



Année / 2018

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat
Département de Génie Mécanique

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

USINABILITE DES ACIERS ET IMPACT DU MATERIAU A
OUTIL SUR LES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES

Option

Construction Mécanique

Par

Youcef ABIDI

Directeur de thèse :

Lakhdar BOULANOUAR

Professeur

Université BADJI Mokhtar - Annaba

Devant le jury

Président :

Med Athmane YALLESE

Professeur

Université 8 Mai 1945 - Guelma

Examineurs :

Idriss AMARA

Professeur

Université Mentouri – Constantine

Hamid HAMADACHE

Professeur

Université BADJI Mokhtar - Annaba

Résumé

Ce travail est une étude d'investigation de l'effet des paramètres d'usinage (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) sur les principaux critères de l'usinabilité, qui sont en l'occurrence: l'usure (durée de vie de l'outil), la rugosité de surface usinée et la vibration radiale de durant le tournage dur à sec de trois nuances d'aciers trempés: AISI 52100 (66 HRC), AISI 4140 (61 HRC) et AISI 1045 (39 HRC) avec la céramique mixte CC650 (70% Al_2O_3 + 30% TiC). La méthodologie entreprise est celle de planification des expériences. Un accent particulier a été mis sur le comportement à l'usure de l'outil en fonction des conditions d'usinage pour le tournage de l'acier le plus durci (AISI 52100). Les résultats obtenus montrent d'une part que lorsque la vitesse de coupe augmente de 140 m/mn à 530 m/mn la durée de vie de l'outil chute de 35min à 4min, d'autre part, lorsque l'avance s'accroît de 0.08 mm/tr à 0.22 mm/tr, la durée de vie diminue de 28 mn à 20 mn. Une analyse ANOVA d'un plan expérimental orthogonal Taguchi L_{27} est appliquée afin de déterminer la contribution de chaque paramètre de coupe ainsi que les interactions sur la rugosité de surface et les vibrations radiales. Les résultats ont montré que l'avance est le paramètre le plus significatif sur la rugosité de surface lors de l'usinage des trois aciers étudiés, suivie par la profondeur de passe. Par contre, sur les vibrations de coupe radiales, c'est la vitesse de coupe qui a un effet primordial. Les corrélations entre les deux réponses étudiées : rugosité de surface (R_a) et Amplitude des vitesses de vibration de coupe, sont faibles. Ceci est dû aux vibrations excessives du système usinant lors de l'usinage avec des vitesses de rotation élevées. Les deux réponses rugosité de surface et vibration de coupe en fonction des éléments du régime de coupe ($V, f; D$) sont modélisées par des équations de régression multiple de second ordre avec des coefficients de corrélation (R^2) très acceptables.

Mots clés: Usinage dur, Aciers Trempés, Céramique de coupe, Rugosité de surface, Vibration, ANOVA.

Abstract

This work is an investigative study of the machining parameters effect (cutting speed, feed rate and depth of cut) on main machinability criteria, which are in this case: wear (tool life), surface roughness and radial cutting vibrations during dry hard turning of three steel grades: AISI 52100 (66 HRC), AISI 4140 (61 HRC) and AISI 1045 (39 HRC) with mixed ceramic CC650 (70% Al_2O_3 + 30% TiC). The experiments planning is the methodology undertaken. Special emphasis has been placed on the tool wear behavior depending on the machining conditions for turning the hardest steel (AISI 52100). The results obtained show on the one hand that when the cutting speed increases from 140 m/min to 530 m/min the tool life drops from 35 min to 4 min, on the other hand, when the advance increases from 0.08 mm/rev to 0.22 mm/rev, the tool life decreases from 28 min to 20 min. ANOVA analysis of Taguchi's L_{27} Orthogonal array is applied to determine the contribution of each cutting parameter as well as the interactions on surface roughness and radial vibrations. Results showed that surface roughness (R_a) mainly influenced by feed during the machining of the three steels studied, followed by the depth of cut. On the other hand, cutting speed is the more influenced parameter on radial cutting vibrations effect. Correlations between the two responses studied: surface roughness (R_a) and cutting vibration velocities are low. This is due to the excessive vibrations of the machining system during turning with high rotational speeds. Surface roughness and cutting vibration responses are modeled by second order regression with high determination of coefficient (R^2).

Keywords: Hard machining, Hardened steels, Cutting ceramic tool, Surface roughness, Vibration, ANOVA.

الخلاصة

تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى معرفة تأثير عوامل القطع على المعايير الأساسية لعملية القطع، والتي تتمثل في هذه الحالة: تآكل أداة القطع (طول حياة الأداة)، نوعية السطح المشكل واهتزازات القطع خلال عملية خراطة لثلاث معادن مصلبة (AISI 52100 ؛ AISI 4140 ؛ AISI 1045) ، بدون تبريد، باستعمال أداة قطع من نوع الخزف المختلط (الأسود) (CC650) . بشكل خاص، تمت دراسة تطورات تآكل أداة القطع تحت تأثير عوامل القطع من سرعة وتغذية خلال خراطة المعدن الصلب. النتائج المحصلة عليها أوضحت أن ارتفاع سرعة القطع من 140 م/د إلى 530 م/د يؤدي إلى انخفاض عمر الأداة من 35 د إلى 4 د، وأن ارتفاع سرعة التغذية من 0.08 مم/دورة إلى 0.22 مم/دورة يؤدي إلى انخفاض عمر الأداة من 28 د إلى 20 د. عملية التحليل الإحصائي حسب المتغيرات لنتائج جدول التجارب حسب تاغوشي 27 ($Taguchi L_{27}$) ، أوضحت بأن زيادة التغذية تؤثر سلباً بشكل كبير على نوعية السطوح المشغلة للمعادن الثلاثة، فيما أن العامل الثاني المؤثر هو عمق القطع. أما بالنسبة لاهتزازات القطع، فإن سرعة القطع هي العامل الأكثر تأثيراً. الدراسة أوضحت كذلك بأن العلاقة بين خشونة السطح (R_a) وسعة سرعات اهتزاز القطع (V_e) ، ضعيفة (ويرجع ذلك إلى الاهتزازات المفرطة لنظام التشغيل الآلي أثناء التشغيل بالسرعات العالية). تمت نمذجة خشونة السطح و اهتزاز القطع بدلالة عوامل القطع من خلال معادلات انحدار متعددة من الدرجة الثانية مع معاملات ارتباط مقبولة للغاية (R^2).

الكلمات المفتاحية:

تشغيل على الصلب، فولاذ صلب، أداة القطع الخزفية، خشونة السطح، الاهتزاز، تحليل المتغيرات.

Remerciements

Ce mémoire est le fruit de travail effectué au Laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (LRTAPM), Université Badji Mokhtar-Annaba.

Je souhaiterais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, le Professeur Lakhdar BOULANOUAR, pour m'avoir accompagné dans la démarche scientifique de ce projet et pour son soutien et sa patience tout au long de ces années.

Je voudrais remercier tout particulièrement le Professeur Med Athmane YALLESSE, de l'Université 8 mai 1945 - Guelma de m'avoir fait l'honneur d'examiner et présider le jury de cette thèse.

Je souhaite également remercier les Professeurs Idriss AMARA et Hamid HAMADACHE d'avoir accepté d'être les examinateurs de ce travail de recherche.

Je tiens à saluer ici toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail de thèse de doctorat.

Je remercie tous les membres de ma famille : mes parents ; mon épouse ; mes frères ; mes sœurs, pour leur soutien, pour leurs encouragements, tout au long de ces années.

Enfin, j'exprime ma profonde reconnaissance à ma famille et mes amis pour leurs soutiens.

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale	1
I. Chapitre I : Synthèse Bibliographique ; Usinage des matériaux	2
I.1 Introduction	2
I.2 Paramètres d'usinage	2
I.3 Formation du copeau	3
I.4 Outils de coupe	4
I.4.1 Matériaux	4
I.4.2 Géométrie des outils	5
I.4.2.1 Angles de coupe	5
I.4.2.2 Acuité d'arête	7
I.4.2.3 Brise copeau	8
I.4.3 Usure de l'outil	8
I.4.3.1 Phénomènes d'usure	8
I.4.3.1.1 Phénomènes mécaniques	8
I.4.3.1.2 Phénomènes physico-chimiques	9
I.4.3.2 Modèles d'usure	9
I.5 Usinage avec des outils en céramique	10
I.6 Modélisation de la coupe	11
I.6.1 Modélisation par éléments finis	12
I.6.1.1 Paramètres de la méthode des éléments finis	12
I.6.1.2 Type de résolution	12
I.6.2 Types de modélisation	12
I.6.3 Critère de séparation	13
I.7 Etat de surface	13
I.7.1 Les paramètres de mesure de rugosité	14
I.8 La vibration et le contrôle vibratoire	16
I.8.1 Introduction	16
I.8.2 Instrument de mesure de la vibration	17
I.8.3 Recommandation SANDVIK pour réduire la vibration de coupe en tournage	17
I.8.4 Corrélation entre la vibration de coupe et la rugosité de surface	18
I.9 Plan d'expérience	19
I.9.1 Choix du plan expérience	19

I.9.2 Analyse de la variance (ANOVA)	19
I.9.2.1 Définition	19
I.9.2.2 Hypothèse de l'analyse	20
I.9.2.3 Principe de l'analyse	20
I.10 Tournage dur	21
I.10.1 Usinabilité des aciers durs	22
I.10.2 Métallurgie en tournage dur	22
I.10.3 Avantage du tournage dur	22
I.10.4 Recommandation des matériaux à outils pour le tournage dur	22
I.11 Etude et analyse bibliographie sur l'usinabilité des aciers traités	24
I.11.1 Usinage de l'acier AISI 52100	24
I.11.1.1 Introduction sur l'acier AISI 52100	
I.11.1.2 Etat de l'art sur l'usinage de l'acier AISI 52100	24
I.11.2 Usinage de l'acier AISI 4140	33
I.11.2.1 Introduction sur l'acier AISI 4140	33
I.11.2.2 Etat de l'art sur l'usinage de l'acier AISI 4140	33
I.11.3 Usinage de l'acier AISI 1045	34
I.11.3.1 Introduction sur l'acier AISI 1045	34
I.11.3.2 Etat de l'art sur l'usinage de l'acier AISI 1045	35
I.12 Conclusion de la synthèse bibliographique	37
II. Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales	38
II.1 Matériaux	38
II.2 Traitements thermiques	38
II.3 Usinage	39
II.4 Plan d'expérience	39
II.5 Caractérisation des paramètres technologiques	39
II.5.1 Procédure expérimentale	40
II.5.2 Processus de traitement des données	43
II.5.3 Etude et suivi de l'usure	43
II.5.4 Etude et mesure de la Vibration de coupe	43
II.5.5 Etude et mesure de la Rugosité	44
II.5.6 Etude et mesure de la Température	44
III. Chapitre III : Résultats et Discussion	45
III.1 Matériau	45

III.2 Traitements thermiques	46
III.3 Analyse du comportement à l'usure de la céramique mixte CC650 lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 dur.....	46
III.3.1 introduction	46
III.3.2 Durée de vie de l'outil de coupe en tournage dur de l'acier AISI 52100.....	46
III.4. Corrélations entre paramètres de coupe et paramètres technologique pour aciers d'étude	52
III.4.1 Analyse statistique des résultats	52
III.4.1.1 Présentation des résultats	52
III.4.1.2 Analyse ANOVA des résultats	57
III.4.1.2.1 ANOVA pour la rugosité Ra	57
III.4.1.2.2 ANOVA pour les vibrations de coupe radiales (Ve)	58
III.4.2 Diagrammes des contours pour la rugosité et les vibrations	67
III.4.3 Modèles de régression	70
III.5 Analyse comparative entre les aciers étudiés	71
III.6 Analyse de la corrélation entre la rugosité et les vibrations radiales	72
Conclusions et Perspectives	75
Références Bibliographiques	77

Liste des Illustrations

Figure 1:	Opération de chariotage en tournage.....	2
Figure 2:	Formation de copeau	3
Figure 3:	Evolution de la gamme des outils de coupe.....	4
Figure 4:	Plans d'outil en main sur un outil de chariotage d'après la norme NF E 66-503	5
Figure 5:	Plans et angles en main sur les outils courants : outil à charioter droit (d'après NF E 66-502)	6
Figure 6:	Description géométrique de l'outil	7
Figure 7:	Modes d'usure prédominants selon la température	8
Figure 8:	Usure de l'outil de coupe selon ISO 3685	10
Figure 9:	Analyse d'une surface usinée	14
Figure 10:	Motifs de rugosité	14
Figure 11:	Vibration du système masse-ressort	16
Figure 12:	Profil de la surface en considération de la vibration relative entre l'outil et la pièce usinée	18
Figure 13:	Calcul de la rugosité à l'état dynamique	19
Figure 14:	Recommandation de matière d'outil pour l'usinage dur	23
Figure 15:	Nuances et duretés des aciers couvertes par des investigations de recherches	23
Figure 16:	Forces de coupe en fonction de la progression de l'usure de l'outil...	26
Figure 17:	Eprouvette d'essais	38
Figure 18:	Cycles des traitements thermiques pour les différentes nuances d'aciers testées	39
Figure 19:	Montage d'usinage, mesure de la rugosité et des vibrations	42
Figure 20:	Matériels et appareils de mesure utilisés pour l'étude expérimentale	42
Figure 21:	Analyse de la température prise par le thermo-laser avec le logiciel thermospot	44
Figure 22:	Evolution de l'usure en dépouille de la céramique mixte (CC650) en fonction du temps lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 trempé à différentes vitesses de coupe ($f = 0.08\text{mm/tr}$ et $D=0.3\text{mm}$)	47

Figure 23:	Comportement vibratoire de la machine outil à vide en fonction de l'accroissement de la fréquence de rotation de la broche	47
Figure 24:	Evolution de la durée de vie de la CC650 en fonction de la vitesse de coupe	48
Figure 25:	Evolution de l'usure en dépouille de l'outil de coupe (CC650) en fonction du temps à différentes avances, lors du chariotage de finition de l'acier AISI 52100 trempé ($V = 200\text{m/mn}$ et $D = 0.3\text{mm}$)...	49
Figure 26:	Evolution de la durée de vie de l'outil CC650 en fonction de l'avance.....	50
Figure 27:	Morphologie de l'usure en dépouille de l'outil de coupe CC650 en fonction des paramètres de coupe	51
Figure 28:	Morphologie de l'usure en cratère de l'outil de coupe CC650 pour les vitesses de coupe 280m/mn et 530m/mn	51
Figure 29:	Évolution de la rugosité pour les différentes combinaisons du plan d'expérience lors de l'usinage de l'acier AISI 52100	56
Figure 30:	Évolution de la rugosité pour les différentes combinaisons du plan d'expérience lors de l'usinage de l'acier AISI 4140 42CD4	56
Figure 31:	Évolution de la rugosité pour les différentes combinaisons du plan d'expérience lors de l'usinage de l'acier AISI 1045	57
Figure 32:	Effet des paramètres de coupe (V , f , D) sur la rugosité de surface (R_a) de l'acier AISI 52100	62
Figure 33:	Effet des paramètres de coupe (V , f , D) sur la rugosité de surface (R_a) de l'acier AISI 4140.....	63
Figure 34:	Effet des paramètres de coupe (V , f , D) sur la rugosité de surface (R_a) de l'acier AISI 1045.....	64
Figure 35:	Effets des paramètres de coupe (V , f , D) sur les vibrations (V_e) lors de l'usinage de l'acier AISI 52100.....	65
Figure 36:	Effet des paramètres de coupe (V , f , D) sur les vibrations (V_e) lors de l'usinage de l'acier AISI 4140.....	66
Figure 37:	Effet des paramètres de coupe (V , f , D) sur les vibrations (V_e) lors de l'usinage de l'acier AISI 1045.....	67
Figure 38:	Diagrammes des contours pour la rugosité R_a et la vibration radiale V_e lors de l'usinage de l'acier AISI 52100.....	68
Figure 39:	Diagrammes des contours pour la rugosité R_a et la vibration radiale V_e lors de l'usinage de l'acier AISI 4140.....	69
Figure 40:	Diagrammes des contours pour la rugosité R_a et la vibration radiale V_e lors de l'usinage de l'acier AISI 1045.....	70

Figure 41: Résultats comparatifs de la rugosité et des vibrations de coupe des aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045, (a) $V = 140\text{m/min}$ (b) $V = 210\text{ m/min}$ (c) $V = 280\text{m/min}$	73
Figure 42: Intensité de la relation entre la rugosité (R_a) et les vibrations radiales (V_e) pour les trois aciers d'études.....	74

Liste des Tableaux

Tableau 1:	Types d'outils en céramique	11
Tableau 2:	Définition des paramètres liés aux motifs	15
Tableau 3:	Définition des paramètres liés à la ligne moyenne.....	15
Tableau 4:	Modèles mathématiques obtenus lors de l'usinage dur de l'acier AISI 52100.....	27
Tableau 5:	Paramètres d'usinage pour la série Uni-factorielle pour l'acier 100Cr6..	40
Tableau 6:	Paramètres d'usinage et niveaux de variation (plan factoriel L ₂₇)	40
Tableau 7:	Plan expérimental orthogonal Taguchi L ₂₇	41
Tableau 8:	Composition chimique des aciers d'étude (% en poids), balance Fe.....	45
Tableau 9:	Taux de dégradation de la durée de vie en fonction de l'augmentation de la vitesse de coupe.....	48
Tableau 10:	Taux de dégradation de la durée de vie en fonction de l'augmentation de l'avance.....	50
Tableau 11a:	Résultats de la rugosité de la surface usinée et des vibrations radiales de l'outil en fonction des différentes combinaisons du plan L ₂₇ de Taguchi lors de l'usinage de l'acier AISI 52100.....	53
Tableau 11b:	Résultats de la rugosité de la surface usinée et des vibrations radiales de l'outil en fonction des différentes combinaisons du plan L ₂₇ de Taguchi pour l'acier AISI 1045.....	54
Tableau 11c:	Résultats de la rugosité de la surface usinée et des vibrations radiales de l'outil en fonction des différentes combinaisons du plan L ₂₇ de Taguchi pour l'acier AISI 4140.....	55
Tableau 12a:	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra) d'acier AISI 52100.....	59
Tableau 12b:	Analyse de la variance (ANOVA) pour la vibration de coupe (Ve) d'acier AISI 52100	59
Tableau 13a:	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra) d'acier AISI 4140.....	60
Tableau 13b:	Analyse de la variance (ANOVA) pour la vibration de coupe (Ve) d'acier AISI 4140.....	60
Tableau 14a:	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra) d'acier AISI 1045.....	60
Tableau 14b:	Analyse de la variance (ANOVA) pour la vibration de coupe (Ve) d'acier AISI 1045.....	61

Tableau 15: Modèles de régression de la rugosité et des vibrations radiales en fonction des paramètres du régime de coupe pour les différents aciers étudiés.....	70
Tableau 16: Coefficients de corrélation entre la Rugosité de surface (Ra) et les Vibrations radiales (Ve) des différents aciers étudiés.....	74

Table des notations

D	Profondeur de passe, mm
f	Avance de coupe, mm/tr
r	Coefficient de Pearson
Ra	Écart moyen arithmétique du profil, μm
Rt	Hauteur totale du profil, μm
Rz	Hauteur maximale du profil, μm
t	Température de coupe, $^{\circ}\text{C}$
T	Durée de vie en minute
V	Vitesse de coupe, m/mn
a	Avance de coupe, mm/tr
ρ	Coefficient de Spearman
KT	Usure en cratère, mm
VB	Usure en dépouille, mm
$[VB]$	Usure en dépouille admissible = 0.3 mm
Ve	Vélocité de la vibration, mm/s
$\mathcal{K}_r$	Angle de direction principale de l'outil en degré
α	Angle de dépouille principale en degré
γ	Angle de coupe en degré
λ_s	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante principale de l'outil en degré
β	Angle de taillant en degré
R^2	Coefficient de détermination

Introduction Générale

L'optimisation du processus de coupe et le contrôle des paramètres technologiques est un objectif primordial afin de réduire les coûts d'usinage. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail. Il consiste à étudier le comportement de l'outil de coupe en terme d'usure, qualité de surface et vibrations de coupe en tournage dur des aciers AISI 52100 (66 HRC), AISI 4140 (61 HRC) et AISI 1045 (39 HRC) avec un outil en céramique mixte CC650 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$).

Les matériaux d'étude sont des aciers caractérisés par une bonne trempabilité et possèdent un durcissement important après un traitement thermique de trempe. Ils sont très recommandés pour les pièces résistantes à l'usure. L'acier AISI 52100, qui est reconnu sous le nom «acier à roulement», est un acier faiblement allié, de durcissement qui varie généralement de 60 à 68 HRC après un traitement thermique de trempe. Il est recommandé pour la fabrication des roulements, butées, cames, galets...etc. L'acier AISI 4140 est un acier faiblement allié, dont le durcissement après trempe augmente la dureté à (53-63) HRC. Il est destiné à différents usages mécaniques, tels que les arbres, les engrenages...etc. L'acier AISI 1045 est un acier à outil au carbone non allié, qui se caractérise par une bonne usinabilité et une stabilité dimensionnelle. Il est destiné à la construction des moules pour plastiques, des entretoises, des plateaux de fixation...etc. Sa dureté après un traitement thermique de trempe peut atteindre 35 à 58 HRC.

Le premier chapitre expose une introduction à l'usinage, synthétisant les paramètres de coupe, les phénomènes régissant les processus de coupe, les outils de coupe, la modélisation de la coupe, l'état de surface, des généralités sur les vibrations et la vibration de coupe, la corrélation entre la vibration et la qualité de surface, les plans d'expérience, l'usinage dur et l'état de l'art du thème étudié.

Le second chapitre, présente les matériaux et les techniques expérimentales utilisés.

Le chapitre 3 présente les résultats et l'analyse du comportement de l'outil de coupe en termes d'usure durant le tournage de l'acier AISI 52100 et la rugosité de surface ainsi que les vibrations de coupe en tournage des trois aciers d'étude en fonction des paramètres de coupe. Une étude statistique permettant la déduction de modèles mathématiques, liés aux résultats des essais renforce et met en évidence l'apport de cette étude. L'analyse comparative entre l'usinage des trois aciers étudiés et la corrélation entre la rugosité de surface et la vibration de coupe est le point fort de ce travail.

En dernier lieu, une conclusion générale est élaborée suivie d'une liste de références bibliographique.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique: Usinage des matériaux

I.1 Introduction

L'usinage est un procédé de mise en forme par enlèvement de matière. C'est le plus utilisé pour la fabrication des pièces mécaniques. Le principe de base est la création et l'évacuation d'un copeau qui fait jouer deux mécanismes physiques : la déformation plastique au sein du copeau et son contact avec l'outil.

L'enlèvement de la matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (défini par une vitesse de coupe V_c) et le mouvement d'avance (défini par une vitesse d'avance f). En tournage par exemple, le chariotage est une opération d'usinage d'un cylindre mené d'un mouvement rotatif et par un déplacement linéaire de l'outil de coupe parallèlement à l'axe de rotation de la pièce (Fig.1).

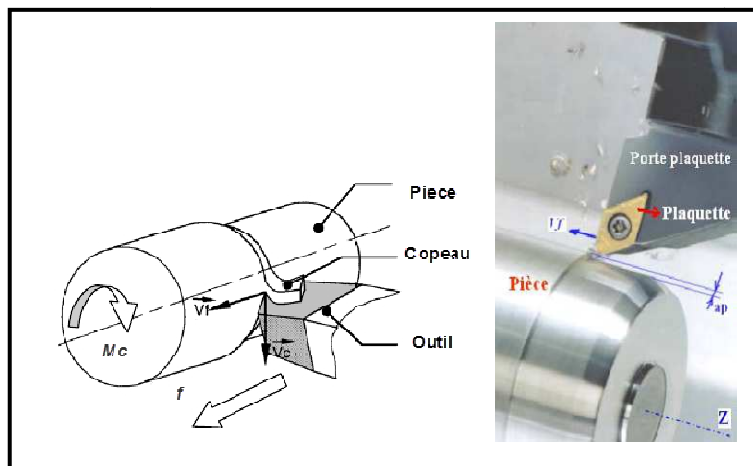


Figure1 : Opération de chariotage en tournage [5]

I.2 Paramètres d'usinage

Les paramètres de coupe conditionnent les phénomènes mécaniques mis en jeu au cours du procédé et sont à l'origine des puissances mécaniques et thermiques dissipées. Les principaux paramètres influençant la formation et l'écoulement du copeau sont : la vitesse de coupe, l'avance, les angles de coupe, le comportement intrinsèque du matériau usiné, le frottement à l'interface outil-copeau, la lubrification, ...etc.

Vitesse de coupe V_c : c'est la vitesse relative entre l'arête de coupe de l'outil et la matière enlevée.

Avance f : est la valeur du déplacement de l'outil en mm /tr, lorsque la pièce a effectué une révolution (c'est le pas de l'hélice). C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée.

Profondeur de passe (profondeur de coupe) a_p : est la différence des rayons entre la surface à usiner et la surface usinée. La profondeur de passe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance.

I.3 Formation du copeau

Dans une coupe orthogonale, l'interaction entre l'outil, la pièce et le copeau peut se décrire de manière relativement simple [1] : l'avance de l'outil dans la couche superficielle de la pièce comprime fortement la matière et génère un cisaillement interne entre la pointe de l'outil et la surface libre de la pièce (Fig. 2). Cette zone de formation du copeau est appelée zone primaire de cisaillement (Z1), ou 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.

Le copeau ainsi formé, frotte sur la face de coupe de l'outil avec une vitesse différente de la vitesse de coupe et une section différente de la section initiale. Cette zone de frottement et de glissement entre l'outil et le copeau est appelée zone secondaire de cisaillement (Z2). Le frottement induit une forte élévation de température en plus des taux importants de cisaillement [2-4].

Le frottement dans cette zone génère une quantité de chaleur très importante (~ 20 à 30% de la chaleur totale produite) selon [6], ce flux de chaleur diffuse à la fois dans l'outil et dans le copeau.

Une troisième zone, que l'on nomme zone tertiaire de déformation (Z3), est le résultat du frottement entre la nouvelle surface usinée et la face en dépouille de l'outil. La vitesse de frottement à ce niveau est égale à la vitesse de coupe. A l'échelle microscopique, les phénomènes d'adhésion conduisent là aussi à un cisaillement plastique important. Les phénomènes sont bien moins intenses que dans (Z2), mais sont responsables de la qualité de la surface usinée et notamment de sa rugosité et des contraintes résiduelles (phénomène d'écrouissage).

Ces trois zones de déformation, sont le siège de phénomènes mécaniques (déformations élastiques et/ou plastiques) et thermiques (génération de chaleur) très importants qui dépendent de plusieurs paramètres tels que la rhéologie du matériau usiné, la nature du contact et les propriétés thermo-physiques du couple outil-matière. Le phénomène fondamental, de la formation du copeau en coupe stationnaire, est un glissement plan unidirectionnel pseudopériodique.

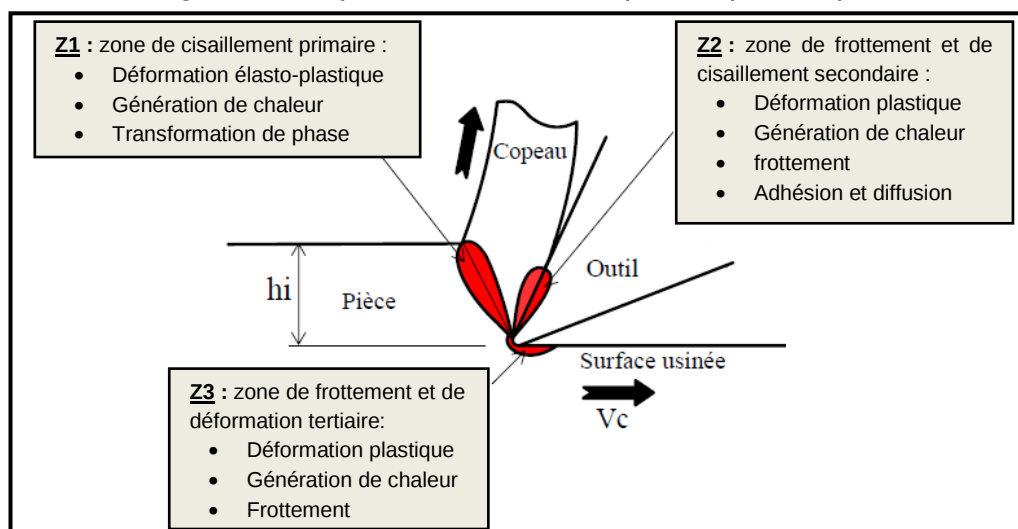


Figure2 : Formation de copeau

I.4 Outils de coupe

I.4.1 Matériaux : l'évolution de la nature des matériaux à usiner spécialement en dureté, expose l'outil de coupe durant l'opération d'usinage à des sollicitations thermodynamiques de plus en plus sévères. L'outil qui fait l'élément primordial de la réussite d'usinage, doit répondre à certains paramètres physiques: une dureté supérieure à celle de la pièce à usiner, un maintien de dureté à haute température, une rigidité et ténacité importante, résistance à l'oxydation et à l'usure. Ce qui a imposé des développements spectaculaires dans les nuances des outils. Actuellement, Il existe plusieurs types d'outils possédants des propriétés et des capacités différentes. La Figure 3 montre l'évolution de la gamme des matériaux des outils de coupe.

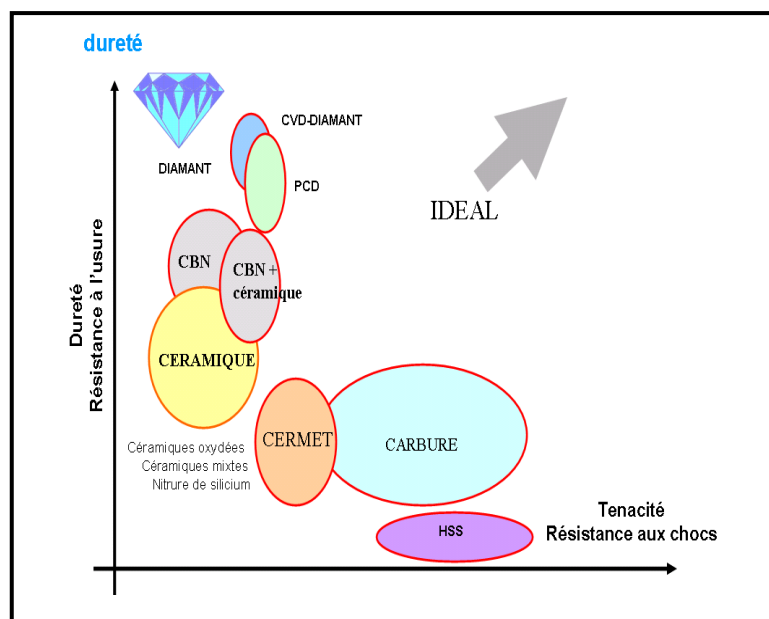


Figure 3 : Evolution de la gamme des outils de coupe [7]

* *Aciers rapide* : se sont des aciers hypoeutectoides fortement alliés en tungstène ou molybdène et renforcés par d'autres additifs (Chrome, Vanadium ou Cobalt). La dureté est de l'ordre de 700 à 1000 Hv.

* *Les carbures* : se sont des matériaux formés de carbure de tungstène, titane ou tantale. Des éléments métalliques comme le cobalt sont utilisés pour assurer la liaison de ces carbures. La dureté est de l'ordre de 1250 à 1800 Hv.

* *Les cermets (carbures cimentés)* : se sont des alliages métalliques ayant subis des diffusions thermiques de carbone, azote ou de bore. La dureté est de l'ordre 1500 à 2000 Hv.

* *Les céramiques* : il ya deux matériaux de base, les oxydes d'aluminium (Al_2O_3) et les nitrures de silicium (Si_3N_4). Les céramiques pures sont à base de Al_2O_3 mais

contiennent un peu de zirconium (ZrO_2) qui permet d'augmenter la ténacité, tandis que les céramiques mixtes contiennent jusqu'à 30 ou 40% de TiC ou TiB_2 . Les céramiques à base de Si_3N_4 (Sialon) possèdent de très bonnes propriétés thermiques. Leur haute ténacité et leur faible coefficient de dilatation font des sialons des outils très résistants aux chocs thermiques. La dureté est de l'ordre de 2000 Hv.

* *Nitrure de Bore Cubique (CBN)* : CBN et PCBN (Nitrure de Bore Cubique polycristallin) sont des outils ultra-durs. Ils conservent leurs propriétés dans le domaine des hautes températures. Ils sont composés de nitrures de bore (50 à 90%) et des liants TiC ou TiN . La dureté est de l'ordre de 3200 Hv.

* *Diamant* : c'est un produit naturel, mais il peut également être fabriqué synthétiquement comme le CBN. Sous l'effet d'une pression extrêmement élevée et de hautes températures, le carbone pur (C) se transforme en diamant. La dureté atteint jusqu'à 8000 Hv.

I.4.2 Géométrie des outils : la partie active d'un outil est caractérisée par différents paramètres géométriques qui sont : les angles de coupe, l'acuité d'arête, le brise-copeaux et le rayon de bec.

I.4.2.1 Angles de coupe : Les angles de coupe sont repérés dans différents plans de projection. Dans le cas de l'outil en main, les principaux plans de projection sont les plans : P_f , P_p , P_r , P_s (Fig. 4):

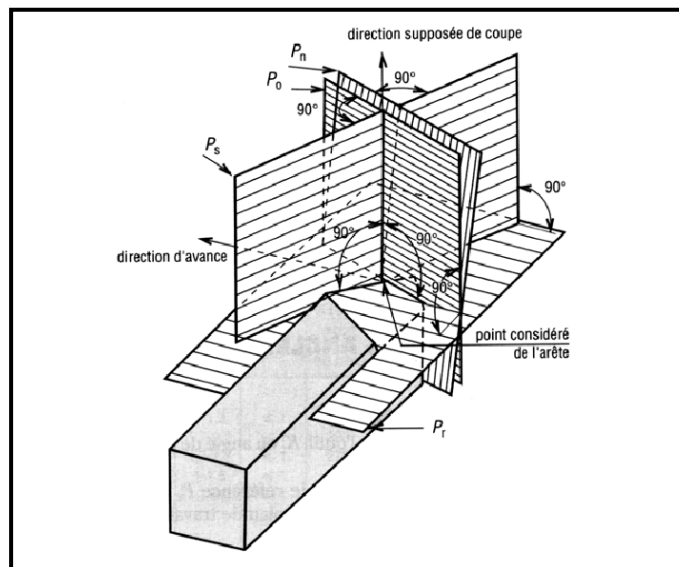


Figure 4 : Plans d'outil en main sur un outil de chariotage d'après la norme [NF E 66-503](#).

* Plan d'arête de l'outil, P_s : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r ;

* Plan de travail conventionnel, P_f : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r , au point considéré de l'arête, et parallèle à la « direction supposée d'avance » de l'outil.

* Plan vers l'arrière de l'outil, P_p : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r et au plan de travail conventionnel P_f , au point considéré de l'arête.

Les angles de l'outil (Fig. 5) sont :

- Angle de direction principale de l'outil (ϕ) : angle aigu mesuré dans le plan de référence entre le plan d'arête P_a et le plan de travail P_f .
- Angle d'inclinaison de l'arête tranchante principale de l'outil (γ) : angle aigu mesuré dans le plan d'arête P_a entre l'arête et le plan de référence P_r .
- Angle de dépouille principale (β) : angle aigu entre la face de dépouille principale P_d et le plan d'arête P_a ;
- Angle de taillant (α) : angle aigu entre la face de coupe P_c et la face de dépouille P_d .
- Angle de coupe (γ_o) : angle aigu entre la face de coupe P_c et le plan de référence P_r .

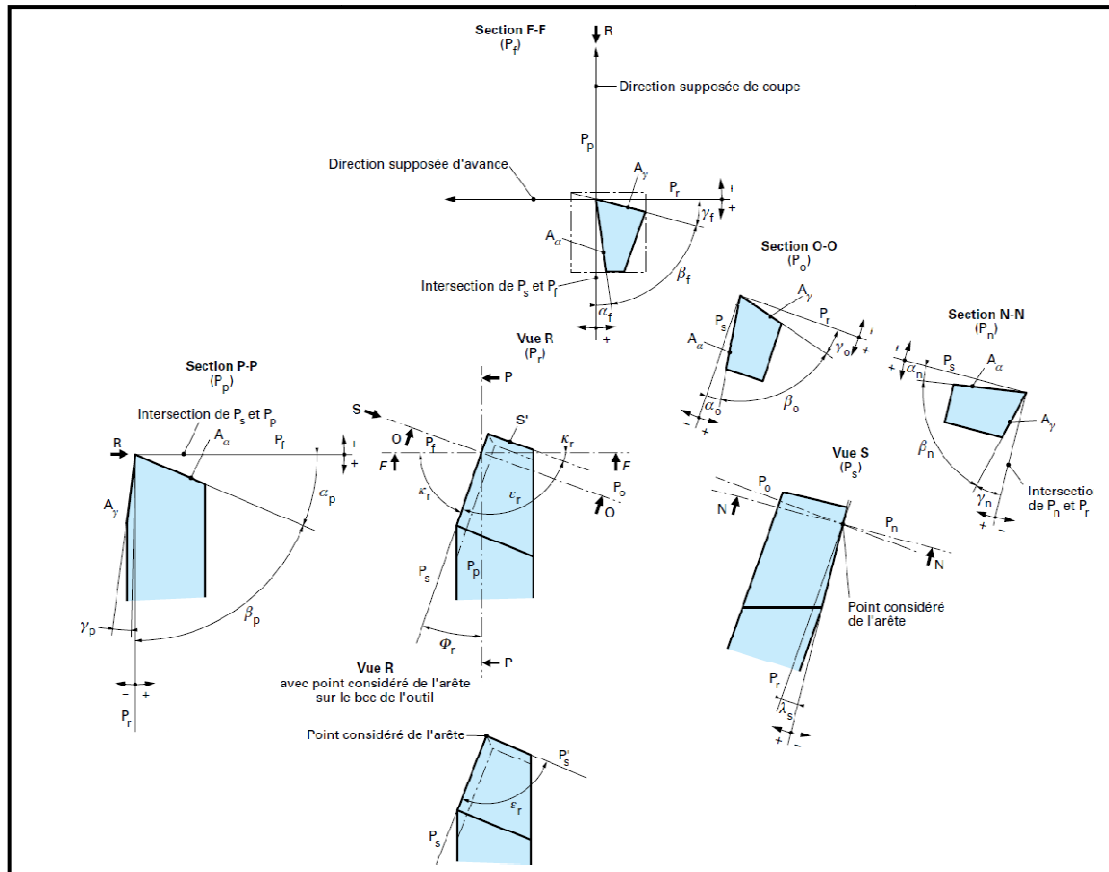


Figure 5 : Plans et angles en main sur les outils courants : outil à chariot droit (d'après NF E 66-502)

Ces trois angles sont liés par l'équation (1) et sont définis selon le besoin dans un des plans de section :

$$(\alpha + \beta + \gamma) = 90^\circ \quad (1)$$

P_0 : Plan orthogonal de l'outil, plan perpendiculaire au plan de référence P_r et au plan d'arête (P_s), au point considéré de l'arête ;

P_n : Plan normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré ;

P_f : Plan de travail conventionnel.

P_p : Plan vers l'arrière de l'outil.

Les angles γ angle de coupe et λ_s angle d'inclinaison jouent un rôle fondamental pour l'évacuation du copeau [8]. L'augmentation de γ diminue les forces de coupe et la température durant l'usinage [9]. L'angle en dépouille principale α n'a aucune influence sur les forces de coupe [10]. Mais les angles en dépouille principale et secondaire, sont très importants et seront toujours minimisés pour augmenter la résistance mécanique des arêtes et du bec de l'outil [11]. Plus l'angle de dépouille α augmente, plus la résistance de l'arrête de coupe aux forces mécanique diminue [12].

I.4.2.2 Acuité d'arête

La frontière entre les faces de coupe et les faces de dépouille se nomme acuité d'arête. Elle est la source de formation du copeau. Deux types d'acuité d'arête peuvent exister, l'arête chanfreinée et l'arête arrondie [12] ou la formation du copeau est différente (Fig. 6). Pour un matériau, l'acuité d'arête sera parfaite à un rayon nul $R_b = 0$. Il faut prévoir une géométrie combinant un arrondi suivi d'un chanfrein afin de créer une zone de compression suffisamment importante pour que la rupture du matériau usiné se produise de manière continue [14]. L'acuité arrondie diminue les forces de coupe plus que l'acuité chanfreinée, [15-17].

L'avantage de l'acuité des arêtes est l'augmentation de la durée de vie d'outil ainsi que la maîtrise des états de surface, un faible rayon permet à l'outil une meilleure résistance à l'usure [18]. Les recherches ont montré que la durée de vie d'outil avec une acuité de $10\text{ }\mu\text{m}$ est 5 fois plus grande que celle d'un outil avec une acuité de $50\text{ }\mu\text{m}$.

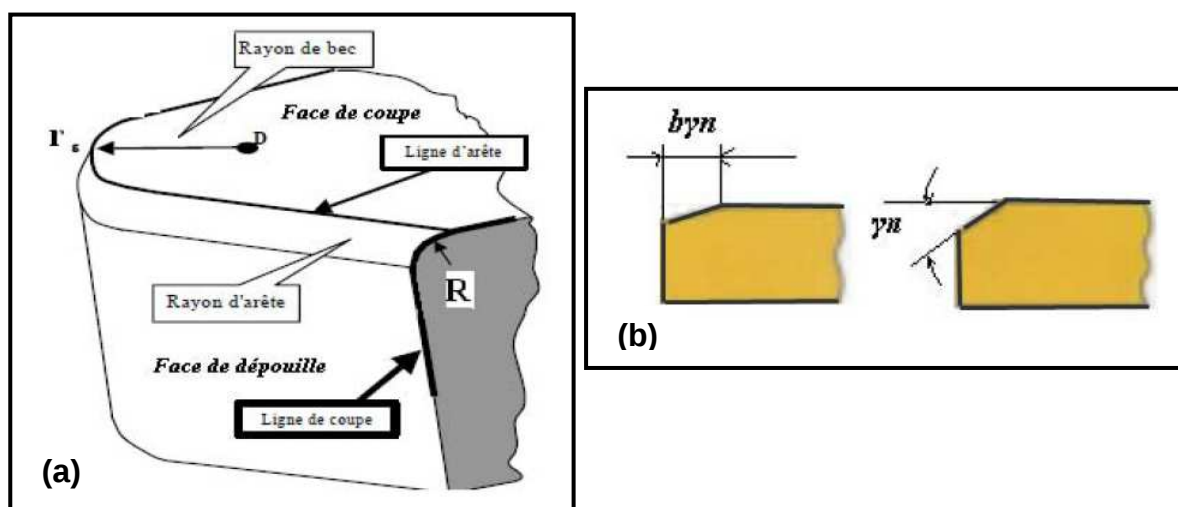


Figure 6 : Description géométrique de l'outil [19].

(a) : Acuité arrondie

(b) : Acuité chanfreinée

I.4.2.3 Brise copeau

Pour des mesures de sécurité de travail et qualité de surface de pièce usinée, il est important de briser le copeau durant le fonctionnement [20]. Alors, la surface de coupe est formée en cuvette qui facilite le fractionnement de copeau.

Rayon de bec (rayon de pointe): le rayon agit sur l'effort de coupe et l'état de surface. L'augmentation du rayon en travail de finition améliore l'état de surface et renforce la résistance de l'outil, ce qui réduit l'usure en dépouille et en cratère. Cependant l'augmentation du rayon accroît l'effort de coupe et peut provoquer des broutements tout en rendant plus difficile le contrôle de copeaux (Fig. 6) [21].

I.4.3 Usure de l'outil

Durant l'usinage, l'outil de coupe subit des contraintes mécaniques et thermiques importantes suite aux contacts agressifs entre la pièce, l'outil et le copeau. Les frottements au niveau de ces contacts ne sont pas équivalents. La concentration de ces contraintes provoque de dégradation des surfaces de la partie active de l'outil par usure. Des phénomènes mécaniques et physico-chimiques définissent les mécanismes de l'usure de l'outil de coupe (Fig. 7) [22].

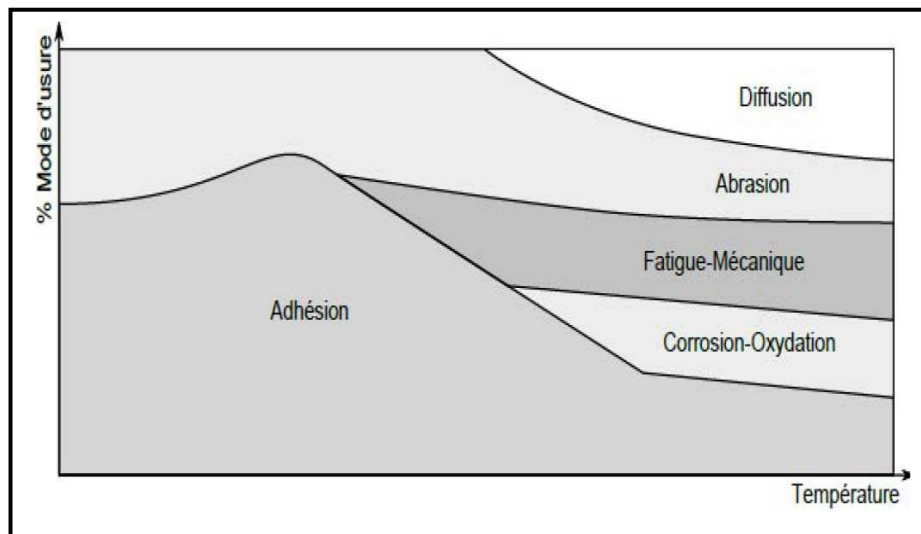


Figure 7 : Modes d'usure prédominants selon la température [22].

I.4.3.1 Phénomènes d'usure

I.4.3.1.1 Phénomènes mécaniques

* Abrasion : Si la matière usinée comporte des particules dures (carbures, nitrures, oxydes..), alors, durant le frottement avec l'outil en usinage à des pressions importantes, ceci favorise l'usure abrasive.

* Adhésion : Aux fortes pressions entre l'outil et la surface usinée et suite aux états de surface, des micro-soudures se créent au cours de l'usinage, ce qui conduit à l'apparition de l'arête rapportée.

* Fissure : durant l'usinage, La combinaison des hautes températures à l'interface outil / copeau et des vibrations de l'outil engendrées par la déformation plastique peut provoquer des fissures au sein de l'outil.

* Déformation plastique : l'arête de l'outil se déforme plastiquement sous l'effet de la pression à haute température.

I.4.3.1.2 Phénomènes physico-chimiques

* Oxydation : l'élévation de la température de l'outil durant l'usinage lubrifié, causera la vaporisation de l'eau dans les fluides. Cette vaporisation de l'eau avec l'oxygène de l'air provoque une fragilisation de l'outil par oxydation.

* Diffusion chimique : la température élevée et la pression d'usinage constituent l'énergie suffisante pour que des atomes de copeau puissent migrer vers l'outil ou vice versa [23,24].

I.4.3.2 Modes d'usure

Au cours de l'usinage, la géométrie de l'outil de coupe se dégrade. Ce qui impacte l'état de surface de la pièce. Alors, la connaissance de niveau d'usure est importante afin de prévoir le changement de l'outil.

Selon les faciès, trois types d'usure sont observés :

- **Usure en dépouille (VB_B)**: c'est l'usure plane sur la face de contact pièce-outil (face de dépouille principale) qui forme une bande de stries parallèle à l'arête de coupe. La hauteur moyenne est couramment désignée par le symbole (VB). Quand (VB) croît, l'arête de coupe recule et les cotes de la pièce s'écartent de la valeur visée (Fig. 8). Pour les petites profondeurs de passe, les recherches ont trouvé que l'usure est localisée dans la zone de rayon de l'outil VB_c [25,26]. L'usure en dépouille, dans la zone B, dépend essentiellement de la dureté de la pièce et celle de l'outil. Plus l'outil est dur par rapport à la pièce, plus l'usure est faible [27]. L'augmentation des paramètres de coupe: vitesse de coupe, avance et temps d'usinage conduit à l'accroissement de l'usure VB_B [28-33].
- **Usure en entaille (VB_N)**: Suite à des particules métalliques qui sont dues soit à la calamine ou à l'oxydation, à la fin de la zone de contact entre la pièce et l'outil, on observe une usure combinée de faciès dépouille et faciès coupe qu'on appelle "usure en entaille VB_N ". La recherche montre que les paramètres principaux influant cette usure sont la profondeur de passe et l'angle de coupe principale $\mathcal{K}_r$ [34]. L'usinage dur provoque aussi la formation de (VB_N) [35].

- **Usure en cratère(KT)** : le glissement (frottement sévère) du copeau sur la surface de coupe conduit à l'usure en cratère de cette dernière [36], [37] (Fig.8). Elle apparaît sous la forme d'une cuvette, ayant une profondeur maximale(KT) et elle est exprimée par l'équation (2).

$$KT = 0,06 + 0,3f \quad (2)$$

Les facteurs affectant cette usure sont :

- o La dureté du matériau de la pièce usinée [38], plus le matériau est dur plus KT est grande.
- o Les paramètres de coupe : L'augmentation de la vitesse de coupe et du temps d'usinage accélère l'usure en cratère [39-43].
- o Dureté d'outil de coupe : Plus le matériau de l'outil est dur, plus l'usure en cratère est faible [44].

I.5 Usinage avec des outils en céramique

La plus courante application des outils en céramique c'est le tournage dur ou à grande vitesse, mais on peut les trouver aussi en fraisage. Ils sont caractérisés par des productivités élevées. Cependant durant leur exploitation, ils nécessitent certaines précautions. Ils ont des excellentes résistances à l'usure et à la chaleur pour des vitesses de coupe élevées. Ces outils de coupe sont recommandés pour l'usinage dur.

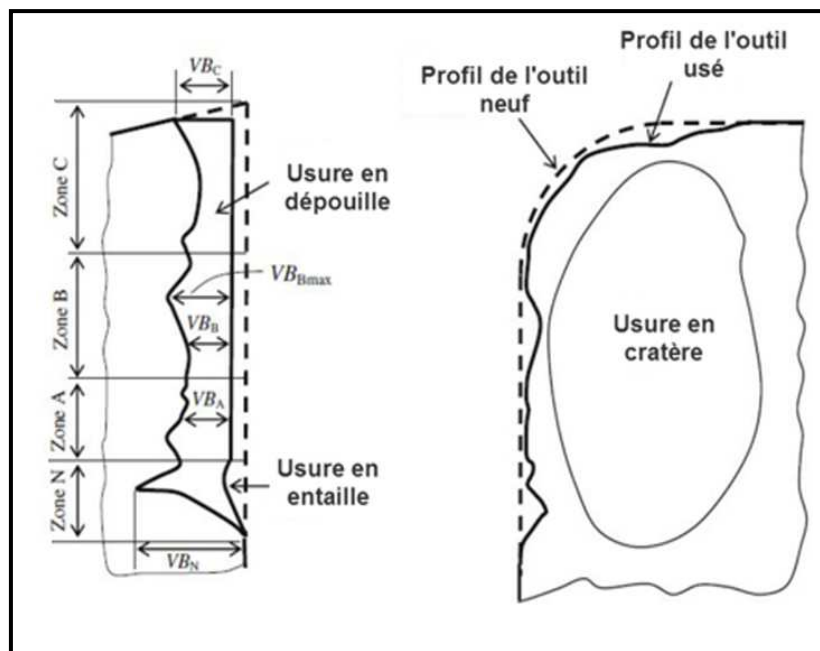


Figure 8 : Usure de l'outil de coupe selon ISO 3685

Le [tableau 1](#) présente les types des outils en céramique pour l'usinage dur.

Tableau 1 : Types d'outils en céramique [44]			
Type d'outil en céramique	Caractéristiques	Recommandation	Ex. Symbole
Nuances Sialon (SiAlON)	Stabilité chimique importante	Usinage des superalliages réfractaires.	CC6060 CC6065
Céramique whiskers	Ténacité renforcée et possibilité de l'arrosage en application	Usinage des alliages à base nickel.	CC670
Céramiques Mixtes (TiC, Ti(C,N))	Bonne ténacité et bonne conductivité thermique	Usinage dur.	CC6050 CC650
Céramiques nitrure de silicium (Si ₃ N ₄)	Ténacité élevée mais manque stabilité chimique.	Usinage fonte grise	CC6190 CC6090
Céramique à base d'oxyde	Stabilité chimique mais manque résistance au choc thermique.	Fonte grise à sec à conditions stables.	CC620

I.6 Modélisation de la coupe

La modélisation de la coupe est un procédé pour quantifier les changements thermomécaniques dans les différentes zones de déformations durant l'usinage. L'objectif est de définir les sollicitations thermiques et mécaniques au niveau de l'outil et de la pièce usinée à partir des paramètres locaux de la température, des efforts et du champ de déformation.

La première modélisation analytique de la coupe permettant de prévoir les efforts de coupe et la formation de copeau ainsi que sa géométrie, est celle de M.E. Merchant [45]. Ce modèle donne des résultats convenables en coupe orthogonale pour les opérations d'ébauche (hypothèse de déformation plane) et pour un copeau continu. En 1965, G. Boothroyd s'est intéressé au champ thermique de la coupe [46]. En 1989, P.L.B. Oxley [47] regroupe les deux aspects dans un nouveau modèle analytique. Ensuite, ce modèle a été développé par d'autres recherches mais qui restent toujours à l'hypothèse des copeaux continus. Les modèles analytiques prévoient uniquement des résultats relativement globaux comme l'effort de coupe, la géométrie ou la température moyenne du copeau et de la pièce, ce qui fait la distinction des modèles numériques qui permettent de prédire des phénomènes locaux comme le champ de température, l'amplitude et la vitesse de déformation, le champ des contraintes résiduelles après usinage, ...

Le modèle le plus développé est celui des éléments finis.

I.6.1 Modélisation par éléments finis

Le développement des calculateurs ont permis d'enrichir la modélisation numérique, bidimensionnelle et tridimensionnelle. La modélisation 2D restera la plus confrontée en simulation suite à la validation des résultats par ceux des essais expérimentaux réalisés en coupe orthogonale. Des nombreux paramètres doivent être définis afin de mettre en place la méthode des éléments finis.

I.6.1.1 Paramètres de la méthode des éléments finis

- **Paramètres réels :** On modélise la géométrie de la pièce et de l'outil par des valeurs proches de la réalité. Cependant, par nécessité de limiter le nombre d'éléments, on ne modélise qu'une partie de la pièce. Le choix des conditions aux limites est une phase cruciale de la modélisation. Les conditions cinématiques (vitesse de coupe, déplacements ...) ne posent pas de problème particulier. La température est imposée constante en traduisant que la pièce réelle ne chauffe pas à cœur pendant l'usinage. Le frottement outil/copeau et pièce est modélisé par loi de Coulomb. La transmission de chaleur entre l'outil et la pièce et la répartition de la chaleur générée par le frottement sont prises de façon arbitraire.
- **Paramètres de calcul :** Le choix du type et de la taille des éléments est primordial pour le calcul par éléments finis. Le type est choisi en fonction de l'analyse, alors que la taille est petite pour prendre compte des très forts gradients mais pas trop petite pour ne pas allonger considérablement les temps de calculs. On sélectionne le type de résolution et le type de modélisation aussi.

I.6.1.2 Type de résolution

Il existe deux types de résolution des équations d'équilibre thermomécanique. La MEF consiste à discrétiser par éléments finis l'espace-temps. Lors de la résolution, si les positions des nœuds des éléments du maillage à l'instant $t + \Delta t$ sont exprimées en fonction de leurs positions, vitesses et accélérations précédentes (t), la résolution est dite Implicite. En revanche, si les positions à l'instant $t + \Delta t$ sont exprimées en fonction de leurs positions, vitesses et accélérations précédentes (t) et de leurs valeurs accentuelles ($t + \Delta t$) alors la résolution est dite Explicite [48].

La résolution Implicite est appropriée généralement à des phénomènes statiques ou faiblement dynamiques afin de limiter l'évolution entre le nœud à l'instant (t) et ($t+\Delta t$). Par contre, la résolution Explicite tient compte des phénomènes dynamiques suite à la convergence rapide de Δt à zéro. La coupe fait partie des phénomènes dynamiques.

I.6.2 Types de modélisation

La coupe peut être modélisée par des formulations : Eulérienne, Lagrangienne ou AEL (Arbitray Lagrangian Eulerian).

- **Modélisations Eulériennes :** Pour cette modélisation, le maillage de la pièce et l'outil est fixe et la matière s'écoule dans le maillage à la vitesse imposée

aux limites (entrée et sortie) [49]. Cette simulation permet de prévoir les champs de contrainte, de déformation, de vitesse de déformation et de température dans la pièce durant un régime de coupe stationnaire avec copeau continu, ce qui fait limiter le domaine d'utilisation de ce modèle.

- **Modélisations Lagrangiennes** : Ce modèle permet de simuler des régimes in-stationnaires sans définition préalable de la géométrie de copeau. Les maillages sont fixes par rapport à la matière [50]. L'avantage de ces modèles est la prévoyance des champs mécaniques et thermiques dans la pièce et l'outil mais l'inconvénient c'est que le maillage reste fixe par rapport à la matière.
- **Modélisations ALE** : La méthode ALE est un compromis des deux premières méthodes en combinant leurs avantages dans la même modélisation. Le maillage suit globalement la déformation de la matière mais les nœuds ne sont pas liés à la matière ce qui permet de limiter la distorsion des mailles. Beaucoup de chercheurs ont utilisé la modélisation ALE pour résoudre les problèmes de réactualisation des surfaces libres et de contacts associés aux modèles Eulériens [51-53].

I.6.3 Critère de séparation

Afin de résoudre le problème de simulation pour les déformations importantes une implantation d'un critère de séparation de nœuds permet de 'déboutonner' le copeau de la pièce suivant une ligne prédéfinie. Le principe du déboutonnage impose une ligne de séparation du copeau par rapport à la pièce. Ce critère est basé sur la valeur limite de déformation plastique du matériau et / ou sur un critère géométrique. Mais, malgré cette séparation, cela n'évite pas la distorsion du maillage ce qui recommande un éventuel remaillage.

I.7 Etat de surface

Les irrégularités des surfaces dues aux procédés d'élaboration d'une pièce sont appelées état de surface. Le principe est de définir un profil de surface en mesures par des instruments à palpeur (profilomètres). Le profil varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité de l'ensemble de l'opération.

Les critères qui peuvent définir la structure de surface sont [54] :

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

L'analyse de la surface est donnée par la (Fig.9).

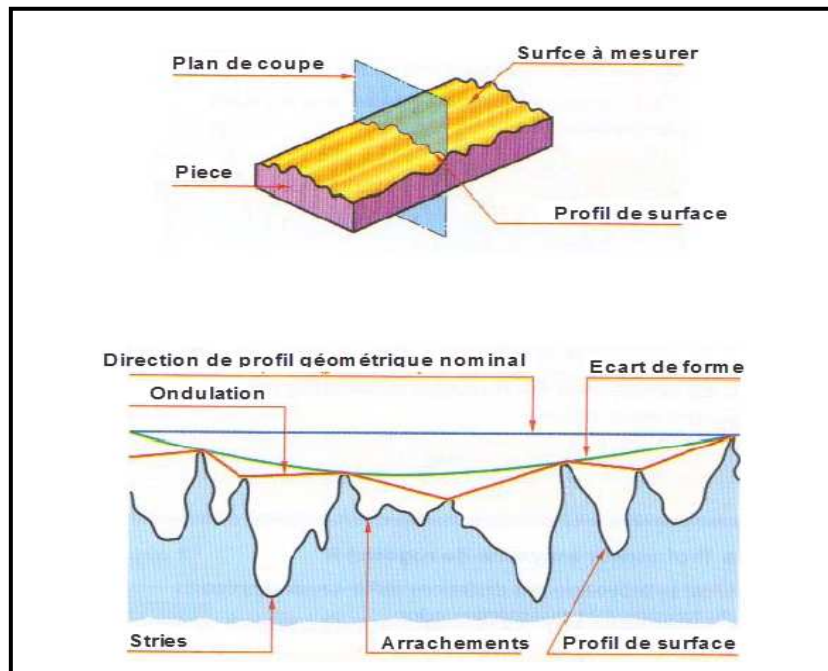


Figure 9 : Analyse d'une surface usinée (D'après ISO 2000, GE40-084N).

I.7.1 Les paramètres de mesure de rugosité

- **Paramètres liés aux motifs** : Selon la norme ISO 12085, Un motif de rugosité est caractérisé par son pas AR_i et ses profondeurs élémentaires H_j et H_{j+1} (Fig. 10). Les principaux paramètres liés aux motifs sont présentés dans le Tableau 2.

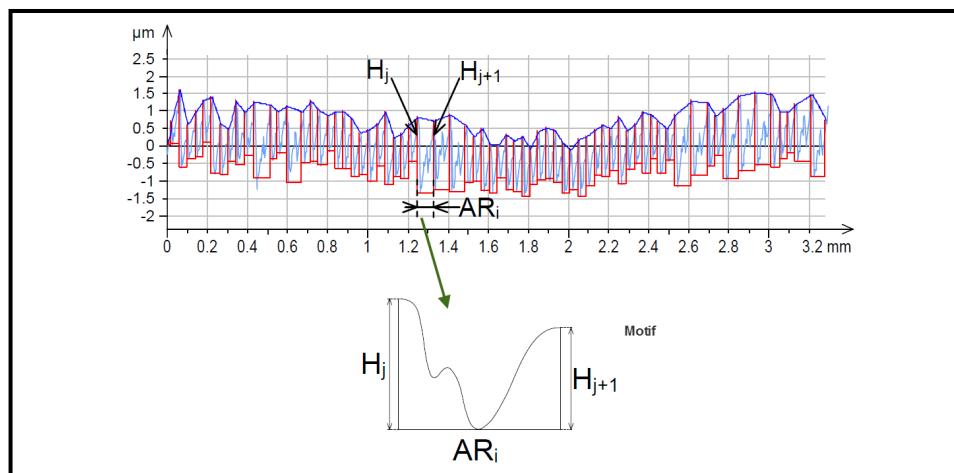


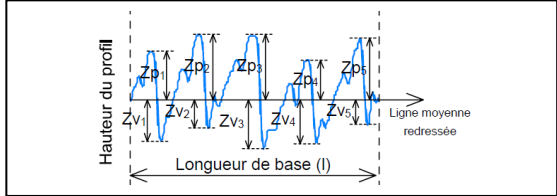
Figure 10 : Motifs de rugosité [55,56]

Tableau 2 : Définition des paramètres liés aux motifs [55]

Intitulé	Définition	Profil de rugosité
Pas moyen des motifs	Moyenne arithmétique des longueurs des motifs	$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$ Avec n = nombre de motifs de rugosité
Profondeur moyenne	Moyenne arithmétique des profondeurs des motifs	$R = \frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} H_j$ Avec n = nombre de motifs de rugosité

- **Paramètres liés à la ligne moyenne** : Selon la norme ISO 4288, le calcul des paramètres est la ligne des moindres carrés calculée sur une longueur de base. La valeur moyenne des paramètres est calculée en effectuant la moyenne des valeurs trouvées sur toutes les longueurs de base. La définition des paramètres liés à la ligne moyenne est donnée dans le [Tableau 3](#).

Tableau 3 : Définition des paramètres liés à la ligne moyenne [55]

Intitulé	Symbole	Définition
Hauteur totale du profil	R_t	Somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, Z_p et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, Z_v à l'intérieur de la longueur d'évaluation. 
Ecart moyen arithmétique du profil évalué	R_a	Moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées $Z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base : $Ra_i = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx$ $Ra = \frac{1}{K} \sum_i^k Ra_i$ (K) : nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)
Hauteur maximale du profil	R_z	Rz_i : somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, Z_p, et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, Z_v, à l'intérieur d'une longueur de base. $Rz = \frac{1}{K} \sum_i^k Rz_i$ (K) : nombre de longueur de base (l) sur la longueur d'évaluation (L)

I.8 Vibration et contrôle vibratoire

La vibration est une cause primordiale retrouvée sur tous les systèmes en mouvement en induisant généralement des défauts de mise en service ou en production. Des instruments de mesure sont utilisés pour la détection et l'analyse des vibrations.

I.8.1 Introduction

La vibration est définie comme une répétition d'un simple mouvement sur lui-même pour une période de temps déterminée. Le mouvement d'un pendule ou d'un ressort montre un exemple typique pour la vibration. On peut noter qu'on ressentira naturellement des vibrations des systèmes tournant ou en mouvement, et notre but c'est de contrôler ces oscillations et agir dans le sens d'amortir ou d'amplifier selon le besoin souhaité.

Le mécanisme masse-ressort présente un exemple très souhaitable pour illustrer le mouvement vibratoire d'une machine tournante (Fig.11).

Le mouvement oscillatoire $x(t)$ de la masse (m) est donné par l'équation :

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

Les caractéristiques requises pour décrire la vibration sont alors :

- La pulsation ω en [rad/s] qui est donnée par $\omega = \sqrt{k/m}$, avec k : raideur du ressort. Ceci peut être traduit en fréquence de vibration $f = \frac{\omega}{2\pi} = 1/T$ qui est un indicateur de nombre total de révolution dans une période de temps spécifique (T).
- L'amplitude de la vibration A .
- La phase de la vibration (φ).

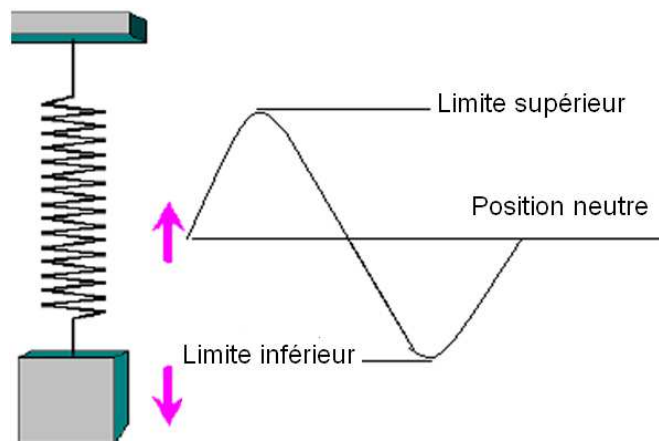


Figure 11: Vibration du système masse-ressort.

I.8.2 Instrument de mesure de la vibration

À la variété des instruments de mesure de la vibration, le principe de la transduction de la vibration est presque le même. Convertir les vibrations mécaniques d'une machine en un signal électrique qui est traité par l'instrument en développant des caractéristiques mesurables (Amplitude, fréquence & phase). Les transducteurs de la vibration sont presque standards pour tous types d'instrument de vibration. Un accéléromètre est un auto-générateur qui produit une tension de sortie proportionnelle à l'accélération de vibration (g). La capacité de voltage généré par unité d'accélération de vibration (g) représente la sensibilité de l'accéléromètre et exprimé en millivolt par g (mV/ g). La gamme des sensibilités des accéléromètres varie de 1 à 10000 mV/g. trois types de capteurs qu'on peut trouver :

- Accéléromètre
- Transducteur vitesse
- Transducteur de déplacement

* **L'accéléromètre** : c'est un instrument de mesure d'inertie qui converti un mouvement mécanique en signal électrique. A partir de la théorie de piézo-électrique, la conversion du signal électrique est directement proportionnelle à l'accélération de la vibration équivalente [57,58]. En application, sur des machines tournantes, on peut trouver trois modèles de montage :

- Montage à goujon
- Montage adhésif
- Montage magnétique

Dans notre étude, on a utilisé le montage magnétique pour enregistrer le signal de la coupe dans une direction radiale.

* **Transducteur vitesse** : il existe deux types principaux de transducteur de vitesse, de bobine émouvante et de type piézo-électrique.

* **Transducteurs de déplacement** : se sont reconnait comme sonde de proximité, très utile et important mais ils sont caractérisés par des applications permanentes sur installation (comme sur une turbine de centrale électrique).

I.8.3 Recommandation SANDVIK pour réduire la vibration de coupe en tournage

Le choix de la meilleure plaquette de coupe éliminera un taux important de la vibration de coupe et améliore la productivité. Il est important de choisir un rayon de courbure inférieur à la profondeur de passe car ceci a le même effet que le choix d'un angle d'engagement correct (si le rayon est assez grand, il va pousser l'outil

dans la direction radiale et affectant la dimension du constituant). Le choix de la nuance la plus résistante à l'usure est importante.

Le réglage du débit de refroidissement, meilleur évacuation du copeau et réduire la vitesse de coupe est important afin de contrôler la vibration.

Il est remarquable que la réduction de la vibration améliore la qualité de surface mais elle infecte la productivité.

I.8.4 Corrélation entre la vibration de coupe et la rugosité de surface

La rugosité est la trace marquée par l'outil de coupe sur la surface de la pièce usinée en déplacement avec des avances déterminées. Ce mouvement relatif interagit de manière complexe, en dépendant des propriétés de la matière de la pièce à usiner, outil de coupe, paramètres de coupe, vibration de l'outil et le cisaillement en formation du copeau [59-61]. La rigidité de la structure de la machine outil et l'homogénéité de la matière de la pièce à usiner sont aussi des paramètres influant sur le processus d'usinage ainsi que le type de copeau enlevé. Les paramètres de coupe, formation de copeau, caractéristiques dynamiques outil-broche et la non homogénéité de distribution de la dureté de la pièce sont généralement considérés comme facteurs significatifs générant des vibrations relatives aléatoires. De ce fait, la rugosité peut se définir théoriquement comme une superposition du profil déterminé à partir de cinématique de coupe et du profil oscillatoire déterminé par la vibration relative entre l'arrête de coupe et la pièce usinée [62]. Les vibrations modifieront le profil de la surface usinée comme montrée sur la Figure 12. Si on considère que le rayon de bec de l'outil de coupe et la vibration relative radiale sont responsable de la géométrie du profil de la surface, le profil déduit pour une période d'un pas de révolution (T) de la pièce usinée durant la coupe est schématisé sur la Figure 13.

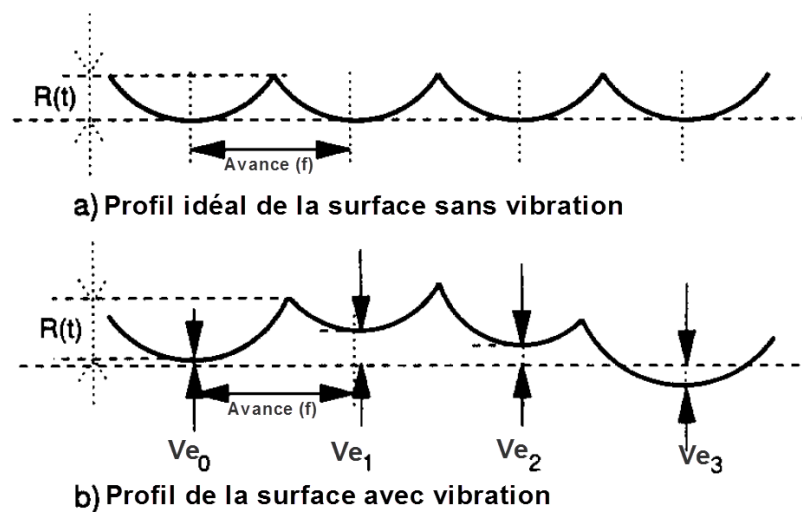


Figure 12 : Profil de la surface en considération de la vibration relative entre l'outil et la pièce usinée [62].

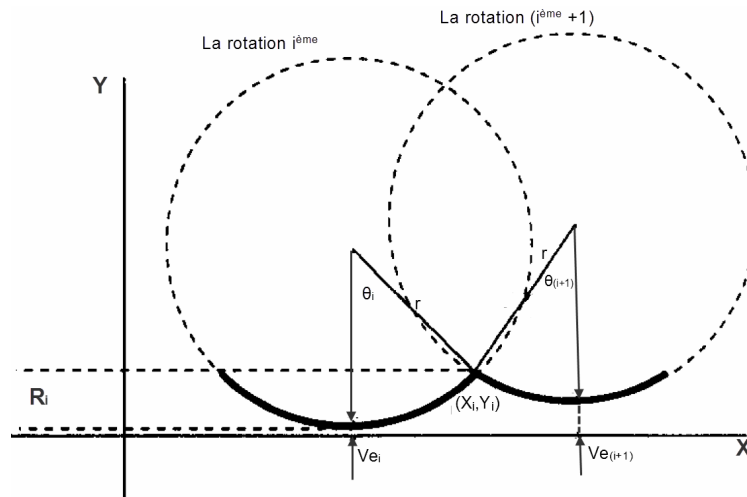


Figure 13 : Calcul de la rugosité à l'état dynamique [62].

I.9 Plan d'expérience

Le plan d'expérience est la suite d'essais d'une expérimentation. Le choix des nombres et des emplacements des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. Le but dans une recherche c'est de réaliser le minimum d'expériences afin de développer des modélisations mathématiques avec des erreurs expérimentales très réduites. Les plans sont construits d'une façon à donner de meilleures qualités statistiques. La surface des réponses englobe l'ensemble des réponses du domaine d'étude.

I.9.1 Choix du plan expérience

Le plus simple des plans d'expériences est le plan factoriel complet qui est caractérisé par un nombre des essais égale à : $N = n^v$, où n est le nombre de niveaux des facteurs et v le nombre des facteurs. Mais la réalisation de la totalité des combinaisons est déraisonnable quand il ya une augmentation des facteurs ou des niveaux, alors on sélectionne une fraction des essais du plan complet en construisant un plan fractionnaire ou le nombre des essais devient $N = n^{v-k}$. (k) est la fraction.

L'interprétation des plans fractionnaires est moins facile que celle des plans complets puisqu'on possède moins d'information [63].

I.9.2 Analyse de la variance (ANOVA)

I.9.2.1 Définition

L'analyse de variance ou analyse factorielle (qui est appelé aussi l'analyse de la variance de Fisher) est une technique permettant de savoir si une ou plusieurs variables dépendantes (appelées aussi variables endogènes ou variables à expliquer) sont en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes (ou

variables exogènes ou variables explicatives), en divisant la variabilité globale trouvée à l'intérieur d'ensemble des données en deux parties.

- Facteurs systématiques qui ont une influence statistique sur l'ensemble.
- Facteurs aléatoires qui ne font pas d'influence.

I.9.2.2 Hypothèse de l'analyse

La forme générale de l'analyse repose sur le test de la normalité des distributions et l'indépendance des échantillons (c'est le test de Fisher).

Les hypothèses à tester sont :

- L'hypothèse nulle correspond au cas où les distributions suivent la même loi normale.
- L'hypothèse alternative est qu'il existe au moins une distribution dont la moyenne s'écarte des autres moyennes.

$$H_0 : m_1 = m_2 = \dots = m_k$$

$$H_1 : \exists (i, j) \text{ tel que } m_i \neq m_j$$

I.9.2.3 Principe de l'analyse

Il consiste à rechercher les sources de variation des réponses. On suppose que les réponses ont été calculées avec le modèle postulé :

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) + e_i \quad (4)$$

Avec : y_i réponse et e_i écart.

En utilisant la méthode des moindres carrés c'est-à-dire en minimisant la somme des carrés. Les réponses calculées s'écrivent $\hat{y}_i$ et l'écart e_i prennent des valeurs particulières r_i qui s'appellent les *résidus*. Alors le modèle peut s'écrire :

$$y_i = \hat{y}_i + r_i \quad (5)$$

La moyenne des réponses mesurées est égale à la moyenne des réponses calculées avec le modèle postulé. On a donc,

$$y_i - \bar{y} = \hat{y}_i - \bar{y} + r_i \quad (6)$$

Où $\bar{y}$ est la moyenne des réponses.

On élève la relation au carré, on obtient la relation:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{i=n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^{i=n} r_i^2 \quad (7)$$

La relation (4) est la relation de base de l'analyse de la variance.

Notant que la somme des carrées des résidus est la plus faible valeur de la somme des carrés des écarts. On a donc :

$$\sum_{i=1}^{i=n} r_i^2 = \text{Minimum de } \sum_{i=1}^{i=n} e_i^2 \quad (8)$$

Si l'on divise la somme des carrés des résidus par le nombre de degrés de liberté des résidus, on obtient la variance des *résidus*

$$V(r_i) = \text{minimum } V(e_i) = (1/(n - p)) \sum_{i=1}^{i=n} r_i^2 \quad (9)$$

Coefficient de détermination R^2 :

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés des réponses calculées corrigées de la moyenne}}{\text{Somme des carrés des réponses mesurées corrigées de la moyenne}}$$

Ce coefficient est une statistique très utile. Il définit la qualité du modèle

Si $R^2 = 0$, le modèle n'a pas de puissance d'explication.

Si $R^2 = 1$, le modèle fournit des réponses calculées égales exactement aux valeurs des réponses mesurées.

Degré de liberté ddl:

Le nombre de degrés de liberté est important car il intervient dans de nombreuses formules de statistique. Walker, H. M a défini le degré de liberté comme étant le nombre des observations moins le nombre des relations entre ces observations [64]. Soit n réponses mesurées indépendamment les unes des autres. Il n'existe pas de relation mathématique entre elles. Les n écarts à la moyenne correspondants ne sont pas indépendants. En effet, il existe une relation mathématique entre ces écarts. Quand on en connaît $n - 1$ on peut calculer le dernier avec la relation mathématique. Il n'y a donc que $(n - 1)$ écarts indépendants. On dit que la série des n écarts à la moyenne possède $n - 1$ *degrés de liberté* [63].

I.10 Tournage dur

Ce procédé d'usinage est devenu un standard pour certains domaines d'activités, comme la fabrication des roulements. Il conduit à réduire le temps d'usinage par élimination de passage de la pièce en rectification pour finition afin d'améliorer l'état de surface. Le gain est économique et écologique. Le résultat de rugosité obtenu est satisfaisant et même concurrencer, dans bien des cas, des opérations traditionnellement réservées à la rectification, il aboutit des Ra de l'ordre de $0.2\mu m$. Mais ceci reste très contraignant aux paramètres de coupe choisis.

Les matières ciblées par cette technique sont des métaux de dureté supérieure à 45 HRC . Comme les aciers pour traitement thermique (trempés).

Cette technique est devenue de plus en plus recommandée en industrie depuis que les plaquettes de coupe, comme celles exploitant le diamant polycristallin (PCD) et le nitrure de bore cubique (CBN) existent. Ces dernières possèdent une dureté très élevée et une grande stabilité chimique à haute température.

I.10.1 Usinabilité des aciers durs

L'usinabilité des aciers durs s'explique par plusieurs critères proposés pour évaluer le début de localisation de bandes de cisaillement. Le critère de Recht [65] considère la compétition entre consolidation par déformation et adoucissement thermique est bornée par 0 et 1.

$$0 \leq -\frac{\partial \tau / \partial \gamma}{\partial \tau / \partial T \cdot \partial T / \partial \gamma} \leq 1 \quad (10)$$

L'initiation d'une bande de cisaillement se produira lorsque τ cessera de croître ($d\tau > 0$) sous l'effet de la consolidation pour décroître ($d\tau < 0$) sous l'effet de l'adoucissement thermique, c'est-à-dire lorsque ($d\tau = 0$). Si le critère est égal à 1, la localisation est imminente. Si la valeur s'étend de 0 à 1, le cisaillement sera catastrophique ; des valeurs supérieures à 1 indiquent prédominance de l'écrouissage et un copeau long et continu ; des valeurs négatives indiquent que le matériau devient, malgré une élévation de température, plus résistant [66].

I.10.2 Métallurgie en tournage dur

En tournage dur des aciers, la température est supérieure à la température d'austénisation, et la durée de montée en température est extrêmement courte ($< 5 \cdot 10^{-4} s$) à une vitesse supérieure à $2 \cdot 10^6$ °C/s . La transformation martensitique est très probable aux interfaces outil-copeau.

I.10.3 Avantage du tournage dur

L'avantage technique du tournage dur est d'assurer une bonne tenue en fatigue et à l'usure des pièces usinées. Donc, il faudra améliorer l'intégrité de surface en rugosité, en contraintes résiduelles et microstructure métallurgique. La rugosité est poussée à $Ra = 0,2 \mu m$ ou la précision dimensionnelles atteint la qualité 6.

I.10.4 Recommandation des matériaux à outils pour le tournage dur

La dureté de matière à usiner en combinaison avec la qualité de surface ciblée recommandent des matériaux d'outillage spécifique (Fig. 14).

Les nuances au nitrure de bore cubique (CBN) sont les mieux adaptées au tournage dur. Elles sont recommandées selon le mode de coupe :

- CB7015 : coupe continue ou légèrement interrompue

- CB7025 : coupe légèrement ou fortement interrompue.
- CB7050 : coupe fortement interrompue et conditions instables.

A côté de la recommandation des outils, la machine doit représenter une bonne stabilité et un alignement pièce parfait. Pour l'arrosage durant le tournage dur, il est préférable de travailler à sec si la stabilité thermique n'est pas trop exigée.

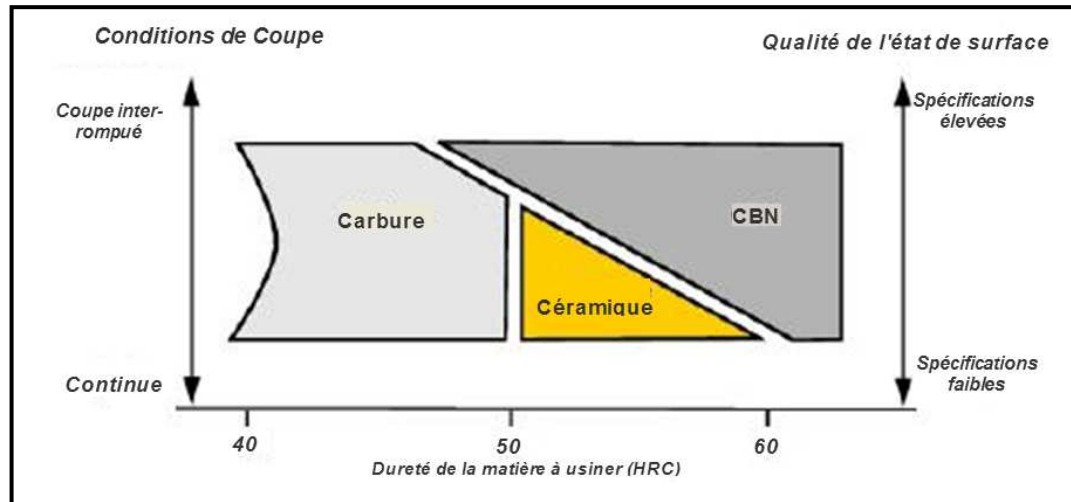


Figure 14: Recommandation de matière d'outil pour l'usinage dur [44].

Une large gamme des aciers durcis a été couverte par des investigations de recherches. Elle est synthétisée par S. Chincharikar et al [67] (Fig. 15).

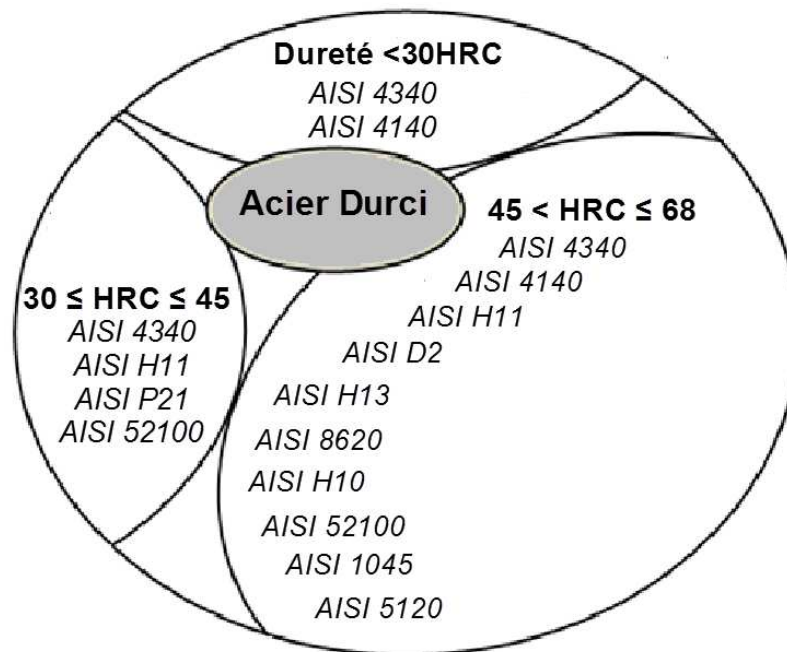


Figure 15 : Nuances et duretés des aciers couvertes par des investigations de recherches [67].

I.11 Etude et analyse bibliographie sur l'usinabilité des aciers traités

I.11.1 Usinage de l'acier AISI 52100

I.11.1.1 Introduction sur l'acier AISI 52100

Le AISI 52100 (100Cr6 selon la norme ISO) est un acier allié au chrome à une teneur de 1,35 à 1,6 % balance en poids. Il est caractérisé par son aptitude au traitement thermique de trempe à l'huile où la dureté augmentera de 240 HB état recuit à environ 68HRC. L'AISI 52100 est destiné à des applications qui exigent une haute résistance aux déformations et à l'usure, il est très économique sur le plan productivité, il s'utilise spécialement pour la fabrication des roulements. Il est caractérisé physiquement par une densité de 7,8 et un coefficient moyen de dilatation $11,4 \times 10^{-6}$ m/(m.°C) pour des températures variée en °C (20,10 0) et $14,7 \times 10^{-6}$ pour des températures (100,700) [68].

I.11.1.2 Etat de l'art sur l'usinage de l'acier AISI 52100

Beaucoup de recherches ont été réalisées durant les dernières années, afin d'améliorer le compromis entre les paramètres d'usinage, la durée de vie des outils et la qualité de surface des pièces usinées. Des modélisations du procédé d'usinage ont été proposé afin d'améliorer la productivité.

Gérard et autres [69], ont étudié l'usinabilité de l'acier durci AISI 52100 et ils ont trouvé que les essais de coupe ont validé expérimentalement que la morphologie du copeau est sous forme de dents de scie envisagé par le critère de Recht.

Gabriel et al. [70] ont étudié l'influence des paramètres de coupe en tournage dur de finition de l'acier AISI 52100 de dureté (62 – 64 HRC) sur les outils de coupe en céramique et PCBN (polycrystalline cubic boron nitride) et sur l'état de surface de la pièce usinée. Les vitesses de coupe, avances et profondeur sont choisis comme suit : (100 à 180 m/mn ; 0.06 à 0.22 mm/tr ; 0.25 mm). Ils ont observé que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à la diminution de la durée de vie de l'outil. En outre, le CB7020 a donnée la meilleure durée de vie en comparaison avec le PCBN et le CC670. Par conséquent, ils ont conclu que ce dernier n'est pas recommandé pour l'usinage d'AISI 52100 trempé. Ils ont trouvé également que la rugosité est très influencée par l'avance. En effet, les rugosités minimales ont été obtenues avec des faibles avances (0,06 à 0,09 mm/tr) et des vitesses de coupes de (116 à 130 m/mn) lors de l'usinage avec le CB7020 & BDN45, alors que pour le CC670, la rugosité optimale a été obtenue à $V_c = 100$ m/mn et elle est équivalente à celle obtenue précédemment avec les vitesses de coupes de 116 à 130 m/mn. Les durées de vie du PCBN sont plus importantes que celles de la céramique dans la plage des vitesses de coupe (100 à 180 m/mn) et des avances de (0,06 à 0,22 mm/tr).

En 2005, Yong & al [71] ont étudié la modélisation des forces de coupe en tournage dur, en prenant en considération l'effet de l'usure de l'outil. Les forces de coupe dues à la formation de copeau et celles dues à l'usure en dépouille de l'outil

sont superposées pour fournir les efforts de coupe résultants. En se basant sur l'approche d'Oxley en modélisation de coupe [72,73], les forces de coupe en tournage dur nécessaires pour la formation de copeau en 3D oblique mécanisme ont été modélisées tout en ignorant la segmentation de copeau à partir des équations de référence :

$$P_1 = F_c \quad (11)$$

$$P_2 = F_t \cos C_s^* + F_r \sin C_s^* \quad (12)$$

$$P_3 = F_t \sin C_s^* - F_r \cos C_s^* \quad (13)$$

Avec : P_1, P_2, P_3 : les forces dans les directions de coupe, axiale et radiale respectivement, et F_c, F_t, F_r : composantes des forces dans les directions de coupe, tangentiel et radiale durant une coupe orthogonal; C_s^* : angle de l'arrête de coupe.

Les composantes des forces dues à l'usure en dépouille $F_{wcutting}$, F_{waxial} et $F_{wradial}$ sont données par :

$$F_{wcutting} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{VB} r \tau_w(z) dz d\theta \quad (14)$$

$$F_{waxial} = - \int_{\theta_1}^{\pi/2} \int_0^{VB} r \sigma_w(z) \cos \theta dz d\theta + \int_{\pi/2}^{\theta_2} \int_0^{VB} r \sigma_w(z) \sin(\theta - \frac{\pi}{2}) dz d\theta \quad (15)$$

$$F_{wradial} = \int_{\theta_1}^{\pi/2} \int_0^{VB} r \sigma_w(z) \cos \theta dz d\theta + \int_{\pi/2}^{\theta_2} \int_0^{VB} r \sigma_w(z) \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) dz d\theta \quad (16)$$

Où : $\theta_1 = \widehat{A\hat{O}\hat{O}'} = \cos^{-1}(\frac{f}{2r})$ et $\theta_2 = \widehat{D\hat{O}\hat{O}'} = \pi - \sin^{-1}((r-d)/r)$

Et les efforts résultants sous l'effet de l'usure et la formation de copeau sont donnés par :

$$P_{1total} = P_1 + F_{wcutting} \quad (17)$$

$$P_{2total} = P_2 + F_{waxial} \quad (18)$$

$$P_{3total} = P_3 + F_{wradial} \quad (19)$$

Où:

$F_{wcutting}, F_{waxial}, F_{wradial}$: forces dues à l'usure en dépouille en tournage 3D.

P_1, P_2, P_3 : Forces dues à la formation du copeau durant la coupe dans les directions axiale et radiale.

$P_{1total}, P_{2total}, P_{3total}$: Force de coupe totale, axiale et radiale dues à l'outil utilisé et la formation copeau.

Pour le tournage dur de l'acier AISI 52100 de dureté 62 HRC avec un outil CBN à des vitesses de coupe variant entre 60 à 180 m/mn, il a été observé que les forces de coupe varient faiblement en fonction de la vitesse [74]. Alors que l'énergie spécifique de coupe diminue de façon significative avec la vitesse.

Yong & al ont trouvé expérimentalement que les forces de coupes totales varient avec la variation progressive de l'usure en dépouille (Fig.16).

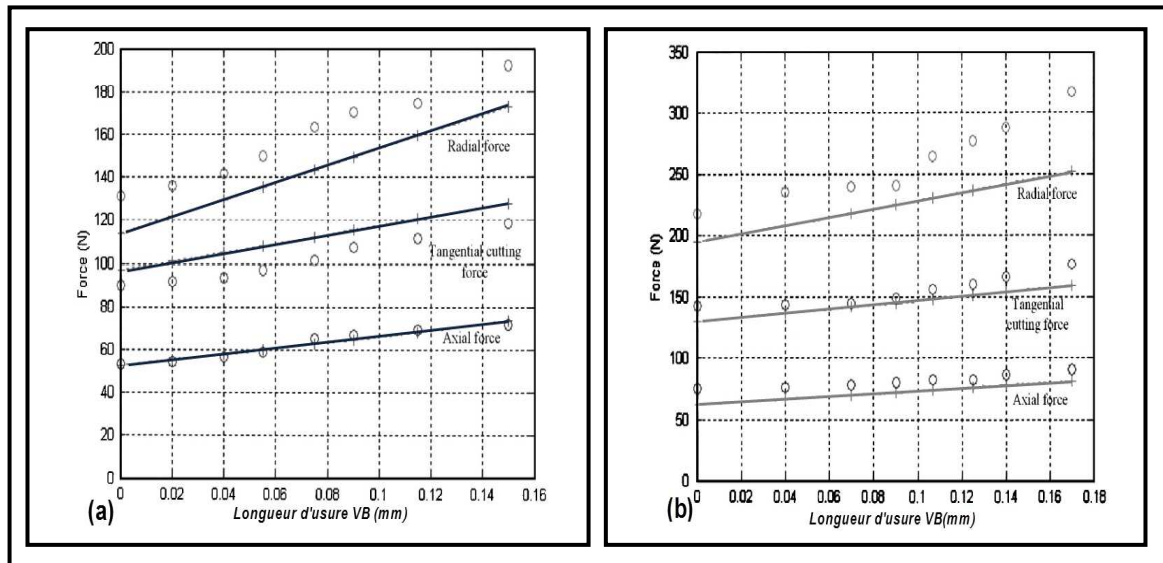


Figure 16 : Forces de coupe en fonction de la progression de l'usure de l'outil [71].

Les forces de coupe en tournage dur de l'acier AISI 52100 dureté 62 à 64 HRC génèrent des contraintes résiduelles en surface de la pièce usinée. Batalha et al. ont enquêté sur l'existence de cette relation [75]. Les paramètres de coupe utilisés en expérience étaient $V_c = 150, 210$ m/mn ; $f = 0,05 ; 0,15$ mm/tr $a_p = 0,05 ; 0,2$ mm et rayon du bec de l'outil (Insert VNMA 160404(08) –BCN 200, revêtu avec céramique et TiAlN de base) 0,4, 0,8 mm. L'expérience a montré que les forces de pénétration et les forces de coupe totale sont beaucoup influencées par la vitesse d'avance et la profondeur de passe, du même pour les contraintes résiduelles qui sont de nature compression. Un modèle empirique décrivant la relation entre la force de pénétration en profondeur et les paramètres de coupes est proposé en équation :

$$F_z = 6,96 + 317,35f + 375,73a_p + 2515,42fa_p \quad (20)$$

De même pour les contraintes résiduelles

$$\sigma_{res} = 20,56 - 57,77f - 87,77a_p + 31,33fa_p \quad (21)$$

Ces modèles linéaires ont un niveau de performance de 90% par rapport aux valeurs exactes. La recherche a montré ensuite que les contraintes résiduelles de compression se trouvent au-dessous de la surface alors que celles de traction se trouvent en surface [76]. L'état de surface des pièces usinées est une caractéristique importante, ce qui est pris en compte par Grzesik et al. [77], en usinant l'acier 52100 sous différents processus et outillages (PCBN 7020 et céramique CC650) à des paramètres d'usinage ($V_c = 100$ (PCBN); 115 (CC) m/mn ; $f = 0,1 \frac{\text{mm}}{\text{tr}}$; $a_p = 0,3$ mm). Les résultats sont avérés plus avantageux pour le CBN. En outre, ils recommandent des processus de superfinition avec des grains abrasifs très fins jusqu'à $9 \mu\text{m}$ afin de réduire la rugosité à 16 fois.

(a) $V_c = 91,2$ m/mn ; $a_p = 0,2032$ mm ; $f = 0,0762$ mm/tr

(b) $V_c = 72,6$ m/mn ; $a_p = 0,2032$ mm ; $f = 0,1143$ mm/tr

S. Benchiheb et al., ont approfondi la recherche de l'influence des paramètres de coupe sur la durée de vie de l'outil CBN 7020 et l'état de surface des pièces usinées en acier (AISI 52100) de dureté 60HRC [78]. Les paramètres de coupe des tests sont: $V_c = 120, 180, 220, 240, 350$ m/mn ; $f = 0,08$, et $0,14$ mm/tr ; $a_p = 0,2$ et $0,3$ mm . L'usure admissible recommandée est $[VB] = 0,3$ mm. La durée de vie de l'outil diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et ceci est lié principalement à l'effet thermique dans la zone de coupe qui adoucit le matériau de l'outil et favorise la manifestation des différents mécanismes d'usure. Par contre, la rugosité de la surface usinée est plus stable aux niveaux élevés des vitesses de coupe suite à l'absence de formation de l'arrête rapportée. Les résultats obtenus de la rugosité rentrent dans la marge de ceux générés par le processus de rectification.

Les modèles de prédiction déduits pour la durée de vie et la rugosité sont donnés sur le Tableau 4 :

Tableau 4 : Modèles mathématiques obtenus lors de l'usinage dur de l'acier AISI 52100 [78]				
Paramètres	Unifactoriel	R^2	Multifactoriel	R^2
Durée de vie T (mn)	$T = e^{16,01} \cdot V_c^{-2,46}$	0.97	$T = e^{13,87} \cdot V_c^{-2,22} \cdot f^{-0,29} \cdot a_p^{-0,22}$	0,97
Rugosité Ra (μm)	$Ra = 1.85 \cdot V_c^{-0,28}$	0.87	$Ra = e^{1,49} \cdot V_c^{-0,28} \cdot f^{0,33} \cdot a_p^{-0,08}$	0,79

La compréhension des mécanismes d'usure de l'outil de coupe en tournage dur est une principale clé technologique qui permettra à optimiser la géométrie de l'outil et les conditions de coupe afin de maîtriser les coûts de fabrication et les profits. C'est dans ce contexte que Huang et al. ont fait une large recherche sur l'usure des outils CBN en tournage dur [79]. Bien que différents modèles d'usure des outils CBN peuvent apparaître, les chercheurs considèrent que la largeur de la bande de l'usure en dépouille VB est généralement considérée comme critère de durée de vie en

tournage dur de l'acier AISI 52100 [80-82]. Poulachon et al. [83] ont conclu que le mécanisme d'usure le plus dominant du CBN en usinage dur de l'AISI 52100, est l'abrasion. Ceci est dû principalement aux alliages des carbures durs de la pièce usinée. Par ailleurs, l'abrasion de l'outil de coupe dépendra de la nature des carbures, leurs tailles et leurs distributions... Chou [84] a observé qu'en tournage dur de l'acier 52100, les couches empilées à la face de dépouille montrent différentes structures et compositions entre les différents outils CBN. La couche empilée en BZN6000 (outil de haute teneur en CBN) montre une structure rugueuse gorgée et en plus du fer oxyde/carbure, une quantité significative de dioxyde de silicium. Le dioxyde de silicium observé a été suggéré comme un produit tribo-chimique. La couche empilée en BZN8100 (outil de faible teneur de CBN) montre une structure de type flocon lisse, avec du fer oxyde / carbure comme composant majeur. Chou a conclu aussi que l'usure adhésive associée au procédé tribo-chimique doit être considérée comme le mécanisme d'usure dominant des outils CBN. Le liant à base de cobalt dans la BZN6000 tend à former des liens solides avec la couche entassée, résultant de l'usure adhésive sévère. Cependant, le nitrure de titane en BZN8100 empêche les fortes liaisons avec la couche entassée, allégeant ainsi l'usure adhésive [85].

Chou et al. [86] ont conclu que le processus des mécanismes de l'usure d'outil CBN en tournage dur ne se base pas seulement sur la géométrie de l'outil et les conditions de coupe, mais aussi sur le contenu CBN en outil, la phase du liant, la stabilité chimique des outils CBN et la composition de la pièce à usiner. Ces derniers sont considérés comme des facteurs importants influant les mécanismes de l'usure des outils CBN en tournage dur.

Il a été conclu également que les principaux mécanismes influant l'usure en tournage dur avec l'outil CBN sont, l'abrasion, l'adhésion et la diffusion. L'attribution de chaque mécanisme dépend de la charge mécanique et thermique au cours de l'usinage, de la composition et de la géométrie du CBN et de la pièce usinée.

Cependant, malgré une large recherche dans ce contexte, il n'y a pas encore un consensus sur plusieurs axes de la caractérisation de l'usure. Hitchiner [87] a indiqué que la dureté de la pièce usinée n'est pas le seul facteur affectant l'usure mais la composition chimique de la pièce peut aussi dans certaines circonstances être un facteur plus important.

Il est recommandé économiquement d'utiliser pour les opérations d'ébauchage ou semi-finition en usinage dur, des outils à haute teneur en CBN et des outils à faible teneur en CBN pour les opérations de finition. Ceci en raison de la durée de vie qui est plus longue pour les deuxièmes. Ce constat est formulé suite à des testes qui ont été conduits dans les mêmes conditions [88,89].

Pour la modélisation du taux d'usure des outils CBN, Poulachon et al. [83] ont rapporté que la durée de vie de l'outil en tournage dur de l'acier AISI 52100 acier peut être exprimée comme suit :

$$V_c t^{0,285} d^{0,112} f^{0,335} \left(\frac{H}{H_0} \right) = 172 \quad (22)$$

$H_0 = 60 \text{ HRC}$; H : La dureté de la pièce usinée, t : la durée de vie de l'outil en mn

Deux autres modèles présenteront le taux d'usure en tenant compte de l'évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps et des mécanismes d'usure possibles [90,91] :

$$\frac{dVB}{dt} = \frac{(\cos \alpha + \tan \gamma)R}{[VB(R - VB \tan \alpha)]} \{ K_{abra} K \left(\frac{P_a^{n-1}}{P_t^n} \right) V_c VB \bar{\sigma} + K_{adhé} e^{a\bar{T}} V_c \bar{\sigma} + K_{diff} \sqrt{V_c VB} e^{-\frac{K_Q}{\bar{T} + 273}} \} \quad (23)$$

Où : K_{abra} : coefficient d'usure abrasive, $K_{adhé}$: coefficient d'usure adhésive, K_{diff} : coefficient d'usure par diffusion, VB : largeur d'usure en dépouille, K_Q : coefficient lié à l'activation de la diffusion, γ : valeur absolue de l'angle d'inclinaison, α : angle de dépouille, R : rayon du bec, P_a : dureté des particules abrasives, P_t : dureté de l'outil, $\bar{\sigma}$: contrainte normale moyenne, $\bar{T}$: température à l'interface outil – pièce, K et n : définissant le rapport $\frac{P_t}{P_a}$ [92].

Pour l'usure en cratère :

$$\frac{dKT(x)}{dt} = K_{abra} K \left(\frac{P_a(x)^{n-1}}{P_t(x)^n} \right) V_{cop}(x) \sigma(x) + \frac{1}{h} K_{adhé} e^{aT(x)} V_{cop}(x) \sigma(x) + K_{diff} e^{-\frac{K_Q}{T(x) + 273}} \sqrt{V_{cop}(x)} \frac{\sqrt{x+\Delta x} - \sqrt{x}}{\Delta x} \quad (24)$$

Où : $KT(x)$: profondeur de l'usure en cratère à l'interface outil/copeau à la position (x) , $T(x)$: distribution de la température prédite en utilisant le model de [65], $\sigma(x)$: distribution de contrainte prédite en utilisant [66], V_{cop} : vitesse du copeau le long de l'interface outil/copeau prédite en utilisant [60], h : longueur de contact outil/copeau prédite en utilisant [67], Δx : segment infinitésimale le long de l'interface outil/copeau.

Les coefficients d'usure pour l'usinage dur de 56100 par l'outil KD050 sont calibrés à :

$$K_{abra} = 0,0295 ; \quad K_{adhé} = 1,4761 \times 10^{-14} ; \quad a = 9,0313 \times 10^{-4} ; \quad K_{diff} = 5,7204 \times 10^6 ; \quad K_Q = 20460$$

Sahin [93] a fait une comparaison des durées de vie entre un outil céramique et un outil CBN en usinage dur de l'acier 52100 en utilisant la méthode de Taguchi. Les variables considérées ont été, la vitesse de coupe, l'avance et la dureté de l'outil afin de calculer la durée de vie. Les outils utilisés dans l'expérience étaient KY1615 (dureté 2145Hv), KY4400 (dureté 2250Hv) et CBN/TiC (dureté 3660Hv). Vitesses de coupe ($V_c = 100; 140; 196 \text{ m/mn}$), avance ($f = 0,06; 0,084; 0,1176 \text{ mm/tr}$) a_p est fixe (0,2mm). La meilleure durée de vie a été obtenue pour la combinaison ($V_c =$

100; $f = 0,06$; CBN) et qui est agréée avec [94]. La durée de vie diminue significativement avec l'augmentation de l'avance, spécialement pour les outils céramiques suite à leur faible stabilité chimique. Le modèle mathématique exprimant la relation entre la durée de vie moyenne et les variables d'usinage prédéfinies est donné par l'équation suivante :

$$T_{\text{moy}} = 190 - 0,79Vc - 955f + 0,0324 H \quad (25)$$

Où H : dureté de l'outil.

Yallese et al [95] ont étudié l'influence des paramètres de coupe en usinage dur de l'acier 52100 sur la durée de vie de l'outil CBN 7020, les efforts de coupe et la qualité de surface de la pièce usinée. Il a été trouvé qu'aux vitesses élevées (aux alentours de 280m/mn), la dégradation de l'outil est importante et rapide ce qui se traduit par la réduction de sa durée de vie. Par conséquent, ceci influe négativement sur la qualité de surface de la pièce usinée. Pour un critère d'usure admissible suivant la surface en dépouille $[VB]=0,3$ mm, la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe est exprimée par le modèle suivant:

$$T = e^{14,65} V_c^{-2,18} \quad (R^2 \approx 0,997) \quad (26)$$

Le volume de copeau enlevé est calculé par :

$$Volume = V_c f a_p T \quad (27)$$

Il a été conclu également que la vitesse de coupe optimale est 120 m/mn et la rugosité est plus stable pour les vitesses de coupe au-delà de 120 m/mn et des avances inférieures à 0,1 mm/tr. Les auteurs ont proposé la relation mathématique suivante entre la rugosité et l'usure en dépouille:

$$R_a = K e^{\alpha(VB)} \quad (28)$$

Avec : α & K constantes liées à la vitesse de coupe.

Bouacha et al. [96] ont élargi l'expérience de tournage dur de l'acier AISI 52100 par l'outil CBN 7020 en faisant une analyse statistique de la rugosité de surface et la variation des forces de coupe sous l'effet des différents paramètres de coupe et la dureté de la pièce usinée. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les forces de coupe diminuent. Ceci est dû principalement à l'adoucissement plastique de la pièce usinée sous l'effet de l'augmentation de la température de coupe. Tandis-que le paramètre profondeur de coupe n'a pas exprimé une influence significative sur la rugosité de surface. Dans la référence [97], il a été déterminé un modèle quadratique, exprimant la relation entre la rugosité les variables ayant un effet significatif:

$$Ra = 0,29 - 0,01Vc + 14,41f - 33,68f^2 - 0,01Vc.f \quad (29)$$

Avec $R^2 = 99,1\%$

Il a été proposé également un modèle de prédiction de la composante de l'effort de coupe radiale en fonction des paramètres de coupe:

$$F = 936 - 4V_c - 5068f - 778a_p + 18.718f^2 + 1392a_p^2 + 4480fa_p \quad (30)$$

Avec $R^2 = 97,3\%$

Dans le même travail, il a été conclu que l'optimisation de la surface de réponse a permis la détermination des paramètres de coupe optimaux ($V_c = 246 \text{ m/mn}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.15 \text{ mm}$).

Motorcu [97] a complété la recherche de Sahin [93] en sélectionnant différents paramètres de coupe pour l'analyse de l'usure des outils. Il a trouvé que l'outil CBN/TiC se distingue par une meilleure performance par rapport aux outils à base de céramique KY1615 & KY4400. Aux faibles avances, le CBN a enregistré la plus grande durée de vie. Par ailleurs, il faut noter que l'augmentation de l'avance n'est pas assez efficace lorsque la vitesse de coupe est faible. Dans les mêmes conditions d'usinage, la durée de vie de l'outil CBN est 6 à 9 fois supérieure que les outils en céramique. Il a indiqué également que l'usure en dépouille présente une tendance linéaire avec l'augmentation du temps de coupe pour l'outil CBN et une dégradation très rapide pour les outils à bases de céramique. La rugosité de surface R_a , augmente considérablement avec l'augmentation de l'avance et s'améliore pour les faibles profondeurs de coupe et ceci pour les trois types d'outils. Pour les faibles et moyennes vitesses de coupe, il n'y a pas d'effet significatif, Par contre, elle diminue pour les grandes vitesses. Les outils CBN/TiC et KY4400 donnent les meilleurs états de surface, le CBN donne un état de surface amélioré d'environ 11% par rapport à l'outil KY1615.

Bartarya et al. [98] ont étudié l'effet des paramètres de coupe sur les forces de coupe et la rugosité en tournage dur de finition de l'AISI 52100 par l'outil CBN, en utilisant trois vitesses de coupe, trois avances et trois profondeurs de passe: ($V_c = 167; 204; 261 \text{ m/mn}$, $f = 0,075; 0,113; 0,15 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,1; 0,15; 0,2 \text{ mm}$). Ils ont confirmé le résultat de [96] qui suggère que la profondeur de coupe est le paramètre le plus important affectant les efforts de coupe. Suite à l'analyse ANOVA, les modèles mathématiques suivants ont été déterminés:

$$F_x = 9,065 \times 10^{-4}V_c^2 + 27,21f^2 + 4121,33a_p^2 + 0,35V_cf + 838,66fa_p - 0,145a_pV_c - 0,33V_c - 102,99f - 920,84a_p + 95,93 \quad (31)$$

$$F_y = 4,49 \times 10^{-4}V_c^2 - 2111,51f^2 + 8644,88a_p^2 + 0,124V_cf + 4804,17fa_p - 0,73a_pV_c - 1,7V_c + 159,11f - 2343,45a_p + 301,8 \quad (32)$$

$$F_z = 2,01 \times 10^{-4}V_c^2 + 2519,52f^2 + 2094,89a_p^2 + 1,75V_cf + 1974,16fa_p - 0,3a_pV_c - 0,21V_c - 884,08f - 351,63a_p + 99,11 \quad (33)$$

$$Ra = 1,34 \times 10^{-4} V_c^2 + 421,19 f^2 - 21,78 a_p^2 + 7,35 \times 10^{-2} V_c f - 406,34 f a_p + 2,71 \times 10^{-2} a_p V_c - 8,05 \times 10^{-2} V_c - 65,98 f - 61,074 a_p + 10,23 \quad (34)$$

Avec :

F_x : force d'avance, F_y : force radiale, F_z : force tangentielle, Ra : Rugosité de surface en μm .

Attanasio et autres [99] ont étudié l'effet de l'usure de l'outil de coupe CBN100 à la formation de la couche blanche durant l'usinage dur de l'acier AISI 52100. Les paramètres de coupe utilisés sont : ($V_c = 150; 250; 350 \text{ m/mn}$, $f = 0,075; 0,1; 0,125 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,1 \text{ mm}$). Ils ont trouvé que l'usure en cratère est influencée par la vitesse de coupe et l'avance, alors que l'usure en dépouille est influencée majoritairement par la vitesse de coupe. Les épaisseurs de la couche blanche et noire sont augmentées par l'augmentation de l'usure en dépouille. Les vitesses de coupe élevées génèrent des couches blanches plus épaisses et des couches sombres fines.

Revel et autres [100] ont étudié l'usinabilité de l'acier AISI 52100 durant le tournage dur à haute précision. Ils ont utilisé les paramètres de coupe: ($V_c = 210; 260 \text{ m/mn}$, $f = 0,05; 0,1 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,005; 0,01 \text{ mm}$). Ils ont obtenu des niveaux de rugosité de $0,1$ à $0,2 \mu\text{m}$, très compétitifs avec la rectification. Des épaisseurs de couches blanches inférieures à $1 \mu\text{m}$ et des couches de transition de 30 à $50 \mu\text{m}$. Ce processus induit des contraintes résiduelles de compression en surface, qui s'accroissent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Il améliore la résistance à la fatigue de la pièce usinée et l'intégrité de surface.

Piava et al.[101], ont investi sur une étude d'optimisation des paramètres de coupe durant l'usinage dur de l'AISI 52100 avec des plaquettes en céramique. Les niveaux de paramètres appliqués sont : ($V_c = 186.4; 200; 220; 240; 253.6 \text{ m/mn}$, $f = 0,132; 0,2; 0,3; 0,4; 0,468 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,099; 0,15; 0,225; 0,3; 0,351 \text{ mm}$). Ils ont trouvé qu'en utilisant des plaquettes amovibles, la productivité augmente presque le double par rapport aux plaquettes conventionnelles, et la rugosité diminue presque la moitié.

Hosseini et autres [102], ont analysé les températures de coupe durant l'usinage dur de l'acier AISI 52100, ainsi que l'effet de la formation de la couche blanche. Ils ont trouvé que la température augmente de 510 à 850°C lorsque la vitesse de coupe passe de 30 à 260 m/min durant l'usinage avec un outil neuf et passe de 540 à 920°C pour des outils usés. Il a été montré aussi que les couches blanches induites durant l'usinage dur sont formées au dessus et au-dessous de la température de transformation austénitique AC1 [102].

Jouini et autres [103] ont caractérisé la surface obtenue à partir de l'usinage dur de précision de l'acier AISI 52100 par des plaquettes en CBN à des niveaux de paramètres de coupe ($V_c = 210; 260 \text{ m/mn}$, $f = 0,05; 0,1 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0,005; 0,01 \text{ mm}$). Ils ont trouvé que la rugosité est très compétitive au

processus de rectification avec des niveaux de Ra égaux à 0,1 et 0,2 μm , et les épaisseurs des couches blanches et de transition sont homogènes. Les contraintes résiduelles de compression sont localisées en surface au niveau correspond à la couche de transition.

I.11.2 Usinage de l'acier AISI 4140

I.11.2.1 Introduction sur l'acier AISI 4140

L'acier AISI 4140 (DIN : 42CrMo4) est un acier de construction faiblement allié au chrome molybdène, caractérisé par une bonne trempabilité à l'huile, une bonne résistance au surcharge à l'état traité, une bonne résistance à l'usure et une résistance à la fatigue. La trempe se réalise à une température qui se range entre 830 à 880 $^{\circ}\text{C}$, suivi d'un refroidissement rapide à l'huile. Il a une large utilisation en mécanique, arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, matrices et engrenages. Sa dureté après trempe atteint environ 55 HRC et peut dépasser 60 HRC pour certaines nuances d'aciers type AISI 4041. Cette variété et flexibilité des propriétés le rend très recommandé à l'industrie. Ce qui a nécessité de larges expériences pour l'optimisation des paramètres lors de son usinage. Il est caractérisé physiquement par une densité de 7,8 et un coefficient moyen de dilatation thermique $11,1 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{m.K})$ pour les intervalles de températures entre (20 à 100) $^{\circ}\text{C}$ et $13,5 \times 10^{-6}$ pour des températures de [100 à 400] $^{\circ}\text{C}$. La conductibilité thermique en $\text{W}/(\text{m.K})$ est environ 42,6 à 20 $^{\circ}\text{C}$.

I.11.2.2 Etat de l'art sur l'usinage de l'acier AISI 4140

Des recherches ont été réalisées durant les dernières années, afin d'améliorer le compromis entre les paramètres d'usinage, la durée de vie de l'outil et la qualité de la surface usinée. Des modélisations du procédé d'usinage afin d'améliorer la productivité lors de l'usinage de l'acier l'AISI 4140 ont été développées.

Asiltürk et al. [104] ont étudié l'optimisation des paramètres d'usinage en tournage dur de l'acier AISI 4140 (56/57 HRC) en utilisant la méthode de Taguchi. L'outil de test est le model MWLNR 2525M-0.8W avec une combinaison de paramètres de coupes ($V_c = 100, 200, 300 \frac{\text{m}}{\text{mn}}$; $f = 0,18, 0,27, 0,36 \frac{\text{mm}}{\text{tr}}$; $a_p = 0,2; 0,4; 0,6 \text{ mm}$). L'analyse des résultats a montré que la profondeur de passe n'a pas d'effet significatif sur la rugosité de surface et que l'optimum des conditions de coupe est atteint à ($V_c = 150 \frac{\text{m}}{\text{mn}}$; $f = 0,18 \frac{\text{mm}}{\text{tr}}$; $a_p = 0,2 \text{ mm}$). L'avance se présente comme le paramètre le plus significatif sur la rugosité, alors que la vitesse de coupe n'a qu'un faible effet.

Uppal et al [105] sont arrivés à la même conclusion que Asiltürk [104], après variation des intervalles des paramètres de coupe à :

($V_c = 100, 200, 300 \frac{\text{m}}{\text{mn}}$; $f = 0,2; 0,4; 0,6 \frac{\text{mm}}{\text{tr}}$; $a_p = 0,2; 0,5; 0,7 \text{ mm}$). En se servant de la méthode de Taguchi, ils ont trouvé aussi que les facteurs les plus significatifs sont

la vitesse de coupe et l'avance. Dans ce cas, l'optimum des conditions de coupe est atteint avec le régime de coupe ($V_c = 300 \frac{m}{mn}$; $f = 0,6 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 0,2 \text{ mm}$).

Das & al [106], ont étudié l'optimisation de la rugosité de surface en tournage dur de l'acier AISI4340 de dureté 47HRC en utilisant des plaquettes en carbure revêtu, en se basant toujours sur la méthode de Taguchi ($L_{27_3^3}$). L'outil de coupe utilisé est CNMG 120408 (ISO désignation), les niveaux des paramètres de coupe sont : ($V_c = 90, 120, 150 \frac{m}{mn}$; $f = 0,1; 0,15; 0,2 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 0,3; 0,4; 0,5 \text{ mm}$). Les principaux résultats de l'analyse ont révélé que: l'augmentation de l'avance conduit à une augmentation de la rugosité de surface et l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une diminution de la rugosité. Ces résultats sont similaires avec ceux de [107]. L'optimum des paramètres d'optimisation est atteint avec le régime de coupe ($V_c = 150 \frac{m}{mn}$; $f = 0,1 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 0,4 \text{ mm}$).

Sadik [108] a fait une étude comparative sur le développement de l'usure d'un outil CBN (à teneur élevé ~88%) en tournage dur de l'acier AISI 4140 et d'autres aciers durs. Les résultats ont montré que l'usure atteint la valeur admissible ($VB = 0,2\text{mm}$) rapidement. Le mécanisme d'usure dominant dans ce cas est l'usure abrasive. Il a été conclu également qu'il n'y a pas de relation claire entre l'austénite résiduelle après le traitement et l'usinabilité de l'acier dur ainsi que les contraintes résiduelles.

Das et autres [109], ont étudié l'usinabilité de l'acier durci AISI 4140 avec des plaquettes revêtues (TiN) en céramique dans un environnement à sec et dans les conditions de coupe suivantes: ($V_c = 100, 170, 240 \frac{m}{mn}$; $f = 0,05; 0,1; 0,15 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 0,1; 0,2; 0,3 \text{ mm}$). Ils ont trouvé que la rugosité de surface est très impactée par l'avance, alors que l'effet de la profondeur de passe est négligeable. L'augmentation de la vitesse de coupe affecte l'usure en dépouille.

Hessainia et al. [117], ont trouvé à travers la modélisation de la rugosité en fonction des paramètres de coupe et de la vibration dans la direction radiale durant le tournage dur de l'acier AISI 4140 en utilisant de la céramique mixte Al_2O_3/TiC , que l'effet de la vibration sur la qualité de surface est négligeable, tandis que l'effet de l'avance de coupe est dominant.

I.11.3 Usinage de l'acier AISI 1045

I.11.3.1 Introduction sur l'acier AISI 1045

L'acier AISI 1045 (DIN, C45) est un acier non allié, classé dans la famille des aciers à outils, riche en carbone, à usage prédéfini, il est recommandé pour les pièces soumises aux chocs et nécessitant une bonne résistance. Il est généralement destiné pour la fabrication des axes, des engrenages, des vis sans fin, des paliers, des pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres) forets pour perçage, ressorts ... Il

est apte au traitement thermique de trempe à une température de 820 à 860 °C et se refroidit à l'huile ou à l'eau. Après trempe, sa dureté atteint environ 58 HRC. Le coefficient moyen de dilatation thermique est 11.1×10^{-6} m/(m.K) pour des températures de [20 à 100] °C et $14,3 \times 10^{-6}$ pour des températures de [100 à 600] °C. Sa conductivité thermique est environ 48 W/(m.K) à une température de 20 °C.

I.11.3.2 Etat de l'art sur l'usinage de l'acier AISI 1045

Sahin et al. [110] ont étudié l'effet des paramètres de coupe en usinage dur de l'acier AISI 1040 par un outil en carbure revêtu TP100 (TNMG 160408-MF2) en utilisant la relation :

$$Ra = CV_C^m f^n a_p^p \epsilon \quad (35)$$

Avec : V_C , f et a_p sont la vitesse de coupe en m/mn, l'avance de coupe en mm/tr et la profondeur de passe en mm respectivement. C , m , n et p sont des constantes, et ϵ l'erreur.

Les paramètres de coupe appliqués sont:

$(V_C = 181; 208; 240; 276; 317 \frac{m}{mn} ; f = 0,1; 0,13; 0,15; 0,18; 0,21 \frac{mm}{tr} ; a_p = 0,36; 0,43; 0,5; 0,58; 0,66 \text{ mm})$

Et le model de la rugosité de surface a été donnée par l'équation :

$$Ra = 145,76 V_C^{-0,331} f^{1,529} a_p^{-0,167} \quad (36)$$

L'analyse de ce modèle montre que l'avance se caractérise par le degré d'influence (1,529) le plus important sur la rugosité de surface, suivie par la vitesse de coupe et en enfin la profondeur de passe. Autrement dit, selon les exposants de ce modèle, on constate clairement que la rugosité diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe, alors qu'elle s'accroît avec l'accroissement de l'avance..

En 2008, Sahin [111] a amélioré son expérience d'usinabilité de AISI 1050 (dureté : 48HRC) en changeant l'outil de coupe par un outil CBN/TiC (CNGA 120408-L0-B) et limitant les vitesses de coupe à environ 240m/mn. Les paramètres de coupe appliqués sont:

$V_C = 103, 138, 173, 208, 243 \frac{m}{mn} ; f = 0,1; 0,134; 0,169; 0,203; 0,238 \frac{mm}{tr} ; a_p = 0,41; 0,54; 0,67; 0,8; 0,93 \text{ mm})$.

A son tour, il a trouvé que l'avance est le facteur le plus significatif sur les critères de rugosité Ra & Rz . La rugosité de surface générée par l'outil CBN est plus faible que celle produite par l'outil KY 1615. La valeur mesurée de Ra est équivalente à $0.823 \mu m$.

Par la méthode de Taguchi, Yadav et al. [112] ont étudié l'optimisation des paramètres de coupe pour la rugosité de surface AISI 1040 et à leur tour ils ont conclu que l'avance reste le paramètre le plus influent sur la rugosité de surface suivie par la vitesse de coupe. La rugosité augmente avec l'augmentation de l'avance et augmente avec la diminution de la vitesse de coupe.

Ces résultats ont été obtenus dans les conditions de travail suivantes: ($V_c = 175, 220, 264 \frac{m}{mn}$; $f = 0,1; 0,2; 0,3 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 0,5; 1; 1,5 \text{ mm}$) l'optimum des paramètres pour une meilleure qualité de surface est obtenu avec la combinaison du régime de coupe suivant: ($V_c = 264 \frac{m}{mn}$; $f = 0,1 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 1,5 \text{ mm}$).

En se servant de la méthode d'analyse de Taguchi, Kumar & al [113] ont cherché l'optimum des paramètres de coupe pour la rugosité de surface minimale lors de l'usinage de l'AISI 1045 avec deux types d'outils en carbure revêtu avec TiN & TiAlN. Les paramètres de coupe considérés sont: ($V_c = 150, 200, 250 \frac{m}{mn}$; $f = 0,1; 0,2; 0,3 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 0,75; 1,5; 2,25 \text{ mm}$). Ils ont trouvé que l'avance est toujours le facteur le plus significatif sur la rugosité et ceci pour les deux types d'outils testés, et la meilleure qualité de surface est obtenue avec la combinaison des éléments du régime de coupe: ($V_c = 250 \frac{m}{mn}$; $f = 0,1 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 0,75 \text{ mm}$) et ($V_c = 200 \frac{m}{mn}$; $f = 0,1 \frac{mm}{tr}$; $a_p = 0,75 \text{ mm}$) respectivement pour les outils carbure revêtus en TiN et en TiAlN. L'étude comparative a montré que le revêtement TiAlN est nettement meilleur que le TiN. Ceci, grâce à sa dureté élevée, sa résistance accrue à l'usure, et sa bonne stabilité chimique et thermique. Cependant et conjointement à ces avantages, une couche adhésive de Al_2O_3 est formée, prévoyant ainsi une diffusion de l'oxygène dans l'outil.

Quasim et autres [114], ont investi dans le processus d'optimisation de l'usinabilité de l'acier AISI 1045 en utilisant l'outil statistique. Les essais ont été réalisés avec des plaquettes en carbure métallique et en carbure cémenté non revêtu. Les résultats ont montré que la simulation par ABAQUS pour définir les forces de coupe est performante. En effet, l'erreur estimée est de 2,6 à 4,5% par rapport aux valeurs mesurées et que l'outil en carbure a présenté les plus faibles niveaux de force et de température.

I.12 Conclusion de la synthèse bibliographique

L'état de l'art réalisé dans ce chapitre, a montré le positionnement important du processus d'usinage dur dans l'environnement de fabrication par enlèvement de copeau où il est devenu très recommandé suite au profit économique intéressant à travers le compromis cout-qualité. Le développement des outils de coupe de pointe comme la Céramique, le PCD et le CBN a conduit l'exploitation de ce processus vers le succès mais les contraintes économiques recommandent toujours une optimisation des techniques de cette exploitation. Alors, la recherche désire toujours à travers le processus d'atteindre une longue durée de vie du consommable (outil de coupe), une bonne productivité des pièces et une tolérance géométrique très améliorée. En répondant à ces exigences nous devons avoir une meilleure connaissance du compromis entre les paramètres d'usinage, l'environnement et la tribologie du processus. Les applications de mise en forme par usinage des matériaux difficiles à usiner à vitesses élevées continuent de se développer de plus en plus, et il est donc d'intérêt de comprendre et d'être capable d'envisager la modélisation du procédé de coupe.

La bibliographie éditée dans ce chapitre renferme des informations importantes concernant l'usinage dur qui feront une base référentielle pour notre étude.

Dans cette étude, nous investiguons à la qualification de l'outil en céramique mixte CC650 pour l'usinage dure à travers l'analyse de son usure durant le tournage de l'acier AISI 52100 (qui présente la dureté la plus élevée des trois aciers étudiés). Les paramètres technologiques : rugosité de surface et vibration de coupe dans la direction radiale ont été vérifié pour différents régimes de coupe afin d'analyser la corrélation entre eux pour trois aciers durcis AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045.

Chapitre II

Matériaux et Techniques Expérimentales

Dans ce chapitre, on présente les matériels utilisés en qualité soft & hard, les éprouvettes, ainsi que les régimes de coupe pour les essais retenus. Les opérations de chariotage faites sur des aciers sélectionnés pour traitements thermiques qui sont référés à l'acier AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045.

II.1 Matériaux

Les différents traitements thermiques et essais ont été réalisés sur des pièces de formes cylindriques découpées à partir de barres d'aciers industriels de différentes nuances. Les dimensions sont définies comme étant le produit du diamètre par longueur ($\varnothing \times L$ mm) et elles sont égales : (130 x 350), (65 x 350) et (65 x 350), respectivement pour l'acier 100Cr6 (AISI 52100), C45 (AISI 1045) et 42CrMo4 (AISI 4140) (Fig. 17). Les compositions chimiques de ces aciers sont déterminées à l'aide d'un spectromètre à émission optique de type *THERMO SCIENTIFIC ARL 4460* (OES).



Figure 17: Pièces d'essais

II.2 Traitements thermiques

Les traitements thermiques de trempe et de revenu ont été effectués dans un four électrique à résistance WOT 9703- 457 404. Les trempes des pièces ont été réalisées directement dans un bain d'huile à l'ambiante pour le 100Cr6 & 42CrMo4, et à l'eau pour le C45. Les pièces ont été austénitisées à une température de 850 °C suivies par des revenus à 200 °C et refroidies à l'air (Fig. 18). Les mesures des duretés ont été faites par un duromètre portable equotip. Elles ont atteint 66 HRC pour l'acier 100Cr6, 39HRC pour le C45 et 61HRC pour le 42CrMo4.

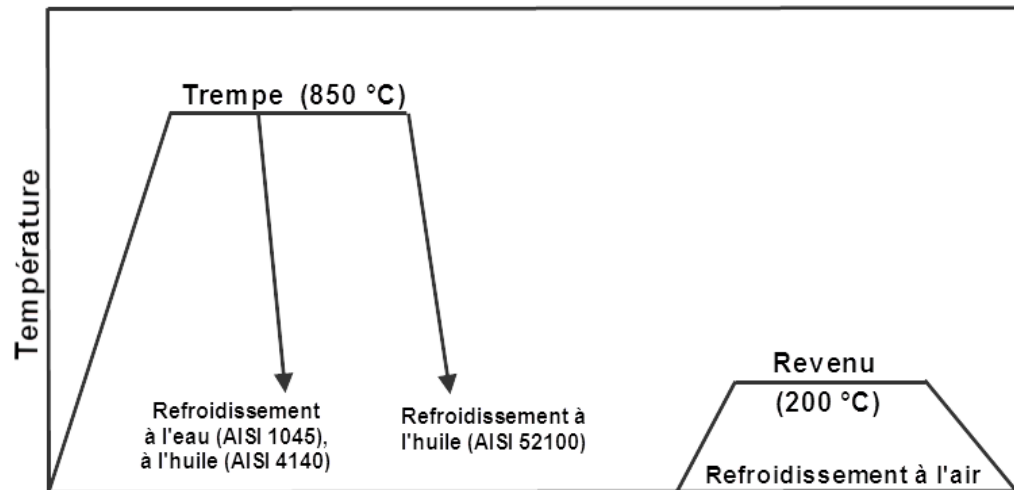


Figure 18: Cycles des traitements thermiques pour les différentes nuances d'aciers testées.

II.3 Usinage

Les essais de chariotage ont été réalisés sur un tour parallèle SN40 d'une puissance de 6.6 kW et de vitesse de rotation maximale 2000 tr/min. Les pièces ont été fixées en montage mixte mandrin/pointe. Les plaquettes de coupe utilisées sont en céramique mixte (CC650), amovibles et de forme carrée ayant la désignation SNGN 120408 T01020 et de composition chimique (70% Al_2O_3 + 30% TiC) montées sur un porte plaquette PSBNR2525M12 ayant la géométrie suivante : $\chi_r = 75^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$; $\lambda = -6^\circ$. Le rayon du bec utilisé est $R_\epsilon = 0,8$ mm.

II.4 Plan d'expérience

Deux plans d'expérience ont été effectués pour chaque nuance d'acier ; un plan uni factoriel afin de déterminer la durée de vie de l'outil de coupe en fonction des paramètres de coupe (V : vitesse de coupe [m/mn], f : avance [mm/tr], D : profondeur de passe [mm]) (tableau 5); et un plan d'expérience complet L_{27} (3^3), composé de trois variables, ayant chacune trois niveaux. Ceci pour déterminer les relations fonctionnelles entre les paramètres technologiques, qui sont en l'occurrence la rugosité et la vibration radiale et les éléments du régime de coupe (V , f , D) (tableau 6). Le plan Taguchi L_{27} a été choisi dans le but d'avoir un optimum des réponses avec la meilleure précision possible pour la modélisation, tout en prenant en considération l'aspect économique.

II.5 Caractérisation des paramètres technologiques

Les paramètres technologiques qui ont été l'objet de la caractérisation sont l'usure de l'outil de coupe, la rugosité de la surface usinée et la vibration radiale de la coupe.

Tableau 5: Paramètres d'usinage pour la série Uni-factorielle pour l'acier 100Cr6.

V (m/mn)	f (mm/tr)	D (mm)
140	0,08	0,3
200	0,08	0,3
280	0,08	0,3
380	0,08	0,3
530	0,08	0,3
200	0,12	0,3
200	0,16	0,3
200	0,22	0,3

Tableau 6: Paramètres d'usinage et niveaux de variation (plan factoriel L_{27})

Paramètres	Unité	Niveaux		
		bas (-1)	Moyen (0)	Elevé (+1)
Vitesse de coupe (V)	m/min	140	210	280
Avance (f)	mm/tr	0,08	0,16	0,22
Profondeur de passe (D)	mm	0,15	0,325	0,5

II.5.1 Procédure expérimentale

Le travail expérimental est divisé en deux séries :

La première a pour objectif de déterminer la durée de vie de l'outil de coupe durant l'usinage dur à sec de l'acier 100Cr6, à partir d'un plan d'expérience uni-factoriel. Les paramètres de coupe sont illustrés dans le [tableau 5](#). La mesure de l'usure en dépouille de l'outil est faite à l'aide d'un microscope de type ГОСТ 8074-56 СДЕЛАНО В СССР ММИ-2, ayant une précision de 0.005mm. L'analyse de faciès d'usure a été faite à l'aide d'un microscope optique type HUND (W-AD) équipé d'une camera CCD piloté par un ordinateur, doté d'un software interface de capture et mesure d'image *Motic Image 2000*. L'usure admissible retenue est $[VB] = 0,3$ mm.

La seconde série, est un plan factoriel complet L_{27} , avec le nombre d'essais $N = 3^3 = 27$ (27 combinaisons de paramètres de coupe). Elle est consacrée à la détermination de l'influence des paramètres de coupe (Vitesse de coupe, avance, et profondeur de passe) sur la rugosité de la surface usinée et sur la variation des vibrations radiales de l'outil de coupe en usinage dur et à sec des trois nuances d'aciers cités ci-dessus. Les niveaux des paramètres de coupe utilisés pour le plan L_{27} sont présentés sur le [tableau 6](#). Le plan expérimental est illustré sur le [tableau 7](#). Les mesures de la rugosité (R_a , R_z et R_t) sont faites à l'aide d'un rugosimètre SurfTest 301 Mitutoyo roughnessmeter. Ces mesures ont été réalisées sans démontage de la pièce de la machine afin de conserver les mêmes conditions de travail et éviter les erreurs de positionnement.

Tableau 7: Plan expérimental orthogonal Taguchi L ₂₇			
Test N°	Paramètres		
	D (mm)	V (m/mn)	f (mm/tr)
1	0,15	140	0,08
2	0,15	140	0,16
3	0,15	140	0,22
4	0,15	210	0,08
5	0,15	210	0,16
6	0,15	210	0,22
7	0,15	280	0,08
8	0,15	280	0,16
9	0,15	280	0,22
10	0,325	140	0,08
11	0,325	140	0,16
12	0,325	140	0,22
13	0,325	210	0,08
14	0,325	210	0,16
15	0,325	210	0,22
16	0,325	280	0,08
17	0,325	280	0,16
18	0,325	280	0,22
19	0,5	140	0,08
20	0,5	140	0,16
21	0,5	140	0,22
22	0,5	210	0,08
23	0,5	210	0,16
24	0,5	210	0,22
25	0,5	280	0,08
26	0,5	280	0,16
27	0,5	280	0,22

Un relevé de la température dans la zone de coupe a été effectué à l'aide d'un pyromètre à laser (laser liner) afin d'avoir une idée sur l'évolution du champ thermique. Les vibrations de coupe ont été mesurées dans la direction radiale à l'aide d'un Digital Vibration Meter, lié à un ordinateur à travers un câble optionnel et un software interface TestRS232 (Fig. 19). Les valeurs des vibrations sont prises en vitesse [mm/s], Les matériels et appareils de mesure utilisés dans cette étude sont regroupés dans la figure 20.



Figure 19 : Montage d'usinage, mesure de la rugosité et des vibrations



Figure 20 : Matériels et appareils de mesure utilisés pour l'étude expérimentale.

II.5.2 Processus de traitement des données

Les données du plan factoriel L_{27} (composé de 3 variables et 3 niveaux pour chaque variable) sont analysées statistiquement par l'analyse ANOVA en utilisant le logiciel MINITAB16.

II.5.3 Etude et suivi de l'usure

La mesure de la dégradation par usure de la plaquette d'usinage se fait à partir des observations sous microscope pour les trois faces : de dépouille principale, de dépouille secondaire et en cratère. La fréquence de prise des mesures est séquencée en chronométrage à la seconde. La ligne de référence de mesure est la partie non opérationnelle de l'arrête tranchante de la plaquette.

II.5.4 Etude et mesure de la Vibration de coupe

La mesure de vibration de coupe a été faite dans la direction radiale (direction perpendiculaire à l'axe de rotation de la pièce où l'effort de coupe est important), le palpeur à aimant est placé sur la face arrière du porte-plaquette. La mesure est faite en grandeur vitesse (mm/s). L'amplitude des vibrations de coupe (en vitesse) entre l'outil de coupe et la pièce usinée est mesurée en utilisant une sonde électromagnétique, indiquant des mesures de l'amplitude de la vibration à des points sélectionnés le long de la pièce pendant le processus d'usinage. Les amplitudes des vibrations sont enregistrées à des intervalles de temps réguliers fixées sur la partie software de l'interface ordinateur du vibromètre comme suit : $Ve_1(t)$, $Ve_2(t+T)$, $Ve_3(t+2T)$, ..., $Ve_i(t + (i-1)T)$.

Notions fondamentales de vibration d'accéléromètre VM6360

Le signal sinusoïdal peut être considéré comme le signal de vibration élémentaire. Ses grandeurs sont reliées par la fonction :

$$X(t) = A \sin(\omega t) = A \sin(2\pi f t) \quad (37)$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f \quad \text{et} \quad f = \frac{1}{T}$$

$X(t)$: Valeur instantanée du signal au temps (t) en [mm]

A : Amplitude de crête du signal en [mm]

ω : Pulsation ou vitesse angulaire en [rad/s]

f : Fréquence du signal en [Hz]

T : Période du signal en [s]

La vibration mécanique peut être mesurée en déplacement, en vitesse ou en accélération.

Les valeurs crêtes sont données par :

En déplacement : $x_C = A$; en vitesse : $v_C = 2\pi f \cdot x_C$; en accélération : $a_C = 2\pi f \cdot v_C$

Pour la mesure de vibration absolue mesurée au moyen d'un accéléromètre, c'est la norme ISO 10816 qui fait foi.

Pour les machines tournantes, l'essentiel de l'énergie de la vibration se situe entre 10 et 1000Hz. Il est recommandé de prendre la vibration en vitesse [mm/s].

II.5.5 Etude et mesure de la Rugosité

La rugosité de surface est mesurée pour chaque régime de coupe, à trois positions différentes faisant un angle de 120°. Elle est relevée directement sur la machine et sans démontage de la pièce. Les prises de mesure de la rugosité ont concerné les trois principaux critères (Ra, Rz et Rt).

II.5.6 Etude et mesure de la Température

La température de l'environnement de la coupe est mesurée avec un pyromètre infrarouge portable (laser liner). Les mesures sont faites dans le but de se renseigner sur l'évolution de la température durant la coupe pour quelques régimes au niveau de la zone de contact "Outil-Pièce" par le biais d'un enregistrement automatique d'une vidéo illustrant la variation de la température à chaque seconde. Le traitement des données se fait à l'aide d'un logiciel thermospot (Fig. 21).

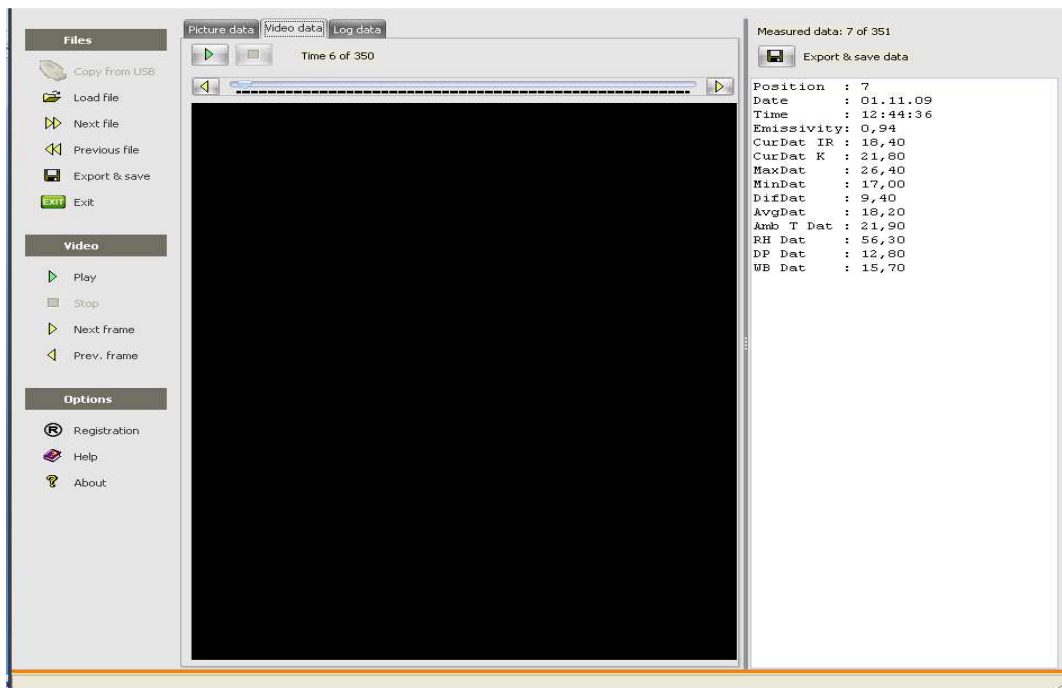


Figure 21 : Analyse de la température prise par le thermo-laser avec le logiciel thermospot.

Chapitre III

Résultats et Discussion

Les conditions de coupe ont été choisies dans le but de réaliser des opérations de tournage à sec des aciers durcis afin d'obtenir une meilleure qualité de surface avec une durée de vie de l'outil de coupe prolongée avec maximisation d'enlèvement de matière.

Les aciers choisis pour cette étude sont de nuances AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045. Les outils de coupe utilisés sont des plaquettes en céramique mixte CC650.

La durée de vie de l'outil a été testée pour différentes vitesses de coupe et avances lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 qui s'est caractérisé par la dureté la plus élevée par rapport aux autres nuances. La profondeur de passe a été maintenue constante (0,3mm).

Les paramètres de coupe du plan d'expérience utilisé L_{27} , est sélectionné depuis le plan uni-axial utilisé pour la caractérisation de l'usure de l'outil.

Le but de l'étude vise à analyser la corrélation entre la rugosité de surface et les vibrations de coupe pour le tournage dur des trois nuances d'aciers étudiés.

III.1 Matériau usinés

Les compositions chimiques de nos matériaux d'étude sont indiquées dans le [Tableau 8](#).

Les aciers de l'étude peuvent être classés dans le groupe des aciers à traitement thermique du fait de la présence du carbone à des pourcentages très favorables à l'austénitisation de la structure après trempe, ce qui permet d'augmenter la dureté du matériau.

Les aciers sont rangés et référencés aux aciers AISI 52100 (100Cr6), AISI 1045 (C45) et l'AISI 4140 (42CrMo4).

Le Chrome qui se trouve à des taux de 1,444% et 0,949% pour les aciers AISI 52100 et AISI 4140 respectivement fait augmenter la trempabilité et forme des carbures qui contribuent à la résistance à l'abrasion.

Tableau 8 : Composition chimique des aciers d'étude (% en poids), balance Fe									
Désignation	C	Mn	Si	Ni	Al	Cr	V	Ti	Mo
Acier normalisé à 100Cr6	0,939	0,277	0,265	0,175	0,012	1,444	0,004	0,005	0,058
Acier normalisé à C45	0,452	0,723	0,238	0,055	0,005	0,092	0,003	0,011	0,009
Acier normalisé à 42CrMo4	0,393	0,628	0,234	0,029	0,011	0,949	0,003	0,001	0,158

III.2 Traitements thermiques

Le traitement thermique de trempe et revenu est réalisé pour les trois matériaux selon le cycle présenté en [Figure 18](#). Afin de trouver une structure martensitique homogène à des duretés élevées. Les duretés moyennes calculées pour les différentes mesures enregistrées par l'Equotip sont 66HRC, 39HRC et 61HRC pour les aciers 100Cr6, C45 et 42CrMo4 respectivement. Ces niveaux de dureté sont favorables à la résistance à l'usure ce qui les rend des aciers très comparables et similaires aux aciers à outils.

III.3 Analyse du comportement à l'usure de la céramique mixte CC650 lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 durci

III.3.1 introduction

Le but de cette analyse est de définir le comportement à l'usure de la céramique mixte de coupe (70% Al_2O_3 + 30% TiC) durant le tournage dur de finition et à sec de l'acier 100Cr6 (dureté 66 HRC). Une série d'essais conformément à un plan unifactoriel des trois paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) a été réalisée afin d'étudier l'évolution de l'usure en fonction du temps pour ensuite déduire la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance. Les résultats du suivi de l'usure en fonction du temps d'usinage pour les différentes vitesses de coupe et différentes avances testées sont illustrés dans [Figures 22 et 25](#).

III.3.2 Durée de vie de l'outil de coupe en tournage dur de l'acier AISI 52100

La [Figure 22](#) illustre l'évolution de l'usure en dépouille de l'outil CC650 en fonction du temps à différentes vitesses de coupe (140, 200, 280, 380 et 530) m/mn. L'avance (f) et la profondeur de coupe (D) sont maintenues respectivement constantes à 0,08 mm/tr et 0,3 mm. L'analyse des résultats montre que l'évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps est très influencée par la vitesse de coupe. En se référant à la valeur admissible de l'usure $[\text{VB}] = 0,3 \text{ mm}$ donnée par la norme ISO, il devient possible la détermination de la durée de vie de l'outil ([Tableau 9](#)). L'illustration graphique $T = f(V)$ ([Fig. 24](#)), montre que la durée de vie décroît sensiblement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Une analyse plus approfondie sur la quantification de cette influence ([Tableau 9](#)), montre qu'en augmentant la vitesse de coupe de 140 m/mn à 530 m/mn, la durée de vie chute de 8,75 fois. Ceci s'explique par le fait qu'avec l'augmentation de la vitesse, la température dans la zone de coupe s'élève considérablement, ce qui influe négativement sur la résistance à chaud du matériau de l'outil (notant que la température du copeau est aux alentours de 450°C pour la vitesse de coupe 140 m/mn et 920 °C pour la vitesse de 530 m/mn relevée par le thermo-laser). Par conséquent, les différents mécanismes d'usure de ce dernier (abrasion, diffusion, adhésion..) se déclenchent d'une façon remarquable, ce qui réduit intensivement la

durée de vie de l'outil. En plus de l'effet de la vitesse sur la température, apparaît un autre phénomène d'instabilité du système usinant, dû à l'augmentation de l'amplitude des vibrations suite à l'accroissement de la fréquence de rotation (Fig. 23). Le jumelage de ces deux phénomènes contribue à l'accélération intensive de l'usure de l'outil.

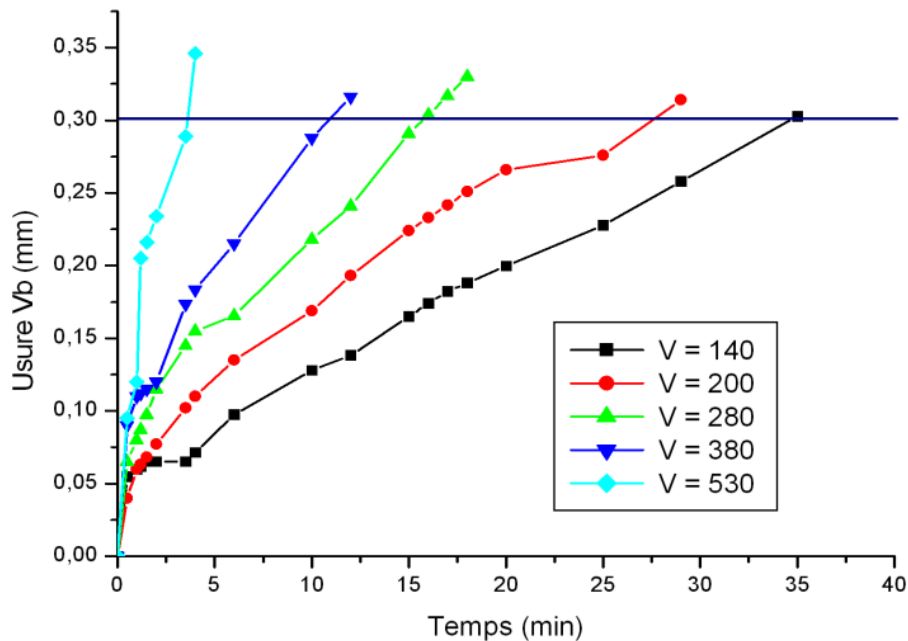


Figure 22 : Evolution de l'usure en dépouille de la céramique mixte (CC650) en fonction du temps lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 trempé, à différentes vitesses de coupe ($f = 0,08$ mm/tr et $D = 0,3$ mm)

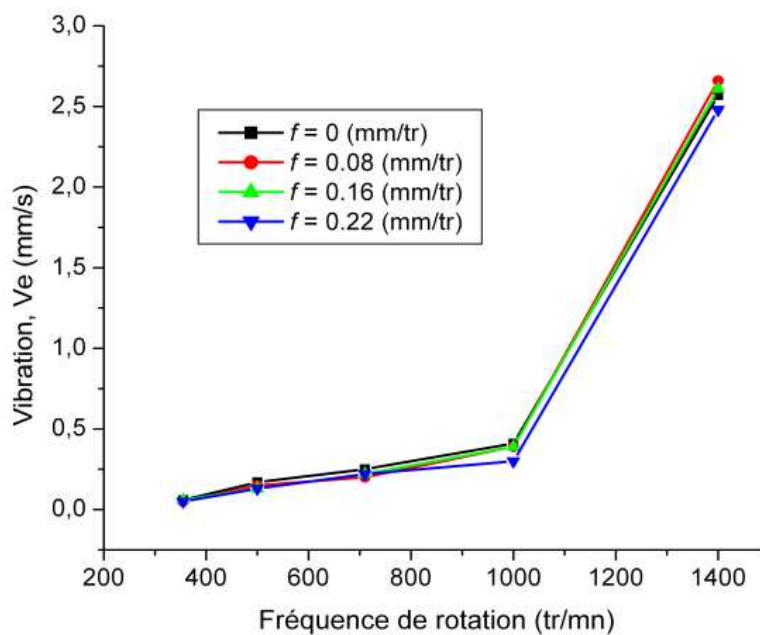


Figure 23 : Comportement vibratoire de la machine outil à vide en fonction de l'accroissement de la fréquence de rotation de la broche.

Tableau 9: Taux de dégradation de la durée de vie en fonction de l'augmentation de la vitesse de coupe.

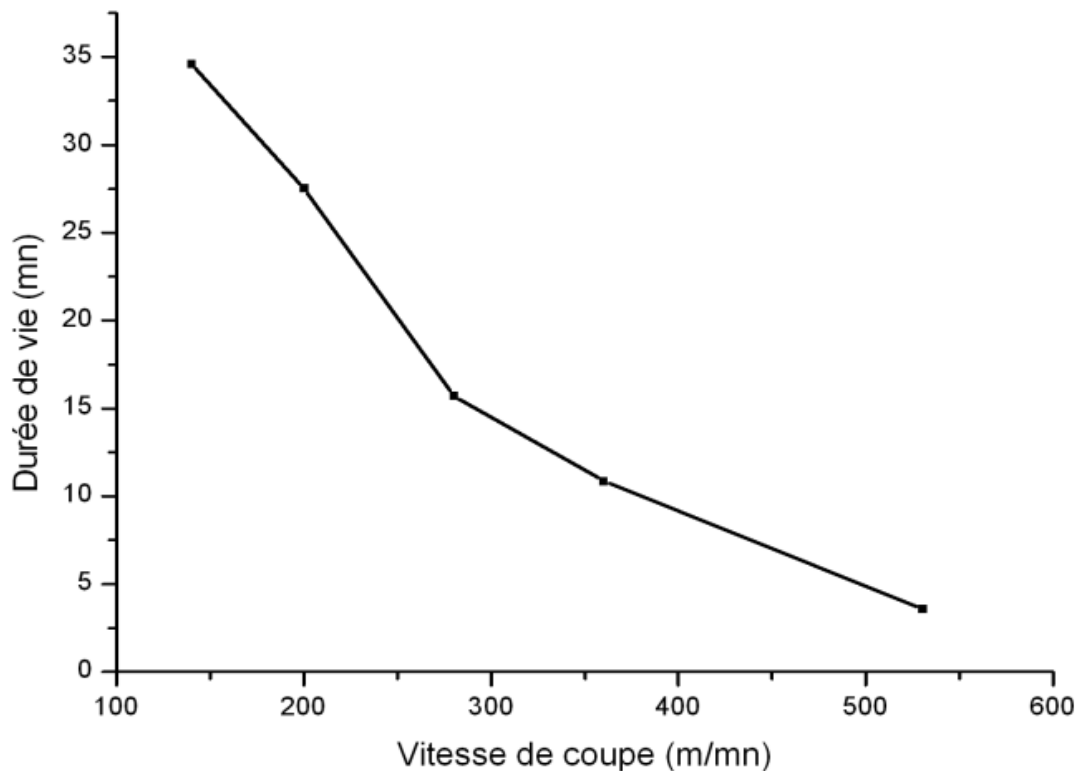
Vitesse $V(\text{m/mn})$	Durée de vie Outil $T(\text{mn})$	Taux de Durée de vie (T_{vx}/T_{140})	Taux de dégradation de T (T_{140}/T_{vx})
140	35	(100%)	(1)
200	28	80%	1,25
280	16	45%	2,19
380	11	31%	3,18
530	4	10%	8,75

L'équation de régression quadratique de la durée de vie de l'outil (T (mn)) en fonction de la vitesse de coupe (V (m/mn)) est donnée par :

$$T(\text{mn}) = 0,00017V^2 - 0,19436V + 58,5497 \quad (38)$$

Avec : $R^2 = 98,98\%$ ($f = 0,08$ mm/tr ; $D = 0,3$ mm)

L'analyse de la [Figure 24](#), montre que le taux de réduction de la durée de vie en fonction de la vitesse est plus prononcé jusqu'à 280 m/min et au delà de cette valeur il a tendance à s'affaiblir.

**Figure 24 :** Evolution de la durée de vie de la CC650 en fonction de la vitesse de coupe.

L'impact de l'avance sur la durée de vie de l'outil est présenté sur la [Figure 25](#) et la [Figure 26](#). L'analyse de ces résultats montre que l'avance influe sur la durée de vie d'une façon inversement proportionnelle. Le degré de cette influence est relativement beaucoup plus faible que celui de la vitesse de coupe décrit précédemment ([Fig. 23](#)). En effet, quand l'avance augmente de 0,08 à 0,22 mm/tr, la durée de vie passe de 28 mn à 20 mn. Autrement dit, quand l'avance s'accroît de 2,75 fois, la durée de vie chute de 29% ([Tableau 10](#)).

Tableau 10: Taux de dégradation de la durée de vie en fonction de l'augmentation de l'avance.

Avance f (mm/tr)	Durée de vie Outil T (mn)	Taux de Durée de vie ($T_{fx}/T_{0.08}$)	Taux de dégradation de T ($T_{0.08}/T_{fx}$)
0,08	28	(100%)	(1)
0,12	25	90%	1,12
0,16	22	78%	1,27
0,22	20	71%	1,40

Il est à noter également que l'évolution de la durée de vie de l'outil décroît en fonction de l'augmentation de l'avance à un degré plus prononcé jusqu'à 0,16 mm/tr. Ensuite, cet effet devient relativement moins accentué ([Fig. 26](#)).

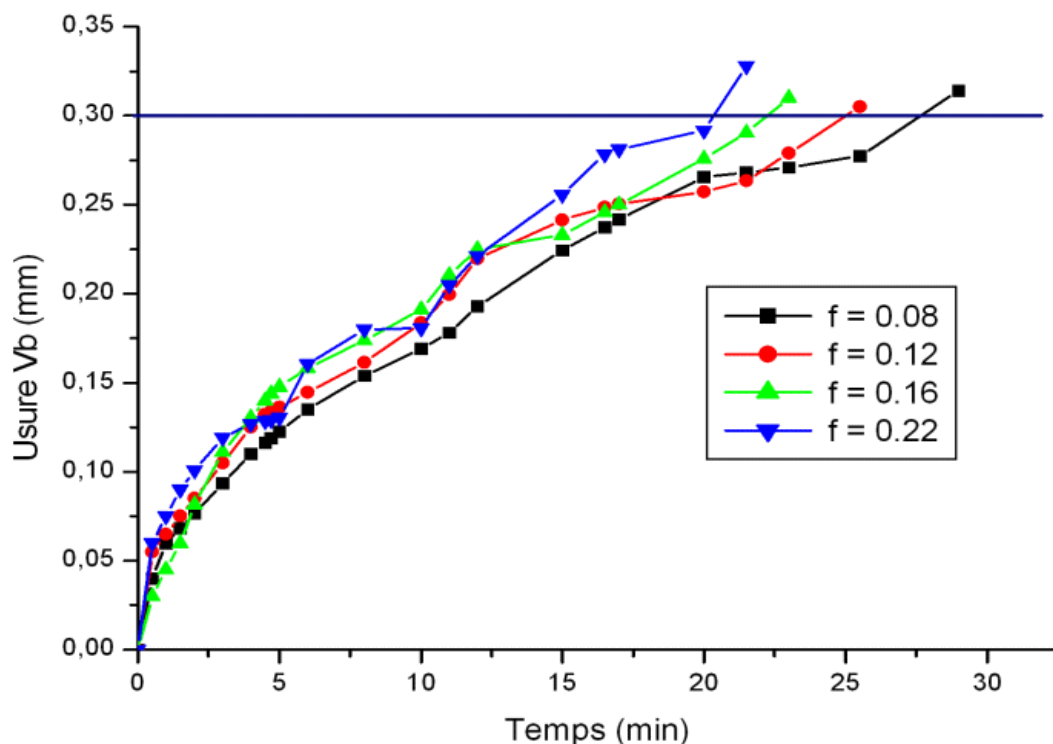


Figure 25 : Evolution de l'usure en dépouille de l'outil de coupe (CC650) en fonction du temps à différentes avances, lors du chariotage de finition de l'acier AISI 52100 trempé ($V = 200$ m/mn et $D = 0,3$ mm)

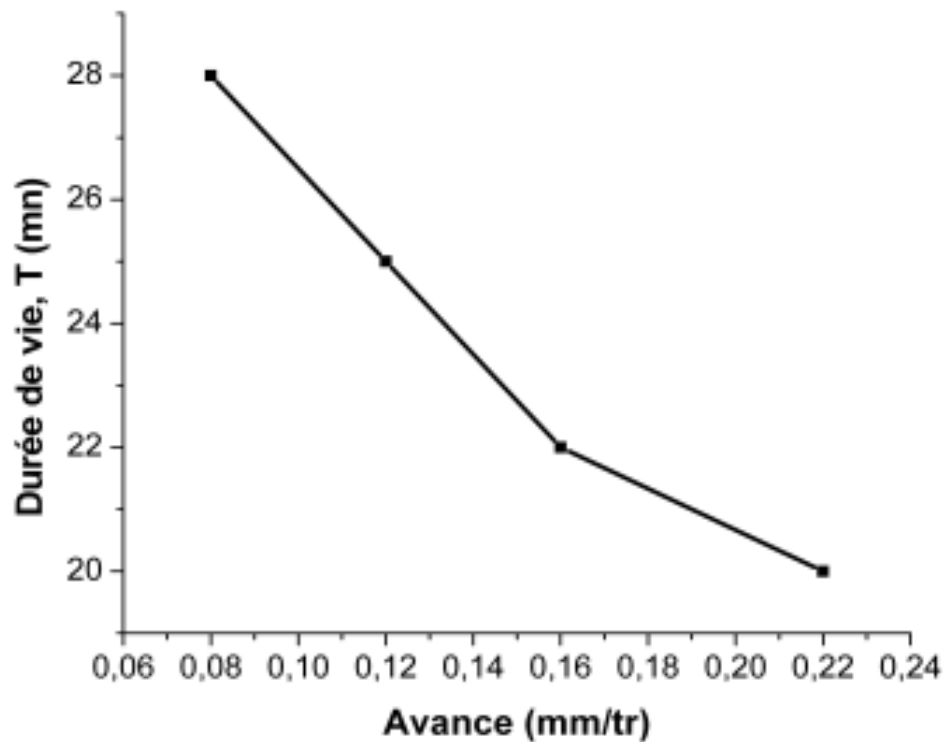


Figure 26 : Evolution de la durée de vie de l'outil CC650 en fonction de l'avance.

L'équation de régression quadratique de la durée de vie de l'outil (T (mn)) en fonction de l'avance (f (mm/tr)) est donnée par :

$$T \text{ (mn)} = 215,162 f^2 - 117,828 f + 35,802 \quad (39)$$

avec : $R^2 = 99,57\%$ ($V = 200 \text{ m/mn}$; $D = 0,3 \text{ mm}$)

L'analyse de la morphologie de l'usure de l'outil pour les différentes vitesses de coupe (200 à 530 m/mn) lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 trempé (Fig. 27a), montre clairement l'intensification de l'usure avec l'augmentation de la vitesse de coupe, ce qui conduit à un genre d'effondrement du bec de l'outil, caractérisé par des stries d'abrasion et une perte de matière importante sur la surface en dépouille (Fig. 27a) et sur la surface d'attaque (Fig. 28). L'analyse de la morphologie de l'usure en fonction de l'avance (Fig. 27b) montre à son tour, la dégradation du bec de l'outil, exprimée par la création de faciès sous forme d'évidement caractérisé par des stries et des brulures.

Pour les deux cas, on n'a pas enregistré ni écaillage ni rupture sur l'arrête de coupe (Figs. 27 & 28) ce qui signifie que la céramique mixte est souhaitable pour ce processus d'usinage supporté par l'effet de sa haute stabilité chimique. La dominance du mode "abrasion" de l'usure constaté, est agréée avec les résultats des littératures [115] et [116].

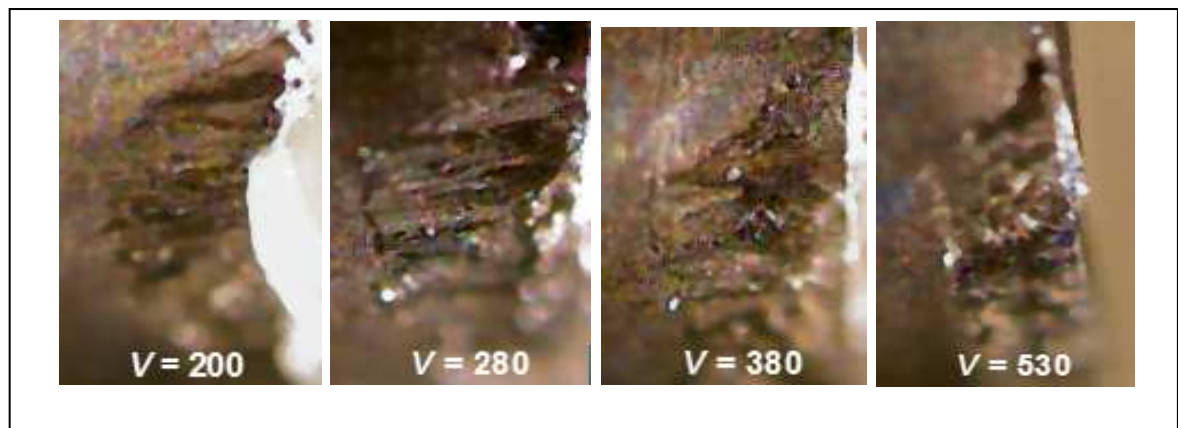


Figure 27a : Morphologie de l'usure en dépouille de l'outil de coupe CC650 en fonction de la vitesse de coupe ($f = 0,08$ mm/tr ; $D = 0,3$ mm).

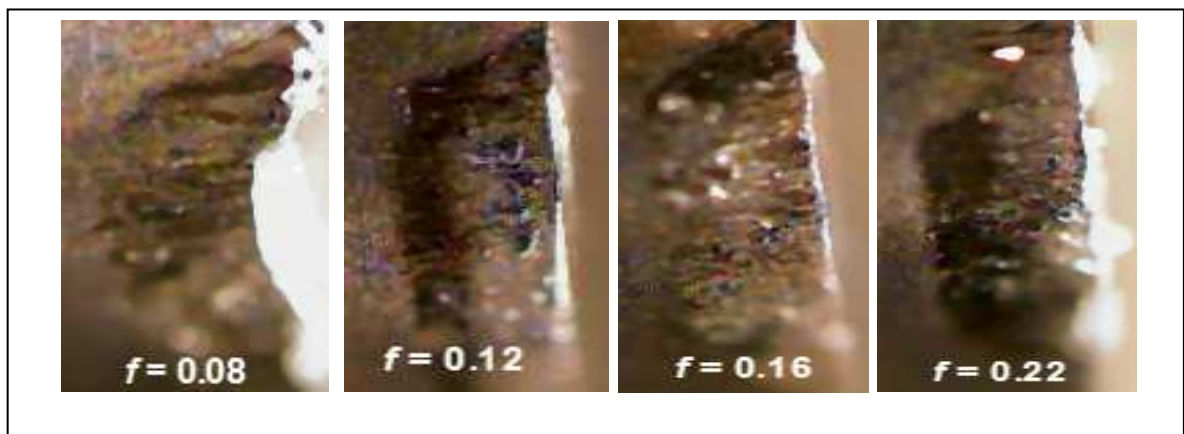


Figure 27b : Morphologie de l'usure en dépouille de l'outil de coupe CC650 en fonction de l'avance ($V = 200$ m/mn ; $D = 0,3$ mm).

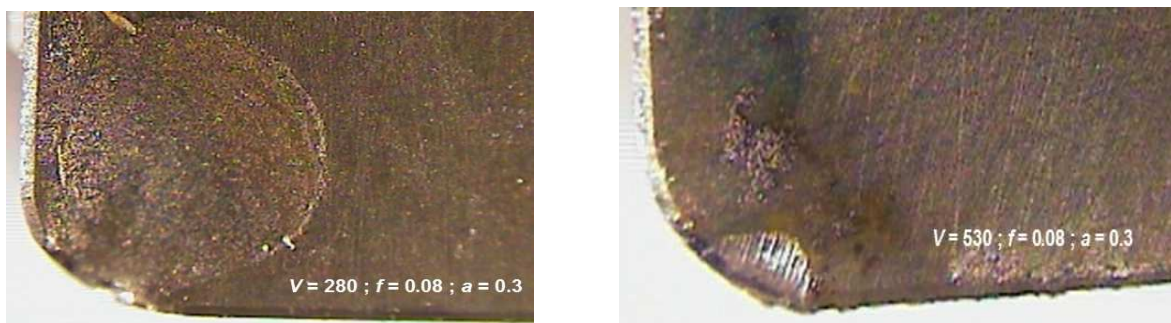


Figure 28 : Morphologie de l'usure en cratère de l'outil de coupe CC650 pour les vitesses de coupe 280 m/mn et 530 m/mn

III.4. Analyse des corrélations entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques lors de l'usinage des différentes nuances d'aciers étudiées

III.4.1 Analyse statistique des résultats

L'étude est scindée en deux étapes principales:

La première concerne l'étude et l'analyse statistique de l'effet des paramètres de coupe (Vitesse (V), Avance (f) et Profondeur de passe (D) sur les paramètres technologiques ciblés qui sont en l'occurrence "la rugosité de la surface usinée (Ra)" et "les vibrations radiales de l'outil (Ve)".

La deuxième étape est consacrée à la détermination des modèles mathématiques de prédiction, exprimant la relation fonctionnelle entre les paramètres technologiques (Ra et Ve) et les paramètres de coupe (V, f et D).

Une analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour identifier, quantifier et mettre en exergue les effets des facteurs principaux (V, f et D) ainsi que ceux de leurs interactions sur les paramètres technologiques (Ra et Ve) lors de l'usinage des trois aciers étudiés. L'analyse a été faite à un niveau de confiance de 95% d'où un $\alpha = 0,05$.

III.4.1.1 Présentation des résultats

Afin d'optimiser les paramètres d'usinage des aciers AISI 52100, AISI 1045 et AISI 4140 en tournage dur, de finition et à sec, par l'outil CC650, une série de tests a été réalisée selon un plan expérimental complet à 3 variables. Chaque variable a trois niveaux. Par conséquent, le nombre des essais à réaliser est égal à $N = 3^3 = 27$. L'objectif de l'étude statistique est de déterminer l'effet des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques qui sont en l'occurrence la rugosité de la surface usinée et les vibrations radiales du bec de l'outil lors de l'usinage, ainsi que la possibilité de corrélation entre elles.

Les résultats expérimentaux de la rugosité de surface et la vélocité de la vibration radiale des trois aciers sont illustrés dans les [tableaux \(11a, 11b, 11c\)](#). Leur analyse a permis de conclure que la plus faible rugosité (Ra) est enregistrée au niveau minimal du régime de coupe ($V = 140$ m/mn, $f = 0,08$ mm/tr, $D = 0,15$ mm) pour les aciers AISI 52100 et 4140. Ceci est expliqué par l'enlèvement lent d'une épaisseur de copeau faible, d'où un arrachement continu de la matière qui favorise l'amélioration de la qualité de surface. Pour le AISI 1045, la plus faible rugosité est enregistrée lors de l'usinage avec le régime ayant l'avance et la profondeur minimales ($f = 0,08$ mm/tr, $D = 0,15$ mm) et la vitesse intermédiaire ($V = 210$ m/mn).

Les [Figures 29,30 et 31](#) représentent respectivement l'évolution des trois critères de la rugosité des surfaces usinées des aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045 selon le plan d'expérience L_{27} . Il est à remarquer que pour les trois aciers de l'étude, Rz et Rt sont superposées et ayant la même allure que l'évolution de Ra. En se référant à

cette constatation, nous nous sommes limités dans la suite de l'étude à l'écart arithmétique (R_a) pour analyser et caractériser la rugosité de la surface usinée.

Tableau 11a: Résultats de la rugosité de la surface usinée et des vibrations radiales de l'outil en fonction des différentes combinaisons du plan L_{27} de Taguchi lors de l'usinage de l'acier AISI 52100.

Test N°	Paramètres de coupe			Rugosité			Vibration
	D (mm)	V (m/mn)	f (mm/tr)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	V_e (mm/s)
1	0,15	140	0,08	0,87	5,51	6,74	0,199
2	0,15	140	0,16	1,37	6,74	7,61	0,207
3	0,15	140	0,22	1,98	9,69	10,51	0,241
4	0,15	210	0,08	1,24	6,03	6,98	0,368
5	0,15	210	0,16	1,29	6,79	8,22	0,413
6	0,15	210	0,22	1,82	9,36	10,53	0,495
7	0,15	280	0,08	1,03	4,88	5,29	0,495
8	0,15	280	0,16	1,18	5,77	6,53	0,520
9	0,15	280	0,22	1,87	9,28	9,75	0,550
10	0,33	140	0,08	0,93	5,21	6,28	0,204
11	0,33	140	0,16	1,58	7,99	8,71	0,239
12	0,33	140	0,22	2,04	9,57	10,80	0,245
13	0,33	210	0,08	1,43	7,14	8,27	0,468
14	0,33	210	0,16	1,75	9,14	10,46	0,479
15	0,33	210	0,22	2,21	10,54	12,35	0,536
16	0,33	280	0,08	1,24	6,86	8,02	0,549
17	0,33	280	0,16	1,43	7,53	8,85	0,554
18	0,33	280	0,22	2,15	10,70	11,86	0,573
19	0,5	140	0,08	1,15	5,90	7,40	0,332
20	0,5	140	0,16	1,66	8,12	8,78	0,550
21	0,5	140	0,22	2,47	10,96	11,65	0,686
22	0,5	210	0,08	1,09	5,94	6,77	0,483
23	0,5	210	0,16	1,57	7,65	5,24	0,580
24	0,5	210	0,22	2,44	10,34	10,88	0,704
25	0,5	280	0,08	0,98	5,23	6,57	0,466
26	0,5	280	0,16	1,45	7,52	8,52	0,526
27	0,5	280	0,22	2,27	9,64	10,25	0,573

Tableau 11b: Résultats de la rugosité de la surface usinée et des vibrations radiales de l'outil en fonction des différentes combinaisons du plan L_{27} de Taguchi pour l'acier AISI 1045.

Test N°	Paramètres de coupe			Rugosité			Vibration
	D (mm)	V (m/mn)	f (mm/tr)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	V_e (mm/s)
1	0,15	140	0,08	0,995	5,305	5,87	0,29
2	0,15	140	0,16	1,320	6,52	7,595	0,31
3	0,15	140	0,22	1,725	8,625	9,44	0,33
4	0,15	210	0,08	0,510	3,18	3,93	0,32
5	0,15	210	0,16	1,125	5,85	6,86	0,33
6	0,15	210	0,22	1,610	7,655	8,585	0,34
7	0,15	280	0,08	0,925	4,395	4,95	2,88
8	0,15	280	0,16	1,175	6,25	6,78	3,13
9	0,15	280	0,22	1,665	7,865	8,525	3,16
10	0,33	140	0,08	1,010	5,49	6,365	0,29
11	0,33	140	0,16	1,470	7,365	8,7	0,31
12	0,33	140	0,22	2,100	9,995	10,845	0,31
13	0,33	210	0,08	0,895	4,775	5,42	0,32
14	0,33	210	0,16	2,040	8,7	9,075	0,36
15	0,33	210	0,22	2,095	9,42	10,53	0,39
16	0,33	280	0,08	1,267	6,403	7,456	2,75
17	0,33	280	0,16	1,680	8,255	9,34	2,86
18	0,33	280	0,22	2,450	11,873	13,633	3,21
19	0,5	140	0,08	1,405	7,085	8,435	0,29
20	0,5	140	0,16	1,820	9,695	11,535	0,31
21	0,5	140	0,22	2,667	12,436	13,746	0,31
22	0,5	210	0,08	1,640	8,965	10,785	0,43
23	0,5	210	0,16	2,125	9,84	10,925	0,44
24	0,5	210	0,22	2,195	9,97	10,95	0,47
25	0,5	280	0,08	0,760	4,7	5,775	2,77
26	0,5	280	0,16	1,550	7,98	8,485	2,90
27	0,5	280	0,22	2,688	12,395	13,622	3,22

Tableau 11c: Résultats de la rugosité de la surface usinée et des vibrations radiales de l'outil en fonction des différentes combinaisons du plan L_{27} de Taguchi pour l'acier AISI 4140.

Test N°	Paramètres de coupe			Rugosité			Vibration
	D (mm)	V (m/mn)	f (mm/tr)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	V_e (mm/s)
1	0,15	140	0,08	0,535	2,81	4,085	0,37
2	0,15	140	0,16	0,755	4,17	5,22	0,43
3	0,15	140	0,22	1,185	6,45	7,14	0,53
4	0,15	210	0,08	0,620	3,195	3,995	0,56
5	0,15	210	0,16	0,650	3,635	4,55	0,90
6	0,15	210	0,22	1,250	7,615	8,38	1,44
7	0,15	280	0,08	0,675	4,11	5,23	1,05
8	0,15	280	0,16	0,840	4,28	5,27	1,27
9	0,15	280	0,22	1,325	7,39	7,915	1,44
10	0,33	140	0,08	0,645	3,6	3,97	0,44
11	0,33	140	0,16	1,230	5,78	6,435	0,61
12	0,33	140	0,22	1,850	8,13	9,285	0,81
13	0,33	210	0,08	0,715	3,865	4,52	0,49
14	0,33	210	0,16	1,287	6,103	6,753	0,73
15	0,33	210	0,22	1,925	8,93	9,86	1,41
16	0,33	280	0,08	0,880	4,87	5,44	1,11
17	0,33	280	0,16	1,293	6,613	7,02	1,25
18	0,33	280	0,22	2,057	9,28	10,413	1,29
19	0,5	140	0,08	0,860	5,103	6,173	0,21
20	0,5	140	0,16	1,530	12,323	14,463	0,43
21	0,5	140	0,22	1,980	13,396	15,263	0,91
22	0,5	210	0,08	1,060	7,24	9,575	0,25
23	0,5	210	0,16	2,440	16,76	20,3	0,97
24	0,5	210	0,22	3,970	18,44	24,8	1,54
25	0,5	280	0,08	1,170	19,356	21,363	2,03
26	0,5	280	0,16	2,538	19,42	21,895	2,09
27	0,5	280	0,22	4,073	19,45	22,294	2,11

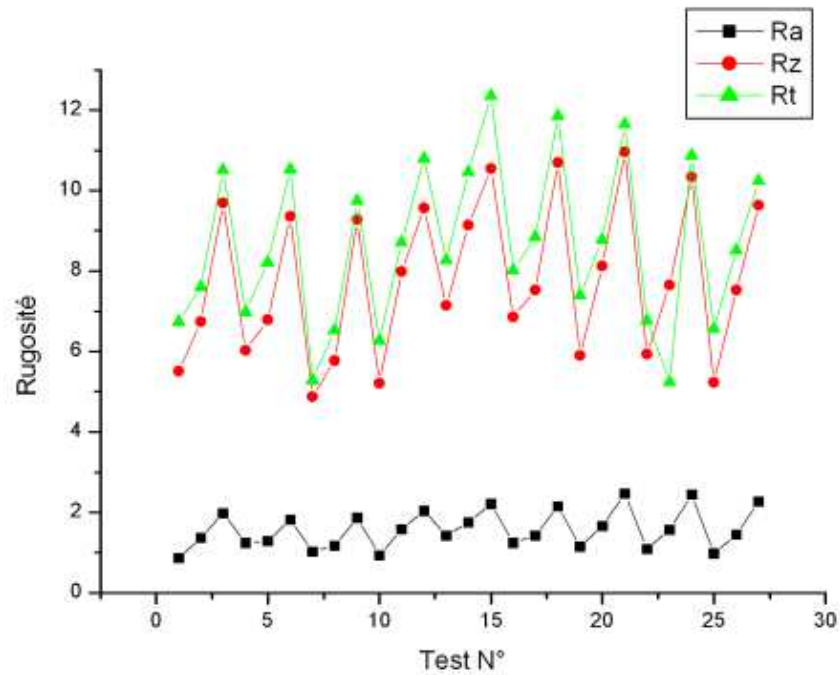


Figure 29 : Valeurs de la rugosité pour les différentes combinaisons du plan d'expériences lors de l'usinage de l'acier AISI 52100.

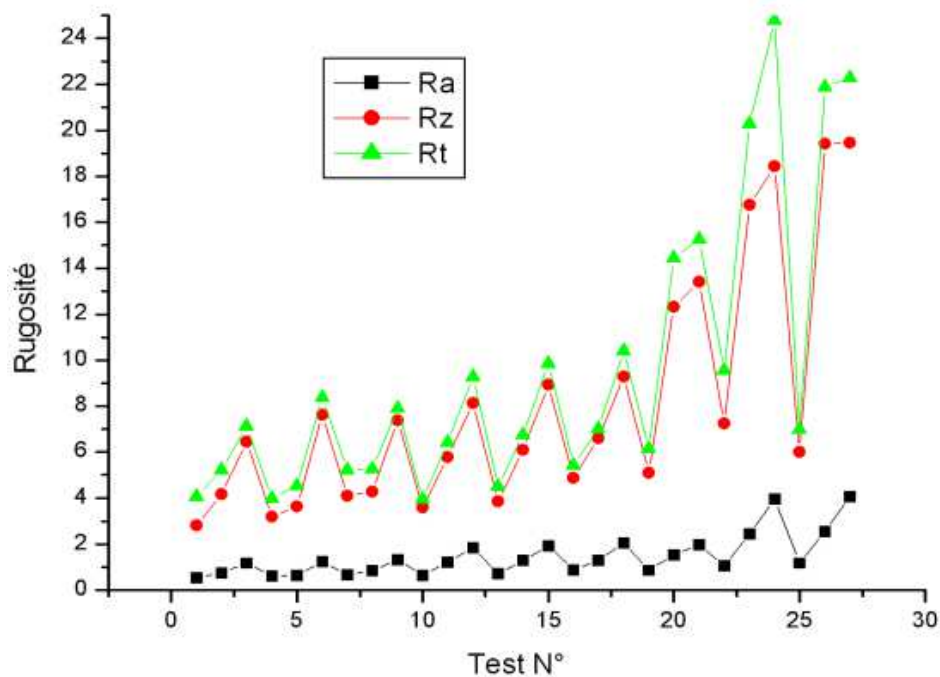


Figure 30 : Valeurs de la rugosité pour les différentes combinaisons du plan d'expériences lors de l'usinage de l'acier AISI 4140.

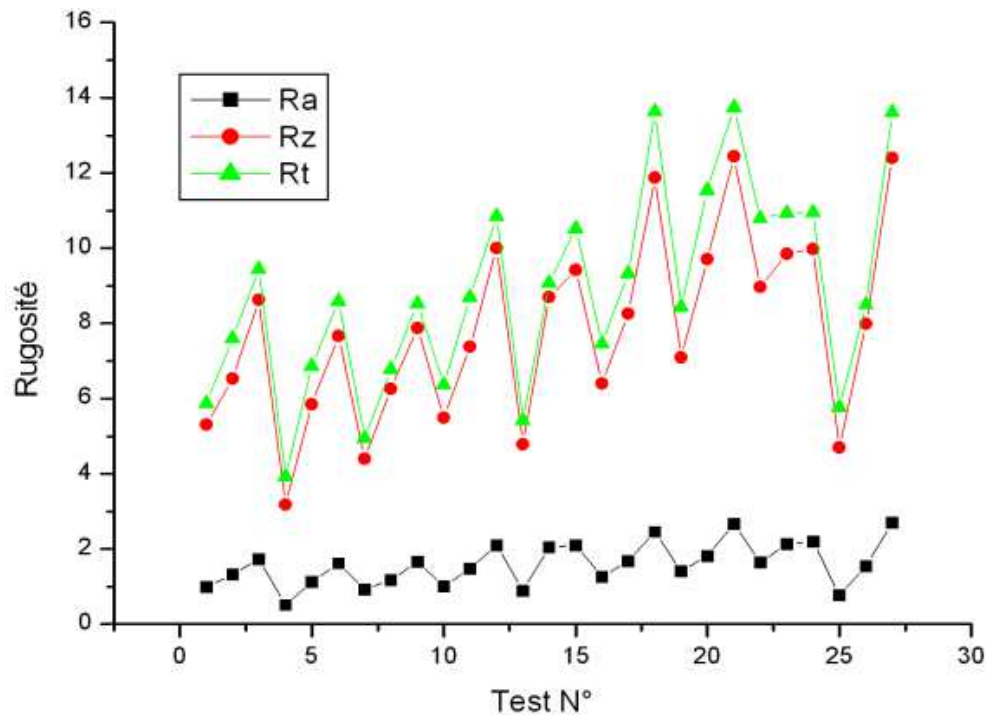


Figure 31 : Valeurs de la rugosité pour les différentes combinaisons du plan d'expériences lors de l'usinage de l'acier AISI 1045.

III.4.1.2 Analyse ANOVA des résultats

III.4.1.2.1 ANOVA pour la rugosité Ra

L'analyse ANOVA des résultats expérimentaux obtenus de la rugosité de surface lors de l'usinage des trois aciers étudiés est exposée dans les [tableaux 12a, 13a et 14a](#), respectivement pour l'acier AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045. Cette analyse, montre que l'avance est le facteur le plus significatif sur la rugosité de surface avec un coefficient de contribution équivalent à 83,9% (pour l'acier AISI 52100); 38,7% (pour l'acier AISI 4140) et 61,5% (pour l'acier AISI 1045). La profondeur de passe est le second paramètre en terme de signification et ceci pour les trois aciers testés, avec des coefficients de contribution équivalents à 6,6%, 35,6% et 22,6%, respectivement pour l'AISI 52100, l'AISI 4140 et l'AISI 1045. Il est à souligner que la contribution de l'effet de l'interaction de l'avance et de la profondeur ($f \cdot D$) est très dominante. En effet, celle ci occupe la troisième position en tant que paramètre significatif pour l'AISI 52100 et l'AISI 4140 avec des contributions de 3,5% et 9,8% respectivement. L'effet de la vitesse de coupe est significatif pour l'AISI 52100 et l'AISI 4140 avec des contributions respectives égales à 1,5% et 5%.

La contribution de l'erreur est petite. Elle a un taux de (1%) pour l'AISI 52100; (3,3%) pour l'AISI 4140 et (5,7%) pour l'AISI 1045, ce qui signifie que les trois paramètres de coupe (vitesse, avance et profondeur) sont largement suffisants pour prédire la rugosité (Ra).

L'analyse des effets des paramètres principaux sur la rugosité de la surface usinée (Ra) pour les trois aciers étudiés a été faite avec le logiciel MINITAB16. Les résultats de cette dernière sont illustrés sur les [figures 32, 33 et 34](#). En se référant à

ces figures, il est visible qu'avec l'augmentation de l'avance et la profondeur de passe, la rugosité a tendance à se dégrader. L'effet de cette dégradation est remarquable et il est relativement plus prononcé pour l'avance. Entre temps, avec l'accroissement de la vitesse de coupe, on constate que le comportement des effets principaux sur la rugosité est varié et ceci pour les trois aciers testés. En effet, pour l'acier AISI 52100, l'accroissement de la vitesse contribue dans la première phase (jusqu'à la vitesse moyenne 210 m/mn) à augmenter la rugosité, ensuite la rugosité s'améliore pour les vitesses (entre 210 à 280 m/mn), alors que pour l'acier AISI 4140 (ayant une dureté proche de celle de l'AISI 52100, mais qui a été usiné dans un environnement de fréquences de rotation plus élevées), on remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une dégradation de l'état de surface. Par contre, pour l'acier AISI 1045 qui a une dureté plus faible et qui a été usiné dans les mêmes conditions que l'AISI 4140, la rugosité diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe (Fig. 34).

III.4.1.2.2 ANOVA pour les vibrations de coupe radiales (Ve)

L'analyse ANOVA des vibrations radiales pour les trois aciers étudiés, présentée dans les [tableaux 12b, 13b et 14b](#) correspondant aux aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045 respectivement, montre que la vitesse est le facteur le plus significatif sur les vibrations de coupe radiales avec des coefficients de contribution équivalents à 41,3% pour l'acier AISI 52100, 55,5% pour l'acier AISI 4140 et 99,2% pour l'acier AISI 1045.

Pour l'acier AISI 52100, la profondeur de passe est le second paramètre en terme de signification. Sa contribution est estimée égale à 21,1%. Par contre, pour l'AISI 4140 et AISI 1045, c'est l'avance qui occupe la seconde position de signification après la vitesse de coupe avec des contributions de 17,1% et 0,3% respectivement. Il est à signaler également que l'effet de l'avance est aussi significatif pour l'AISI 52100 avec une contribution de 10,6%.

L'interaction "Vitesse – Profondeur" exprime des taux de contribution importants pour les aciers plus durs: l'AISI 52100 et l'AISI 4140. Ils sont respectivement 18,3% et 12,7%.

L'effet remarquable de la vitesse de coupe sur les vibrations est expliqué par l'augmentation des vibrations du système usinant pour les hautes fréquences de rotation de la broche (Fig. 23). Notant que l'effet de la vitesse devient plus significatif pour les fréquences de rotation (1000 à 1400 tr/mn). Par contre sur la même figure on constate que l'effet de l'avance est non significatif.

En tenant compte de l'effet remarquable des hautes fréquences de rotation sur les amplitudes de vibration et pour une éventuelle analyse approfondie, il est judicieux de noter que les essais d'usinage sur l'acier AISI 52100 ont été effectués dans la gamme des vitesses (355 à 710) tr/min, alors que ceux de l'AISI 4140 et AISI 1045 ont été menés dans l'intervalle des vitesses: (710 à 1400) tr/min.

La contribution de l'erreur pour les vibrations (Ve) est petite avec un taux de (2,1%) pour l'AISI 52100, (1,7%) pour l'AISI 4140 et (0,05%) pour l'AISI 1045, respectivement [Tableau 12b, 13b et 14b](#).

L'analyse des effets principaux des vibrations radiales (V_r) illustrés sur les Figures 35,36 et 37 correspondant respectivement aux aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045, montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, les vibrations augmentent. Ceci s'explique tout d'abord par l'accroissement de la section transversale du copeau ($S=f \cdot D$), qui nécessite des efforts de coupe plus importants pour son arrachement. Additionné à cela, l'effet des vibrations occasionnées par les hautes fréquences de rotation (cité ci-dessus).

Tableau 12a : Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (R_a) de l'acier AISI 52100.

Source	SS	DOF	MS	F - Value	P	%C
D	0,39188	2	0,19594	26,56	0,000	6,65
f	4,94382	2	2,47191	335,1	0,000	83,84
V	0,08903	2	0,04452	6,03	0,025	1,51
$D * V$	0,10666	4	0,02667	3,61	0,058	1,81
$f * V$	0,10103	4	0,02526	3,42	0,065	1,71
$D * f$	0,20551	4	0,05138	6,96	0,010	3,49
Erreur	0,05901	8	0,00738			1
Total	5,89696	26				

$S = 0,0858879$ $R\text{-}Sq = 99,00\%$ $R\text{-}Sq(\text{adj}) = 96,75\%$

Tableau 12b: Analyse de la variance (ANOVA) pour la vibration de coupe (V_c) de l'acier AISI 52100.

Source	SS	DOF	MS	F - Value	P	%C
D	0,119796	2	0,0599	40,02	0,000	21,11
f	0,060107	2	0,03005	20,08	0,001	10,59
V	0,234493	2	0,11725	78,34	0,000	41,32
$D * V$	0,103969	4	0,02599	17,37	0,001	18,32
$f * V$	0,007574	4	0,00189	1,27	0,359	1,33
$D * f$	0,029541	4	0,00739	4,93	0,027	5,21
Erreur	0,011973	8	0,0015			2,11
Total	0,567453	26				

$S = 0,0386857$ $R\text{-}Sq = 97,89\%$ $R\text{-}Sq(\text{adj}) = 93,14\%$

Tableau 13a : Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 4140.

Source	SS	DOF	MS	F - Value	P	%C
<i>D</i>	7,9707	2	3,9853	43,52	0,000	35,62
<i>f</i>	8,6685	2	4,3342	47,33	0,000	38,74
<i>V</i>	1,1262	2	0,5631	6,15	0,024	5,03
<i>D * V</i>	1,3151	4	0,3288	3,59	0,058	5,88
<i>f * V</i>	0,3692	4	0,0923	1,01	0,458	1,65
<i>D * f</i>	2,1933	4	0,5483	5,99	0,016	9,80
Erreur	0,7327	8	0,0916			3,27
Total	22,3756	26				

S = 0,302628 R-Sq = 96,73% R-Sq(adj) = 89,36%

Tableau 13b: Analyse de la variance (ANOVA) pour la vibration de coupe (Ve) de l'acier AISI 4140.

Source	SS	DOF	MS	F - Value	P	%C
<i>D</i>	0,44963	2	0,22482	13,2	0,003	5,59
<i>f</i>	1,37708	2	0,68854	40,42	0,000	17,13
<i>V</i>	4,46068	2	2,23034	130,92	0,000	55,49
<i>D * V</i>	1,02151	4	0,25538	14,99	0,001	12,71
<i>f * V</i>	0,54852	4	0,13713	8,05	0,007	6,82
<i>D * f</i>	0,04455	4	0,01114	0,65	0,640	0,55
Erreur	0,13628	8	0,01704			1,70
Total	8,03826	26				

S = 0,130519 R-Sq = 98,30% R-Sq(adj) = 94,49%

Tableau 14a : Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 1045.

Source	SS	DOF	MS	F - Value	P	%C
<i>D</i>	1,95112	2	0,9756	15,77	0,002	22,56
<i>f</i>	5,32195	2	2,661	43,03	0,000	61,54
<i>V</i>	0,00765	2	0,0038	0,06	0,940	0,09
<i>D * V</i>	0,40486	4	0,1012	1,64	0,256	4,68
<i>f * V</i>	0,31467	4	0,0787	1,27	0,357	3,64
<i>D * f</i>	0,153	4	0,0383	0,62	0,662	1,77
Erreur	0,49476	8	0,0619			5,72
Total	8,64802	26				

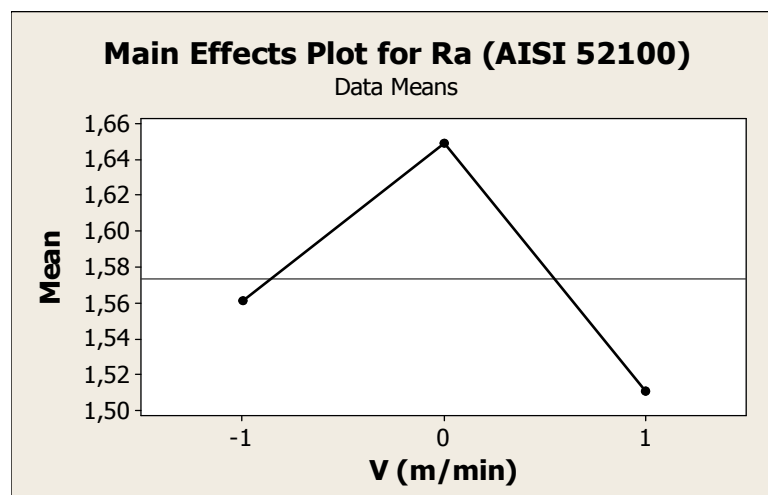
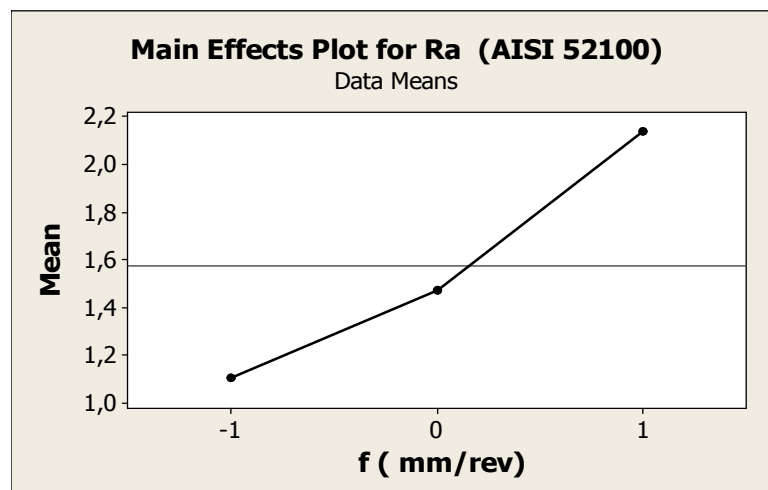
S = 0,248687 R-Sq = 94,28% R-Sq(adj) = 81,41%

Tableau 14b: Analyse de la variance (ANOVA) pour la vibration de coupe (Ve) de l'acier AISI 1045.

Source	SS	DOF	MS	F - Value	P	%C
<i>D</i>	0,0077	2	0,0039	1,53	0,274	0,02
<i>f</i>	0,1095	2	0,0548	21,65	0,001	0,26
<i>V</i>	42,0289	2	21,015	8305,24	0,000	99,25
<i>D * V</i>	0,0385	4	0,0096	3,8	0,051	0,09
<i>f * V</i>	0,1326	4	0,0332	13,11	0,001	0,31
<i>D * f</i>	0,0108	4	0,0027	1,06	0,434	0,03
Erreur	0,0202	8	0,0025			0,05
Total	42,3484	26				

S = 0,0503018 R-Sq = 99,95% R-Sq(adj) = 99,84%

L'effet de la vitesse de coupe sur les vibrations est nettement visible sur la [Figure 37](#). Ce comportement est observé lors de l'usinage de l'acier AISI 1045, qui se caractérise par une dureté relativement plus faible que celle des autres nuances d'aciers testés.



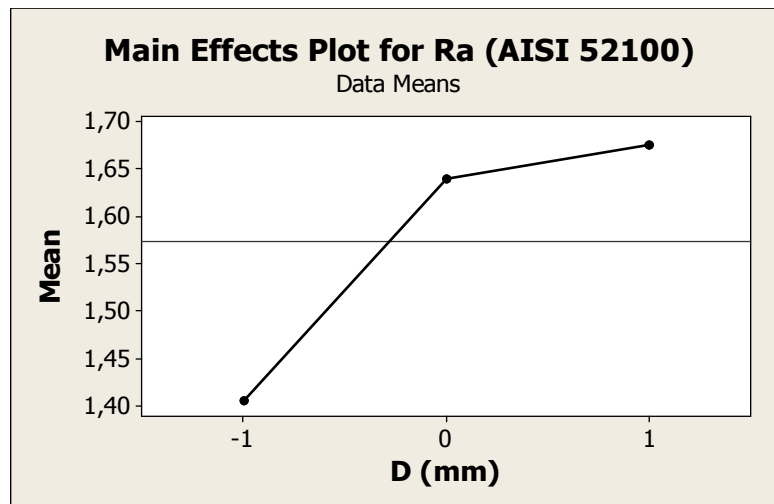
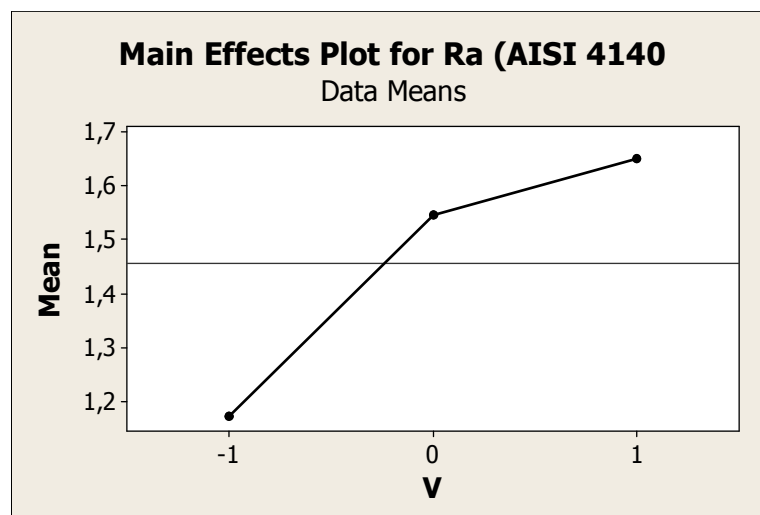
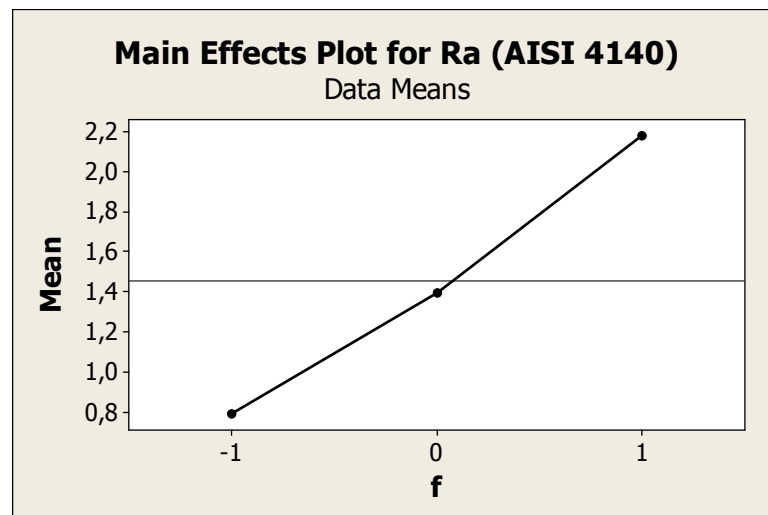


Figure 32 : Effet des paramètres de coupe (V, f, D) sur la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 52100.



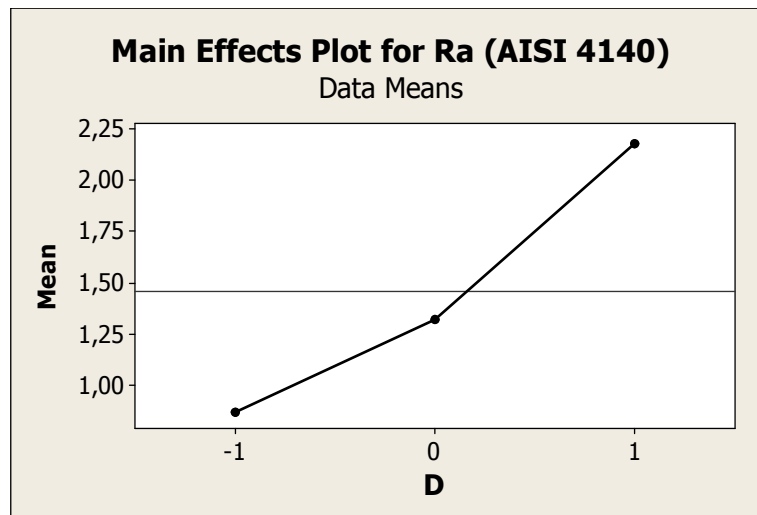
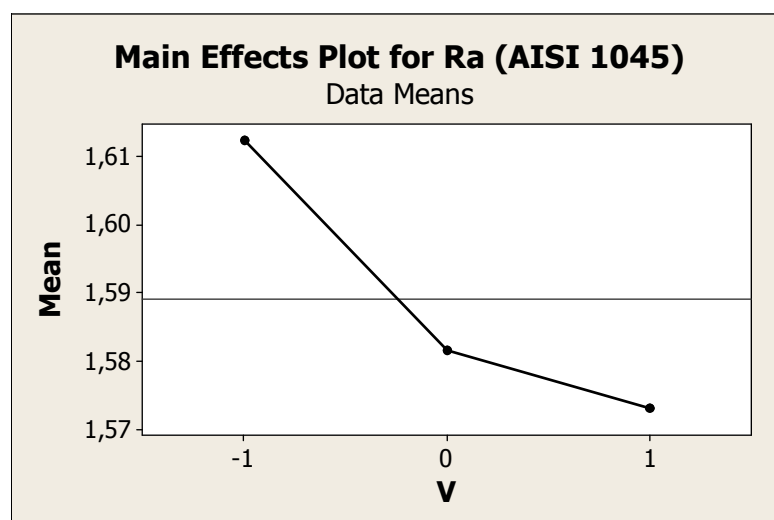
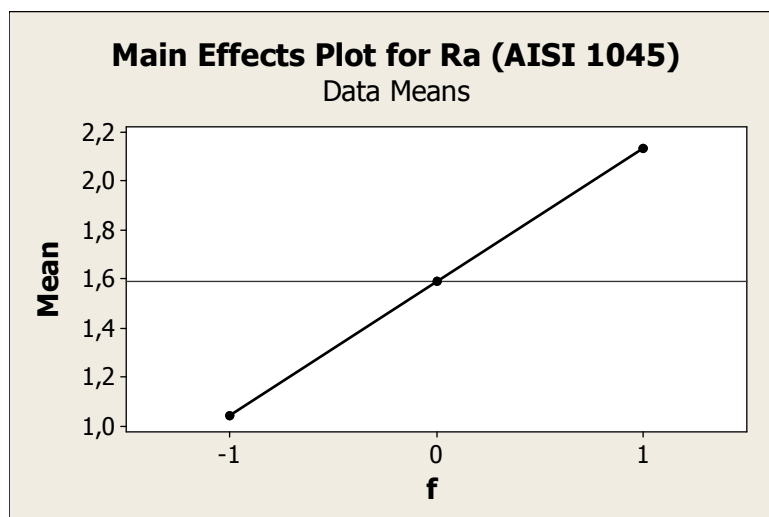


Figure 33 : Effet des paramètres de coupe (V, f, D) sur la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 4140.



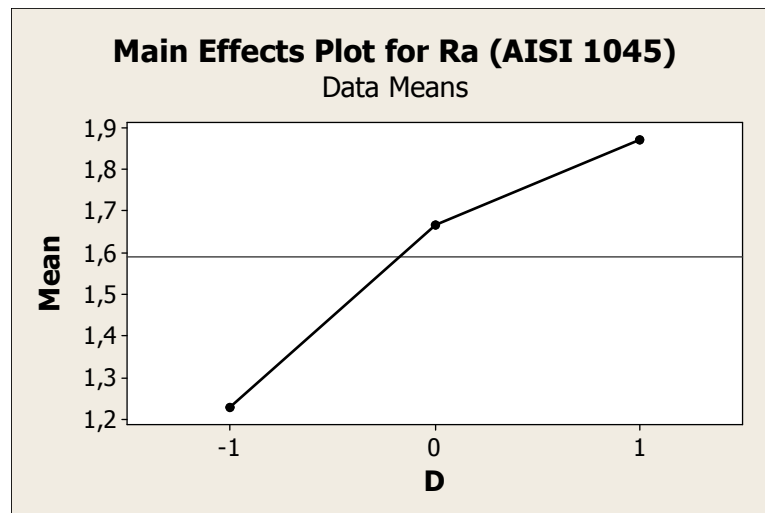
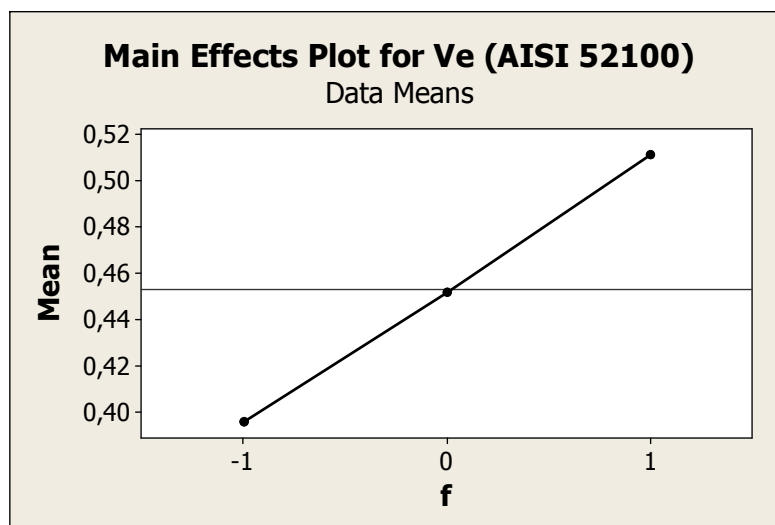
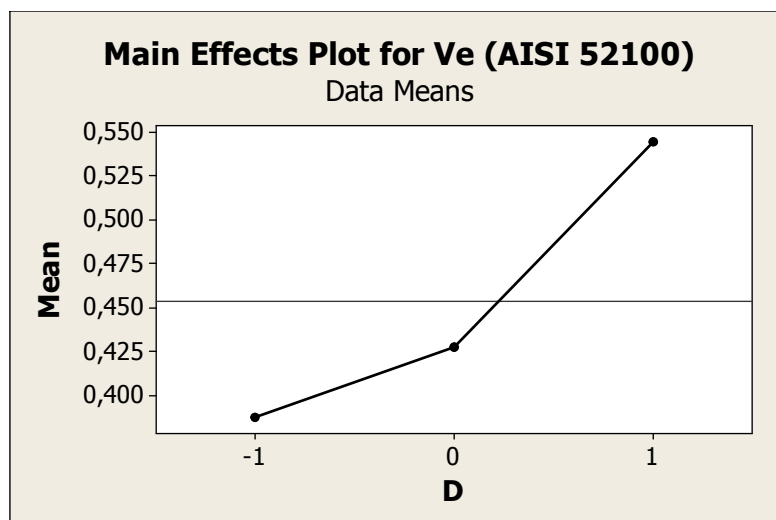


Figure 34 : Effet des paramètres de coupe (V, f, D) sur la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 1045.



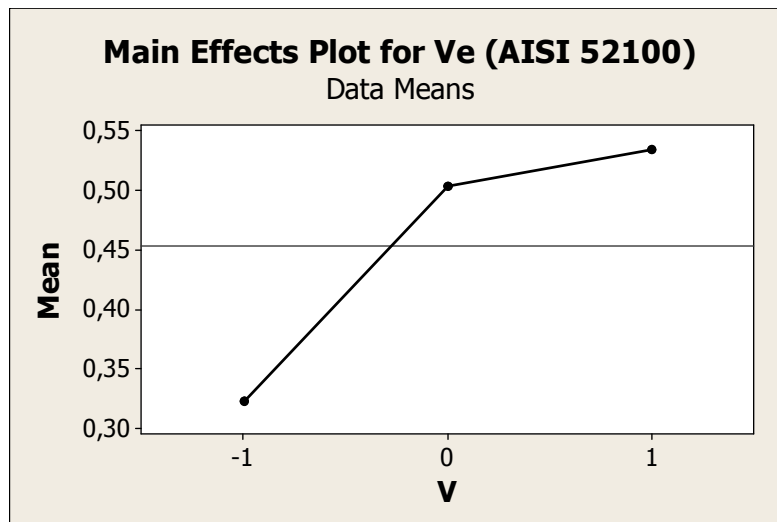
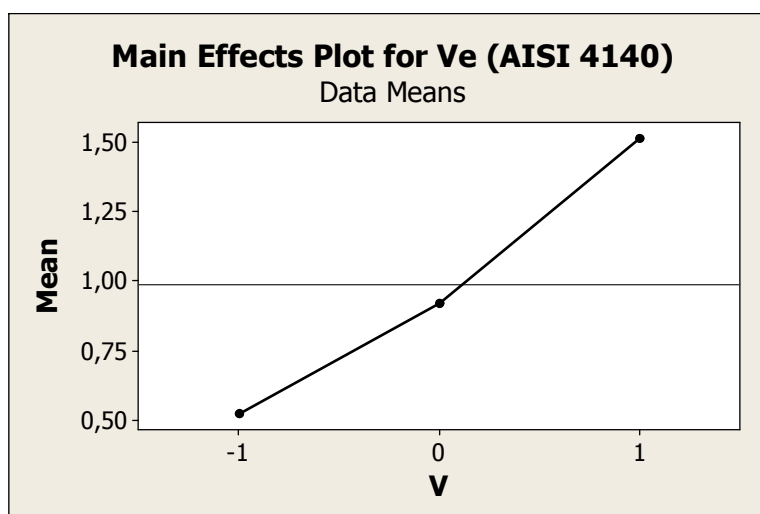
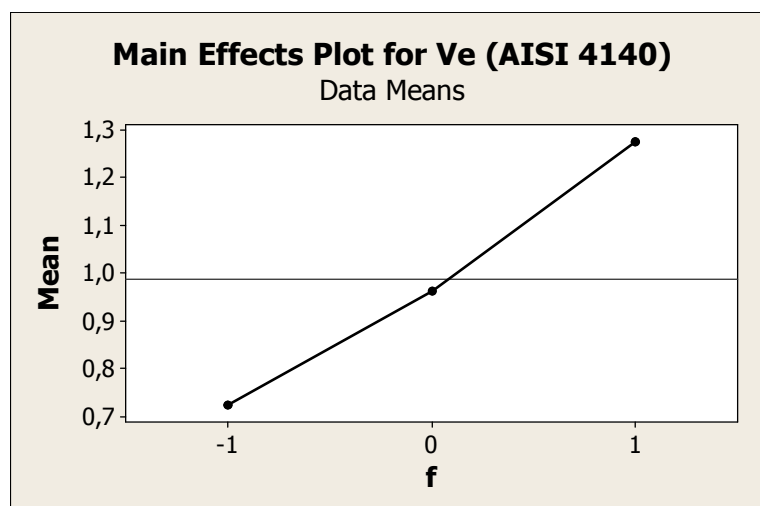


Figure 35 : Effets des paramètres de coupe (V, f, D) sur les vibrations (Ve) lors de l'usinage de l'acier AISI 52100.



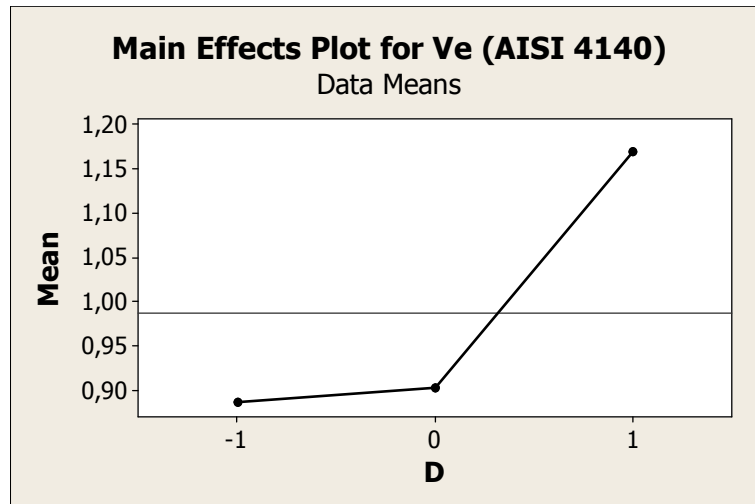
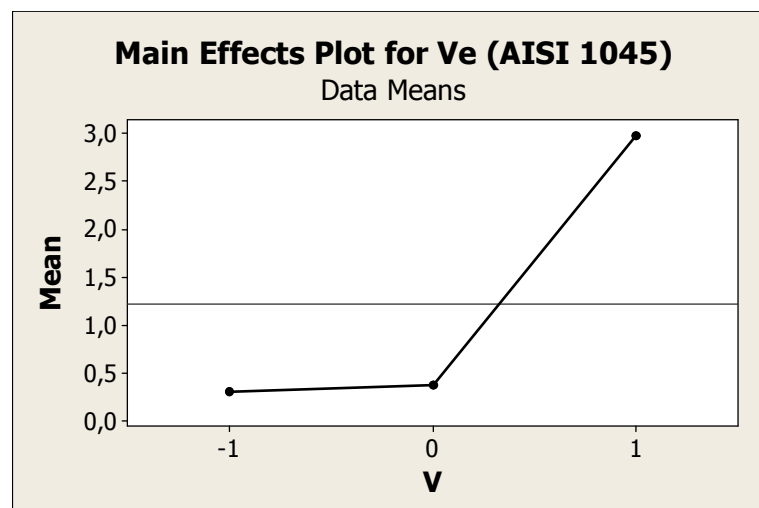
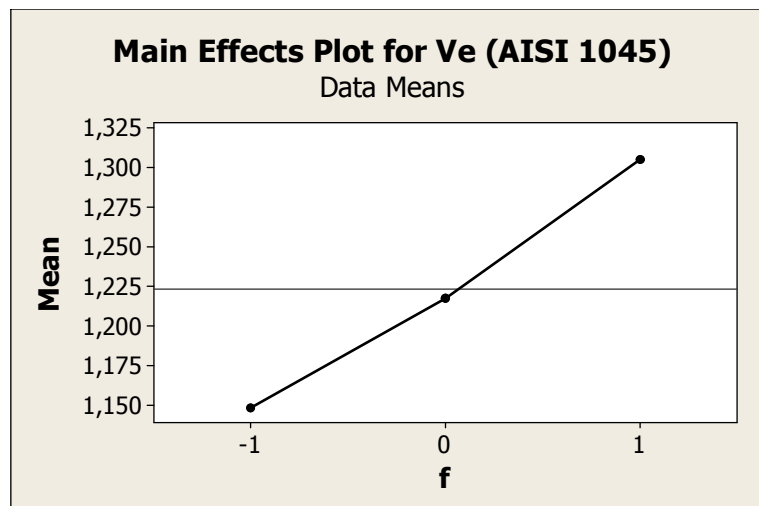


Figure 36 : Effet des paramètres de coupe (V, f, D) sur les vibrations (Ve) lors de l'usinage de l'acier AISI 4140.



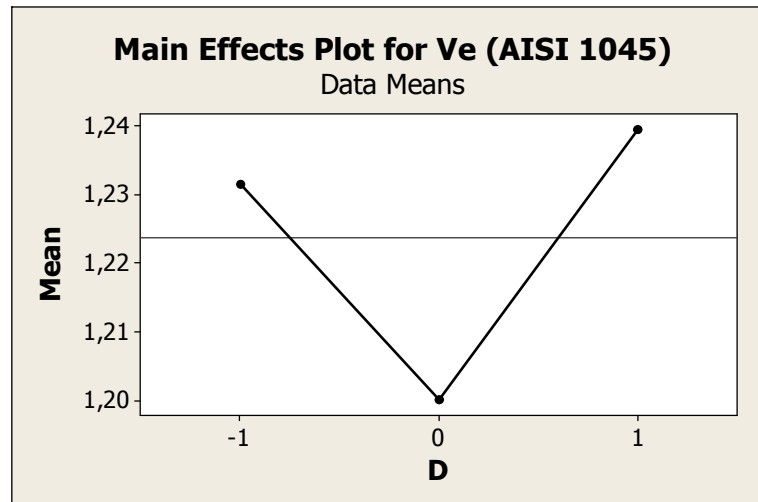
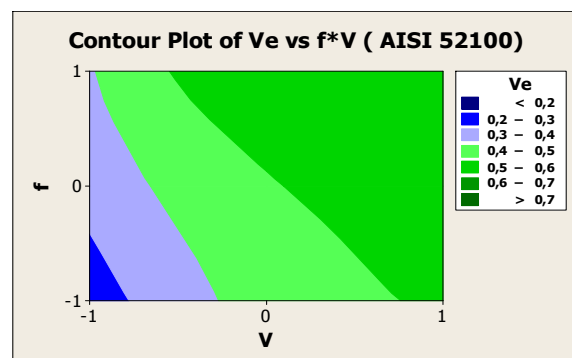
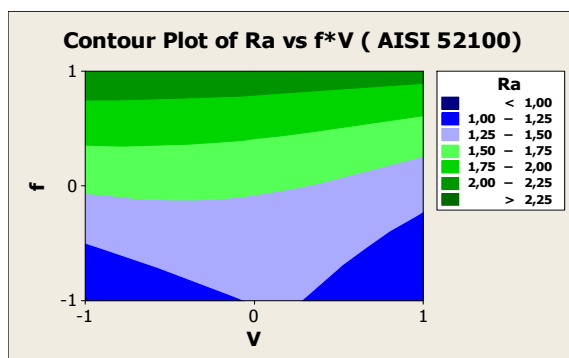


Figure 37 : Effet des paramètres de coupe (V, f, D) sur les vibrations (Ve) lors de l'usinage de l'acier AISI 1045.

III.4.2 Diagrammes de contours pour la rugosité et les vibrations

Les [Figures 38,39 et 40](#) montrent l'impact et les degrés d'influence des paramètres de coupe (V, f et D) sur la rugosité de surface Ra et les vibrations radiales pour les aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045 respectivement. Il est clair que les meilleures qualités de surface (correspondant à de faibles rugosités: $Ra < 1,25 \mu m$) correspondent aux combinaisons des faibles avances et des faibles profondeurs et ceci pour les trois nuances d'aciers, alors que pour les vitesses ce sont les combinaisons des faibles vitesses et faibles profondeurs qui donneront les plus faibles vitesses de vibration. On remarque aussi que l'effet de l'avance est dominant pour la rugosité tandis que l'effet de la vitesse est plus dominant pour la vibration. Ceci confirme les résultats trouvés par l'analyse des effets principaux (III.4.1.2.1 & III.4.1.2.2).



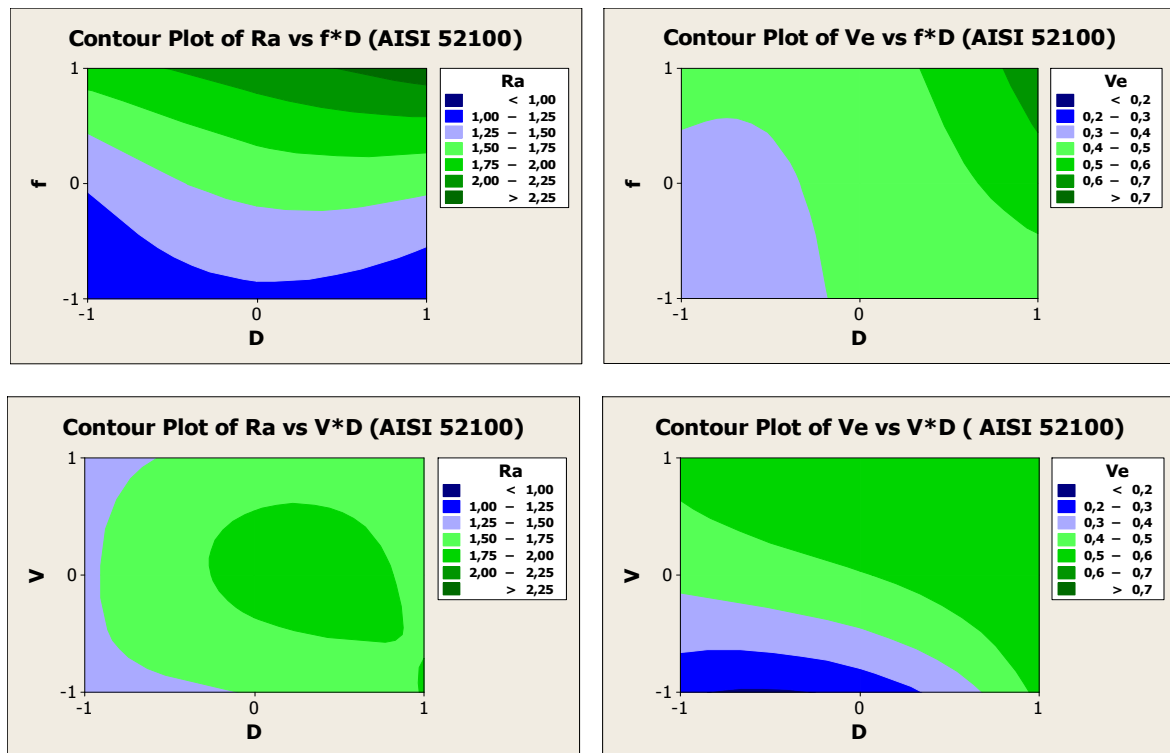
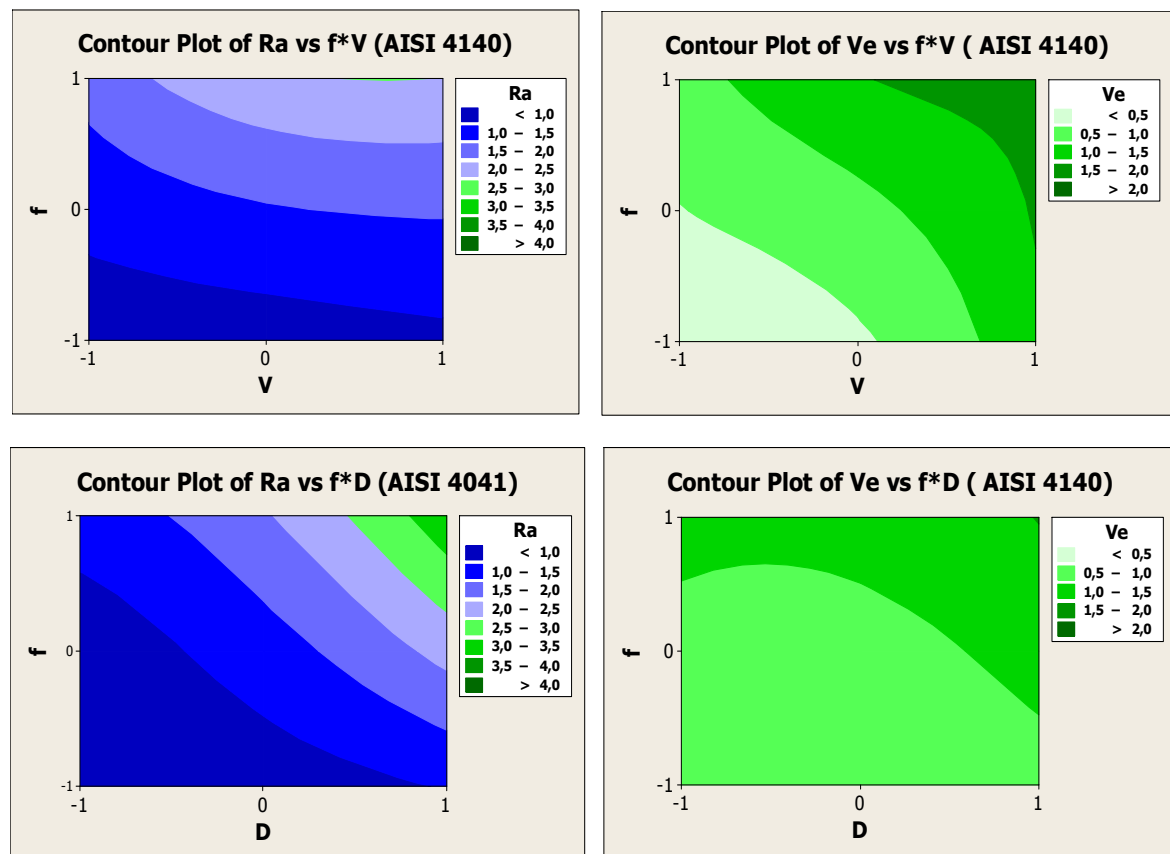


Figure 38 : Diagrammes de contours pour la rugosité R_a et la vibration radiale V_e lors de l'usinage de l'acier AISI 52100



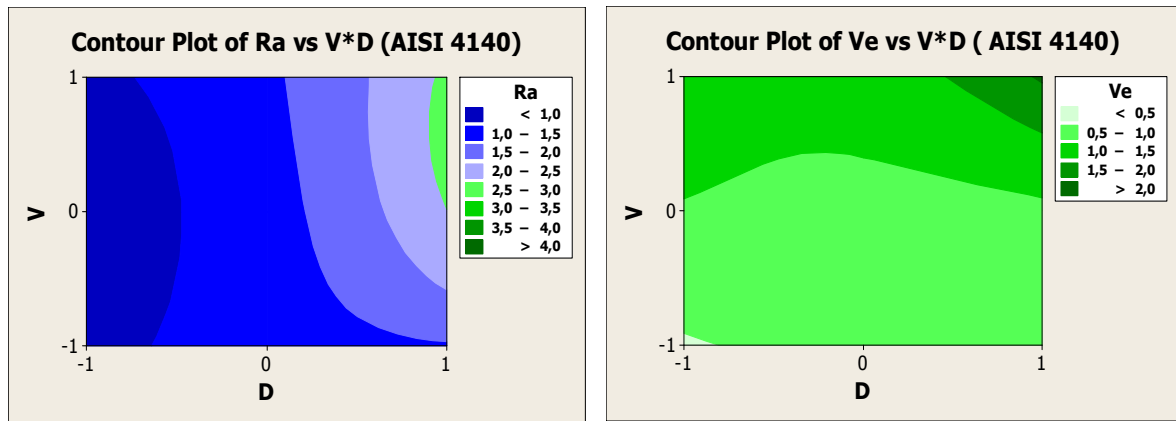
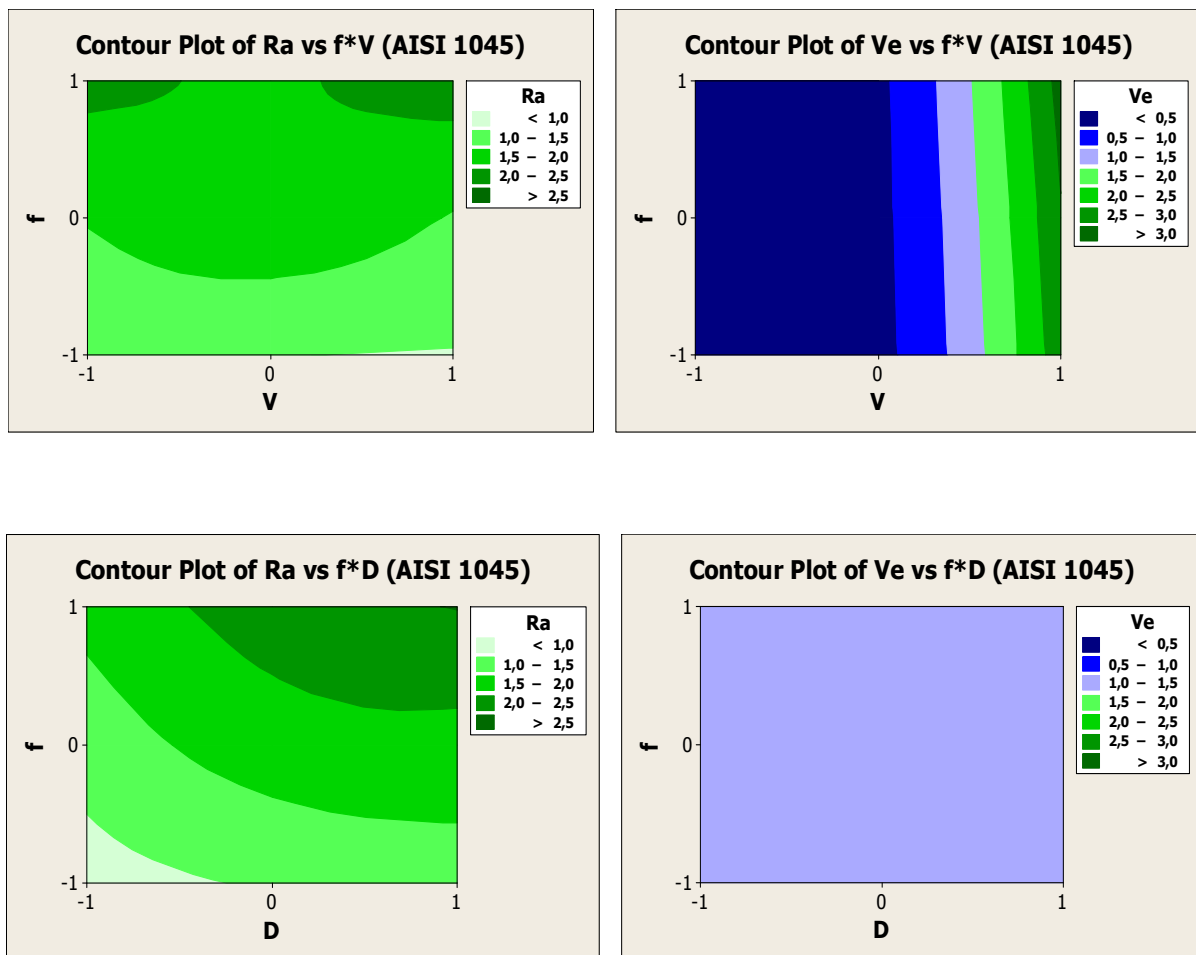


Figure 39 : Diagrammes de contours pour la rugosité Ra et la vibration radiale Ve lors de l'usinage de l'acier AISI 4140



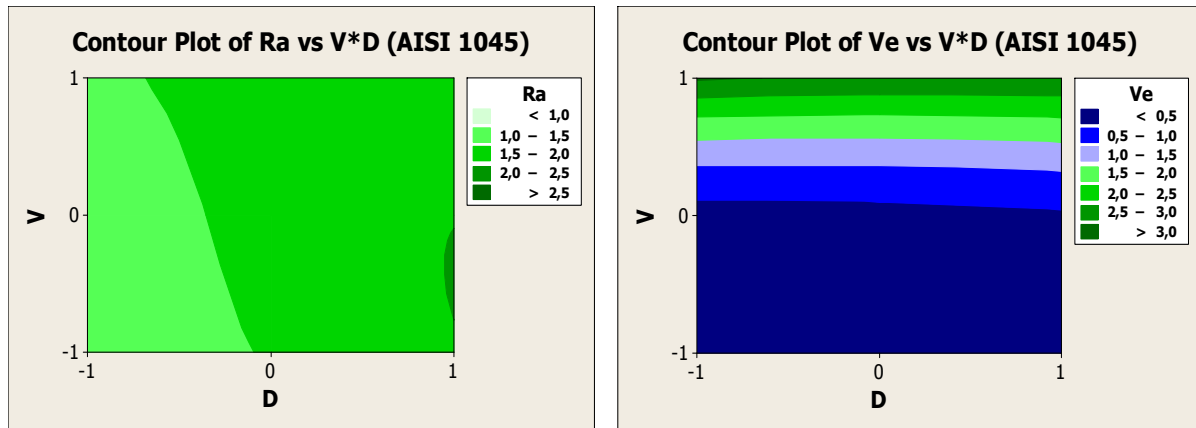


Figure 40 : Diagrammes de contours pour la rugosité Ra et la vibration radiale Ve lors de l'usinage de l'acier AISI 1045

III.4.3 Modèles de régression

Des modèles de régression multiple de second ordre ont été implémentés à un niveau de confiance de 95%. Ils expriment la corrélation entre les paramètres de coupe (V, f et D) et les paramètres technologiques (rugosité de surface (Ra) et vibrations Radiales (Ve)). Les équations obtenues sont présentées dans le [tableau 15](#).

Les valeurs des coefficients (R^2) sont relativement élevées (79,30 à 99,70)%, ce qui justifie l'adéquation des modèles de régression du 2^{ème} degré proposés. En outre, la P-value ($P\text{-value} = 0,000$) de la régression témoigne à son tour que les modèles sont significatifs.

Tableau 15 : Modèles de régression de la rugosité et des vibrations radiales en fonction des paramètres du régime de coupe pour les différentes nuances d'aciers étudiés

Acier	Rugosité de surface (Ra)	Vibration Radiale (Ve)
AISI 52100	$Ra = 0.147f^2 - 0.0994D^2 + 0.519f + 0.135D + 0.119D \times f + 1.54$	$Ve = 0.001f^2 + 0.0386D^2 - 0.0746V^2 + 0.577f + 0.0784D + 0.106V - 0.0767D \times V + 0.476$
	$S = 0,1363 ; R\text{-}Sq = 93,4\% ;$ $P\text{-value} = 0,000$	$S = 0,0658 ; R\text{-}Sq = 85,5\% ;$ $P\text{-value} = 0,000$

AISI 4140	$Ra = 0.092 f^2 + 0.205 D^2$	$Ve = 0.125 D^2 + 0.1 V^2$
	$- 0.134 V^2 + 0.692 f$	$+ 0.037 f^2 + 0.494 V$
	$+ 0.655 D + 0.238 V$	$+ 0.276 f + 0.187 D \times V$
	$+ 0.417 D \times f + 1.35$	$- 0.0471 f \times V + 0.812$
	$S = 0,3645 ; R-Sq = 88,7\% ;$ $P-value = 0,000$	$S = 0,2957 ; R-Sq = 79,3\% ;$ $P-value = 0,000$
AISI 1045	$Ra = 0.322 D + 0.544 f$	$Ve = 1.34 V + 0.0778 f$
	$- 0.117 D^2 - 0.001 f^2$	$+ 1.27 V^2 + 0.0091 f^2$
	$+ 1.67$	$+ 0.0931 f \times V + 0.372$
	$S = 0,25 ; R-Sq = 84,1\% ;$	$S = 0,071 ; R-Sq = 99,7\% ;$
	$P-value = 0,000$	$P-value = 0,000$

III.5 Analyse comparative entres les aciers étudiés

La Figure 41 illustre graphiquement les résultats expérimentaux des réponses Ra et Ve pour toutes les combinaisons du plan orthogonal Taguchi L₂₇. Il ressort que pour les trois aciers testés, la rugosité croît avec l'accroissement de l'avance. L'augmentation de la profondeur de passe dans l'intervalle (0,15 à 0,33 mm) a un effet faible sur la rugosité, alors que celui ci devient plus remarquable quand elle passe à 0,5 mm. Ce cas est principalement observé lors de l'usinage de l'acier AISI 4140 avec les vitesses de coupe $V = 210$ et 280 m/mn. Ceci s'explique par l'instabilité du système usinant, due aux difficultés d'usinage des aciers durcis avec des fréquences de rotation élevées (Fig. 23). Ce cas n'est pas aussi accentué pour l'AISI 52100 de dureté comparable à celle de l'AISI 4140, car suite aux grands diamètres des éprouvettes, celui-ci a été usiné avec des fréquences de rotation plus faibles. Par contre, lors de l'usinage de l'acier AISI 1045, qui se caractérise par une dureté plus faible, le résultat obtenu est antagoniste. En effet, l'effet de la profondeur de passe est insignifiant malgré qu'il a été usiné dans les mêmes conditions de travail que l'AISI 4140. L'analyse de l'effet de la vitesse de coupe sur la rugosité pour les trois configurations (a,b,c) de la Figure 41, montre qu'en moyenne celui ci est faible.

En ce qui concerne l'analyse des résultats des vibrations, illustrés sur la Figure 41, il ressort que l'accroissement de l'avance provoque l'augmentation des vibrations. Ceci a été constaté lors de l'usinage des trois aciers étudiés et pour tous les niveaux des vitesses de coupe testés. Par contre, l'augmentation de la profondeur de passe conduit seulement à l'élévation de l'amplitude des vibrations lors de l'usinage des aciers plus durs (AISI 52100 et AISI 4140), tandis que pour l'AISI 1045, cet effet est presque insignifiant. L'analyse de l'effet de la vitesse de coupe sur les vibrations (Fig. 41 a,b,c), montre qu'avec l'augmentation de celle-ci les amplitudes de vibration s'accroissent. Le taux de cet accroissement est plus important pour l'AISI 1045. Ceci

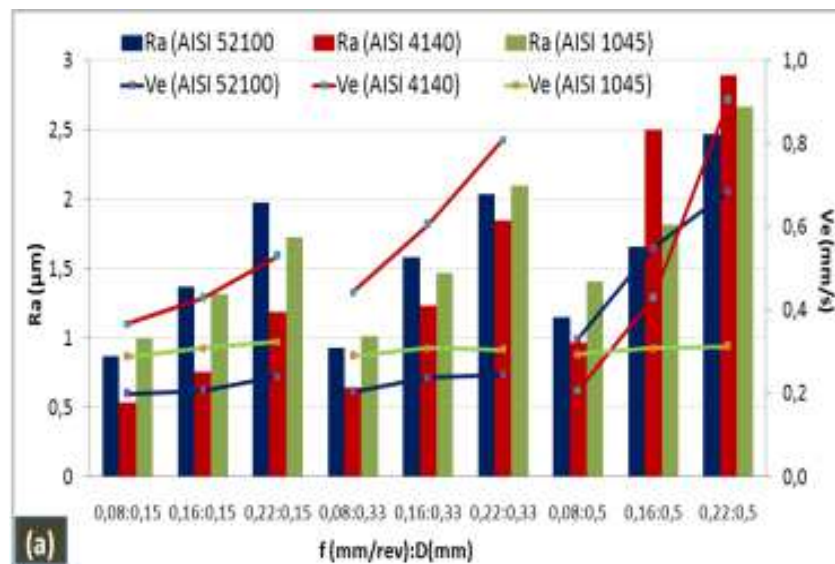
s'explique par l'instabilité du système usinant, suite au travail avec des fréquences de rotation élevées. Ce phénomène est plus accentué, lors de l'usinage de l'acier ayant la plus faible dureté.

III.6 Analyse de la corrélation entre la rugosité et les vibrations radiales

L'analyse de la corrélation (Fig. 42) entre la rugosité (R_a) et les vibrations radiales (V_e) lors de l'usinage des trois aciers étudiés, montre qu'il n'y a pas une nette relation fonctionnelle entre elles (nuage de points dispersés d'une façon aléatoire). Par conséquent, on peut déduire que la corrélation est trop faible ou elle n'existe pas du tout.

La quantification de la force de cette relation fonctionnelle est déterminée par le calcul des coefficients de corrélation, (Tableau 16), qui illustre que lors de l'usinage de l'acier AISI 1045, le coefficient de Pearson montre que la corrélation linéaire est presque nulle ($r = 0,03$). Tandis que pour l'AISI 52100 et l'AISI 4140, cette corrélation selon Pearson est relativement plus élevée ($r = 0,466$ et $r = 0,607$ respectivement). Les coefficients de détermination (r^2) pour les aciers AISI 52100 et AISI 4140 sont : 0,22 et 0,37 en ordre, c'est-à-dire qu'uniquement 22% de la variance rugosité est expliqué par les vibrations pour l'AISI 52100 et seulement 37% pour l'AISI 4140.

Le coefficient de Spearman (Tableau 16) exprime l'existence d'une corrélation non linéaire faible pour l'AISI 52100 et l'AISI 4140, alors qu'elle est encore beaucoup plus faible pour l'AISI 1045. La faiblesse de cette corrélation est liée principalement aux vibrations générées dans le système usinant lors de l'usinage avec des fréquences de rotation relativement élevées (Fig. 23).



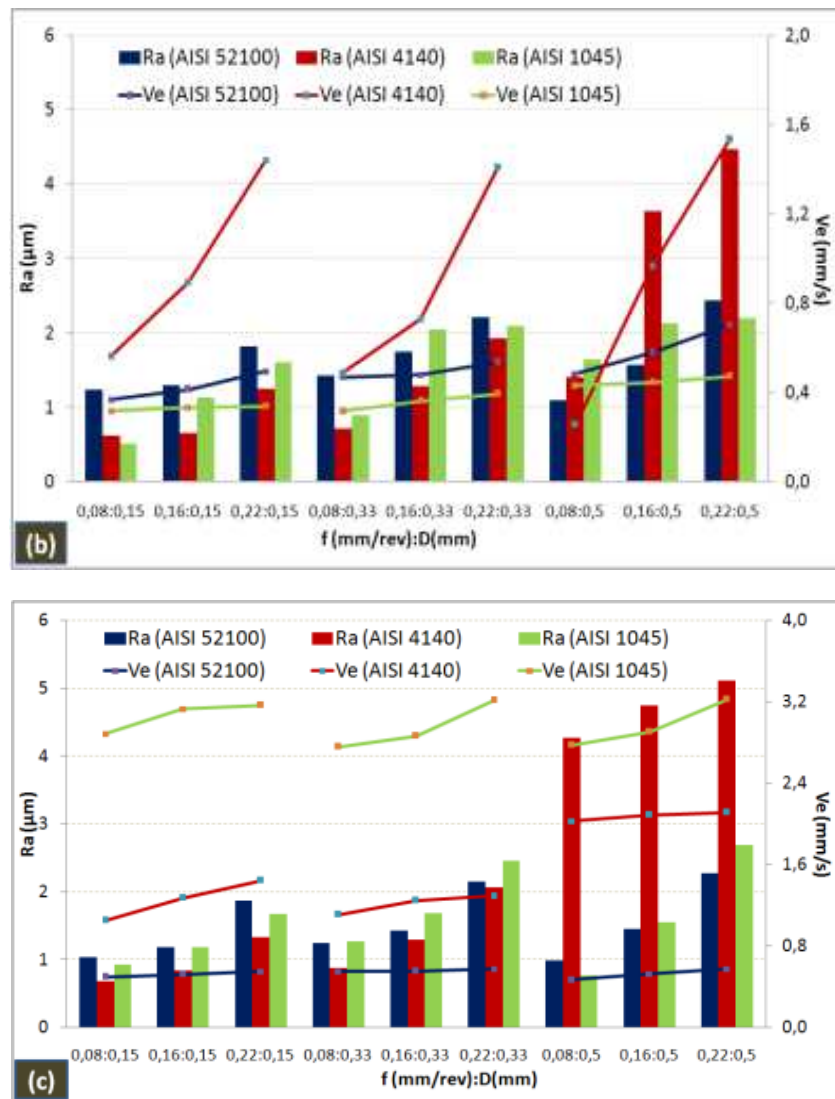
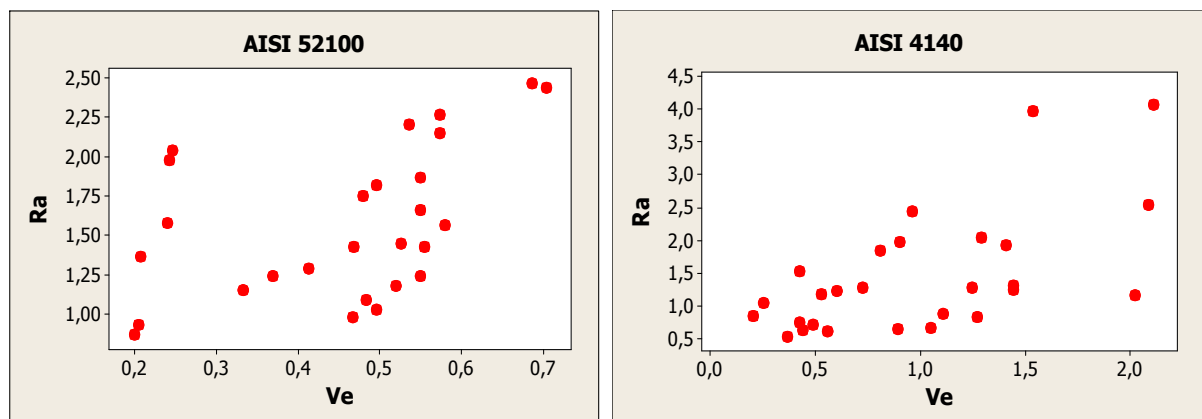


Figure 41 : Résultats comparatifs de la rugosité et des vibrations de coupe des aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045, (a) $V = 140 \text{ m/mn}$ (b) $V = 210 \text{ m/mn}$ (c) $V = 280 \text{ m/mn}$.



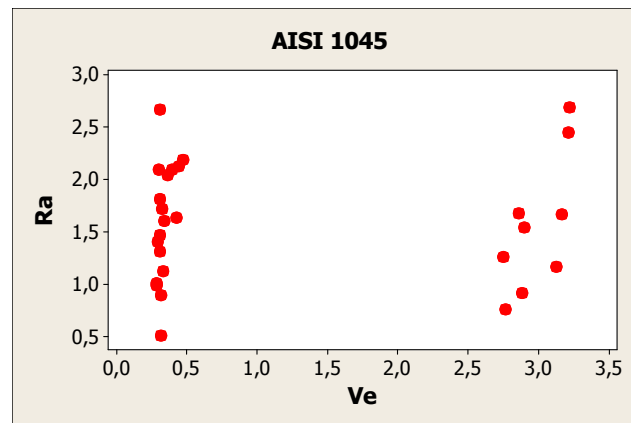


Figure 42 : Intensité de la relation entre la rugosité (Ra) et les vibrations radiales (Ve) pour les trois aciers d'études

Tableau 16: Coefficients de corrélation entre la Rugosité de surface (Ra) et les Vibrations radiales (Ve) des différents aciers étudiés

Coefficient de corrélation	AISI 52100	AISI 4140	AISI1045
Pearson (r)	0,466	0,607	0,031
Spearman (ρ)	0,558	0,594	0,235

Conclusions et Perspectives

A) Conclusions

Les conclusions tirées de cette étude expérimentale, ayant pour objectif le tournage à sec de trois nuances d'aciers durcis (AISI 52100 (66HRC), AISI 4140 (61HRC) et AISI1045 (39HRC)) avec un outil en céramique de coupe mixte (CC650) sont comme suit:

- La meilleure durée de vie de l'outil de coupe en tournage de l'acier AISI 52100 est celle obtenue par le régime de coupe ($V = 140$ m/mn ; $f = 0,08$ mm/tr ; $D = 0,33$ mm)
- L'augmentation de la vitesse de coupe de 3,78 fois en tournage de l'acier AISI 52100 réduit la durée de vie de l'outil de 8,75 fois. Alors que l'accroissement de l'avance de 2,75 fois conduit à réduire la durée de vie d'environ 0,3 fois.
- L'abrasion est le mode d'usure dominant en usinage de l'AISI 52100.
- A partir de l'analyse ANOVA, il a été conclu que l'avance est le paramètre le plus significatif sur la rugosité de surface (R_a) avec des contributions de 83,9% ; 38,7% et 61,5%, respectivement pour les aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045, suivie par la profondeur de passe avec des contributions respectives de 6,6% ; 35,6% et 22,6%. Les contributions de l'interaction de ces deux paramètres lors de l'usinage des aciers AISI 52100 et AISI 4140 sont estimées égales à 3.5% et 9.8% respectivement.
- La vitesse de coupe est le paramètre le plus significatif sur les amplitudes de vibrations radiales. Cet effet est motivé par les valeurs des coefficients de contribution 41,3% ; 55,5% et 99,2%, respectivement pour les aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045.
- Les hautes fréquences de rotation génèrent des vibrations supplémentaires sur le système usinant, ce qui influence les valeurs des vibrations propres causées par la coupe. Ceci influe négativement sur la corrélation entre la rugosité de surface et la vibration de coupe.
- La modélisation de la rugosité de surface à partir des vibrations de coupe nécessite un filtrage des vibrations parasites.
- Pour améliorer la qualité de surface, il est recommandé de réduire l'avance et la profondeur de passe, tout en optimisant la vitesse de coupe, afin que le système usinant soit stable et éviter ainsi le problème des vibrations parasites.
- La régression multiple du second ordre a été adoptée pour modéliser la rugosité de surface avec des coefficients de détermination (R^2) appréciables de : 93,4, 88,7 et 84,1 pour les aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045.
- La régression multiple du second ordre a été adoptée pour modéliser la vibration radiale de coupe avec des coefficients de détermination (R^2) souhaitables de : 85,5%, 79,3% et 99,7% pour les aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045.

- Les coefficients de corrélation linéaire ou non linéaire entre la rugosité de surface R_a et les vibrations radiales montrent que pour les aciers AISI 52100 et AISI 4140 la relation fonctionnelle entre ces deux paramètres technologiques est faible, alors qu'elle est totalement absente pour l'AISI 1045. Ceci est causé par l'instabilité du système usinant.

B) Perspectives

- Filtrage des vibrations parasites durant la coupe afin de définir une corrélation plus nette entre les vibrations et la rugosité de surface.
- Comme la variation de la fréquence de rotation est à l'origine des vibrations (parasites), il est intéressant de fixer ce facteur et revoir la corrélation entre les paramètres technologiques (rugosité, vibration et même l'usure de l'outil).

Références Bibliographiques

- [1] N. A. Abukhshim, P. T. Mativenga, et M. A. Sheikh, "Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 7, 782-800, 2006.
- [2] L. Filice, F. Micari, L. Settineri et D. Umbrello, Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools, *Wear*, 262(5-6), 545–554, 2007.
- [3] W. Grzesik, M. Bartoszek et P. Nieslony, Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 164, 1204–1211, 2005.
- [4] R. T. Coelho, Eu-Gen NG et M.A. Elbestawi, Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2), 263–272, 2007.
- [5] Sandvik COROMANT : Guide technique d'usinage, 2005.
- [6] E.M. Trent, Metal cutting and the tribology of seizure: II movement of work material over the tool in metal cutting. *Wear*, 128(1), 47–64, 1988.
- [7] P. Giraud, les nouvelles techniques d'usinage, SECO Tools, 2008.
- [8] K. C. EE, A. K. Balaji et I. S. Jawahir, Progressive tool-wear mechanisms and their effects on chip-curl/chip-form in machining with grooved tools : an extended application of the equivalent toolface (ET) model, *Wear*, 255(7-12), 1404–1413, 2003.
- [9] J.A. Canteli, J.L. Cantero, N.C. Marin, B. Gomrz, E. Gordo et M.H. Migué-Lez, Cutting performance of TiCN-HSS cermet in dry machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(1), 122–128, 2010.
- [10] S. Amini, H. Soleimanimehr, M.J. Nategh, A. Abudollah et M.H. Sadeghi, FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool, *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1-3), 43–47, 2008.
- [11] V. P Astakhov, *Tribology of metal cutting*, 2007.
- [12] M. A. El Baradie, The effect of varying the workpiece diameter on the cutting tool clearance angle in tool-life testing, *Wear*, 195(1-2), 201–205, 1996.
- [13] W. KÖnig, A. Berkold et K-F. Koch, Turning versus grinding – a comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42(1), 39–43, 1993.
- [14] X. J. Ren, Q. X. Yang, R. D. James et L. Wang, Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling, *Journal of Materials Processing Technology*, 147(1), 38–44, 2004.
- [15] N. Fang et Q. WU, The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(10), 1178–1187, 2005.
- [16] Y. Ozcatalbas, Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al4C3-Al composite. *Materials & Design*, 24(3), 215–221, 2003.
- [17] L. Chen, T.I. EL-Wardany, M. Nasr et M.A. Elbestawi, Effects of edge preparation and feed when hard turning a hot work die steel with polycrystalline cubic boron nitride tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), 89–92, 2006.
- [18] J. Rech, Y.-C. Yen, M.J. Schaff, H. Hamdi, T. Altan et K.D. Bouzakis,

- Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts, *Wear*, 259(7-12), 1168–1176, 2005.
- [19] R. Laheurte, O. Cahuc, P. Darnis et A. Gérard, Evaluation de l'énergie mise en jeu du comportement des outils de coupe dans l'usinage, *Mise en forme des métaux*, 9 –15, 2002.
- [20] H. G. Kim, J. H. Sim et H. J. Kweon, Performance evaluation of chip breaker utilizing neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 647–656, 2009.
- [21] Catalogue générale C005F – données techniques (usinage).
- [22] M. S. Carrilero, R. Bienvenido, J. M. Sanchez, M. Álvarez, A. Gonzalez et M. Marcos, A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al-Cu alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(2), 215–220, 2002.
- [23] P. Christian : Comportement de revêtement céramique sur outil en tournage à sec de finition, Thèse de doctorat, 2003.
- [24] K. Kudou, T. Ono et S. Okada, Crater wear characteristics of an Fe-diffused carbide cutting tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1-3), 255–261, 2003.
- [25] H.H. Shahabi et M.M. Ratnam, Assessment of flank wear and nose wear from workpiece roughness in turning operation using machine vision, *Int J Adv Manuf Technol* 43, 11–21, 2009.
- [26] W. Grzesik et Z. Zalisz, Wear phenomenon in the hard steel machining using ceramic tools. *Tribology International*, 41(8), 802–812, 2008.
- [27] A S. Kumar, A R. Durai et T Sornakumar, Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 21(3-4), 109–117, 2003.
- [28] R.P. Martinho, F.J.G. Silva et A.P.M. Baptista, Wear behaviour of uncoated and diamond coated Si_3N_4 tools under severe turning conditions, *Wear*, 263(7-12), 1417-1422, 2007.
- [29] S. S. Gill, R. Singh, H. Singh et J. Singh, Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3-4), 256–260, 2009.
- [30] B. Denkena, D. Boehnke et R. Meyer, Reduction of wear induced surface zone effects during hard turning by means of new tool geometries, *Production Engineering*, 2(2), 123–132, 2008.
- [31] S. K. Khrais et Y.J. Lin : Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel, *Wear*, 262(1-2), 64–69, 2007.
- [32] H.A. Abdel-aal, M. Nouari et M. El Mansori, Influence of thermal conductivity on wear when machining titanium alloys, *Tribology International*, 42(2), 359–372, 2009.
- [33] J. Kopac, The influence of Cr on tool wear by machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 157, 354–359, 2004.
- [34] G. Cohen, Étude des effets thermiques et mécaniques en usinage à sec. Thèse de doctorat, Paul Sabatier Toulouse, 2009.
- [35] A. S. Kumar, A. R. Durai et T. Sornakumar, Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. *Tribology International*, 39(3), 191–197, 2006.
- [36] B.V. M. Kumar, J. R. Kumar et B. Basu, Crater wear mechanisms of TiCN-

- Ni-WC cermets during dry machining, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25(5-6), 392–399, 2007.
- [37] N. Scuor, E. Lucchini, S. Maschio, S. L. Casto et V. Sergo, Wear mechanisms and residual stresses in alumina-based laminated cutting tools, *Wear*, 258(9), 1372–1378, 2005.
- [38] A. Ebrahimi et 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, 2009.
- [39] M. Remadna et J. F. Rigal, Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3), 67–75, 2006.
- [40] K.A. Venugopal, S. Paul et A.B. Chattopadhyay, Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy, *Cryogenics*, 47(1), 12–18, 2007.
- [41] G. List, G. Sutter et X Bl, Investigation of tool wear in high speed machining by using a ballistic set-up, 2009.
- [42] A. Attanasio, E. Ceretti, S. Rizzuti, D. Umbrello et F. Micari, 3D finite element analysis of tool wear in machining, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 57(1), 61–64, 2008.
- [43] B.V. M. Kumar, J. R. Kumar et B. Basu, Crater wear mechanisms of TiCN-Ni-WC cermets during dry machining. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25(5-6), 392–399, 2007.
- [44] SANDVIK Coromant, Céramiques, usinage productif et intelligent des superalliages réfractaires, 2010.
- [45] M.E. Merchant, *Mechanics of the metal cutting process* *Journal of Applied Physic*, 16 (1945), 267-275 et 318-324, 1945.
- [46] G. Boothroyd, *The fundamentals of metal machining*, Ed. E. Arnold, London, 1965.
- [47] P.L.B. Oxley, *Mechanics of Machining*, Ed. Ellis Horwood, Chichester, 1989.
- [48] G. Germain, Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser, these doctorat, Ecole doctorale n°432, ENSAM, 2006 .
- [49] K. Iwata, K. Osakada, Y. Terasaka, *Process modelling of orthogonal cutting by the rigid plastic finite element Method*. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106,132-138, 1984.
- [50] J.S. Strenkowski, J.T. Carroll, *A finite element model of orthogonal metal cutting* *Journal of Engineering for Industry*, 107, 347-354,1985.
- [51] R. Rakotomalala, P. Joyot *Arbitrary Lagrangian Eulerian thermomechanical finite element model of material cutting* *Journal of Numerical Methods in Engineering*, 9, 975-987, 1993.
- [52] P. Joyot, R. Rakotomalala, M. Touratier, *Modélisation de l'usinage formulée en Euler Lagrange Arbitraire* *Journal Physics*, 3,1141-1144, 1993.
- [53] O. Pantale, *Modélisation et simulation tridimensionnelles de la coupe des métaux* Thèse de l'Université de Bordeaux I, N220-PAN, 1996.
- [54] A. Sarazin, Les solutions Sandvik Coromant aux problématiques d'états de surface, SANDVIK Coromant, 2010.
- [55] B. Raphet, Etats de surface – caractérisation, in *Techniques de l'ingénieur – Sciences & techniques*, R1230. 2005.
- [56] C. Barlier, and L. Girardin, *Memotech Productique- Matériaux et usinage*, educalivre, Editor. 115-127
- [57] E. D. Kirby, C. C. Joseph, Z. J. Zhang, Development of a Fuzzy-Nets-Based

- In-Process Surface Roughness Adaptive Control System in Turning Operations, *Journal of Expert Systems with Applications*, 30, 592–604, 2006.
- [58] K. A. Ghani, A. I. Choudhury, Husni, Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool, *International Journal of Materials Processing Technology*, 127, 17–22, 2002.
- [59] G. M. Zhang and S. G. Kapoor, Dynamic generation of machined surfaces, Parts 1 and 2, *ASME J. Engng Ind.* 113, 137-152, 1991.
- [60] D. Y. Jang and A. Seireg, Tool natural frequency as the control parameter for surface roughness, *Mach. Vibr.* 1, 147-154, 1992.
- [61] D. Y. Jang and Y. Choi, Analysis of the correlation between tool wear and cutting damping generated in the machining process, *Tribol. Trans.* 37, 154-160, 1994.
- [62] D. Y. Jang, Y. Choi, H. G. Kim and A. Hsiao, Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on line roughness measuring technique in hard turning, *Int. J. Mach. Tools Manufact*, 36, (4), 453-464, 1996.
- [63] J. Goupy, L. Creighton, Introduction aux plans d'expériences, Donod, 3^{ème} édition, 2006.
- [64] H.M. Walker, *Degrees of freedom*, *Journal of Educational Psychology*, 31(4), 253-269, 1940.
- [65] Catastrophic thermoplastic shear, *Journal of Applied Physics*, 31,189-193, 1964.
- [66] G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir, Comportement, propriétés, et usinabilité des aciers durcis, *Tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6*, Matériaux 2002.
- [67] S. Chinchankar, S.K. Choudhury, Machining of hardened steel- Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 89, 95–109, 2015.
- [68] Aubert & Duval, 1710f, Internet lien: <http://www.aubertduval.fr>
- [69] G. Poulachon, A. Moison, I.S. Jawahir, Comportement, propriétés, et usinabilité des aciers durcis, Matériaux, 2002
- [70] G. C. Benga, A. M. Abrao, Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 237–241, 2003.
- [71] Y. Huang, S. Y. Liang, Modeling of Cutting Forces Under Hard Turning Conditions Considering Tool Wear Effect, *Transactions of the ASME*, 262-270, 2005.
- [72] J. A. Arsecularatne, P. Mathew et P. L. B. Oxley, Prediction of Chip Flow Direction and Cutting Forces in Oblique Machining With Nose Radius Tools, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 209, 305–315, 1995.
- [73] J. A. Arsecularatne, and P. Mathew, Oxley Modeling Approach, Its Applications and Future Directions, *Mach. Sci. Technol.*, 4, 363–397, 2000.
- [74] Y. K. Chou, and C. J. Evans, White Layers and Thermal Modeling of Hard Turned Surfaces, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 39, 1863–1881,1999.
- [75] G.F. Batalha, S. Delijaicov, J.B. Aguiar, E.C. Bordinassi, M. Stipkovic Filho- Residual stresses modelling in hard turning and its correlation with the cutting forces, *Journal of achievements in materials and manufacturing Engineering*, 24, 2007.
- [76] P. Dalhman, F. Gunnberg, M. Jacobson, The influence of rake angle, cutting

- feed and cutting depth of residual stresses in hard turning, *Journal of Material Processing Technology* 147, 181–184, 2004.
- [77] W. Grzesik, J. Rech, T. Wanat, Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools, *International journal of machine tools & manufacture* 47, 255–262, 2007.
- [78] S. Benchiheb et L. Boulanouar, Influence des Paramètres de Coupe sur la Tenue du CBN 7020 Lors du Tournage Dur, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing, CIP, 2007.
- [79] Y. Huang, K. C. & S. Y. Liang, CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses, *Int J Adv Manuf Technol* 35, 443–453, 2007.
- [80] S. Takatsu, H. Shimoda, K. Otani, Effect of CBN content on the cutting performance of polycrystalline CBN tools, *Int J Refract Hard Mat*, 2(4), 175–178, 1983.
- [81] A.M. Abrao, M.L.H. Wise, D. K. Aspinwall, Tool life and workpiece surface integrity evaluations when machining hardened AISI 52100 steels with conventional ceramic and PCBN tool materials, *SME Tech Pap MR95*, 1–9, 1995.
- [82] R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, The use of high speed machining for the manufacture of hardened steel dies, *Trans. NAMRI/SME*, 24, 21-26, 1996.
- [83] G. Poulachon, A. Moisan, I. Jawahir, Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools, *Wear* 250, 576–586, 2001.
- [84] Y. Chou, Wear mechanism of cubic boron nitride tools in precision turning of hardened steels. PhD Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, 1994.
- [85] Y. K. Chou, C. J. Evans, M. M. Barash, Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel, *J Mater Process Technol* 124, 274–283, 2002.
- [86] Y. Chou, M. M. Barash, Review on hard turning and CBN cutting tools, *SME Tech Pap MR95–214*, 1–12, 1995.
- [87] M. P. Hitchiner, J. Wilks, Some remarks on the chemical wear of diamond and cubic BN during turning and grinding. *Wear* 114, 327–338, 1987.
- [88] J. Barry, G. Byrne, Cutting tool wear in the machining of hardened steel, part 2: cubic boron nitride cutting tool wear, *Wear* 247, 152–160, 2001.
- [89] P. S. Sista, S. O. Swain, S. Chandrasekar S, T. N. Farris , Tool wear characteristics of CBN tools in the finish machining of tool steels. *Manuf Sci Technol ASME MED*, 6(2), 161–168, 1997.
- [90] Y. Huang, S. Y. Liang, Modeling of CBN tool flank wear progression in finish hard turning, *ASME J Manuf Sci Eng*, 126 (1), 98–106, 2004.
- [91] Y. Huang, S. Y. Liang, Modeling of CBN tool crater wear in finish hard turning, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 24(9–10), 632–639, 2004.
- [92] B. M. Kramer, Predicted wear resistances of binary carbide coatings. *J Vac Sci Technol*, A4(6), 2870–2873, 1986.
- [93] Y. Sahin, Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels, *journal of materials processing technology*, 209, 3478–3489, 2009.
- [94] G. C. Benga, A. M. Abrao, Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 237–241, 2003.
- [95] M. A. Yallese , K. Chaoui , N. Zeghib, L. Boulanouar , JF. Rigal , Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, *journal of materials processing technology*, 209, 1092–1104, 2009.

- [96] K. Bouacha , M. A. Yallese , T. Mabrouki , J.F. Rigal, Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 28, 349–361, 2010.
- [97] A.R. Motorcu, Tool life performances, wear mechanism and surface roughness characteristics when turning austenised and quenched AISI 52100 bearing steel with ceramics and CBN/TiC cutting tools, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 18, 137-146, 2011.
- [98] G. Bartarya, S. K. Choudhury, Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness during finish hard turning AISI 52100 grade steel, *Procedia CIRP* 1, 651 – 656, 2012.
- [99] A. Attanasio, D. Umbrello, C. Cappellini, G. Rotella, R. M'Saoubi, Tool wear effects on white and dark layer formation in hard turning of AISI 52100 steel, *Wear* 286– 287, 98–107, 2012.
- [100] P. Revel, N. Jouini, G. Thoquenne, F. Lefebvre, High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel, *Precision Engineering*, 43, 24–33, 2016.
- [101] A.P. Paiva, P.H. Campos, J.R. Ferreira, L.G.D. Lopes, E.J. Paiva, P.P. Balestrassi, A multivariate robust parameter design approach for optimization of AISI 52100 hardened steel turning with wiper mixed ceramic tool, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 30, 152–163, 2012.
- [102] S.B. Hosseinia, T. Beno, U. Klement, J. Kaminski, K. Rytberg , Cutting temperatures during hard turning—Measurements and effects on white layer formation in AISI 52100, *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 1293–1300, 2014.
- [103] Nabil JOUINI, Philippe REVEL, Guillaume THOQUENNE, Fabien LEFEBVRE, Characterization of surfaces obtained by precision hard turning of AISI 52100 in relation to RCF life, *Procedia Engineering*, 66, , 793–802, 2013.
- [104] I. Asiltürk, H. Akkuş, Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, *Measurement*, 44, 1697–1704, 2011.
- [105] N. Uppal, R. Rampal, C. S. Sandhu, To analyses the effectes of turning parameters on material removal rate of AISI 4041 die alloy steel, 02 (09), 538-541, 2013.
- [106] S.R. Das, A. Kumar, D. Dhupal and S.K. Mohapatra, Optimization of Surface Roughness in Hard Turning of AISI 4340 Steel using Coated Carbide Inserts ; *International Journal of Information and Computation Technology*, 3 (9), 871-880, 2013.
- [107] R. Suresh, S. Basavarajappa et G.L. Samuel, Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool, *Measurement*, 45(7),1872–1884, 2012.
- [108] M. Ibrahim. Sadik, Wear development and cutting forces on CBN cutting tool in Hard Part turning of different hardened steels, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, 232 – 237, 2012.
- [109] S. R. Das, D. Dhupal, A. Kumar, Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool, *Measurement*, 62, 108–126, 2015.
- [110] Y. Sahin, A. R. Motorcu, Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool, *Materials and Design*, 26, 321–326, 2005.
- [111] Y. Sahin, A.R. Motorcu, Surface roughness model in machining hardened

- steel with cubic boron nitride cutting tool, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 26, 84–90, 2008.
- [112] U. K. Yadav, D. Narang, P. S. Attri, Experimental Investigation And Optimization Of Machining Parameters For Surface Roughness In CNC Turning By Taguchi Method, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, 4, 2060-2065, 2012.
- [113] A. Kumar, P. Sharma, S. Kataria, A. Kumar, Comparision of Machining Parameters for Optimum Surface Roughness of AISI 1045 With TiN and TiAlN Coated Carbide Tools, *IJRMET* , 3, 2 , 253-258, 2013.
- [114] A. Qasim, S. Nisar, A. Shah, M. S. Khalid, M. A. Sheikh, Optimization of process parameters for machining of AISI-1045 steel using Taguchi design and ANOVA, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 59, 36–51, 2015.
- [115] V. A. A. De Godoy, et A. E. Diniz. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1014-1025, 2012.
- [116] M. W. Azizi, S. Balhadi, M. A. Yallesse, A. Lagred, A. Bouziane, et L. Boulanouar, Study of the machinability of hardened 100Cr6 bearing steel with tin coated ceramic inserts, *Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution*, Constantine, Algeria, 172-177, 2016.
- [117] Z. Hessainia, A. A. Belbah, M. A. Yaltese, T. Mabrouki, J. F. Rigal, On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations, *Measurement*, 46(5), 1671-1681, 2013.