

ANALYSE DE LA CORRELATION ENTRE LA RUGOSITE ET LA VIBRATION DE COUPE EN USINAGE DES ACIERS DURCIS

Youcef ABIDI¹, Lakhdar BOULANOUAR²

Ce travail est une étude d'investigation de l'effet des paramètres d'usinage (vitesse de coupe, avance et profondeur) sur la rugosité de surface et sur les vibrations radiales de la coupe durant le tournage dur à sec de trois nuances d'aciers trempés: AISI 52100 (66HRC), AISI 4140 (61HRC) et AISI 1045 (39HRC) avec la céramique mixte CC650 (70%Al₂O₃+30%TiC). Une analyse ANOVA d'un plan expérimental orthogonal Taguchi L₂₇ est appliquée afin de déterminer la contribution de chaque paramètre 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 pour déterminer la rugosité de surface des trois aciers suivis par la profondeur de passe, alors que pour 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 (Ra) 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 sont modélisées par des équations de régression multiple de second ordre avec des coefficients de corrélation (R²) très acceptables.

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

1. Introduction

Le tournage des aciers durcis occupe de plus en plus une place importante dans l'environnement de l'usinage. Il se présente comme un processus de fabrication par enlèvement de copeau très compétitif vis à vis de la rectification [1, 2, 3].

Il existe beaucoup d'investigations dans le domaine de l'étude des effets de différents paramètres de coupe affectant la qualité de surface usinée, l'usure de l'outil de coupe, la productivité, le choix de matériau, la géométrie d'outil de coupe, les vibrations de coupe les changements métallurgiques dans la matière et la température de coupe durant l'usinage des aciers durcis. A.R.Motorcu [4], a trouvé que la vitesse de coupe et la dureté de l'outil sont les paramètres les plus

¹ PhD, Laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (LRTAPM), Université Badji Mokhtar-Annaba, P.O Box 12, Annaba 23000, Algeria, e-mail: youcef.abidi@alsolb-dz.com

² Prof., Laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (LRTAPM), Université Badji Mokhtar-Annaba, P.O Box 12, Annaba 23000, Algeria, e-mail: lakhdar.boulanouar@univ-annaba.org

influent sur la durée de vie de l'outil en usinage dur. M. Jacobson et al. [5], ont trouvé dans une étude d'usinage dur avec le PCBN et pour des vitesses de coupe varie entre 50 à 1000 m/min, que la rugosité de surface diminue avec l'augmentation de la vitesse, où les meilleurs résultats sont obtenus pour $V = 170$ m/min. M.C. Shaw [6], a démontré que la rugosité de surface de l'acier durci AISI 4140 durant le tournage en utilisant la céramique comme outil est très influencée par l'avance et concorde bien avec la formule primaire de la rugosité ($R = f^2/32r$) pour quelques rayons de courbure. M.A. Yallesse et al. [7] ont confirmé ce résultat aussi lors de l'usinage de l'acier durci AISI 52100. Gaitonde et al. [8], ont trouvé que la croissance de l'avance conduit à une augmentation de la force de coupe. La même conclusion a été déduite par Suresh et al. [9], lors de l'usinage de l'acier durci AISI 4340. M.A. Yallesse et al. [7] ont défini que la composante radiale de la force de coupe est la plus dominante par rapport aux composantes axiale et tangentiel. K. Bouacha & al.[10], ont trouvé que la force s'accroît avec l'augmentation de l'avance et la profondeur de passe et décroît avec l'accroissement de la vitesse de coupe. R. Serra et al. [11] ont trouvé que l'évolution de l'enveloppe du signal des vibrations de coupe durant l'usinage à sec de la fonte FT25 a montré une sensibilité à l'usure de l'outil mais sans pouvoir distinguer précisément les trois phases de la vie de l'outil. En usinage dur avec des vitesses de coupe élevées (>170 m/mn), B. Fnides et al. [12], ont trouvé que les vibrations de coupe affectent la rugosité de la surface usinée. A. Attanasio et al. [13], ont trouvé que l'usure en cratère de l'outil CBN durant l'usinage dur à grande vitesse de l'acier AISI 52100, est influencée par la vitesse de coupe et l'avance tandis que l'usure en dépouille est influencée par la vitesse. R. Suresh et al. [14], confirme que la qualité de surface en usinage dur est meilleure lorsqu'on travaille avec des vitesses de coupes élevées et des avances faibles, alors que l'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse en tournage de l'acier AISI4340. En utilisant des plaquettes en carbure revêtu multicouches, S.R. Das et al. [15,16], ont trouvé que l'avance est le paramètre le plus influent sur la rugosité de surface lors de l'usinage dur de l'acier AISI 4340, suivi par la vitesse de coupe. S.R. Das et al. [17], ont confirmé ces résultats lors de l'usinage de l'acier AISI 4140. M.I. Sadik [18], a trouvé que la force de coupe est très liée à la nuance des pièces usinées. A.S. Kumar et al. [19], ont trouvé que l'usure en dépouille d'outil en céramique augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe. S. Chinchani et al. [20], ont trouvé qu'en usinage dur de l'acier AISI 4340, la force de coupe varie linéairement en fonction de l'avance et de la profondeur passe, par contre avec la vitesse de coupe, elle a une tendance de baisse au début et devient presque stable pour les vitesses élevées. Z. Hessainia & al. [21], ont trouvé à partir d'une investigation d'analyse statistique de l'effet de la vibration de coupe en qualité d'une variable pour déterminer la rugosité de surface en usinage dur, qu'elle est insignifiante. Dans une investigation d'analyse de la

température de coupe durant l'usinage conventionnel de l'acier durci AISI 52100 avec le CBN, S.B. Hosseini et al. [22] a trouvé que la variation de la température est plus importante pour les faibles et moyennes vitesses alors qu'elle est faible pour les grandes vitesses. Dans le même contexte, B.S. Bapat et al. [23], ont montré que la vitesse de coupe est le facteur le plus influant à l'augmentation de la température de coupe, où la température maximale atteint 789°C, 833°C et 946°C, respectivement aux vitesses de coupe 120m/min, 200m/min et 260m/min.

Y.J. Dong et al. [24] ont montré qu'il y'aura une corrélation entre les vibrations de coupe et la rugosité moyenne de surface durant le tournage dur, après le filtrage des parasites provenant du système broche-pièce en travail à de hautes fréquences.

L'objectif de ce travail est l'analyse de la corrélation entre la rugosité de surface et la vibration de coupe radiale durant l'usinage à sec de trois aciers durcis : AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045 dans une approche d'identifier la possibilité d'exister d'une relation entre ces deux paramètres technologiques. Pour l'atteinte de cet objectif, l'étude de l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et la vibration à une variété d'aciers durcis est une nécessité. L'étude est renforcée par une analyse comparative entre les trois aciers avec la modélisation des deux paramètres technologiques.

2. Plan expérimental

Le travail expérimental est basé sur un plan factoriel complet L_{27} (27 combinaisons), consacré 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.

2.1. Matériel Expérimental

Les expériences ont été réalisées sur un tour parallèle SN40 d'une puissance sur la broche de 6.6 kW et de vitesse de rotation maximale 2000 tr/min. Les traitements thermiques des pièces ont été effectués dans un four WOT 9703-457 404 de température de chauffage maximale 1600°C. La dureté est prise par un Duromètre portable Hardness tester *HLM-100 Plus*. La rugosité est mesurée par un rugosimètre SurfTest 301 Mitutoyo roughnessmeter. Les vibrations radiales ont été mesurées par un Digital Vibration Meter (VM-6360), piloté par un ordinateur à travers un câble optionnel et un software interface Test RS232. 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%Al₂O₃ + 30%TiC). Elles sont montées sur un porte-plaquette PSBNR2525M12 ayant la géométrie suivante : $X_r = 75^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$; $\lambda = -6^\circ$.

2.2. Procédure expérimentale

Les matériaux d'étude sont des aciers à trempabilité importante, ayant les nuances suivantes: AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045 (100Cr6, 42CrMo4 et C45 selon la norme DIN). Ces aciers sont 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, butés, 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, se caractérise par une bonne usinabilité et une stabilité dimensionnelle. Il est destiné à la construction des moules pour plastique, les entretoises, les plateaux de fixation...etc. Sa dureté après un traitement thermique de trempe peut atteindre 35 à 58HRC. La composition chimique identifiée par un spectromètre d'émission optique (thermo scientifique ARL 4460), de ces aciers est illustrée dans le tableau 1.

Les essais de chariotage ont été réalisés sur des ébauches cylindriques de longueur 350mm avec un diamètre de 130mm pour l'acier AISI 52100 et de diamètre 60mm pour les aciers AISI 4140 & AISI 1045. Les éprouvettes ont subi une trempe à 850 °C avec refroidissement à l'huile pour les aciers AISI 52100 et AISI 4140 et refroidissement à l'eau pour l'acier AISI 1045. La trempe est suivie d'un revenu à 200 °C. Les duretés atteintes après les traitements thermiques sont : 66HRC pour l'AISI 52100; 61HRC pour l'AISI 4140 et 39HRC pour l'AISI 1045. Les tests d'usinage ont été effectués à sec et avec un montage mixte (entre mandrin et pointe). L'accéléromètre du vibromètre est monté sur porte-outil dans la direction radiale de la coupe. Les vibrations de coupe sont mesurées en vitesse V_e (RMS value) dont l'unité de mesure est mm/s. Les essais sont planifiés conformément à un plan orthogonal complet L_{27} avec 27 combinaisons des trois variables (Vitesse de coupe V , avance f et profondeur de passe D), ayant chacun trois niveaux (Tableau 2).

Tableau 1

Composition chimique des aciers étudiés (% en poids), balance Fe

Désignation	C	Mn	Si	Ni	Al	Cr	V	Ti	Mo
Acier d'expérience AISI 5210	0,939	0,277	0,265	0,175	0,012	1,444	0,004	0,005	0,058
Acier d'expérience AISI 4140	0.393	0.628	0.234	0.029	0.011	0.949	0.003	0.001	0.158
Acier d'expérience AISI 1045	0.452	0.723	0.238	0.055	0.005	0.092	0.003	0.011	0.009

Tableau 2

Niveaux de variation des paramètres de coupe de la campagne des essais (plan factoriel L₂₇)

Paramètres de coupe	Unité	Niveaux		
		-1	0	1
Vitesse de coupe (<i>V</i>)	m/min	140	210	280
Avance (<i>f</i>)	mm/rev	0,08	0,16	0,22
Profondeur de coupe (<i>D</i>)	mm	0,15	0,325	0,5

La première étape de l'étude est d'identifier l'effet des paramètres de coupe (*V*: vitesse, *f*: avance et *D*: profondeur de passe) sur les paramètres technologiques qui sont en l'occurrence la rugosité de la surface usinée (*R_a*) et les vibrations radiales du bec de l'outil (*V_e*) lors de l'usinage.

Les résultats expérimentaux de la rugosité arithmétique et ceux de la vitesse des vibrations radiales sont illustrés dans le tableau 3. L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour l'identification des facteurs significatifs qui affectent les deux paramètres technologiques durant le tournage des trois aciers. L'analyse a été faite à un niveau de confiance de 95% d'où un $\alpha = 0.05$.

La deuxième étape de l'étude est la modélisation des deux paramètres technologiques, suivi de la détermination des coefficients de corrélations et une comparaison entre les réponses des trois aciers.

3. Résultats et Analyses

Les résultats des réponses expérimentaux de la rugosité de surface *R_a* et les amplitudes des vitesses de la vibration de coupe dans le sens radial, durant le tournage dur des aciers d'études, selon plan factoriel complet L₂₇ (3³) sont présentés sur le tableau 3.

3.1. Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse ANOVA pour les trois aciers étudiés présentée dans les tableaux 4,5,6 équivalent au aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045 respectivement, 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 signification pour les trois aciers avec des coefficients de contribution équivalents à 6.6% pour l'AISI 52100, 35.6% pour l'AISI 4140 et 22.6% pour l'AISI 1045. Il est à souligner que la contribution de l'effet de l'avance et de la profondeur ensemble est très dominante. L'interaction avance – profondeur prendra la troisième position comme 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 égales à 1.5% et 5% respectivement.

Tableau 3

Plan expérimental orthogonal Taguchi L_{27} et résultats expérimentaux de la Rugosité et des Vibrations Radiales, lors de l'usinage des aciers étudiés

Test N°	Paramètres de coupe			AISI 52100		AISI 4140		AISI 1045	
	D (mm)	V (m/min)	f (mm/rev)	Ra (μm)	Ve (mm/s)	Ra (μm)	Ve (mm/s)	Ra (μm)	Ve (mm/s)
1	0,15	140	0,08	0,870	0,20	0,535	0,37	0,995	0,29
2	0,15	140	0,16	1,370	0,21	0,755	0,43	1,320	0,31
3	0,15	140	0,22	1,980	0,24	1,185	0,53	1,725	0,33
4	0,15	210	0,08	1,240	0,37	0,620	0,56	0,510	0,32
5	0,15	210	0,16	1,290	0,41	0,650	0,90	1,125	0,33
6	0,15	210	0,22	1,820	0,50	1,250	1,44	1,610	0,34
7	0,15	280	0,08	1,030	0,50	0,675	1,05	0,925	2,88
8	0,15	280	0,16	1,180	0,52	0,840	1,27	1,175	3,13
9	0,15	280	0,22	1,870	0,55	1,325	1,44	1,665	3,16
10	0,33	140	0,08	0,930	0,20	0,645	0,44	1,010	0,29
11	0,33	140	0,16	1,580	0,24	1,230	0,61	1,470	0,31
12	0,33	140	0,22	2,040	0,25	1,850	0,81	2,100	0,31
13	0,33	210	0,08	1,430	0,47	0,715	0,49	0,895	0,32
14	0,33	210	0,16	1,750	0,48	1,287	0,73	2,040	0,36
15	0,33	210	0,22	2,210	0,54	1,925	1,41	2,095	0,39
16	0,33	280	0,08	1,240	0,55	0,880	1,11	1,267	2,75
17	0,33	280	0,16	1,430	0,55	1,293	1,25	1,680	2,86
18	0,33	280	0,22	2,150	0,57	2,057	1,29	2,450	3,21
19	0,5	140	0,08	1,150	0,33	0,860	0,21	1,405	0,29
20	0,5	140	0,16	1,660	0,55	1,530	0,43	1,820	0,31
21	0,5	140	0,22	2,470	0,69	1,980	0,91	2,667	0,31
22	0,5	210	0,08	1,090	0,48	1,060	0,25	1,640	0,43
23	0,5	210	0,16	1,570	0,58	2,440	0,97	2,125	0,44
24	0,5	210	0,22	2,440	0,70	3,970	1,54	2,195	0,47
25	0,5	280	0,08	0,980	0,47	1,170	2,03	0,760	2,77
26	0,5	280	0,16	1,450	0,53	2,538	2,09	1,550	2,90
27	0,5	280	0,22	2,270	0,57	4,073	2,11	2,688	3,22

La contribution de l'erreur pour la rugosité (Ra) est petite avec 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 principaux sur la rugosité de surface usinée (Ra) pour les trois aciers a été faite avec le logiciel MINITAB16. Les résultats de cette dernière sont illustrés sur les figures 1,2,3 correspond aux aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045 respectivement, où les effets des trois paramètres (avance, vitesse et profondeur de passe) sur la

rugosité (Ra) sont exprimés graphiquement et montrent qu'avec l'augmentation de l'avance et la profondeur de passe, la rugosité a tendance à se dégrader avec un effet remarquable et relativement plus prononcé pour l'avance, tandis que l'accroissement de la vitesse de coupe a des effets variés pour les trois aciers.

Tableau 4

ANOVA de la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 52100						
Source	DOF	SS	MS	F-Value	P	C (%)
<i>D</i>	2	0,38739	0,19369	25,29	0,000	6,6
<i>V</i>	2	0,08756	0,04378	5,72	0,029	1,5
<i>f</i>	2	4,92472	2,46236	321,49	0,000	83,9
<i>D x V</i>	4	0,10595	0,02649	3,46	0,064	1,8
<i>D x f</i>	4	0,20619	0,05155	6,73	0,011	3,5
<i>V x f</i>	4	0,09955	0,02489	3,25	0,073	1,7
<i>Error</i>	8	0,06127	0,00766			1,0
<i>Total</i>	26	5,87263				100
S = 0,0875172 R-Sq = 98,96%						

Tableau 5

ANOVA de la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 4140						
Source	DOF	SS	MS	F-Value	P	C (%)
<i>D</i>	2	7,9707	3,9853	43,52	0,000	35,6
<i>V</i>	2	1,1262	0,5631	6,15	0,024	5,0
<i>f</i>	2	8,6685	4,3342	47,33	0,000	38,7
<i>D x V</i>	4	1,3151	0,3288	3,59	0,058	5,9
<i>D x f</i>	4	2,1933	0,5483	5,99	0,016	9,8
<i>V x f</i>	4	0,3692	0,0923	1,01	0,458	1,7
<i>Error</i>	8	0,7327	0,0916			3,3
<i>Total</i>	26	22,3756				100
S = 0,302628 R-Sq = 96,73%						

Tableau 6

ANOVA de la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 1045						
Source	DOF	SS	MS	F-Value	P	C (%)
<i>D</i>	2	1,95112	0,97556	15,77	0,002	22,6
<i>V</i>	2	0,00765	0,00383	0,06	0,940	0,1
<i>f</i>	2	5,32195	2,66098	43,03	0,000	61,5
<i>D x V</i>	4	0,40486	0,10121	1,64	0,256	4,7
<i>D x f</i>	4	0,15300	0,03825	0,62	0,662	1,8
<i>V x f</i>	4	0,31467	0,07867	1,27	0,357	3,6
<i>Error</i>	8	0,49476	0,06185			5,7
<i>Total</i>	26	8,64802				100
S = 0,248687 R-Sq = 94,28%						

En effet, pour l'acier AISI 52100, l'accroissement de la vitesse contribue dans la première phase (jusqu'à la vitesse moyenne 210m/mn) à augmenter la rugosité,

ensuite la rugosité s'améliore pour les vitesses (entre 210 à 280m/mn), alors que pour l'acier AISI 4140 qui est proche en dureté de l'AISI 52100 mais qui est usiné dans un environnement de fréquences de rotation plus élevées, il est remarqué que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une dégradation de l'état de surface. 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. 3).

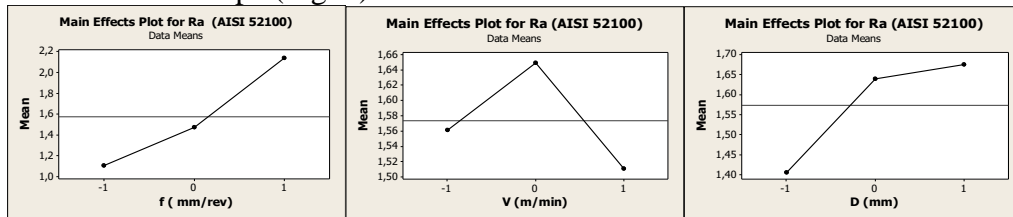


Fig. 1. Effets des paramètres de coupe (V, f, D) sur la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 52100.

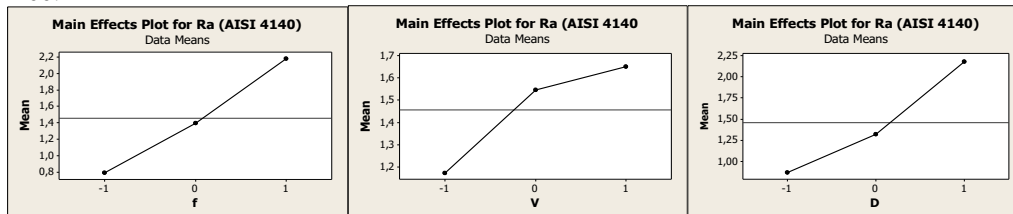


Fig. 2. Effets des paramètres de coupe (V, f, D) sur la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 4140.

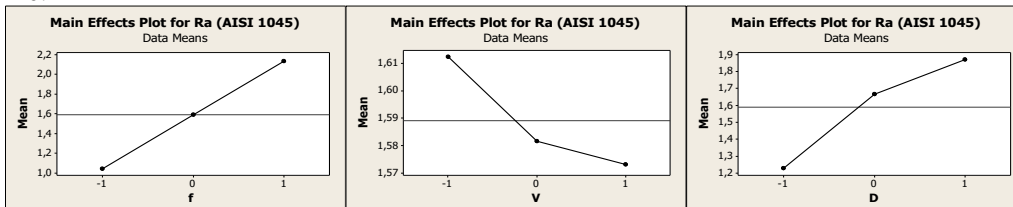


Fig. 3. Effets des paramètres de coupe (V, f, D) sur la rugosité de surface (Ra) de l'acier AISI 1045.

L'analyse ANOVA des vibrations radiales pour les trois aciers étudiés, présentée dans les tableaux 7,8 et 9 correspond 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. La profondeur de passe est le second paramètre en signification pour l'acier AISI 52100 avec une contribution équivalente à 21.1%, par contre pour l'AISI 4140 et AISI 1045, c'est l'avance qui est en seconde position de signification avec des contributions de 17.1% et 0.3% respectivement.

Tableau 7

ANOVA de la vibration radiale (Ve) de l'acier AISI 52100						
Source	DOF	SS	MS	F-Value	P	C (%)
<i>D</i>	2	0,119796	0,059898	40,022	0,000	21,1
<i>V</i>	2	0,234493	0,117247	78,341	0,000	41,3
<i>f</i>	2	0,060107	0,030054	20,081	0,001	10,6
<i>D x V</i>	4	0,029541	0,025992	17,367	0,000	18,3
<i>D x f</i>	4	0,007574	0,007385	4,9346	0,027	5,2
<i>V x f</i>	4	0,011973	0,001894	1,2652	0,359	1,3
<i>Error</i>	8	0,567453	0,001497			2,1
<i>Total</i>	26					100
S = 0,0386857 R-Sq = 97,89%						

Tableau 8

ANOVA de la vibration radiale (Ve) de l'acier AISI 4140						
Source	DOF	SS	MS	F-Value	P	C (%)
<i>D</i>	2	0,44963	0,22482	13,20	0,003	5,6
<i>V</i>	2	4,46068	2,23034	130,92	0,000	55,5
<i>f</i>	2	1,37708	0,68854	40,42	0,000	17,1
<i>D x V</i>	4	1,02151	0,25538	14,99	0,001	12,7
<i>D x f</i>	4	0,04455	0,01114	0,65	0,640	0,6
<i>V x f</i>	4	0,54852	0,13713	8,05	0,007	6,8
<i>Error</i>	8	0,13628	0,01704			1,7
<i>Total</i>	26	8,03826				100
S = 0,130519 R-Sq = 98,30%						

Tableau 9

ANOVA de la vibration radiale (Ve) de l'acier AISI 1045						
Source	DOF	SS	MS	F-Value	P	C (%)
<i>D</i>	2	0,0077	0,0039	1,53	0,274	0,0
<i>V</i>	2	42,0289	21,0145	8305,2	0,000	99,2
<i>f</i>	2	0,1095	0,0548	21,65	0,001	0,3
<i>D x V</i>	4	0,0385	0,0096	3,80	0,051	0,1
<i>D x f</i>	4	0,0108	0,0027	1,06	0,434	0,0
<i>V x f</i>	4	0,1326	0,0332	13,11	0,001	0,3
<i>Error</i>	8	0,0202	0,0025			0,0
<i>Total</i>	26	42,3484				100
S = 0,0503018 R-Sq = 99,95%						

L'avance est aussi significative pour l'AISI 52100 avec une contribution de 10.6%. L'interaction "vitesse – profondeur" exprime des taux de contribution importants pour les aciers plus dur, l'AISI 52100 et l'AISI 4140. Ils sont respectivement 18.3% et 12.7%.

La Figure 4 montre l'accoisement de la vibration radiale en fonction de la fréquence de la broche à vide, ce qui explique que l'effet de la vitesse pour les hautes fréquences est primordiale ; alors que l'effet de l'avance est non significative, notant que l'acier AISI 52100 est usiné dans un intervalle de

vitesse, qui varie entre 355 tr/min à 710 tr/min, tandis que ceux de l'AISI 4140 et AISI 1045 sont entre 710 tr/min et 1400 tr/min.

La contribution de l'erreur pour les vibrations (V_e) 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.

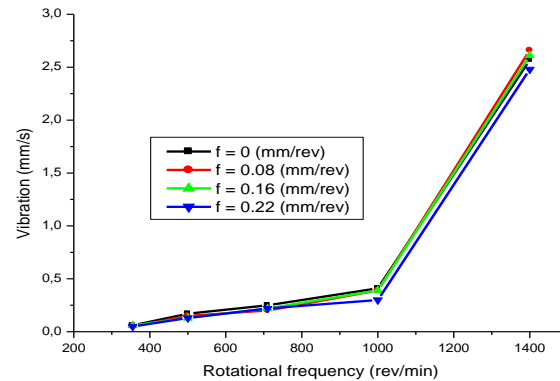


Fig. 4. Comportement vibratoire en marche à vide de la machine-outil en fonction de la fréquence de rotation de la broche à différentes vitesses d'avance.

L'analyse graphique des effets principaux des vibrations radiales (V_e) illustrée sur les figures 5,6 et 7 correspond aux aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045 respectivement, montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, les vibrations augmentent. Ceci s'explique par l'augmentation des efforts de coupe en jumelage avec les vibrations du système tournant pour les fréquences élevées. L'effet de la vitesse de coupe est primordial pour l'acier de faible dureté, l'AISI 1045(Fig.7).

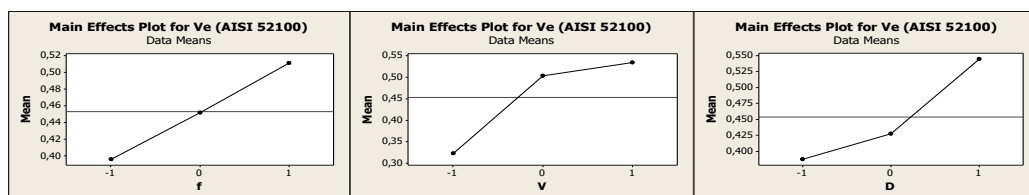


Fig. 5. Effets des paramètres de coupe (V , f , D) sur les vibrations (V_e) lors de l'usinage de l'acier AISI 52100.

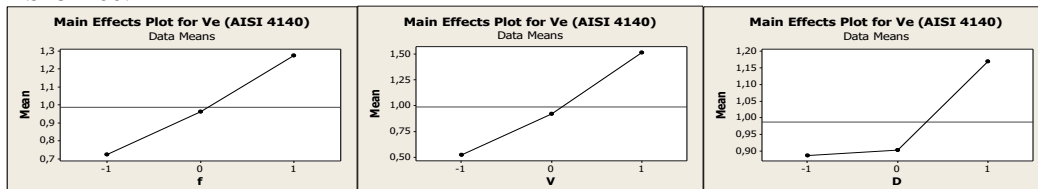


Fig. 6. Effets des paramètres de coupe (V , f , D) sur les vibrations (V_e) lors de l'usinage de l'acier AISI 4140.

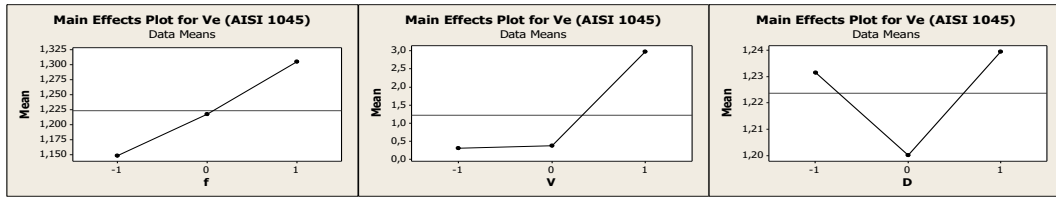


Fig. 7. Effets des paramètres de coupe (V , f , D) sur les vibrations (V_e) lors de l'usinage de l'acier AISI 1045.

3.2. Analyse de la corrélation entre rugosité et vibrations radiales

L'analyse de la corrélation entre la rugosité (R_a) et les vibrations radiales (V_e) des trois aciers étudiés, illustrée sur la figure 8, montre qu'il n'y a pas une tendance remarquable, ce qui montre que la corrélation entre elle est faible. Ceci est confirmé par le calcul des coefficients de corrélation présentés sur le tableau 10. Le coefficient de Pearson montre qu'il n'y a pas de corrélation linéaire pour l'AISI 1045, le (r) est équivalent à zéro, tandis que pour l'AISI 52100 et l'AISI 4140, l'intensité de liaison linéaire est faible. 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.

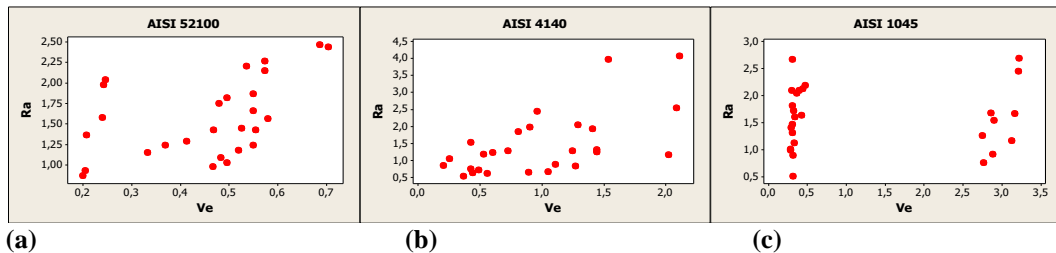


Fig. 8. Intensité de la relation entre la rugosité (R_a) et les vibrations radiales (V_e) : (a) pour acier AISI 521000 (b) pour acier AISI 4140 (c) pour acier AISI 1045.

Le coefficient de Spearman exprimant l'existence d'une corrélation non linéaire est aussi faible pour l'AISI 52100 et l'AISI 4140 et il est très faible pour l'AISI 1045. Cette faiblesse de trouver un lien entre la rugosité de surface et les vibrations de coupe est liée principalement aux vibrations du système usinant engendrées durant l'usinage à des vitesses de rotation élevées.

Tableau 10

Coefficients de corrélation entre la Rugosité de surface (R_a) et les Vibrations radiales (V_e) 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

3.3. Modèles de régression

Des modèles de régression multiple de second ordre ont été implémentés à un niveau de confiance de 95% pour une corrélation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques (rugosité de surface (R_a) et vibrations Radiales (V_e)). Les équations obtenues sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11

Equations de régression de la rugosité et des vibrations radiales

Acier	Rugosité de surface (R_a)	Vibration Radiale (V_e)
AISI 52100	$R_a = 0.147f^2 - 0.0994D^2 + 0.519f + 0.135D + 0.119D \cdot f + 1.54$ $S = 0,136298 ; R-Sq = 93,4\% ;$ $P-value = 0,000$	$V_e = 0.001f^2 + 0.0386D^2 - 0.0746V^2 + 0.577f + 0.0784D + 0.106V - 0.0767D \cdot V + 0.476$ $S = 0,0657789 ; R-Sq = 85,5\% ;$ $P-value = 0,000$
AISI 4140	$R_a = 0.092f^2 + 0.205D^2 - 0.134V^2 + 0.692f + 0.655D + 0.238V + 0.417D \cdot f + 1.35$ $S = 0,364484 ; R-Sq = 88,7\% ;$ $P-value = 0,000$	$V_e = 0.037f^2 + 0.125D^2 - 0.1V^2 + 0.276f + 0.0784D - 0.0471V \cdot f - 0.187D \cdot V + 0.812$ $S = 0,295694 ; R-Sq = 79,3\% ;$ $P-value = 0,000$
AISI 1045	$R_a = -0.001f^2 - 0.117D^2 + 0.544f + 0.322D + 1.67$ $S = 0,249994 ; R-Sq = 84,1\% ;$ $P-value = 0,000$	$V_e = 0.0091f^2 + 1.27V^2 + 0.0778f + 1.34V + 0.0931f \cdot V + 0.372$ $S = 0,0710394 ; R-Sq = 99,7\% ;$ $P-value = 0,000$

Les niveaux de R^2 sont acceptables, ce qui confirme que l'équation de 2^{ème} degré est souhaitée, où il définira les réponses avec une bonne rectitude. Le P-value de la régression témoigne que les modèles sont significatifs.

4. Conclusions

Les conclusions tirées de cette étude expérimentale, concernant le tournage de finition à sec des aciers durcis AISI 52100 (66HRC), AISI 4140 (61HRC) et AISI1045 (39HRC) par la céramique mixte CC650 sont les suivantes :

- A partir de l'analyse ANOVA, il a été observé que l'avance est le paramètre le plus significatif sur la rugosité de surface avec des contributions de 83,9% ; 38,7% et 61.5%, respectivement pour les aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045, suivi par la profondeur de passe avec des contributions de 6,6% ; 35,6% et 22,6%. L'interaction de ces deux paramètres est significative pour les aciers AISI 52100 et AISI 4140 avec des contributions de 3.5% et 9.8% respectivement. Pour la vibration radiale, La vitesse de coupe est le paramètre le plus significatif avec des

contributions de 41,3% ; 55,5% et 99,2%, respectivement pour les aciers AISI 52100, AISI 4140 et AISI 1045.

- Les hautes fréquences de rotation engendrent plus de vibrations sur le système usinant, ce qui influence les vibrations spécifiques de la coupe, ce qui influence 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 indispensable de réduire l'avance et la profondeur et optimiser la vitesse de coupe à un niveau où les vibrations du système tournant seront à leur niveau minimal.
- L'AISI 1045 (39HRC) montrant des niveaux de rugosité de surface plus bas en comparaison avec ceux des aciers AISI 52100 (66HRC) et AISI 4140 (61HRC).
- On déduit que la céramique mixte CC650 est plus recommandée pour l'usinage dur de l'AISI 1045 (39HRC) qui donnera des résultats avantageux en précision et qualité de surface.
- La régression multiple de la rugosité de surface et de la vibration de coupe radiale se caractérise par des niveaux de R^2 souhaitables.

REFERENCES

- [1]. *H. Schultz*, State of the art of high speed machining, First french and german Conference of high speed machining, 1997, pp. 1-7
- [2]. *G. Schneider Jr*, Cutting tool applications, Chapter 1, Prentice-Hall Publication, 2002, pp. 2-65
- [3]. *G. Poulachon, A. Moison*, Performance evaluation on hardened steel-PCBN tool pair in high speed turning, *Matériaux et Techniques* 1-2,2003, pp.23-24
- [4]. *Ali Riza M*, Tool life performance, wear mechanisms and surface roughness characteristics when turning austenised and quenched AISI 52100 bearing steel with ceramic and CBN/TiC cutting tools, *IJEMS*, **Vol. 18**,2011, pp. 137-146
- [5]. *M. Jacobson*, Surface integrity of hard-turned M50 steel , Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers ,PartB, Journal of Engineering Manufacture, **Vol. 216**, 2002, pp. 47-54
- [6]. *M.C. Shaw*, "Metal cutting principles", Oxford University Press, New York, 2005
- [7]. Mohamed Athmane Yallese, K Chaoui, N Zeghib & L Boulanouar , Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool , *Journal of Materials Processing Technology*, **Vol. 209**, 2009, pp.1092–1104
- [8]. *VN Gaitonde, SR Karnik, L Figueira, JP Davim*; Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, **Vol. 27**, 2009, pp. 754–763

- [9]. *R. Suresh, S. Basavarajappa, V.N. Gaitonde, G.L. Samuel*, Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **Vol. 33**, 2012, pp. 75–86
- [10]. *Khaidar Bouacha, Mohamed Athmane Yaltese, Tarek Mabrouki, Jean François Rigal*, Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool, *Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, **Vol. 28**, 2010, pp.349–361
- [11]. *R. Serra, W. Rmili, A. Ouahabi*, Suivi de l'usure des outils de coupe en tournage à sec de la fonte FT25 par analyse vibratoire, 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24-28 aout 2009.
- [12]. *B.Fnides, M.A.Yaltese, T. Mabrouki, J. F.Rigal*, Surface roughness model in turning hardened hot work steel using mixed ceramic tool, *ISSN Vol. 3(77)*, *mechanika*, 2009, pp.1392 – 1207
- [13]. *A.Attanasioa, D. Umbrello, C. Cappellinia, G. Rotellac, R. M'Saoubi*, Tool wear effects on white and dark layer formation in hard turning of AISI 52100 steel, *Wear Vol. 286– 287*, 2012, pp. 98– 107
- [14]. *R. Suresh, S. Basavarajappa, G.L. Samuel*, Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool, *Measurement*, **Vol.45**, 2012, pp. 1872–1884
- [15]. *Sudhansu Ranjan Das, Amaresh Kumar, and Debabrata Dhupal*, Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI 4340 Steel Using Coated Carbide Inserts , *International Journal of Innovation and Applied Studies* , ISSN 2028-9324, **Vol. 2** No. 4,2013, pp. 445-453
- [16]. *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*, ISSN 0974-2239 **Vol. 3**, Number 9, 2013, pp. 871-880
- [17]. *Sudhansu Ranjan Das, Debabrata Dhupal, Amaresh Kumar*, Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool, *Measurement*, **Vol.62**, 2015, pp.108–126
- [18]. *M. Ibrahim. Sadik*, Wear development and cutting forces on CBN cutting tool in Hard Part turning of different hardened steels, *Procedia CIRP 1*, 2012, pp.232 – 237
- [19]. *Kumar, A.S., Durai, A.R., Sornakumar, T.*, Wear behavior of alumina based ceramic cutting tools on machining stainless steel and EN24 steel. *Tribol. Int.* 39, 2006, 191–197
- [20]. *Satish Chinchanihar, S.K. Choudhury*, Investigations on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **Vol. 38**, 2013, pp. 124–133
- [21]. *Zahia Hessainia, Ahmed Belbah, Mohamed Athmane Yaltese, Tarek Mabrouki, Jean-François Rigal*, On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations , *Measurement*, Vol. 46, 2013, pp.1671–1681
- [22]. *S.B. Hosseinia, T. Benob, U. Klementa, J. Kaminskia, K. Rytberg*, Cutting temperatures during hard turning - Measurements and effectson white layer formation in AISI 52100, *Journal of Materials Processing Technology*, **Vol. 214**, 2014, pp. 1293–1300
- [23]. *P.S. Bapat, P.D. Dhikale, S.M. Shinde, A.P. Kulkarni, S.S. Chinchanihar*, A Numerical Model to Obtain Temperature Distribution during Hard Turning of AISI 52100 Steel, *Materials Today: Proceedings*, **Vol. 2**, 2015, pp. 1907 – 1914
- [24]. *Dong Young Jang, Young-Gu Choi, Hong-Gil Kim and Alex Hsiac*, 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.* **Vol. 36**, No. 4, 1996, pp. 453-464 .