites inférieure	Limites supérieure
V (m/min)	Intervalle	150	250
f (mm/tr)	Intervalle	0.08	0.16
d (mm)	Intervalle	0.15	0.45
Ra (mm) cermet revêtu	Minimisé	0,39	1,42
F _{tot} (N) cermet revêtu	Minimisé	125.70	310.44
Ra (mm) cermet non revêtu	Minimisé	0,32	1,46
F _{tot} (N) cermet non revêtu	Minimisé	109.85	373.62

Les solutions optimales trouvées pour les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu sont présentées par les tableaux (IV.12 et IV.13) respectivement, les résultats sont classés par ordres décroissants de la désirabilité. L’utilisation d’un outil de coupe cermet revêtu a permis de donner une meilleure valeur de la rugosité (Ra) de (0.30µm) avec un minimum d’effort de coupe totale (F_{tot}) de (117,736N) pour un taux de désirabilité de (0,985) dans l’intervalle des paramètres de coupe utilisés. Par contre, l’utilisation d’un outil de coupe cermet non revêtu a permis de donner une meilleure valeur de la rugosité (Ra) de (0.47µm) avec un minimum d’effort de coupe totale (F_{tot}) de (135.417N) pour un taux de désirabilité de (0.934) dans l’intervalle des paramètres de coupe utilisés.

Tableau IV.12 : Solutions optimales obtenues avec l’outil cermet revêtu

Num. Solutions	V (m/min)	f (mm/tr)	d (mm)	Ra (µm)	F _{tot} (N)	Desirabilité
<u>1</u>	<u>250,000</u>	<u>0,080</u>	<u>0,15</u>	<u>0,303</u>	<u>117,736</u>	<u>0,985</u>
2	249,999	0,080	0,15	0,303	117,737	0,985
3	249,594	0,080	0,15	0,305	117,749	0,985

Tableau IV.13 : Solutions optimales obtenu avec l’outil cermet non revêtu

Num. Solutions	V (m/min)	f (mm/tr)	d (mm)	Ra (µm)	F _{tot} (N)	Desirabilité
<u>1</u>	<u>206.072</u>	<u>0.08</u>	<u>0.20</u>	<u>0.47</u>	<u>135.417</u>	<u>0.934</u>
2	205.814	0.08	0.20	0.47	135.402	0.934
3	205.442	0.08	0.20	0.47	135.391	0.934

Les résultats de la variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe (V , f et d) de l'optimisation multi objectif selon les deux critères imposé de minimiser la rugosité et de minimiser l'effort de coupe totale obtenue avec les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu sont présentés par les figures (IV.27 – IV.32).

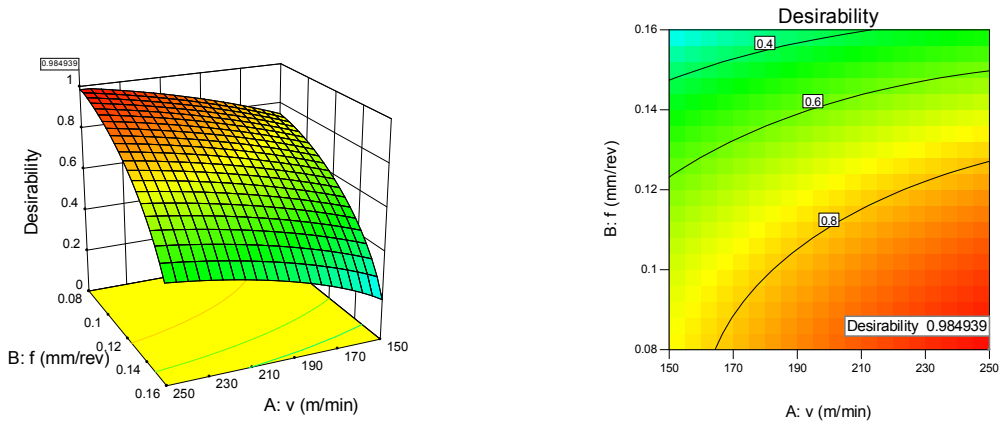


Figure IV.27 : Contour et surface de réponse de la variation de la désirabilité en fonction de (v et f) obtenus avec l'outil cermet revêtu

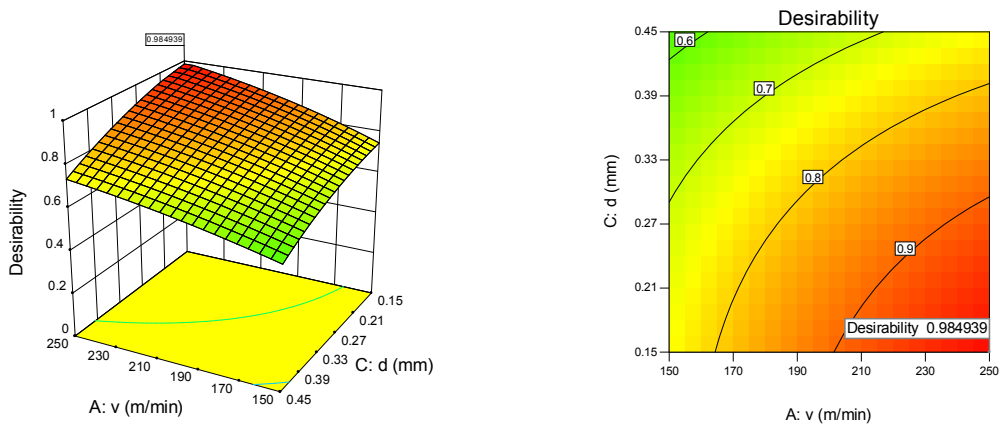


Figure IV.28 : Contour et surface de réponse de la variation de la désirabilité en fonction de (V et d) obtenus avec l'outil cermet revêtu

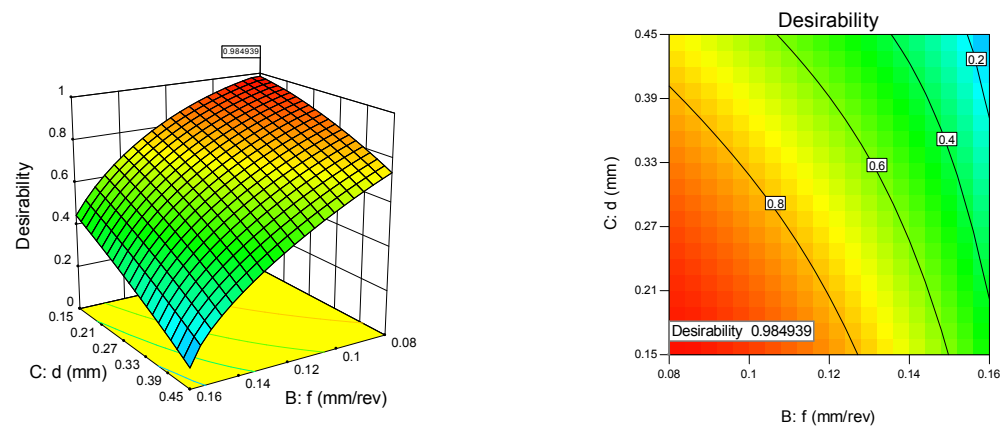


Figure IV.29 : Contour et surface de réponse de la variation de la désirabilité en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revêtu

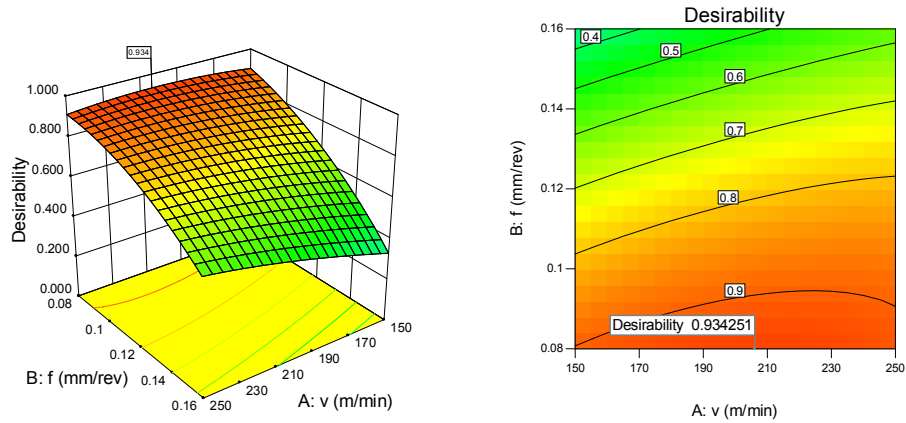


Figure IV.30 : Contour et surface de réponse de la variation de la désirabilité en fonction de (V et f) obtenus avec l’outil cermet non revêtu

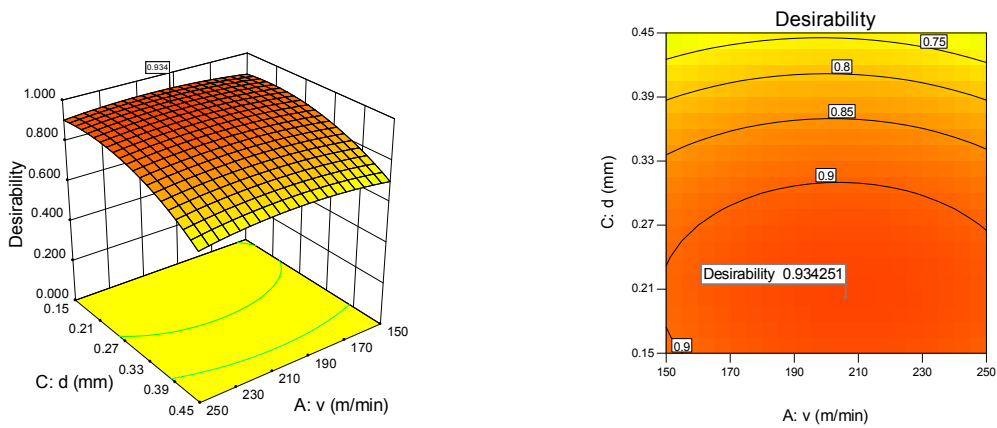


Figure IV.31 : Contour et surface de réponse de la variation de la désirabilité en fonction de (V et d) obtenus avec l’outil cermet non revêtu

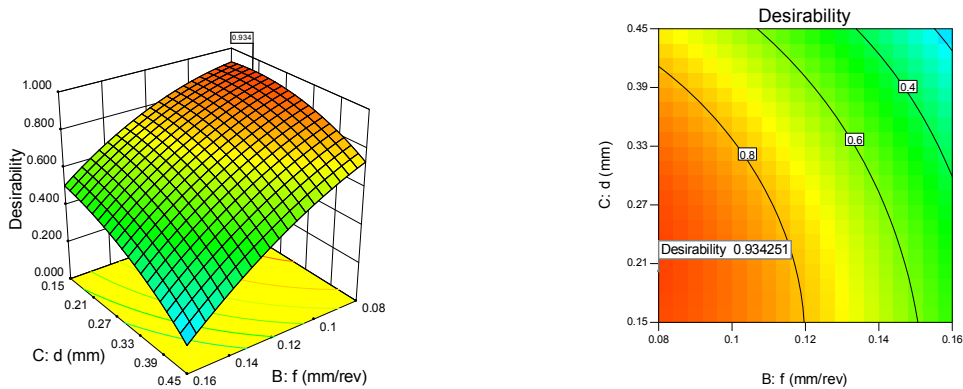


Figure IV.32 : Contour et surface de réponse de la variation de la désirabilité en fonction de (f et d) obtenus avec l’outil cermet non revêtu

IV.2.5.2 Optimisation multi objectif pour minimiser (Ra) et maximiser (Q)

L’objectif de cette partie est de minimiser la rugosité (Ra) et maximiser la productivité lors l’usinage de l’acier 100Cr6 non trempé avec les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. La productivité (Q) est calculée par la formule suivante :

$$Q = v * f * d \quad (IV-20)$$

Les contraintes utilisées par le processus d'optimisation des paramètres de coupe (V, f, d) qui peuvent produire la meilleure qualité de la surface usinée (Ra) avec un maximum de productivité sont illustrés dans le tableau (IV.14).

Tableau IV.14 : Les contraintes d’optimisation des paramètres d'usinage

Conditions	Objectifs	Limites inférieure	Limites supérieure
V (m/min)	Intervalle	150	250
f (mm/tr)	Intervalle	0.08	0.16
d (mm)	Intervalle	0.15	0.45
Ra (mm) cermet revêtu	Minimisé	0.39	1.42
Q (cm ³ /min) cermet revêtu	Maximisé	1.8	18
Ra (mm) cermet non revêtu	Minimisé	0,32	1,46
Q (cm ³ /min) cermet non revêtu	Maximisé	1.8	18

Les solutions optimales trouvées pour les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu sont présentées par les tableaux (IV.15 et IV.16) respectivement, les résultats sont classés par ordres décroissants de la désirabilité. L’utilisation d’un outil de coupe cermet revêtu a permis de donner une meilleure valeur de la rugosité (Ra) de (0.63µm) avec un maximum de productivité (Q) de (12.75 cm³/mn) pour un taux de désirabilité de (0.72) dans l’intervalle des paramètres de coupe utilisés. Par contre, l’utilisation d’un outil de coupe cermet non revêtu a permis de donner une meilleure valeur de la rugosité (Ra) de (0.54µm) avec un maximum de productivité (Q) de (11.62 cm³/mn) pour un taux de désirabilité de (0.69) dans l’intervalle des paramètres de coupe utilisés. Les valeurs optimales obtenues de la rugosité (Ra) et la productivité (Q) avec l’outil cermet revêtu choisi en termes de désirabilité plus élevée ont été à une vitesse de coupe (v) de 250m/mn, une vitesse d’avance (f) de 0.102 mm/rev et une profondeur de passe (d) de 0.45 mm. Par cotre, pour l’outil de coupe cermet non revêtu les paramètres de coupes optimales ont été à une vitesse de coupe (v) de 250m/mn, une vitesse d’avance (f) de 0.113 mm/rev et une profondeur de passe (d) de 0.45 mm.

Tableau IV.15 : Solutions optimales obtenu avec l’outil cermet revêtu

Num. Solutions	V (m/min)	f (mm/tr)	d (mm)	Ra (µm)	Q(N)	Désirabilité
<u>1</u>	<u>250</u>	<u>0.113</u>	<u>0.45</u>	<u>0.631</u>	<u>12.75</u>	<u>0.720</u>
2	250	0.113	0.45	0.634	12.75	0.720
3	250	0.113	0.45	0.628	12.75	0.720

Tableau IV.16 : Solutions optimales obtenu avec l’outil cermet non revêtu

Num. Solutions	V (m/min)	f (mm/tr)	d (mm)	Ra	Q	Désirabilité
<u>1</u>	<u>250</u>	<u>0.102</u>	<u>0.45</u>	<u>0.545</u>	<u>11.629</u>	<u>0.698</u>
2	250	0.102	0.45	0.542	11.602	0.698
3	250	0.102	0.45	0.549	11.673	0.698

Les résultats des variations de la désirabilité en fonction des conditions de coupe (V , f et d) de l'optimisation multi objectif selon les deux critères imposé de minimiser la rugosité et maximiser la productivité obtenue avec les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu sont présentés par les figures (IV.33 – IV.38).

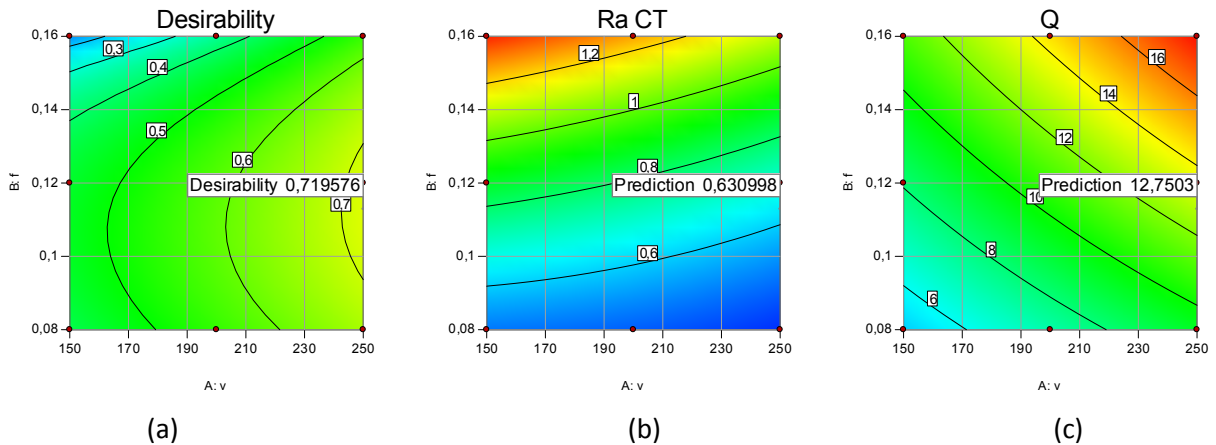


Figure IV.33: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet revêtu en fonction de (V et f) : (a) Variations de la désirabilité, (b) de la rugosité (Ra) et (c) de la productivité (Q).

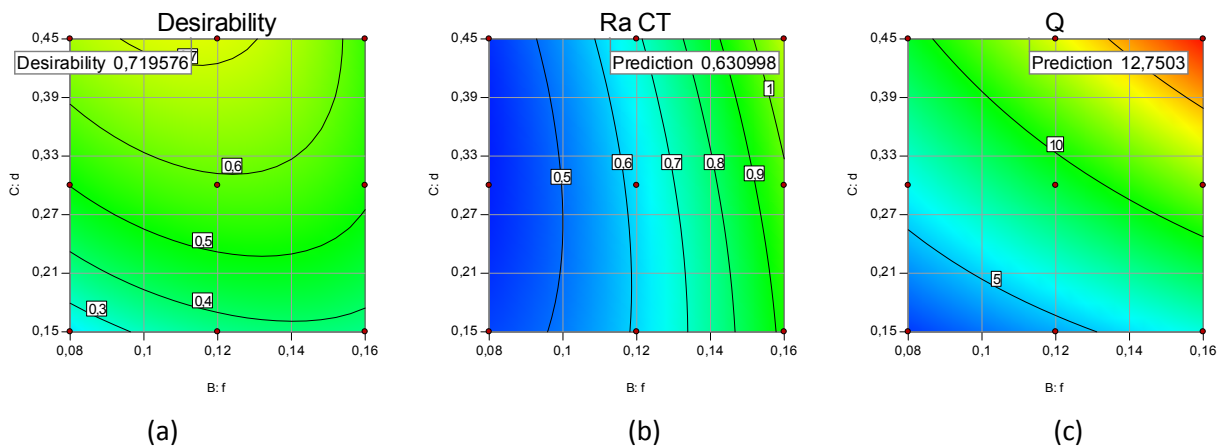


Figure IV.34: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet revêtu en fonction de (f et d) : (a) Variations de la désirabilité, (b) de la rugosité (Ra) et (c) de la productivité (Q).

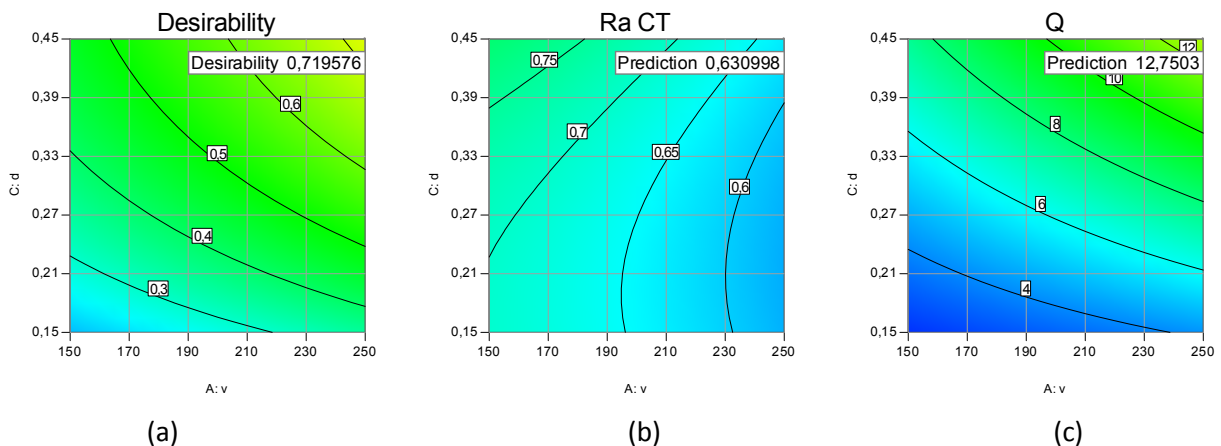
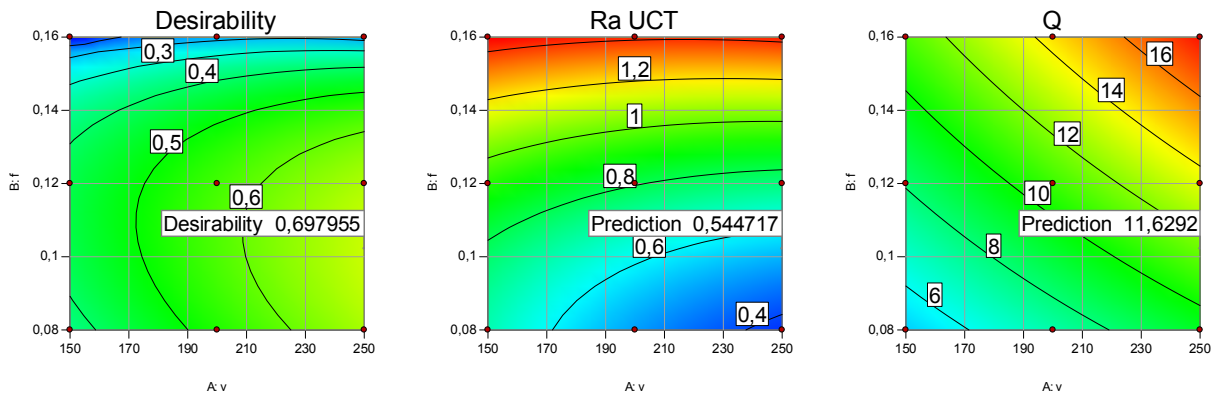


Figure IV.35: Contour des réponses obtenues avec l'outil cermet revêtu en fonction de (V et d) : (a) Variations de la désirabilité, (b) de la rugosité (Ra) et (c) de la productivité (Q).

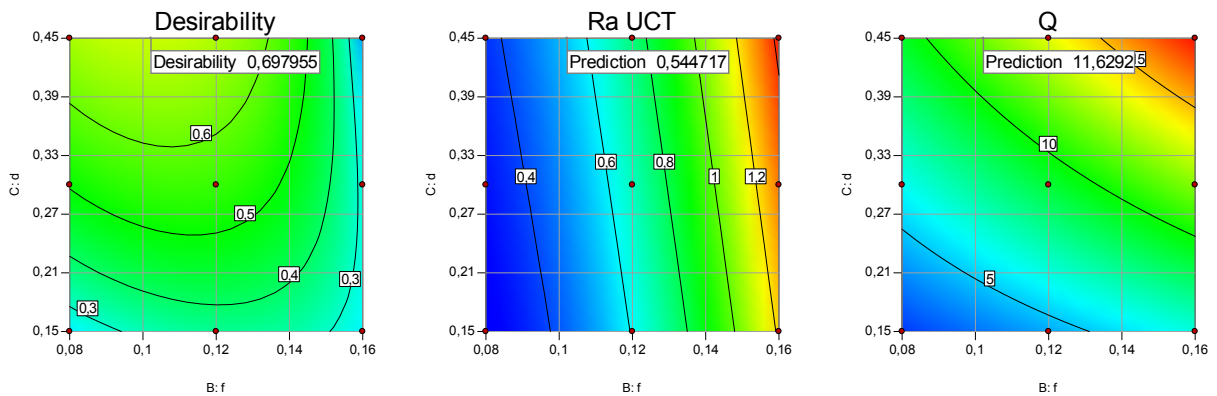


(a)

(b)

(c)

Figure IV.36: Contour des réponses obtenues avec l’outil cermet non revêtu en fonction de (V et f) : (a) Variations de la désirabilité, (b) de la rugosité (Ra) et (c) de la productivité (Q).

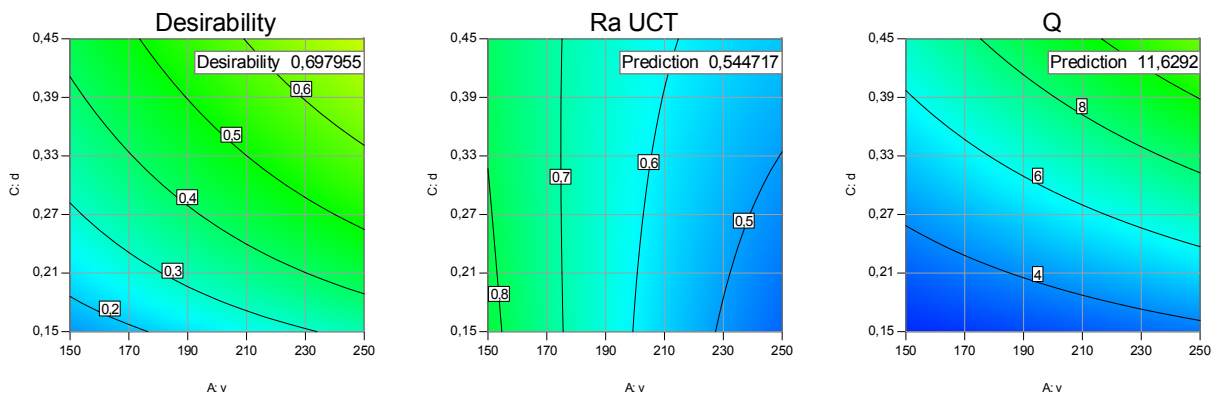


(a)

(b)

(c)

Figure IV.37: Contour des réponses obtenues avec l’outil cermet non revêtu en fonction de (f et d) : (a) Variations de la désirabilité, (b) de la rugosité (Ra) et (c) de la productivité (Q).



(a)

(b)

(c)

Figure IV.38: Contour des réponses obtenues avec l’outil cermet non revêtu en fonction de (V et d) : (a) Variations de la désirabilité, (b) de la rugosité (Ra) et (c) de la productivité (Q).

Partie B: Tournage dur de l'acier Acier 42CrMo4 (HRC48)

IV.3 Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude expérimentale du tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC) avec des outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. L'objectif de cette partie est d'étudier l'effet des paramètres de coupe et le revêtement de l'outil de coupe sur la qualité de la surface usinée en tournage dur.

IV.4 Analyse et discussions des résultats expérimentaux

Afin de modéliser l'évolution des critères de la rugosité (Ra et Rt) en tournage dur (TD) de l'acier trempé 42CrMo4 avec des outils de coupe cermets revêtus et non revêtus, un plan de surface de réponse du type Box-Behnken a été construit. Ce plan a été construit avec la variation de trois facteurs variables qui sont la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe. Ce plan possède 12 points expérimentaux, en plus les trois points expérimentaux (03) ajoutés au centre du domaine d'étude, donc 12 + 3 essais, soit 15 essais comme nombre total des essais semblent nécessaire à notre plan d'expérience. Les conditions de coupe sont représentées par le tableau IIV.17.

Tableau IV.17: Conditions de coupe du plan d'expérience de Box-Behnken

Niveaux	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)
Bas	60	0.08	0.25
Moyen	90	0.12	0.50
Haut	120	0.16	0.75

Les essais réalisés selon cette méthode de planification des expériences ont permis l'obtention des résultats de la rugosité (Ra et Rt) qui sont présentés par le tableau IV.18.

Tableau IV.18 : Résultats expérimentaux selon le plan Box-Behnken

Num Essai	Paramètres de coupe			Cermet revêtu			Cermet non revêtu			productivité Q (cm ³ /mn)
	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)	
1	90	0,12	0,5	0,92	4,88	6,35	1,67	7,68	9	5,4
2	60	0,12	0,75	1,5	8,55	10	2,23	14,69	16,33	5,4
3	90	0,16	0,25	0,94	5,88	6,6	1,28	6,8	7,33	3,6
4	90	0,08	0,25	0,56	3,19	3,4	0,68	3,69	4,46	1,8
5	90	0,08	0,75	1,62	9,11	10,53	1,41	6,49	7	5,4
6	90	0,12	0,5	1,2	5,86	7,27	1,53	7,55	9,18	5,4
7	90	0,16	0,75	1,27	6,1	7,66	2,23	10,57	12,34	10,8
8	60	0,12	0,25	0,69	3,49	3,85	1,42	6,97	7,85	1,8
9	90	0,12	0,5	1,22	5,88	7,27	1,53	7,55	9,18	5,4
10	60	0,08	0,5	0,92	3,97	5,5	1,28	6,51	7,12	2,4
11	120	0,16	0,5	1,53	8,36	9,44	2,56	12,74	16,83	9,6
12	120	0,08	0,5	1,8	7	9	2,18	10,61	11,91	4,8
13	120	0,12	0,25	1,24	9,18	10,24	2,21	11,92	17,81	3,6
14	120	0,12	0,75	1,74	13,26	14,67	2,04	9,64	11,9	10,8
15	60	0,16	0,5	1,72	6,84	8,33	1,98	8,64	11,22	4,8

L'objectif de cette étude est la détermination des facteurs qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés. Dans La méthodologie des surfaces de réponse (MSR), la forme de la relation mathématique entre la réponse observée et les variables indépendantes peut être représentée comme suit :

$$Y = F(Vc, f, ap) \quad (IV.21)$$

Le modèle polynomial quadratique de second ordre adapté pour la régression, ce modèle s'appelle le modèle quadratique ce dernier peut être écrit comme suit :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i X_i + \sum_{i=1}^4 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^4 a_{ij} X_i X_j \quad (IV.22)$$

Où (Y) est la réponse observée, (a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}) représentent respectivement les termes des constantes du modèle (les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques). Les (X_i) représentent les variables indépendantes sous la forme codifiée.

L'utilisation du modèle quadratique est importante non seulement dans l'étude des facteurs dans leurs domaines de variation, mais également dans la localisation et l'observation de la région où la réponse s'approche de la valeur optimale. Les données nécessaires pour établir les modèles de réponse sont généralement rassemblées par la planification expérimentale.

IV.4.1 Analyse de l'effet des paramètres de coupe sur les critères de la rugosité

Les résultats d'ANOVA obtenus avec l'outil cermet revêtu du critère de la rugosité R_a sont illustrés par le tableau (IV.20). L'analyse de ces résultats fait ressortait que la vitesse de coupe (V), la profondeur de passe (d), l'interaction de la vitesse de coupe et l'avance ($V*f$), l'interaction de l'avance et la profondeur de passe ($V*d$) et le terme quadratique de la vitesse de coupe (v^2) ont tous un effet significatif sur la rugosité (R_a), en effet leur valeur du paramètre de test de signification a été inférieure à (0.05). La profondeur de passe a été le facteur le plus influent sur les valeurs de la rugosité avec un pourcentage de contribution de 42.32%. Suivi par celui du terme quadratique de la vitesse de coupe (v^2) avec un pourcentage de contribution de (13.25%), ensuite celui de l'interaction de la vitesse de coupe et l'avance ($V*f$) avec une valeur de (13.48%), par contre la vitesse de coupe a contribué avec un taux de (12.55%) seulement.

Les résultats d'ANOVA obtenus avec l'outil cermet revêtu du critère de la rugosité R_t sont présentés dans le tableau (IV.20), l'analyse de ces résultats fait ressortir que la vitesse de

coupe (V), la profondeur de passe (d) et le terme quadratique de la vitesse de coupe (v^2) ont tous un effet significatif sur la rugosité (R_t), en effet leur valeur du paramètre de test de signification a été inférieure à (0.05). Par contre les autres termes n'ont pas d'effets significatifs sur le critère de la rugosité R_t . En revanche la profondeur de passe semble à un effet très important, elle présente un pourcentage de contribution de (38.77%) suivi par celui de la vitesse de coupe est a donné une valeur de (27.01%) et ensuite celui du terme quadratique de la vitesse de coupe (v^2) avec un pourcentage de (11.40%).

Tableau IV.19 : Résultats d'ANOVA de la rugosité (R_a) obtenus avec l'outil cermet revêtu

Source	SS	DDL	MS	F-Value	p-value	PC%	Remarque
Model	2,06	9	0,23	12,77	0,006	95,81	significatif
<i>A-v</i>	0,27	1	0,27	15,28	0,0113	12,55	significatif
<i>B-f</i>	0,039	1	0,039	2,19	0,1991	1,813	Non significatif
<i>C-d</i>	0,91	1	0,91	50,87	0,0008	42,32	significatif
<i>AB</i>	0,29	1	0,29	15,98	0,0104	13,48	significatif
<i>AC</i>	0,024	1	0,024	1,34	0,2991	1,116	Non significatif
<i>BC</i>	0,13	1	0,13	7,44	0,0414	6,046	significatif
A^2	0,3	1	0,3	16,99	0,0092	13,95	significatif
B^2	0,031	1	0,031	1,75	0,2434	1,441	Non significatif
C^2	0,043	1	0,043	2,4	0,182	2	Non significatif
Résidus	0,09	5	0,018			4,186	
Total	2,15	14				100	

Tableau IV.20 : Résultats d'ANOVA de la rugosité (R_t) obtenus avec l'outil cermet revêtu

Source	SC	DDL	CM	F-Value	p-value	PC%	Remarque
Model	106,03	9	11,78	7,79	0,018	93,34	significatif
<i>A-v</i>	30,69	1	30,69	20,3	0,0064	27,01	significatif
<i>B-f</i>	1,62	1	1,62	1,07	0,348	1,426	Non significatif
<i>C-d</i>	44,04	1	44,04	29,13	0,0029	38,77	significatif
<i>AB</i>	1,43	1	1,43	0,94	0,3757	1,258	Non significatif
<i>AC</i>	0,74	1	0,74	0,49	0,5155	0,651	Non significatif
<i>BC</i>	9,21	1	9,21	6,09	0,0566	8,108	significatif
A^2	12,96	1	12,96	8,57	0,0327	11,40	significatif
B^2	2,18	1	2,18	1,44	0,2832	1,919	Non significatif
C^2	2,69	1	2,69	1,78	0,2399	2,368	Non significatif
Résidus	7,56	5	1,51			6,655	
Total	113,59	14				100	

Les résultats d'ANOVA obtenus avec l'outil cermet non revêtu de la rugosité R_a sont présentés dans le tableau (IV.21), ces résultats indiquent que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe et le terme quadratique (V^2) ont tous un effet significatif sur

les valeurs de la rugosité Ra. le terme quadratique (V^2) a été le terme le plus influent avec un pourcentage de contribution de (25.84%) suivi de celui de l'avance (f) avec une valeur de (21.91%) Ensuite celui de la profondeur de passe avec (18.82%), et enfin viens celui de la vitesse de coupe avec une valeur de (15.16%). En outre, les résultats obtenus avec l'outil cermet non revêtu du critère de la rugosité Rt (Tableau IV.22) ont indiqué aussi que le terme quadratique (V^2) a été le terme le plus influent avec un pourcentage de contribution de (29.44%).

Tableau IV.21 : Résultats d'ANOVA de la rugosité (Ra) obtenus avec l'outil cermet non revêtu

Source	SC	DDL	CM	F-Value	p-value	PC%	Remarque
Model	3,31	9	0,37	7,08	0,0221	92,97	significatif
A-v	0,54	1	0,54	10,42	0,0233	15,16	significatif
B-f	0,78	1	0,78	15,05	0,0116	21,91	significatif
C-d	0,67	1	0,67	12,96	0,0155	18,82	significatif
AB	0,026	1	0,026	0,49	0,5138	0,730	Non significatif
AC	0,24	1	0,24	4,63	0,0842	6,741	significatif
BC	0,012	1	0,012	0,23	0,6496	0,337	Non significatif
A ²	0,92	1	0,92	17,73	0,0084	25,84	significatif
B ²	0,021	1	0,021	0,41	0,5506	0,589	Non significatif
C ²	0,038	1	0,038	0,72	0,4339	1,067	Non significatif
Résidus	0,26	5	0,052			7,303	
Total	3,56	14				100	

Tableau IV.22 : Résultats d'ANOVA de la rugosité (Rt) obtenus avec l'outil cermet non revêtu

Source	SC	DDL	CM	F-Value	p-value	PC%	Remarque
Model	211,88	9	23,54	19,08	0,0023	97,17	significatif
A-v	31,72	1	31,72	25,71	0,0039	14,54	significatif
B-f	37,11	1	37,11	30,08	0,0027	17,01	significatif
C-d	12,8	1	12,8	10,38	0,0234	5,870	significatif
AB	0,17	1	0,17	0,14	0,7271	0,077	Non significatif
AC	51,77	1	51,77	41,96	0,0013	23,74	significatif
BC	1,53	1	1,53	1,24	0,3168	0,701	Non significatif
A ²	64,21	1	64,21	52,04	0,0008	29,44	significatif
B ²	8,53	1	8,53	6,91	0,0466	3,911	significatif
C ²	0,12	1	0,12	0,1	0,765	0,055	Non significatif
Résidus	6,17	5	1,23			2,829	
Total	218,05	14				100	

D'autre part l'analyse des graphes des effets principaux présentés par les figures (IV.39 - IV.42) des deux critères de la rugosité (Ra et Rt) de tous les facteurs considérés montrent que

l'effet de la vitesse de coupe est significatif. En effet, une augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de la surface usinée car la valeur de Ra diminue lorsque la vitesse de coupe passe de (60 m/min) à une vitesse de (90 m/min), juste après cette valeur de la vitesse de coupe, un changement de la tendance a été observé de la variation des résultats des deux critères de la rugosité (Ra et Rt), en ce moment la rugosité a commencé de se détériorer. Ceci est observé sur les diagrammes des moyens des deux critères de la rugosité obtenus avec les deux outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. Ceci peut être expliqué par la déstabilisation du système usinant pour les vitesses de coupe élevées (supérieurs à $V=90\text{m/min}$). Due à l'effet de l'usure de la partie active de l'outil de coupe cermet revêtu et non revêtu en tournage dur de l'acier 42CrMo4.

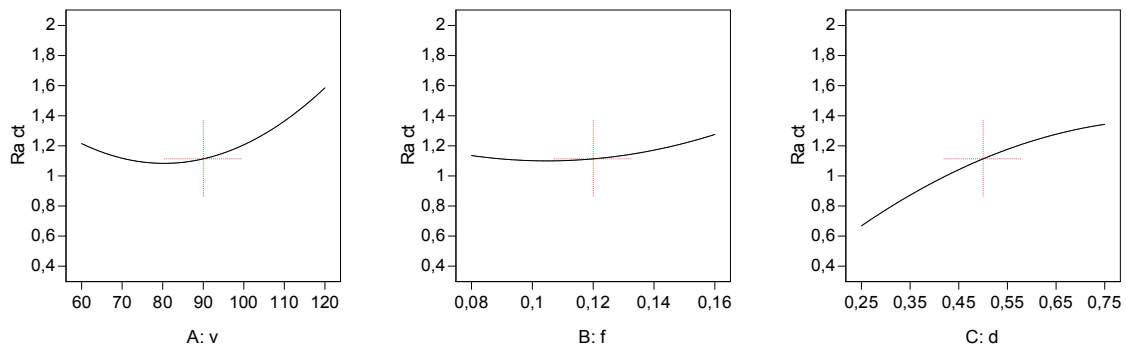


Figure IV.39: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Ra) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu

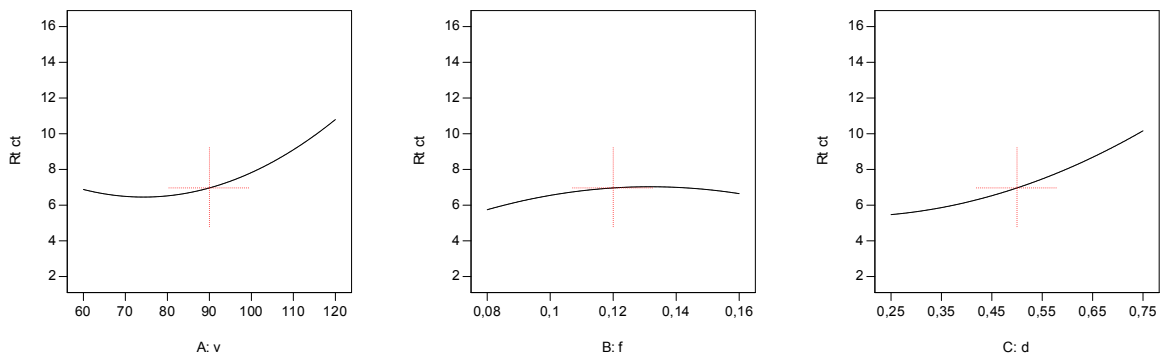


Figure IV.40: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Rt) obtenu avec l'outil de coupe cermet revêtu

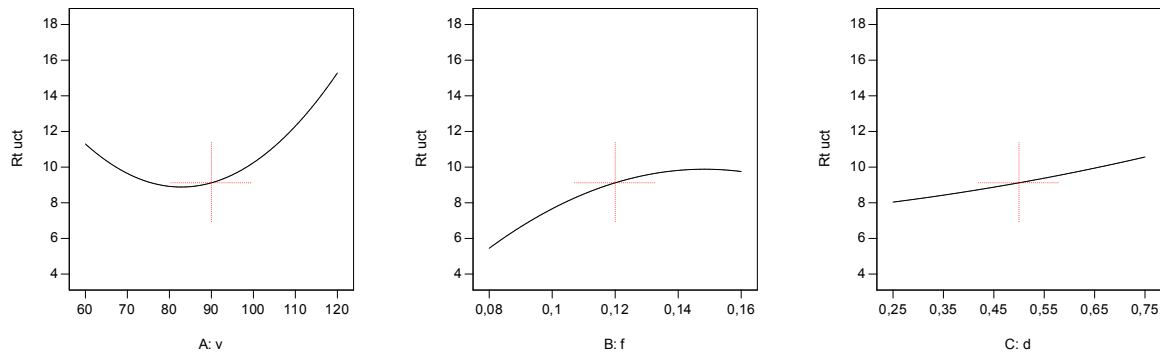


Figure IV.41: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Ra) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu

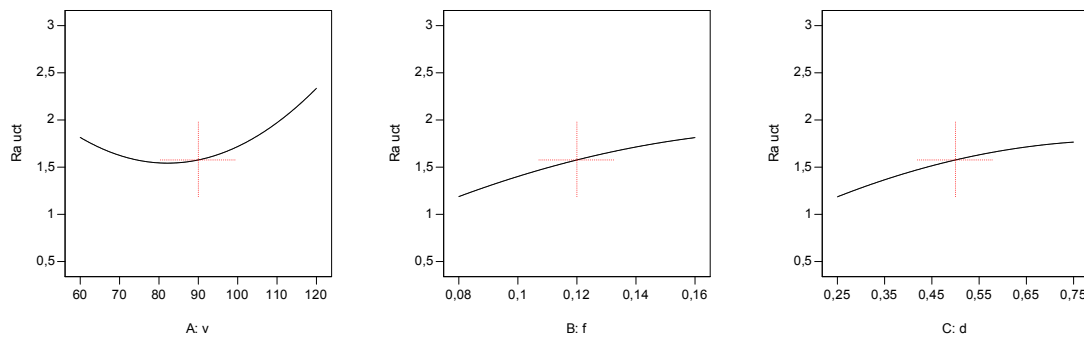


Figure IV.42: Diagramme de l'effet principal des facteurs (v, f et d) sur la rugosité (Rt) obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu

Les micrographies des figures (IV.43 et IV.44), illustrent la morphologie de l'usure en fin de l'usinage de différentes combinaisons du plan des expériences, du matériau à outil de coupe cermet revêtu (TiCN/TiN) et cermet non revêtu. Ces images montrent également la morphologie de l'usure de la face du cratère et du bec de la partie active de l'outil de coupe. L'analyse approfondie de ces figures montre que les surfaces du cratère se caractérisent par des différentes morphologies d'usure, l'usinage à des vitesses de coupes basses inférieures à (90 m /min) s'est caractérisé par la présence de l'usure par abrasion et la diffusion. Par contre, aux vitesses de coupe élevées l'usure s'accroît sur le bec de la partie active de l'outil de coupe, par conséquent la qualité des surfaces usinées et la précision dimensionnelle se dégradent. En revanche la combinaison la moins contraignante avec une vitesse de coupe ($v=60\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $d=0.5\text{mm}$), le carbure revêtu à montrer une faible usure en dépouille. Par contre la combinaison la plus contraignante ($V_c=128\text{m/min}$, $f=0.18\text{ mm/tr}$ et $a_p=0.25\text{mm}$) s'est caractérisé par la présence d'une rupture de l'arête de coupe, qu'a été observés essentiellement lors l'usinage à des profondeurs de passes élevés.

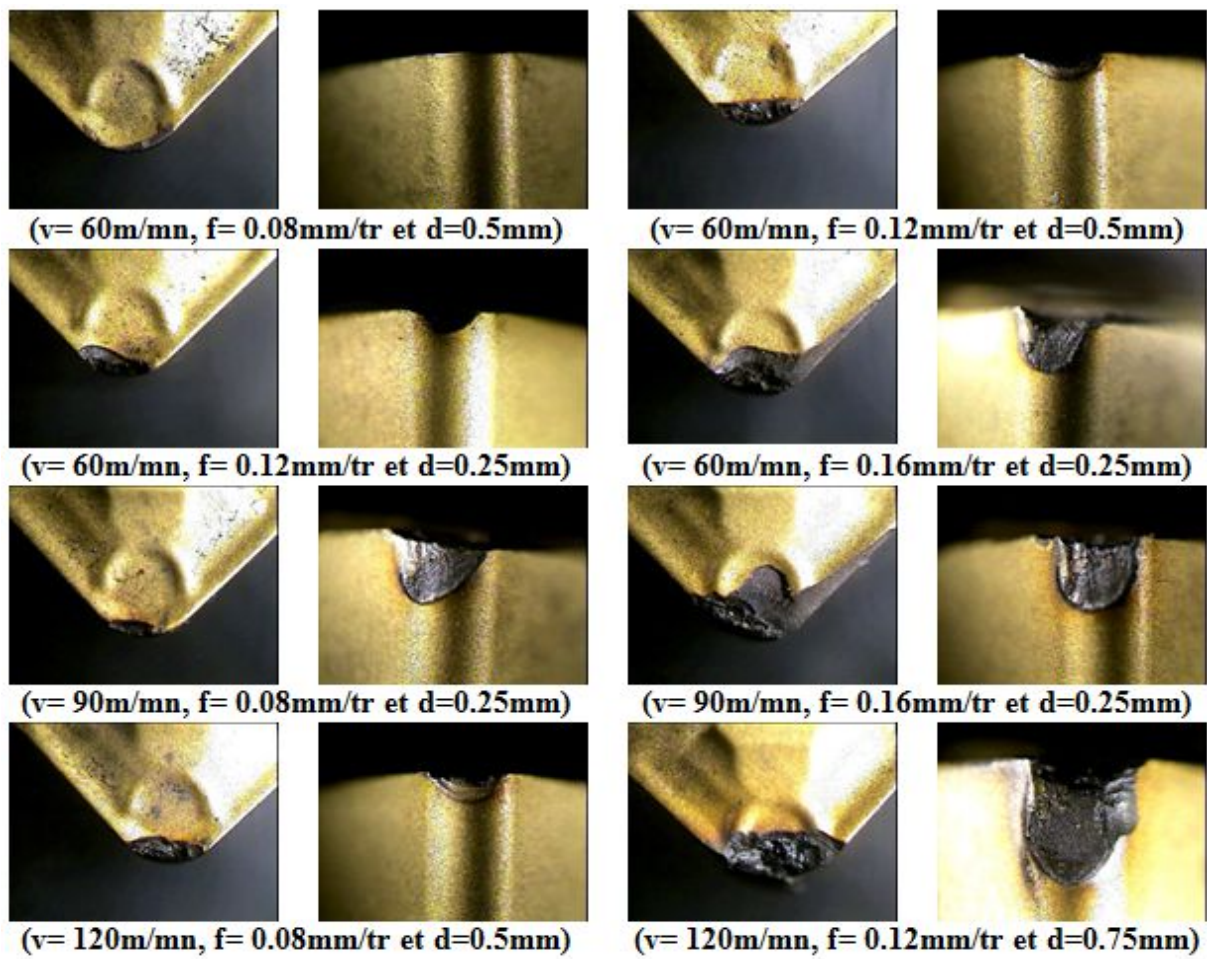


Figure IV.43 : Micrographies de la partie active de l'outil cermet revêtu.

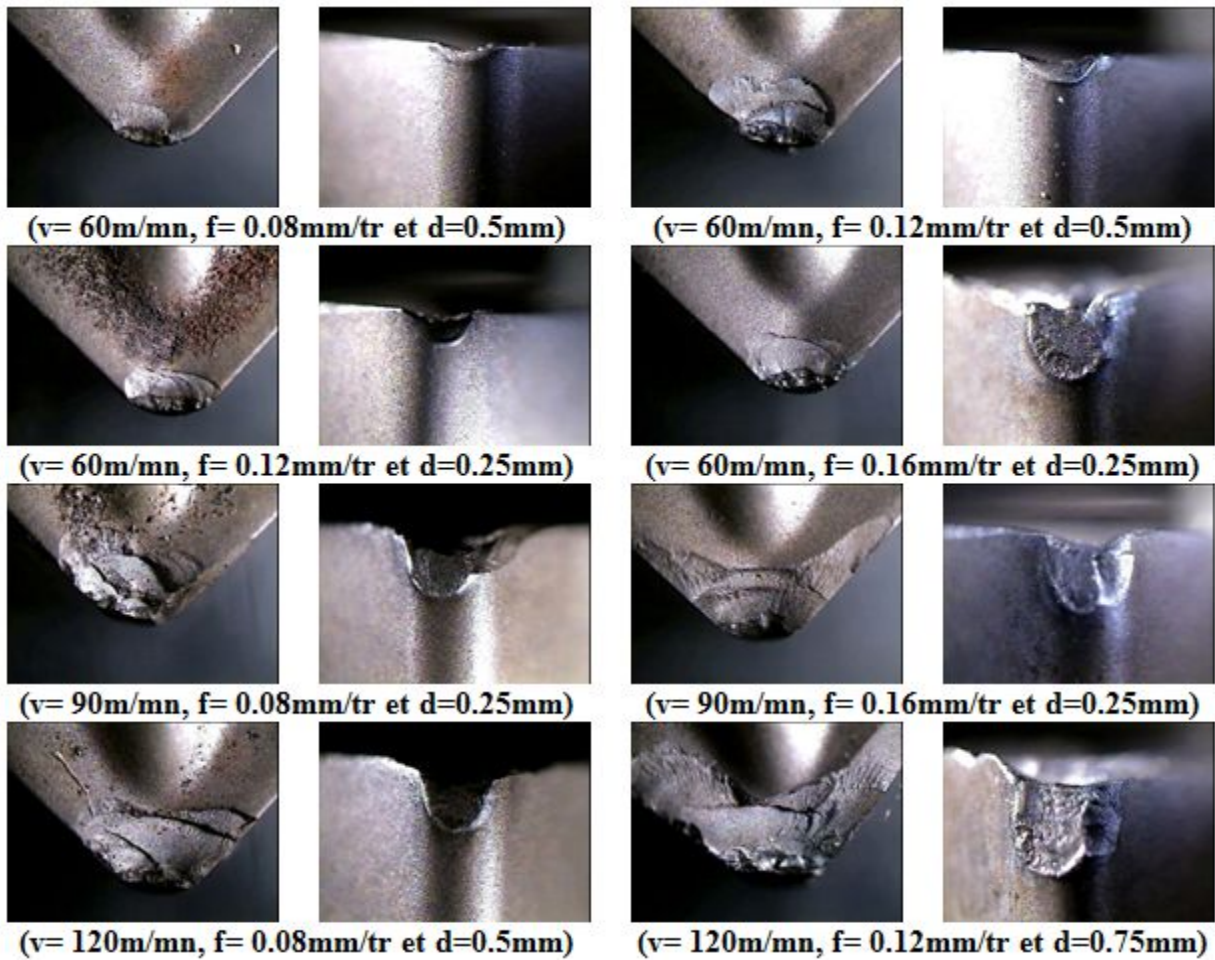


Figure IV.44 : Micrographies de la partie active de l'outil cermet non revêtu.

IV.4.2 Analyse des modèles quadratiques des critères de la rugosité

Cette analyse sera basée sur l'analyse du modèle quadratique de prédiction de la rugosité (R_a et R_t) obtenue avec les deux outils de coupe revêtu et non revêtu, et enfin les graphiques de probabilité normale pour tester la normalité des modèles.

L'analyse des modèle quadratiques de prédiction de la rugosité R_a et R_t en fonction des conditions de coupes (V , f , d) et leurs interactions qui ont un effet significatif ont donné les équations des modèles (IV.21 – IV.24) avec des coefficients de corrélation de $R^2 = 95.81\%$ pour le critère de la rugosité R_a et $R^2 = 93.34\%$ pour le critère de la rugosité R_t obtenus avec l'outil de coupe cermet revêtu. En outre, pour les résultats obtenu avec l'outil de coupe cermet non revêtu les coefficients de déterminations sont $R^2 = 92,97\%$ pour le critère de la rugosité R_a et $R^2 = 97.17\%$ pour le critère de la rugosité R_t .

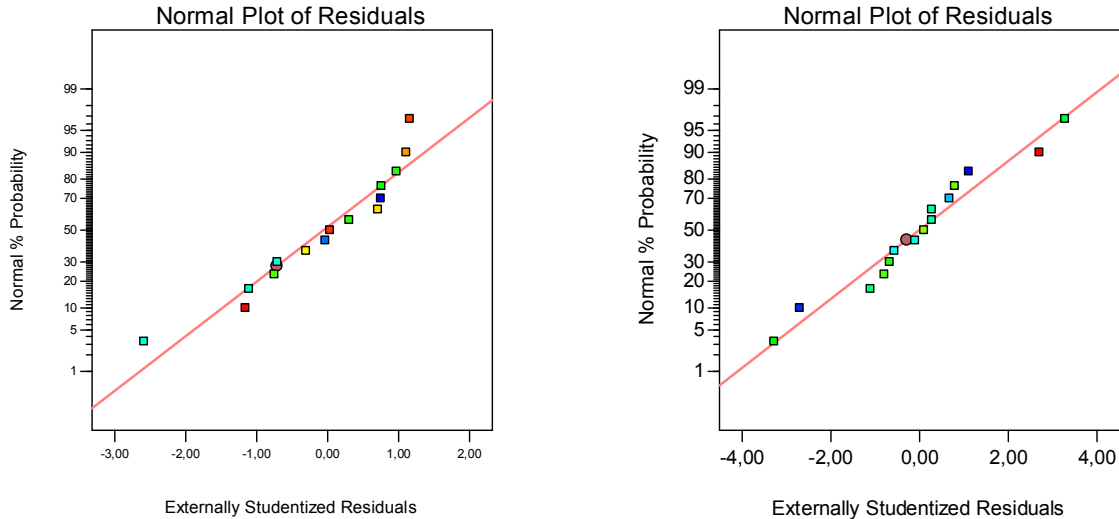
$$R_{a_{CT}} = -1,31 - 0,0193 v + 17,1f + 6,20 d + 0,000319 v*v + 57,6f*f - 1,73 d*d - 0,2229 v*f - 0,01033 v*d - 18,25 f*d \quad (IV.23)$$

$$Rt_{CT} = -8,7 - 0,221 v + 247 f + 19,1 d + 0,002081 v*v - 481 f*f + 13,7 d*d - 0,498 v*f - 0,0573 v*d - 151,7 f*d \quad (IV.24)$$

$$Ra_{UCT} = 0,83 - 0,0668 v + 22,4 f + 5,05 d + 0,000555 v*v - 47,4 f*f - 1,61 d*d - 0,0667 v*f - 0,0327 v*d + 5,5 f*d \quad (IV.25)$$

$$Rt_{UCT} = 2,7 - 0,548 v + 236 f + 37,9 d + 0,004633 v*v - 950 f*f + 2,92 d*d + 0,171 v*f - 0,4797 v*d + 61,8 f*d \quad (IV.26)$$

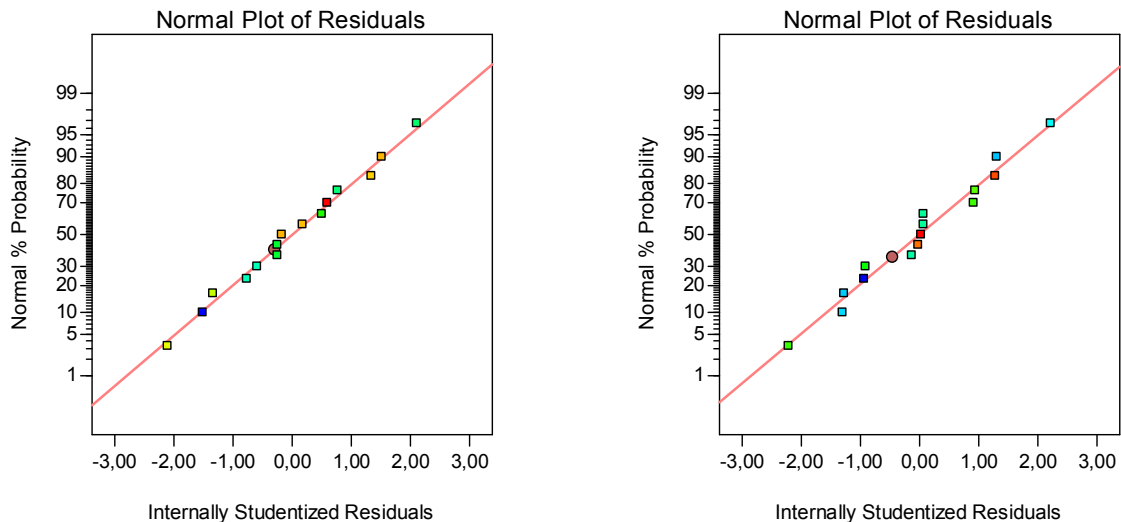
La valeur du coefficient de détermination R^2 pour le modèle de la rugosité (Ra) égale à 0.9581. Cela signifie que 95.81% des variations du niveau de la rugosité de surface sont expliquées par ce modèle et que 0,0419% restent par conséquent inexpliquées. Par contre la valeur du coefficient de détermination R^2 pour le modèle de la rugosité de surface usinée (Rt) égale à 0.9334. Ces valeurs du coefficient montrent une très bonne corrélation entre ces modèles et les données expérimentales. En outre, les graphiques de la probabilité normale des résidus de la rugosité obtenue avec l'outil de coupe cermet revêtu et non revêtu illustrées dans les figures (IV.45 -IV.46), montre que les résidus se trouvent très proches par rapport à la ligne droite de la normalité. La normalité semble acceptable en plus les coefficients de détermination sont très élevés.



(a) : normalité pour Ra

(b) : normalité pour Rt

Figure IV.45 : Graphe du test de normalité de la rugosité obtenue avec l'outil cermet revêtu



(a) : normalité pour Ra

(b) : normalité pour Rt

Figure IV.46 : Graphe du test de normalité de la rugosité obtenue avec l'outil cermet non revêtu

IV.4.3 Analyse des graphes de surfaces de réponses 3D

Les figures (IV.47 - IV.52) montrent les contours et les surfaces de réponse de la variation du critère de la rugosité (R_a) en fonction des paramètres de coupe notamment la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe pour les résultats obtenus avec les outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. La figure (IV.47) indique l'effet de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, l'analyse de cette figure a permis de constater que la vitesse de coupe au cours de sa variation de (60 m/min) à la valeur (90 m/min) a amélioré l'état de la surface usiné, au de là de cette vitesse la rugosité commence à se détériorer et atteint une valeur de ($1.8\mu\text{m}$) cela pour une avance inférieure à (0.1mm/tr). La figure (IV.48) montre les résultats de (R_a) en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe, cette figure indique clairement l'effet de la profondeur de passe ce qui nous a permis de constater qu'en tournage dur avec des inserts cermet nous devons choisir des profondeurs de coupe inférieure à (0.3mm). La figure (IV.49) illustre la surface de réponse et le contour des variations de la rugosité (R_a) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revêtu. Et enfin les figure (IV.50 - IV.52) montrent les contours et les surfaces de réponse de la variation du critère de la rugosité (R_a) en fonction des paramètres de coupe (V , f et d) pour les résultats obtenus avec les outils de coupe non revêtus.

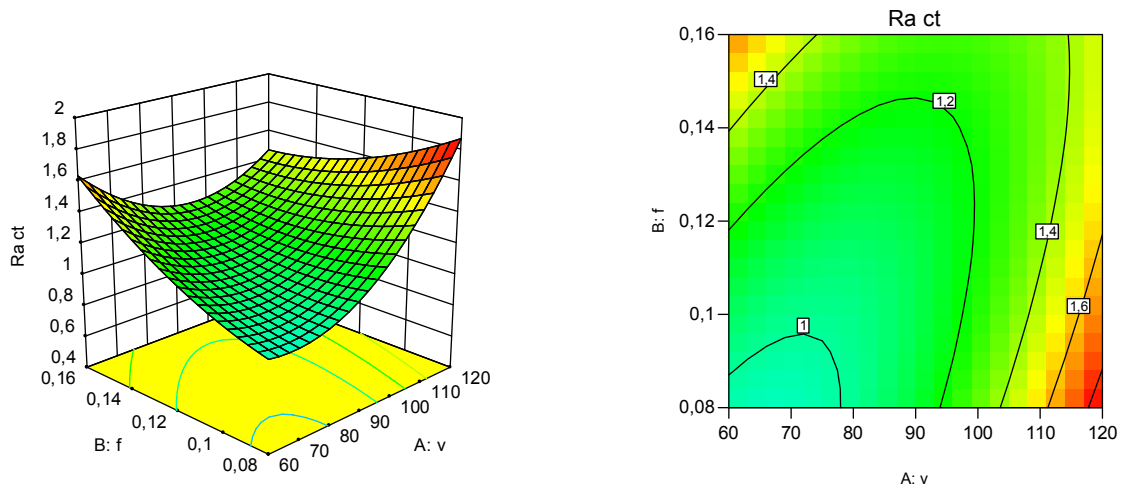


Figure IV.47: Surface de réponse de la variation de la rugosité (Ra) en fonction de (V et f) obtenus avec l'outil cermet revêtu.

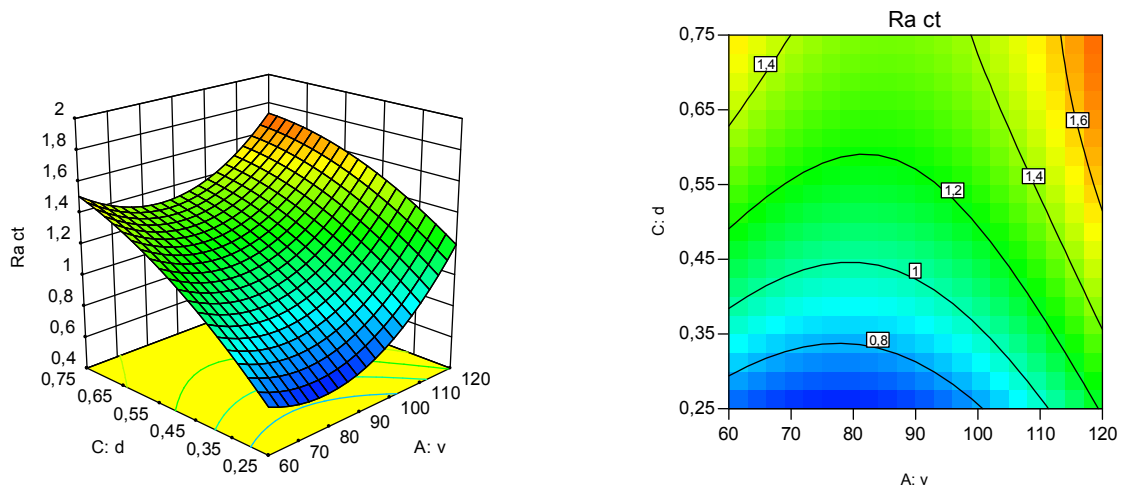


Figure IV.48: Surface de réponse de la variation de la rugosité (Ra) en fonction de (V et d) obtenus avec l'outil cermet revêtu.

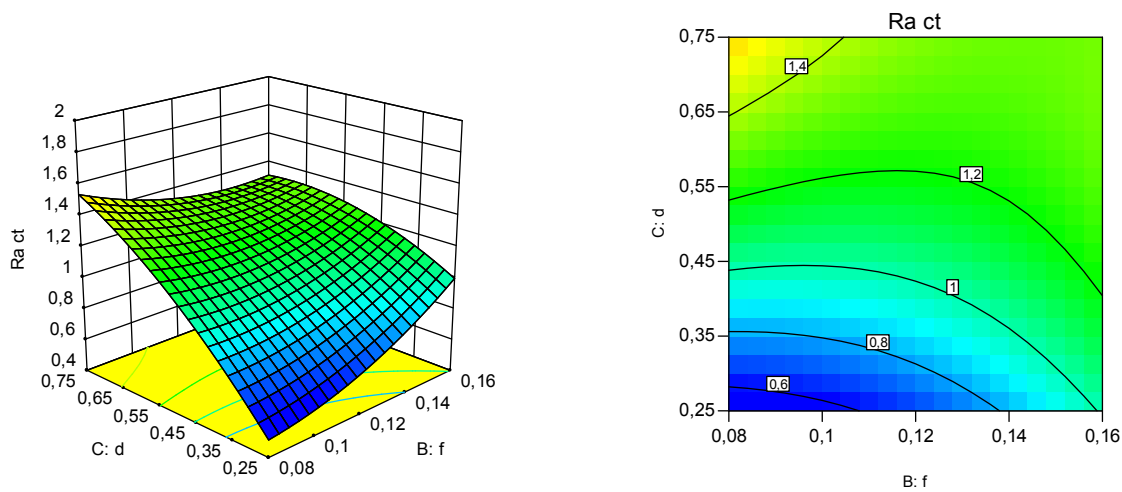


Figure IV.49: Surface de réponse de la variation de la rugosité (Ra) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil cermet revêtu.

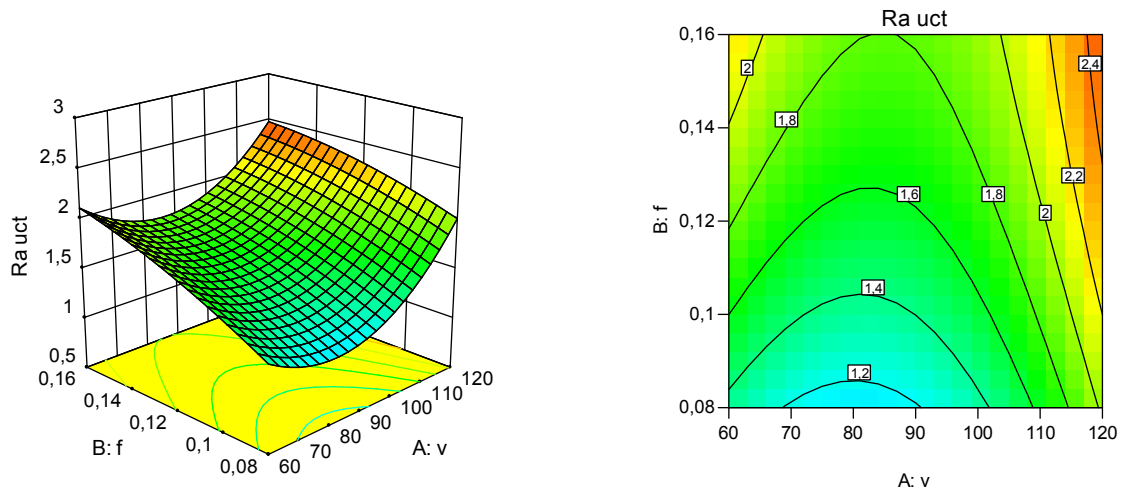


Figure IV.50: Surface de réponse de la variation de la rugosité (Ra) en fonction de (V et f) obtenus avec l'outil non revêtu

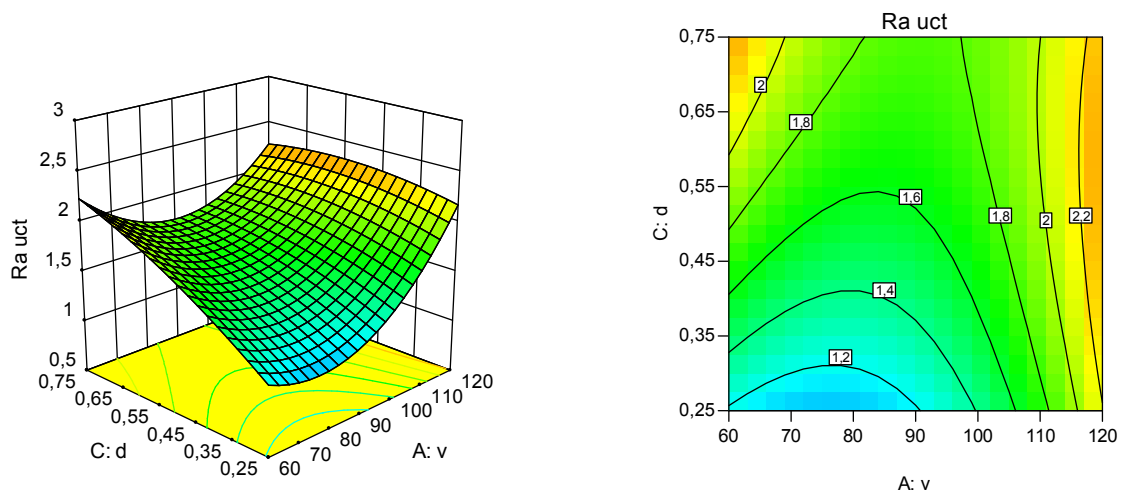


Figure IV.51: Surface de réponse de la variation de la rugosité (Ra) en fonction de (V et d) obtenus avec l'outil cermet non revêtu

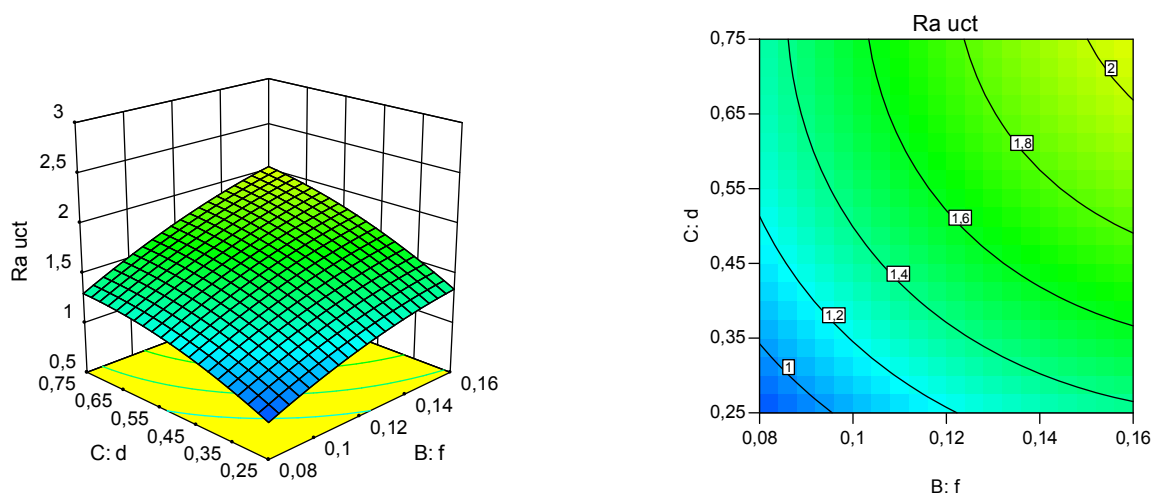


Figure IV.52: Surface de réponse de la variation de la rugosité (Ra) en fonction de (f et d) obtenus avec l'outil non revêtu

IV.4.4 Analyse des résultats de la rugosité en tournage dur avec l'outil carbure revêtu

Afin d'étudier l'effet des paramètres de coupe notamment la vitesse de coupe et la vitesse d'avance nous avons adopté un plan factoriel complet composé de deux facteurs variables à quatre niveaux. Le choix de ce plan a été fait on se basant sur les conclusions qu'ont été inspiré de l'analyse des résultats du plan d'expérience de **Box-Behnken** qu'a été utilisé pour les essais de tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48HRC) avec des outils de coupe cermets revêtus et non revêtus. Nous avons constaté qu'aux valeurs élevées de la profondeur de passe l'usure des outils de coupe cermets revêtus a été rapide et importante. Nous avons constaté également qu'aux vitesses supérieures à (90 m/min) la rugosité commence à se détériorer et atteint une valeur de (1.8 μ m). Pour ces raisons un plan d'expérience du type factoriel complet a été choisi, ce dernier a été construit avec la variation de deux facteurs qui sont la vitesse de coupe et l'avance, à quatre niveaux (1, 2, 3, et 4), toute on maintenant la profondeur de coupe constante a une valeur de (d=0.25 mm), afin d'étudier l'évolution des critères de la rugosité (Ra et Rt) dans une opération de tournage dur (TD) de l'acier trempé 42CrMo4 (48 HRC) dans cette fois-ci nous avons utilisé des plaquettes carbure revêtu (TiCN+Al₂O₃). Ce plan correspond à la table orthogonale de (Taguchi L16) et requis 16 combinaisons différentes. Les conditions de coupe de ce plan sont représentées par le tableau IV.23.

Tableau IV.23 : Conditions de coupe du Plan factoriel complet (N= 2⁴, L16)

Niveaux	N (tr/min)	Vitesse de coupe v (m/min)	Vitesse d'avance f (mm/rev)
Niveau 1	250	45	0.08
Niveau 2	355	65	0.12
Niveau 3	500	90	0.16
Niveau 4	710	128	0.18

Les essais réalisés selon cette méthode de planification des expériences conformément au plan de type (Taguchi L16), ont permis l'obtention des résultats expérimentaux de la rugosité (Ra et Rt) qui sont présentés par le tableau IV.24.

Le traitement de ces résultats a été réalisé on utilisant le logiciel (Minitab 17), est un logiciel de calcul statistique. Dans cette partie, notre analyse sera basée sur les diagrammes de l'effet principal des facteurs variables choisis (la vitesse de coupe et la vitesse d'avance) sur la rugosité (Ra et Rt), ainsi que les diagrammes des effets d'interaction des facteurs (v et f) sur la rugosité (Ra et Rt).

Tableau IV.24 : Résultats expérimentaux du Plan factoriel complet ($N=2^4$, L16)

Run Order	V (m/mm)	f(mm/tr)	Ra (μm)	Rt (μm)
1	45	0,16	1,29	7,93
2	65	0,12	1,135	8,515
3	90	0,16	1,345	7,35
4	128	0,16	1,355	7,365
5	45	0,18	1,785	9,98
6	90	0,12	1,085	6,83
7	65	0,08	0,865	5,365
8	128	0,08	0,885	6,05
9	65	0,16	1,43	7,605
10	65	0,18	1,435	7,085
11	90	0,08	0,885	5,65
12	45	0,12	0,99	6,425
13	128	0,18	1,54	8,44
14	128	0,12	1,015	7,12
15	45	0,08	0,88	5,625
16	90	0,18	1,53	8,235

Les figures (IV.53 et IV.54) illustrent l'évolution des deux critères de la rugosité (Ra et Rt) respectivement, en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance. L'analyse de ces figures fait ressortir que la vitesse de coupe ne présente pas un effet significatif sur le critère de la rugosité (Ra). Par contre une légère amélioration de la rugosité (Rt) dans une plage de variations de la vitesse de coupe de (45 à 90m/mm), juste après cette plage de vitesse de coupe les valeurs de la rugosité (Rt) obtenu avec l'outil de coupe carbure revêtu ($\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3$) ont été élevés. En outre, l'analyse de ces résultats montre que l'effet de l'augmentation de l'avance, est relativement très élevé par rapport à celui de la vitesse de coupe. Néanmoins avec l'augmentation de l'avance de (0.08 à 0.18mm/tr), la moyenne de la rugosité (Rt) a augmenté de la valeur $5.67\mu\text{m}$ à une valeur de $8.43\mu\text{m}$.

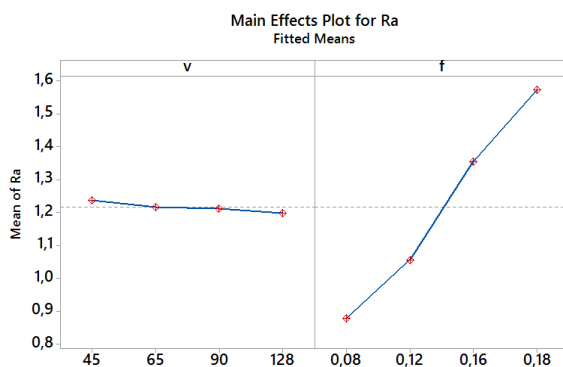


Figure IV.53 : Effet principal de (V et f) sur la rugosité Ra



Figure IV.54 : Effet principal de (V et f) sur la rugosité Rt

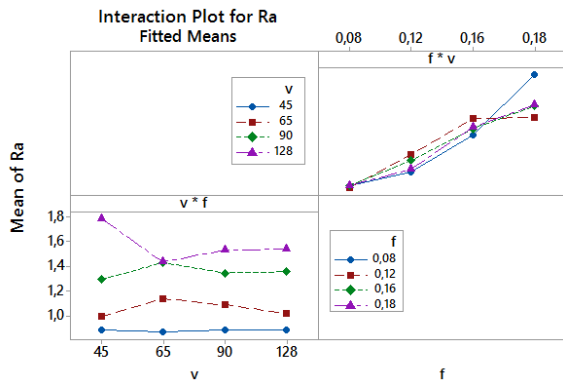


Figure IV.55 : Effet de l'interaction des facteurs (V et f) sur la rugosité Ra

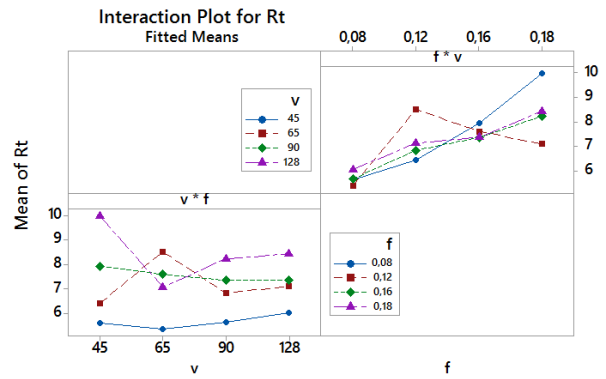


Figure IV.56 : Effet de l'interaction des facteurs (V et f) sur la rugosité Ra

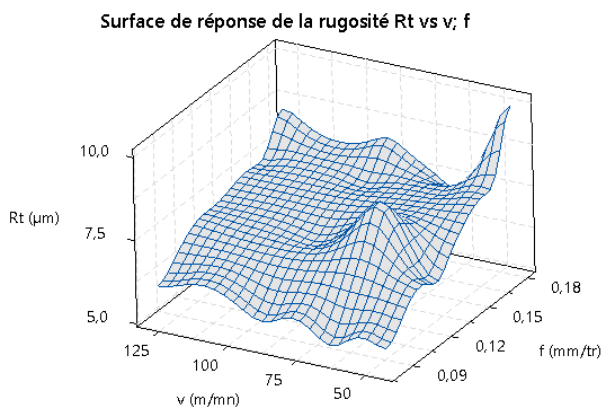


Figure IV.57 : Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (V et f).

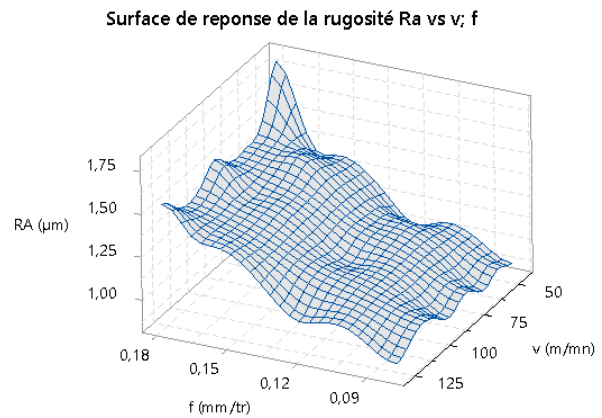


Figure IV.58 : Surface de réponse de la rugosité Rt en fonction de (V et f).

Les figures (IV.55 et IV.56) illustrent les diagrammes de l'effet des interactions des deux facteurs étudiés qui sont la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, en effet ces figures montrent clairement leurs effets mutuels sur l'évolution des deux critères de la rugosité (Ra et Rt). L'analyse des surfaces de réponse (Figures IV.57 et IV.58) ont indiqué nettement la variation de la rugosité dans l'espace expérimental étudié. Les micrographies représentées par la figure (IV.59), illustre la morphologie de l'usure en fin de l'usinage de différentes combinaisons du plan des expériences, du matériau à outil de coupe carbure revêtu ($TiCN+Al_2O_3$). Ces photos montrent également la morphologie de l'usure de la face de dépouille principale de la partie active de l'outil. L'analyse approfondie de ces figures montre que les surfaces de dépouille se caractérisent par des bandes d'usure striées, suivie par la formation d'une entaille ce qu'est témoinant la présence de l'usure par abrasion, à la combinaison la moins contraignante avec une vitesse de coupe ($V_c = 45m/mn$, $f = 0.08mm/tr$

et $a_p=0.25\text{mm}$), le carbure revêtu à montrer une faible usure en épouille. Par contre la combinaison la plus contraignante ($V_c=128\text{m/mn}$, $f=0.18\text{ mm/tr}$ et $a_p=0.25\text{mm}$), l'usure s'accroît sur les deux surfaces de dépouilles principale et axillaire, par conséquent la qualité des surfaces usinées et la précision dimensionnelle se dégradent.

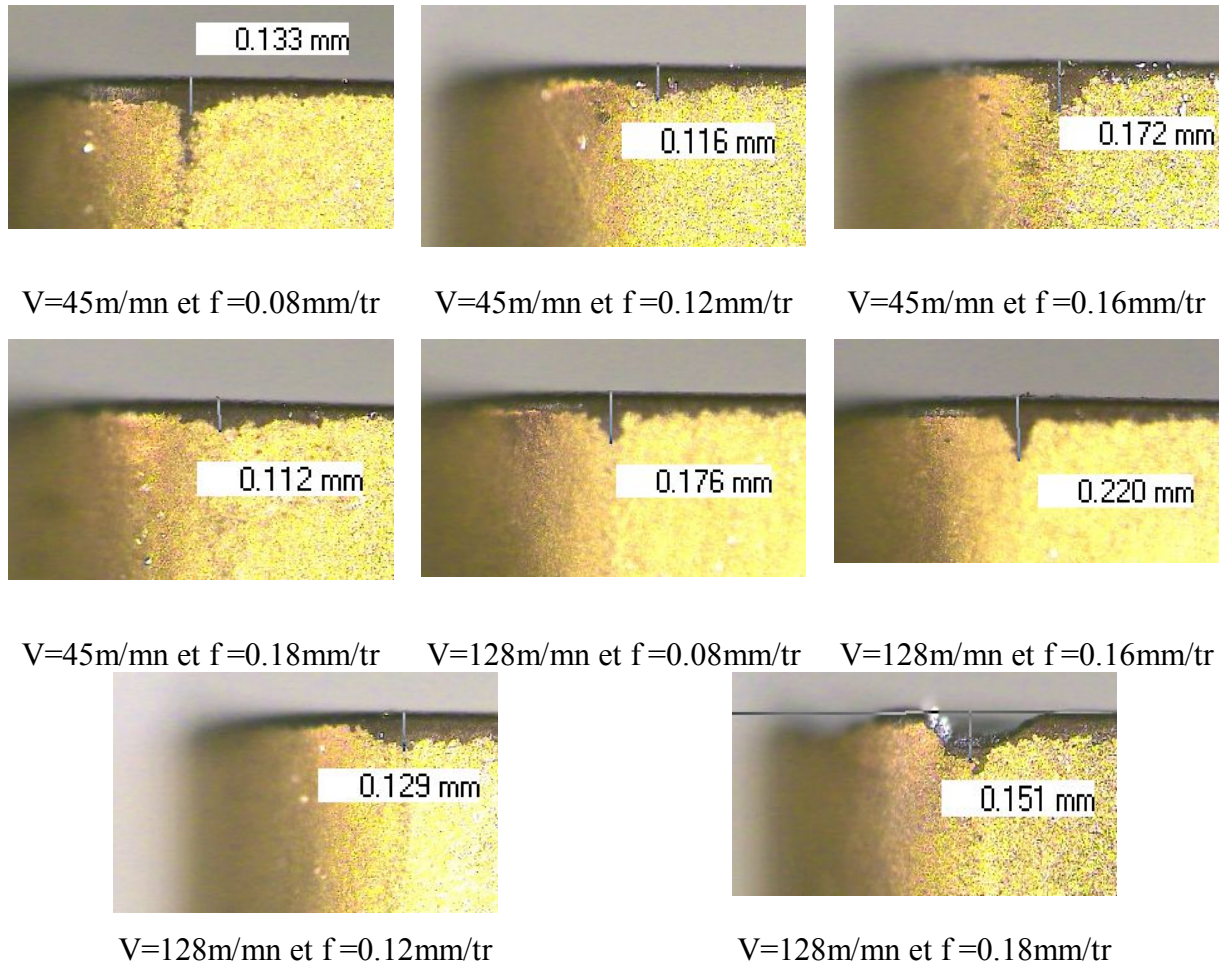


Figure IV.59 : Micrographies d'usure en épouille principale des plaquettes carbures revêtus ($\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3$)

IV.5 Conclusion

La partie A de ce travail concerne la modélisation mathématique et l'optimisation multi objectif des efforts de coupe et de la rugosité en tournage de l'acier 100Cr6 non trempé, avec des outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. Dans cette partie, nous avons présenté et analysé chaque résultat de mesure en fonction des paramètres de coupe étudiés. L'utilisation de l'ANOVA a permis une analyse statistique détaillée, basé sur la détermination des modèles mathématiques, leurs coefficients de corrélation et leurs constantes relatives. Cette technique

définit le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les efforts de coupe et la rugosité des surfaces usinées.

Par contre, la partie B de ce travail concerne la modélisation mathématique de la rugosité en tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48HRC), avec des outils de coupe cermet revêtu et non revêtu. Cette étude a été menée selon deux plans d'expériences le premier a été du type Box-Behnken et le second un plan factoriel complet composé de deux facteurs à quatre niveaux. Dans cette partie, les résultats des essais ont montré que les modes d'usure observés sont ceux de l'abrasion et de diffusion, des ruptures de l'arête de coupe ont été également observés qui sont dues essentiellement à l'augmentation de la profondeur de passe. Les résultats ont montré aussi que l'usinage a été accompagné par des sollicitations thermiques et mécaniques très importantes, où l'observation de brûlures et des rayures qui témoignent que la coupe a été effectuée à des températures et des pressions très élevées.

VI. Conclusion générale

Le travail présenté vise à étudier l'effet des revêtements à base de titane et céramique des outils de coupe cermet revêtu et non revêtu sur le couple "Outil – Matière", dans une opération de tournage à sec, de l'acier à roulement 100Cr6 et en tournage dur de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC). L'analyse des comportements à l'usure, de l'état de surface et des sollicitations dynamiques est aussi l'objectif de cette étude. Ce travail nous a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

1. Lors l'usinage de l'acier 100Cr6 non trempé :

- Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont montré que l'avance a un effet prépondérant sur les valeurs de la rugosité (Ra) lors l'usinage de l'acier 100Cr6 non trempé. En effet, le pourcentage de contribution de l'avance sur les résultats de (Ra) obtenus avec l'outil de coupe cermet revêtu a été de (93.95%), par contre avec l'outil de coupe cermet non revêtu a été de (82,09%). En outre, les résultats de l'analyse d'ANOVA ont indiqué nettement que l'effet de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe sur la rugosité (Ra) des surfaces usinées ont été très faibles.
- Les résultats de la rugosité, ont montré aussi que la vitesse de coupe et la vitesse d'avance ont des influences antagonistes sur la qualité de l'état de surface. En effet l'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de surface, alors que l'accroissement de l'avance le dégrade. Cependant les rugosités obtenues par les deux facteurs (VC , ap) sont nettement plus faibles que celles occasionnées par la variation de l'avance.
- les résultats des composantes de l'effort de coupe ont montré que l'influence de la vitesse de coupe est relativement minime. Par contre, l'avance et la profondeur de passe ont une influence plus importante, en effet avec leur accroissement les efforts de coupe augmentent.
- les résultats des composantes de l'effort de coupe ont montré que la profondeur de passe semble être le facteur prépondérant. En effet, le pourcentage de contribution de l'avance sur les résultats de (Fa , Fr et Ft) obtenus avec l'outil de coupe cermet revêtu ont été de (60.72, 58.82 et 40.14%) respectivement, par contre avec l'outil de coupe cermet non revêtu ont été de (86.81, 54.72 et 71.34%) respectivement.
- L'utilisation des outils cermet revêtu s'est caractérisée par de faibles valeurs de la rugosité et des efforts de coupe par rapport aux outils testés cermet non revêtu. Ceci est due suite à l'amélioration des conditions de frottement aux interfaces "outil – copeau - pièce", grâce aux revêtements, les composantes de l'effort de coupe se trouvent nettement réduites, ce

qui en résulte de légères vibrations du système usinant par conséquent l'état des surfaces usinées s'améliore.

- Le test d'adéquation des modèles postulés de la rugosité et des composantes de l'effort de coupe, obtenus avec l'outil de coupe cermet revêtu et non revêtu a indiqué que la majorité des coefficients de détermination R^2 des différents modèles mathématiques sont élevés, ce qui prouve une bonne adéquation des relations entre les réponses et les facteurs de prédiction.
- Les valeurs du coefficient de corrélation (r) pour tous les modèles ont été arrange dans intervalle entre 0.95 et 0.97, ce qui indique une bonne accordance entre les valeurs expérimentales et théoriques.
- La connaissance de ces modèles représente un intérêt économique et industriel très important car elle précise les plages des conditions d'usinage pour optimiser le processus de coupe et faire les prédictions qui lui sont primordiales.
- le cermet revêtu (TiCN/TiN) a permis de donner une meilleure valeur de la rugosité (R_a) de ($0.30\mu\text{m}$) avec un minimum d'effort de coupe totale (F_{tot}) de ($117,736\text{N}$) pour un taux de désirabilité de ($0,985$), par contre, le cermet non revêtu a permis de donner une meilleure valeur de la rugosité (R_a) de ($0.47\mu\text{m}$) avec un minimum d'effort de coupe totale (F_{tot}) de (135.417N) pour un taux de désirabilité de (0.934).
- Les valeurs optimales de la rugosité (R_a) et de la productivité (Q) avec l'outil cermet revêtu choisi en termes de désirabilité plus élevée ont obtenu avec les conditions de ($v=250\text{m/mn}$, $f=0.102\text{ mm/rev}$ et $d=0.45\text{ mm}$). Par cotre, pour l'outil de coupe cermet non revêtu les paramètres de coupes optimales ont été à une vitesse de coupe (v) de 250m/mn , une vitesse d'avance (f) de 0.113 mm/rev et une profondeur de passe (d) de 0.45 mm .
- les diagrammes des moyens des critères de la rugosité (R_a et R_t) obtenue avec les outils de coupe cermet revêtu et non revêtu lors du tournage dur (TD) de l'acier 42CrMo4 trempé (48 HRC), ont montre que l'augmentation de la vitesse de coupe de (45m/mn à 90m/mn) la rugosité s'améliore, par contre aux vitesses de coupe élevées supérieures à (90m/mn) contribue à la détérioration de l'état de surface. Ceci est à cause de l'accroissement de l'usure, l'état de surface se dégrade, ceci s'explique par les modifications géométriques de l'arête de coupe de l'outil provoquées par les conditions de coupe sévère et des températures élevées qui règnent à la pointe de l'outil.

Références

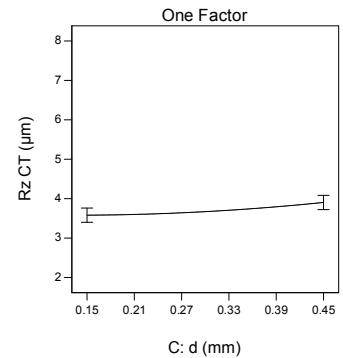
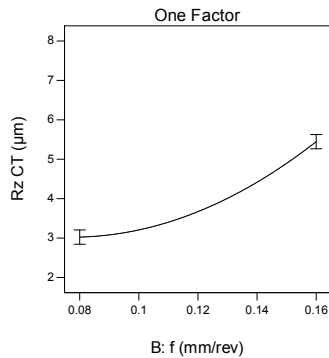
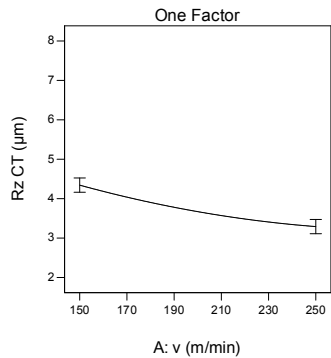
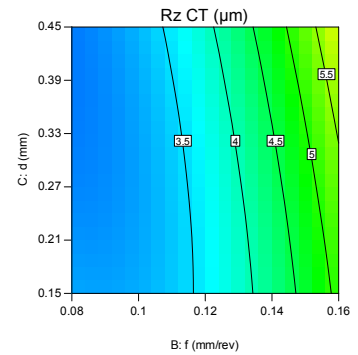
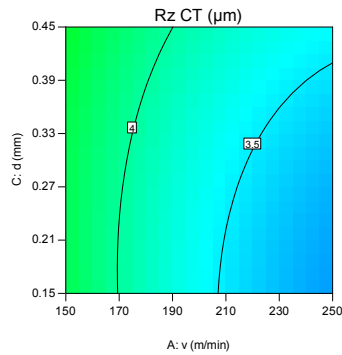
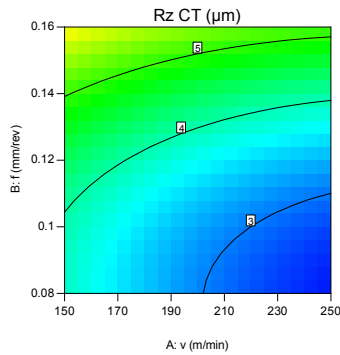
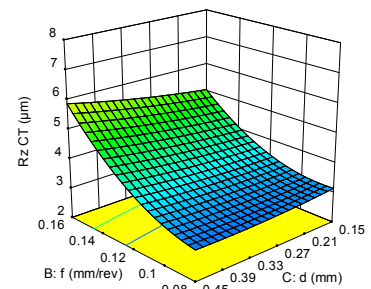
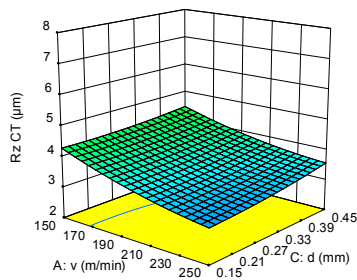
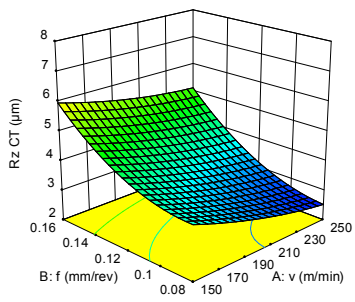
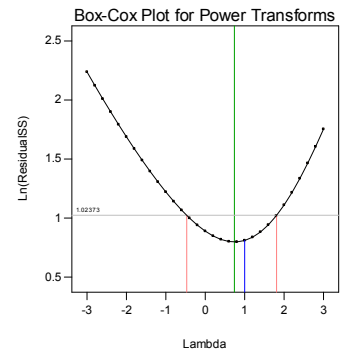
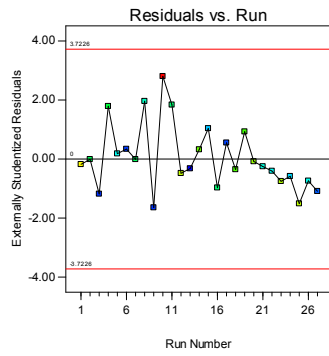
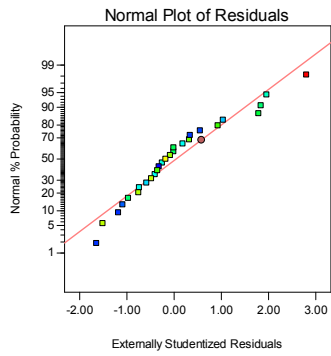
1. A.A.Czaplicki; l'usinabilité et la coupe des métaux. Revue de la société royale belge des ingénieurs et industries. N° 12, pp. 7087. 1962.
2. BERARD GRUBER : Outillage et mesure. Dunod spes pp 51 - 63 1981.
3. POULACHON G., Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, 1999, 165 p.
4. MATHON P., Usinabilité d'aciers 16NC6 de structures différentes. Traitement thermique, Paris, Sept-Oct.1968, pp.27-38.
5. MATHON P., Usinabilité et lois générales de l'usinage des aciers et des fontes. Recueil de conférences, In. La coupe des métaux, INSA de Lyon, 1971, p.12-164.
6. M.ROBELET.GODIN : Etude comparée de deux tests rapides d'usinabilité, corrélation avec les résultats d'essai de longue durée Revue de met pp 1021-1032 . 1973.
7. Mehdi Remadna, Le comportement du système usinant en tournage dur, application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure de Bore Cubique).Thèse de doctorat. N°d'ordre 01 ISAL 00 22. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001.
8. REMADNA M., RIGAL J.F., ROUMESY B., Testing of CBN insert wear in hard steel turning. International CIRP workshop, Paris 1999, pp.119-126.
9. J. P. Cordebois and coll. Fabrication par usinage. ISBN 2 10 005586 0. Dunod, Paris, 2003.
10. Jawahir I.S. and Van luttervell A.C. Recent developments in chip control research and application, In Annals of CIRP, volume 42, pages 659–693, 1993.
11. J. Rech. Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool-chip interface in orthogonal dry cutting. Surface and Coatings Technology, 200/16-17 :5132–5139,2006.
12. F. Zemzemi. Caractérisation de modeles de frottement aux interfaces Piece-outil-copeau en usinage : application au cas de L'usinage des aciers et de l'inconel 718. PhD thèse 2007.
13. F.W Taylor. On the art of cutting metals. In Trans ASME, volume 28, pages 31–248, 1907.
14. M. BARGE étude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion. PhD thèse 2005
15. G. Poulachon, A. L. Moisan et Michel Dessoly. Contribution à l'étude des mécanismes de coupe en tournage dur. Mécanique Industries, 3(4):291 – 299, 2002.
16. M. Nouari, M. Calamaz et F. Girot. Mécanismes d'usure des outils coupants en usinage à sec d'alliage de titane aéronautique. Comptes Rendus Mécanique, 336(10):772 – 781, 2008.
17. P.J. Arrazola, A. Garay, L.-M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya et F. Le Maître. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). Journal of Materials Processing Technology, 209:2223 – 2230, 2009.

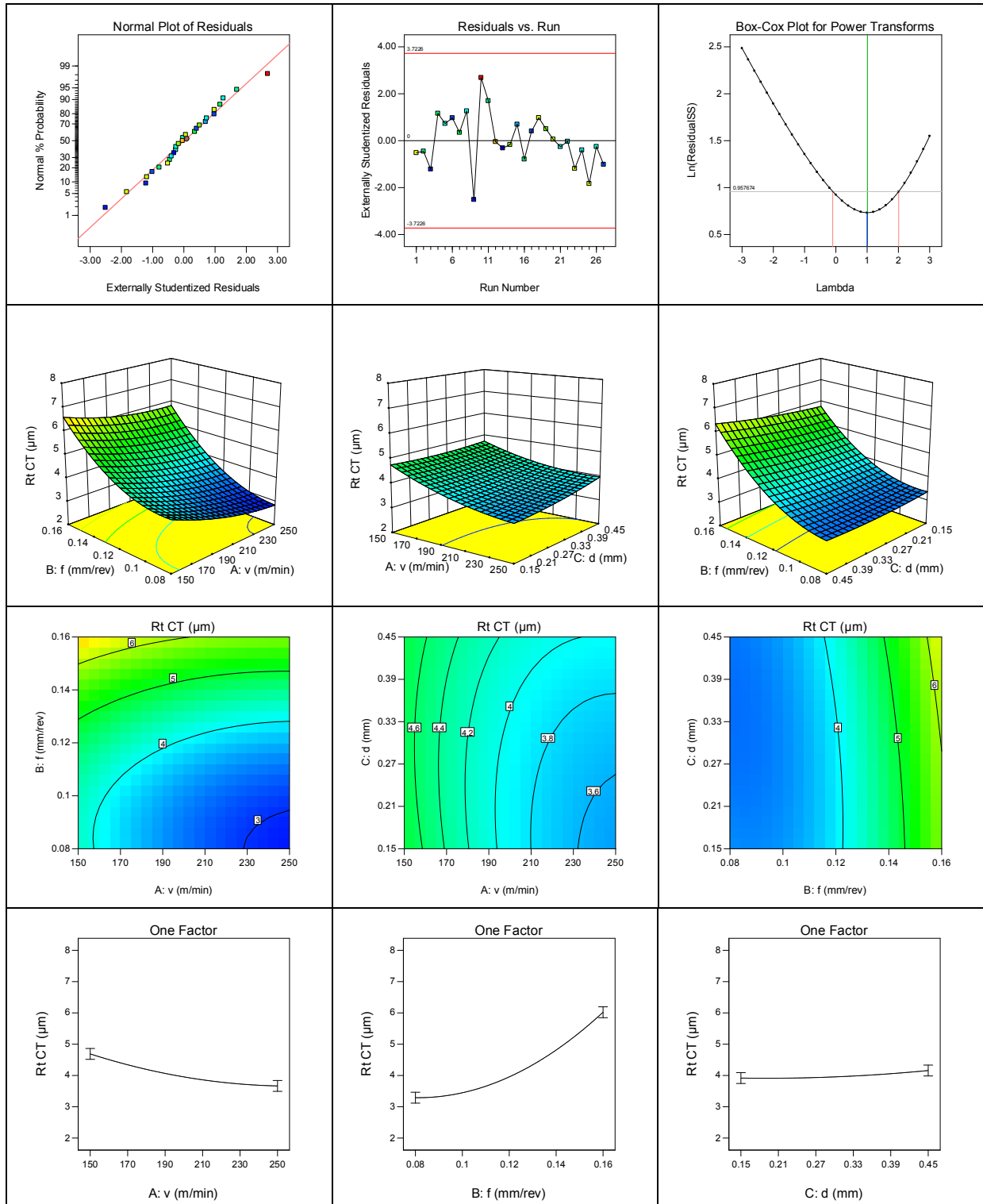
18. Z. B. Hou et R. Komanduri. Modeling of thermomechanical shear instability in machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(11):1273 – 1314, 1997.
19. J. Hua et R. Shivpuri. Prediction of chip morphology and segmentation during the machining of titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 150(1- 2):124 – 133, 2004.
20. M.A. Elbestawi, A.K. Srivastava, et T.I. El-Wardany. A model for chip formation during machining of hardened steel. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 45(1):71 – 76, 1996.
21. M. C. Shaw et A. Vyas. The mechanism of chip formation with hard turning steel. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 47(1):77 – 82, 1998.
22. G. Poulachon, A. Moisan et I. S. Jawahir. Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools. *Wear*, 250(1-12):576 – 586, 2001.
23. H. K. TONSHOFF, A. MOHFELD ET C. SPENGLER: The coating in manufacturing engineering. 2001. 123.
24. S. J. Bull et A. M. Jones. Multilayer coatings for improved performance. *Surface and Coatings Technology*, 78(1-3):173 – 184, 1996.
25. W GRZESIK : Friction behaviour of heat isolating coating in machining : mechanical thermal and energy-based considerations,. *International Journal Of Machine Tools and Manufacture*, pages 145 – 150, 2003.
26. Toman MacGinley et John Monaghan. Modelling the orthogonal machining process using coated cemented carbide cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3):293 – 300, 2001.
27. J. Rech, A. Kusiak et J. L. Battaglia. Tribological and thermal functions of cutting tool coatings. *Surface and Coatings Technology*, 186(3) :364 – 371, 2004.
28. A. Kusiak, J.-L. Battaglia, et J. Rech. Tool coatings influence on the heat transfer in the tool during machining. *Surface and Coatings Technology*, 195(1):29 – 40, 2005.
29. M. Nouari et A. Ginting. Wear characteristics and performance of multi-layer cvdcoated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 200(18-19):5663 – 5676, 2006.
30. W. Grzesik. The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 79(1-3):133 –143, 1998.
31. I. S. Jawahir et C. A. van Luttervelt. Recent developments in chip control research and applications. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 42(2):659 – 693, 1993.
32. J. Martana,b, P. Benes; Thermal properties of cutting tool coatings at high temperatures. *Thermochimica Acta* 539 (2012) 51– 55
33. W. Grzesik. An integrated approach to evaluating the tribo-contact for coated cutting inserts. *Wear*, 240(1-2):9 – 18, 2000.

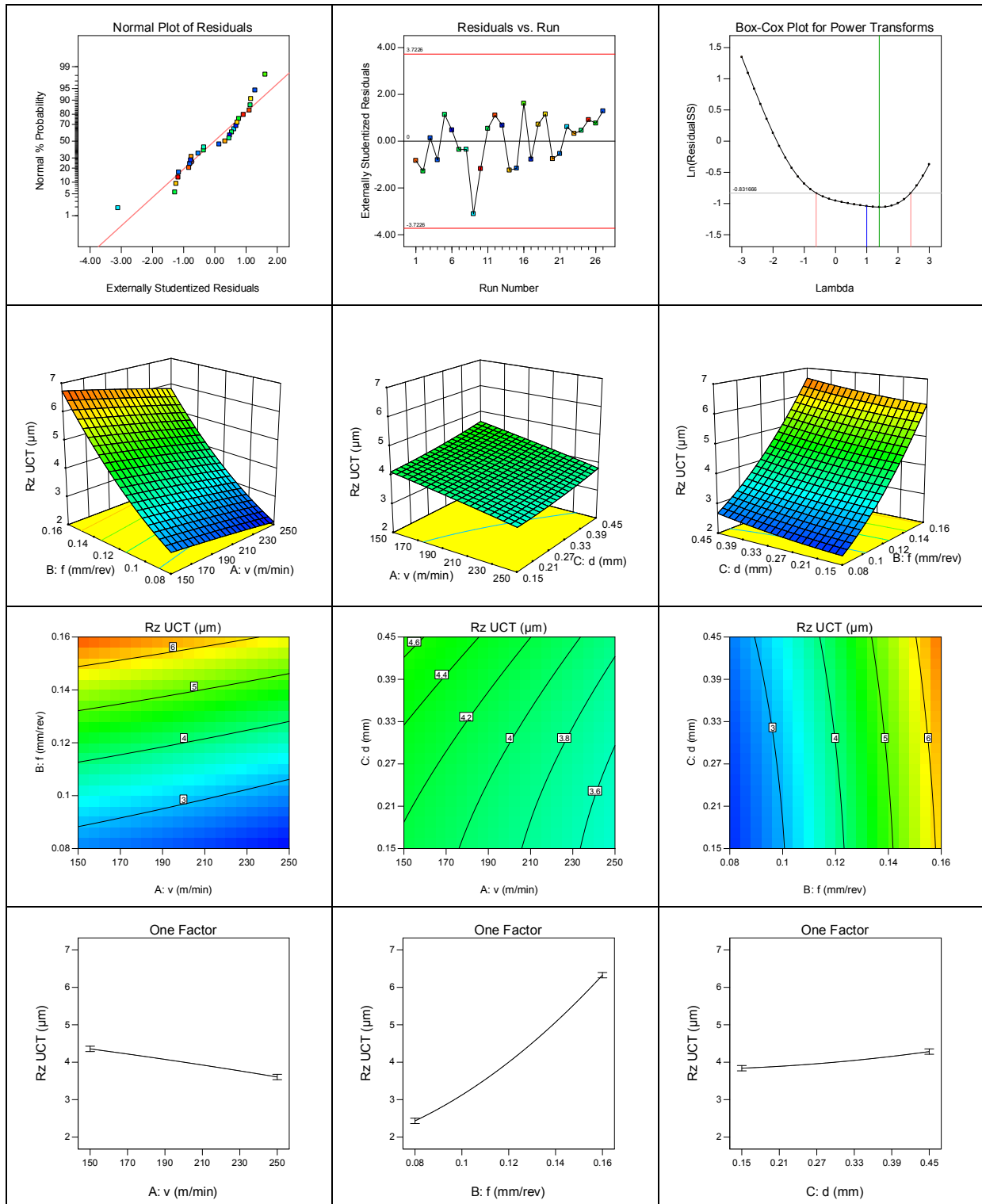
34. J.X. Deng, Z.Wu, Y.S. Lian, T. Qi, J. Cheng, Performance of carbide tools with textured rakeface filled with solid lubricants in dry cutting processes, *Int. J. Refract. Met. HardMater.* 30 (2012) 164–172.
35. P. Koshy, J. Tovey, Performance of electrical discharge textured cutting tools, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 60 (2011) 153–156.
36. Zhang K, Deng J, Meng R, et al. Effect of nano-scale textures on cutting performance of WC/Co-based Ti55Al45N coated tools in dry cutting. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2015; 51: 35–49.
37. S. Chinchankar, S. K. Choudhury, Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach, *Measurement*, 46, pp. 913–919 (2013).
38. Hasan GOKKAYA and Muammer NALBANT, The Effects of Cutting Tool Coating on the Surface Roughness of AISI 1015 Steel Depending on Cutting Parameters. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 30 (2006) , 307 – 316.
39. Cemal Cakir M, Ensarioglu C and Demirayak I. Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material. *J. Mater. Process. Technol.* 2009; 209: 102–109.
40. Santoshkumar A. Lawate , Vijay B. Sabnis, Experimental investigation of effect of PVD, CVD and CERAMIC tool inserts in turning of hardened EN 19 / AISI 4140 for optimization of surface roughness. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, June 2015, Volume 2, Issue 6
41. M.Y. Noordin, V.C. Venkatesh, S. Sharif, S. Elting, A. Abdullah. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. *Journal Materials Processes Technology*, Vol. 46, pp. 58-145 (2004).
42. Sahoo AK and Sahoo B. Performance studies of multilayer hard surface coatings (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) of indexable carbide inserts in hard machining: Part-I (An experimental approach). *Measurement*. 2013; 46: 2854–2867.
43. Société Française Du VIDE : Cours d'obtention des couches minces, 1994.
44. Rami Mohammad, Étude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Thèse de doctorat en Génie Mécanique, Université de Toulouse (2011).
45. J. Rech. Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures _a la fraise-mère à grande vitesse. *Engineering Sciences. Arts et Métiers Paris Tech*, 2002. French.
46. K. BOUACHA, L'étude statistique de l'usinabilité de l'acier 42CD4 trempé et non trempé en tournage usiné avec la céramique mixte et la carbure métallique simple et à triple revêtement, mémoire de magister, université 08 mai 45 Guelma, juillet 2003.
47. AZIZI Mohamed Walid, utilisation des plans d'expériences en td pour Quantifier l'influence des paramètres de coupe sur Les indicateurs de performance d'usinage, thèse doctorat, Spécialité, Génie Mécanique, université 08 mai 45 Guelma, 2014.

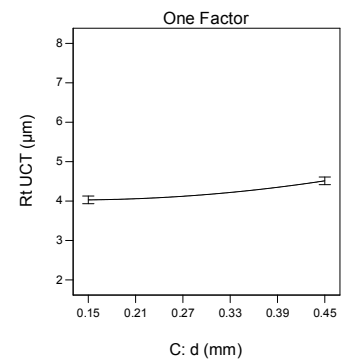
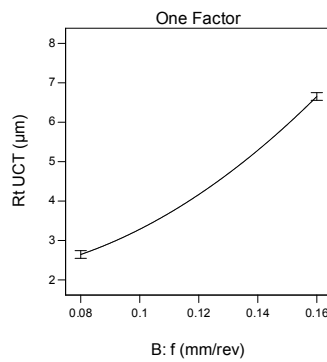
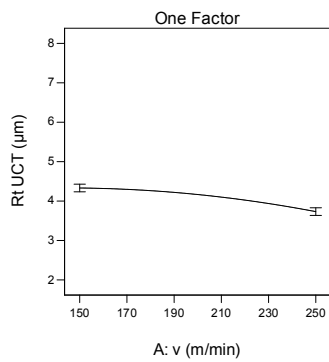
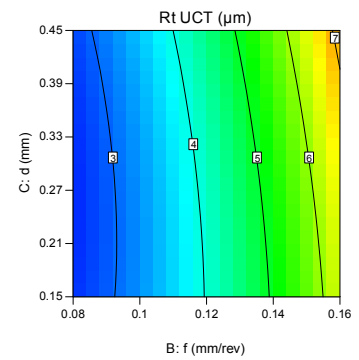
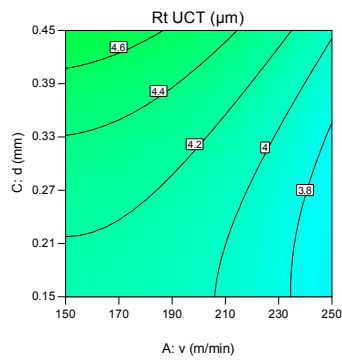
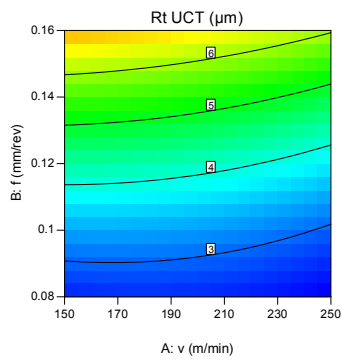
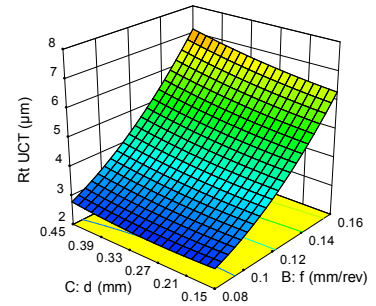
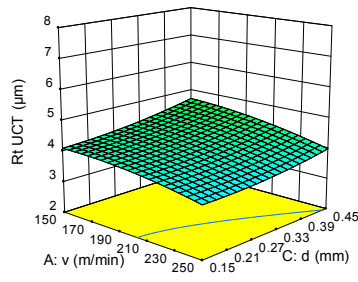
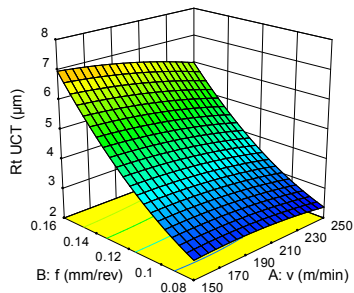
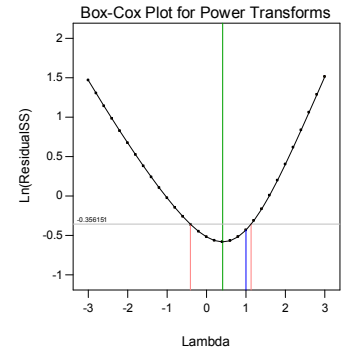
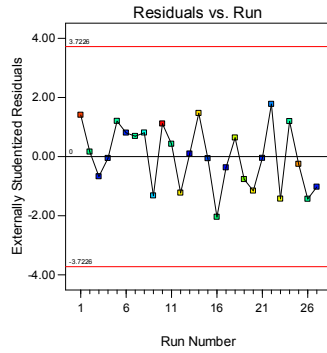
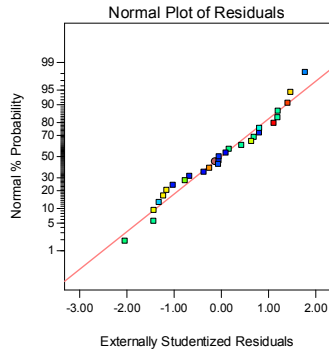
48. BELHADI Salim, étude de l'usinage des aciers traités lors du Tournage avec des matériaux de coupe de Haute technologie : Etude expérimentale de la formation du copeau, thèse doctorat, Spécialité, Génie Mécanique, université Badji Mokhtar Annaba, 2009.
49. E. M. Trent and P. K. Wright. Metal Cutting (Fourth Edition). Butterworth-Heinemann, 2000.
50. H. S. Qi and B. Mills. On the formation mechanism of adherent layers on a cutting tool. *Wear*, 198(1-2):192–196, October 1996
51. K. Kudou, T. Ono, and S. Okada. Crater wear characteristics of an Fe-diffused carbide cutting tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1-3):255–261, January 2003.
52. Tchadja Kagnaya, Contribution A L'identification Des Mécanismes D'usure D'un Wc-6%Co En Usinage Et Par Une Approche Tribologique Et Thermique, Thèse Doctorat De L'école Nationale Supérieure Des Mines De Paris, 2009.
53. Labidi Abderezak, Prédiction de l'usure et de la durée de vie des outils de coupe lors du tournage des aciers, mémoire de magister, université 08 mai 45 Guelma, 2012.
54. Corromant sandvik catalogue « GENERAL TURNING Edition 2000 ».
55. C. Y. H. Lim, P. P. T. Lau, and S. C. Lim. The effects of work material on tool wear. *Wear*, 250(1-12):344–348, October 2001.
56. Q. Liu and Y. Altintas. On-line monitoring of flank wear in turning with multilayered feed-forward neural network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(12):1945–1959, December 1999.
57. G. List, M. Nouari, D. Géhin, S. Gomez, J.P. Manaud, Y. Le Petitcorps, and F. Girot. Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy. *Wear*, 259(7-12):1177–1189, 2005.
58. A. Ebrahimi and M.M. Moshksar. Evaluation of machinability in turning of microalloyed and quenched-tempered steels: Tool wear, statistical analysis, chip morphology. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2):910–921, January 2009.
59. M.A. Yallese, Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Thèse de doctorat, (2005).
60. M.A. Yallese., J.F. Rigal, K. Chaoui, L. Boulanouar, The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 Steel (60HRC). *Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the ImechE part B*, vol. 219, pp.35-55, (2005).
61. M.A Yallese, L. Boulanouar, N. Ouelaa, S. Belhadi, Influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100 Cr 6 (60 HRC) avec le CBN. Premier Congrès International, Conception et Modélisation des systèmes Mécaniques. Colloque international Tunisie 23 et 25 mars (2005).
62. P. Schimmerling, J-C. Sisson, A. Zaidi, Pratique des Plans d'Expériences, *Tec et Doc, Lavoisier*, Paris, (1998).

63. D. Benoist, Y. Tourbier, S. Tourbier, Plans d'Expériences : Construction et Analyse, *Tec et Doc, Lavoisier*, Paris (1994).
64. J. Goupey, Plans d'Expériences pour Surface de Réponse, *Edition Dunod*, Paris, (1999).
65. G. Taguchi & Y. Wu, Introduction to off-line quality control, Central Japan Quality Control Association, 1985.
66. V. V. Fedorov, Theory of optimal experiment, Academic Press, New York, 1972.
67. J. N. Baléo, B. Bourges, Ph. Courcoux, C. Faur-Brasquet et P. Cloirec, Méthodologie expérimentale, Méthodes et outils pour les expérimentations scientifiques, *Editions TEC & DOC, Lavoisier*, Paris (2003).
68. G. E. P. Box, W. G. Hunter, et J. S. Hunter, Statistic for Experimenters, *John Wiley & Sons*, New York, 1978.
69. J. Goupy, La méthode des plans d'expériences, *Editions Dunod*, Paris 1998.
70. F. Louvet & L. Delplanque, Les Plans d'Expériences par la méthode Taguchi, Expérimentique, 2005.
71. R. Myers & D. Montgomery, Response Surface Methodology, Process and product Optimization Using Designed Experiments, *Wiley*, 1995.
72. Y. Dodge et V. Rousson, Analyse de régression appliquée, *Editions Dunod*, Paris, 2004.
73. Derringer, G., and Suich, R., (1980), Simultaneous Optimization of Several Response Variables, *Journal of Quality Technology*, 12, 4, pp 214-219.
74. Abdul-Wahab, S.A., Abdo, J. (2007). Optimization of multistage flash desalination process by using a two-level factorial design, *Applied Thermal Eng.* 27: 413-421.
75. Khuri, A.I., Conlon, M. (1981), Simultaneous optimization of multiple response represented by polynomial regression functions, *Technometrics*, Vol. 23 No.4, pp.363-7
76. Harrington E.C. Jr (1965). The Desirability Function. *Industrial Quality Contr-ol*.
77. E.D. Castillo, Modified desirability function for multiple response optimizations, *JQT*, tome 28 (1996).
78. C. Ch'ng, A new approach for multiple response optimizations, *Quality Engineering* (2005).
79. A.I. Khuri and J. Cornell, Response Surface Design and Analysis, Marcel Dekker, New York (1987).









Activities scientifiques

Publications

Ouahid Keblouti, Lakhdar Boulanouar, Mohamed Walid Azizi and Mohamed Athmane Yaltese “Effects of coating material and cutting parameters on the surface roughness and cutting forces in dry turning of AISI 52100 steel” *Structural Engineering and Mechanics. Vol. 61, No. 4 (2017) page (519-526)*, ISSN: 1225-4568 (Print), DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2017.61.4.519>.

Ouahid Keblouti, Lakhdar Boulanouar, Mohamed Walid Azizi and Mohamed Athmane Yaltese « Modeling and multi-objective optimization of surface roughness and productivity in dry turning of AISI 52100 steel using (TiCN-TiN) coating cermet tools » *International Journal of Industrial Engineering Computations. Vol. (8), (2017) page (71-84)*, DOI: 10.5267/j.ijiec.2016.7.002.

Communications

O. Keblouti, L. Boulanouar, R. Bouzian « Modélisation de la rugosité et évaluation de l’effet du revêtement des outils de coupe en tournage à sec : application de la méthodologie de surface de réponse et l’anova » conférence international de mécanique et matériaux (ICAMM 2014) 16 et 17 Novembre, Sétif, Algérie.

M. W. Azizi, M.A. Yaltese, O. Keblouti and S. Belhadi « Analysis of roughness and cutting force components under different turning conditions of GCr15 Steel Based on Taguchi Method » *Proceedings of the 2014 International Applied Energetics and Pollution Conference*, organized by the AEPL laboratory, December 14-15, 2014, Constantine, Algeria.

M. W. Azizi, M.A. Yaltese, S. Belhadi, A. Lagred, O. Keblouti and L. Boulanouar « Effet du rayon du bec de l’outil sur la rugosité de surface en TD » *Journées d’études sur la fonderie et environnement*, 10 -12 mai 2016, Annaba, Algérie.

O. Keblouti et L. Boulanouar « Evaluation des performances des outils de coupe revêtus en tournage à sec par l’analyse de variance (ANOVA) » 8^{ème} Journée de la Mécanique, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, 10 et 11 Avril, 2012.

O. Keblouti et L. Boulanouar « Étude de l’effet du revêtement [TiN + AL203 + TiCN] lors de l’usinage de l’acier C30 en tournage à sec » 1^{er} Congrès International sur la mécanique avancée Annaba 23 au 25 Mai 2010.

O. Keblouti et L. Boulanouar « Influence de l’usure des outils en carbure métallique revêtus et non revêtus sur la qualité de la surface usinée de l’acier C30 » 1^{ère} Conférence Internationale sur les Mines et la Métallurgie, Annaba du 10 au 12 Mai 2010.

O. Keblouti et L. Boulanouar « Performance du revêtement [TiN + AL203 + TiCN] lors de l’usinage de l’acier C30 en tournage à sec » le premier séminaire international sur la maintenance et la sécurité industrielle, Skikda, journées du 09 et 10 MAI 2009.

O. Keblouti et L. Boulanouar « Étude de l’effet du revêtement des outils en carbure métallique sur l’usure et la qualité de la surface usinée de l’acier C30 » Congrès algérien de mécanique 16-19 Novembre 2009 Biskra.

O. Keblouti et L. Boulanouar « Étude et quantification de l’effet du revêtement sur l’usure des outils en carbure métallique » 2^{ème} Conférence internationale sur les sciences de la mécanique Oum el bouaghi Novembre 16, 17 et 18 – 2008.