

IMPACT DU REVÊTEMENT ET DES CONDITIONS DE COUPE SUR LE COMPORTEMENT A L'USURE DES OUTILS ET SUR LA RUGOSITÉ DE LA SURFACE USINÉE

O. KEBLOUTI^{1,2}, L. BOULANOUAR¹, R. BOUZIANE¹ M. W. AZIZI¹

L'objectif de cet article est d'étudier expérimentalement l'effet du revêtement des outils de coupe et celui des paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) sur le comportement à l'usure des plaquettes de coupe à double et à triple revêtements ainsi que sur la qualité de surface de l'acier AISI 1030 en tournage à sec. Les matrices des deux types de plaquettes testées sont en carbure métallique. Le premier type se caractérise par un revêtement PVD à deux couches (TiAlN/TiN) et le second par un revêtement CVD à trois couches (Ti(C, N)+Al₂O₃+TiN). Les résultats montrent que les plaquettes à triple revêtements (Ti(C.N) + Al₂O₃ + TiN) ont exprimé une supériorité remarquable en termes de durée de vie par rapport aux plaquettes à double revêtements (plus de 5 fois). L'usure en dépouille est prépondérante. L'influence de l'avance sur la durée de vie est relativement plus faible par rapport à celle occasionnée par la vitesse de coupe et le revêtement. Les meilleures conditions de frottement aux interfaces "Outil-Copeau-Pièce", occasionnées par les revêtements, ont conduit à l'amélioration de la qualité de la surface usinée.

Mots clés: Usinage, Revêtement, Rugosité, Usure, Durée de vie, ANOVA.

1. Introduction

Actuellement, les revêtements occupent des domaines très importants dans l'industrie automobile, aéronautique ainsi qu'en usinage. Dans ce dernier domaine, ils sont notamment utilisés pour améliorer la qualité des produits fabriqués et accroître la productivité. Les techniques de revêtement consistent à déposer sur le substrat de la partie active de l'outil de coupe des couches minces (mono ou multicouches) ayant des épaisseurs allant jusqu'à 15 µm. Ceci dans le but d'améliorer d'une part le comportement à l'usure (par adhésion, abrasion, oxydation ou diffusion) des outils et d'autre part le revêtement joue le rôle d'une barrière thermique et chimique pour protéger le substrat constituant la partie active de l'outil, notamment lors de l'usinage aux températures de coupe élevées. Il contribue également à la diminution du coefficient de frottement aux interfaces de la triade "Outil-Pièce-Copeau".

¹ Advanced Technologies in Mechanical Production Research Laboratory (LRTAPM), Badji Mokhtar Annaba University BP12, Annaba, 23000, Algeria. Email : kebloutiusthb@gmail.com.

² Département de Construction Mécanique et Productique, FGM&GP, USTHB, BP 32 El-Alia, Bab-Ezzouar, 16111, Alger, Algérie.

Actuellement, les revêtements les plus utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane, les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al_2O_3). Ils peuvent être monocouche (TiCN) ou multicouches (TiCN- Al_2O_3 - TiN). La nature du dépôt choisi dépend du but recherché: résistance à l'usure et à l'oxydation, tenue à la température ou réduction du frottement [1]. Selon Grzesik [2], les revêtements peuvent être classés en quatre groupes : les revêtements à base de titane (TiC, TiN, TiB_2 , TiCN), les revêtements céramiques, les revêtements de diamant (PCBN) et les revêtements autolubrifiants avec MoS_2 ou WC. En usinage, diverses études ont montré le rôle bénéfique du revêtement des outils de coupe [3-6]. D'autres travaux de recherche ont étudié le lien qui existe entre la température à l'interface "Outil-Copeau" et la conductivité thermique des revêtements [7, 8]. Les investigations menées par Grzesik [9] ont permis de mettre en évidence le rôle crucial des différents types de revêtements (mono et multicouches) lors de l'usinage à sec de deux nuances d'acières: l'acier AISI 1045 à base de carbone et l'acier inoxydable AISI 304. Les types de revêtement utilisés sont: Monocouche (TiC), Bicouches (TiC/TiN) et Tri-couches (TiC/ Al_2O_3 /TiN). Ces études ont montré que la présence de la couche d' Al_2O_3 joue un rôle de barrière d'isolation. Par conséquent, la quantité de chaleur produite à l'interface "Outil-copeau" sera évacuée aisément à travers le copeau, ce qui conduit à son adoucissement. Il a été constaté également qu'aux avances élevées lors de l'usinage de l'acier AISI 304 avec un outil à triple revêtement (TiC/ Al_2O_3 /TiN), la présence de la couche d' Al_2O_3 a entraîné une baisse de la pression spécifique. Les résultats expérimentaux comparatifs des valeurs des coefficients de frottement montrent que celles des couples "TiC/ Al_2O_3 /TiN – AISI 1045" et "TiC/ Al_2O_3 /TiN – AISI 304" sont généralement inférieures à celles des autres couples (Outils-Matière) testés. Le phénomène tribologique à l'interface "Outil-Pièce" a été également étudié lors d'une opération de tournage dur de l'acier AISI 1045 par Zhang et al. [10]. Ils ont développé deux nouveaux types d'outils en carbure métallique revêtus. Le premier type consiste à réaliser des textures à l'échelle nanométrique avec rayon laser sur la face de coupe du substrat WC/Co. Ensuite, ils ont déposé une couche de revêtement de Ti55Al45N par la technique d'évaporation par arc cathodique. Pour le second type, ils ont inversé les séquences. Suite à la réalisation des essais avec ces deux types d'outils développés, ils ont constaté une diminution significative des efforts et de la température de coupe ainsi que le coefficient de frottement à l'interface (outil / copeaux). Ils ont expliqué ceci par la diminution du frottement à l'interface (outil / copeaux), grâce aux nano-textures réalisées sur la face de coupe.

D'un point de vue thermique, les travaux de Rech et al. [6] illustrent les effets de certaines couches de revêtement en usinage. Leurs résultats montrent que l'utilisation des revêtements permet de faire baisser la quantité de chaleur dissipée dans les outils revêtus. En effet, un outil sans revêtement présente le flux de

chaleur le plus élevé par rapport à tous les autres cas de figures. L'écart atteint environ 15 W entre les configurations sans revêtement d'une part et celles avec revêtement "TiN" et "(Ti,Al)N+MoS2" d'autre part. La couche de revêtement MoS2 est utilisée pour améliorer les conditions de frottement, ce qui conduit à une réduction notable du flux de chaleur pénétrant dans l'outil. Aussi, d'un point de vue qualité de surfaces des pièces usinées, plusieurs études ont montré l'impact du revêtement des outils de coupe sur la rugosité lors de l'usinage. Dans une étude comparative entre deux types de revêtements (TiAlN et TiCN/Al₂O₃/TiN, déposés respectivement par les procédés PVD et CVD sur un substrat en carbure métallique), il a été observé que les faibles valeurs de la rugosité ont été obtenues avec le revêtement TiAlN [11].

Dans le même contexte scientifique, nous exposons ce présent travail à caractère expérimental. Les essais ont été réalisés conformément à la méthode de planification des expériences (table standard de Taguchi L16). L'objectif visé est d'investiguer l'effet du revêtement sur le comportement à l'usure des outils en carbure métallique et sur la qualité des surfaces usinées. Les résultats obtenus sont analysés statistiquement par la méthode d'analyse de la variance (ANOVA), tout en observant un intervalle de confiance de 95%.

2. Procédure expérimentale

Le présent travail à caractère expérimental est focalisé sur l'étude de l'effet du revêtement des outils coupants et celui des paramètres du régime de coupe (Vitesse, avance et profondeur de coupe) sur le comportement à l'usure des outils et sur la rugosité de la surface usinée, lors du tournage à sec de l'acier AISI 1030. Un plan expérimental du type Taguchi L16 a été adopté. Il se compose de quatre facteurs variables à deux niveaux chacun (niveau haut et niveau bas). Ces facteurs sont: la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f), la profondeur de coupe (ap) et le type du revêtement (R). Le premier type de revêtement est (TiAlN/TiN) et le second est (Ti(C, N)+Al₂O₃+TiN). Tous les deux sont déposés respectivement par PVD et CVD sur un substrat en carbure métallique (Tableau 1).

Table 1

Facteurs du plan d'expérience Taguchi L16

Facteurs étudiés	Symbol	Type	Niveaux des facteurs	
Vitesse de coupe (m/min)	Vc	Numérique	120	250
Avance (mm/tr)	f	Numérique	0.08	0.24
Profondeur de coupe (mm)	ap	Numérique	0.25	1
Type de revêtement	R	Catégorique	Revêtement bicouches TiAlN/TiN	Revêtement tri-couches Ti(C, N)+Al ₂ O ₃ +TiN

2.1. Equipement expérimental

Les essais ont été réalisés sur un tour parallèle SN40C d'une puissance de 6.6 kW sur la broche, ayant une gamme de vitesse de 22.4 à 2000 tr/mn et d'avance de 0.08 à 6.4 mm/tr. Le porte-outil est du type CSBNR 25-25 M12, dont les paramètres géométriques de la partie active sont : $\chi = 75^\circ$, $\lambda = -6^\circ$, $\alpha = +6^\circ$ et $\gamma = -6^\circ$. Pour la mesure du critère de la rugosité (R_a) nous avons utilisé un Rugosimètre portable de marque MITUTOYO /S J. 201M (Fig. 1), avec affichage digital. Ce dernier est constitué d'un palpeur qui se déplace linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de 4mm avec une longueur de base de $(0.8*5)$. Le contrôle de l'usure a été effectué avec un microscope optique, doté de deux chariots à mouvements croisés se déplaçant avec une précision de $5\mu\text{m}$. Pour l'analyse micrographique et la mesure de la surface d'usure en cratère on a utilisé un microscope optique équipé d'une caméra. L'acquisition des données sur PC se fait à l'aide d'un logiciel Motic Images 2000 (Fig. 2). Ce dernier sert à mesurer les grandeurs de l'usure sur la surface en dépouille principale et celle en dépouille auxiliaire, ainsi que sur le cratère sur la surface d'attaque. Les agrandissements possibles sont: Gx4, Gx10, Gx40 et Gx100. Dans ce travail, l'acier AISI 1030 a été utilisé comme éprouvettes pour la réalisation des expériences. Ce matériau est livré sous forme de barre cylindrique de diamètre $\phi = 60\text{mm}$ et de 6m de longueur. Cet acier se caractérise par une large utilisation dans l'industrie mécanique. Sa composition chimique est illustrée dans le tableau 2.



Fig. 1. Rugosimètre Mitutoyo SJ. 201 M



Fig. 2. Microscope optique
Tableau 2

Composition chimique de l'acier AISI 1030

Désignation matériau	Composition chimique (% en masse)							
AISI 1030	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
	0.32	0.32	0.37	0.019	0.015	0.3	0.166	1.62

3. Résultats et discussions

Les résultats expérimentaux de l'étude de l'effet du revêtement sur leur comportement à l'usure des outils de coupe et sur la rugosité de la surface usinée en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p) sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3

Résultats expérimentaux

N°	Revêtement (R)	Vitesse de coupe V_c (m/mn)	L'avance f (mm/tr)	Profondeur de passe a_p (mm)	Rugosité R_a (μm)	Tenue T (min)
1	R2	120	0,08	0,25	2,15	141,15
2	R1	250	0,08	0,25	0,65	12,51
3	R2	250	0,08	1	2,17	35,43
4	R2	250	0,08	0,25	0,69	49,15
5	R1	250	0,08	1	1,54	7,5
6	R1	120	0,24	1	2,59	6,51
7	R2	120	0,24	0,25	2,82	69
8	R2	120	0,08	1	2,06	60,42
9	R1	250	0,24	1	2,55	5,32
10	R1	250	0,24	0,25	2,69	10,23
11	R1	120	0,08	0,25	1,47	60,11
12	R2	250	0,24	1	3,9	22,45
13	R2	250	0,24	0,25	3,97	39,4
14	R1	120	0,08	1	2,14	29,35
15	R2	120	0,24	1	3,36	27
16	R1	120	0,24	0,25	2,95	27,14

2.1. Analyse des résultats de l'usure

Les données collectées lors du suivi de l'usure en dépouille, des deux matériaux à outil testé, pour les différentes combinaisons du plan des expériences sont représentées graphiquement sur les figures 3 et 4. L'analyse de ces résultats montre que l'usure en dépouille évolue en fonction du temps selon trois périodes distinctes : d'abord, les courbes commencent par une période d'usure initiale (rodage), appelée également « usure de jeunesse ». Elle est caractérisée par une usure relativement plus intense, justifiée par l'élimination et la cassure des aspérités pendant les premières secondes de travail. Ensuite, apparaît la période de l'usure normale ou de maturation. Avec l'augmentation du temps, cette dernière se distingue par une évolution approximativement linéaire. Au terme de cette période, une autre usure prend naissance. Celle-ci s'appelle généralement usure accélérée, catastrophique ou de vieillesse. Elle se caractérise par une évolution relativement plus intense, qui conduit en fin de compte à la détérioration totale de l'arête tranchante.

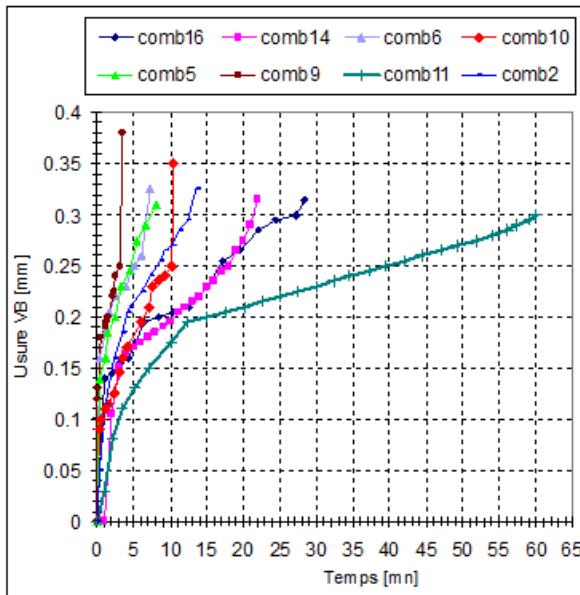


Fig. 3. Evolution de l'usure de l'outil à deux couches de revêtement (TiAlN/TiN)

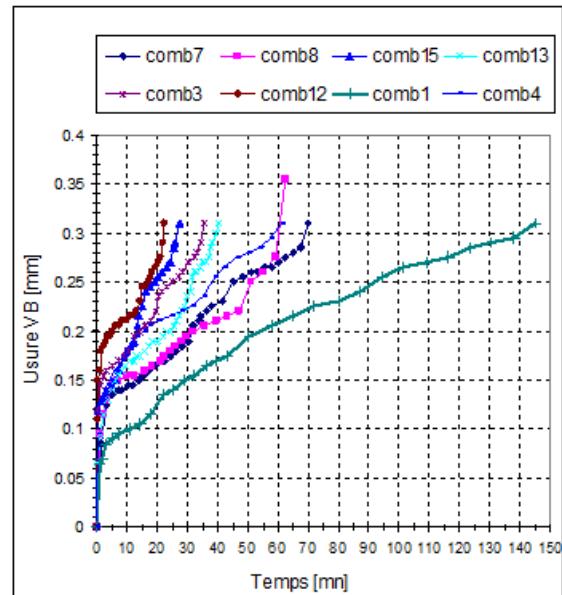


Fig. 4. Evolution de l'usure de l'outil à trois couches de revêtement (Ti(C, N)/Al₂O₃ /TiN)

Les plaquettes à triples revêtements [Ti (CN) + Al₂O₃ + TiN] ont montré une grande résistance à l'usure grâce à la présence de la couche de revêtement (Al₂O₃), qui a constitué une barrière à la diffusion de la chaleur vers le substrat. Les plaquettes à revêtement bicouches [Ti (AlN) + TiN] ont montré à leur tour une résistance à l'usure relativement plus faible que celle du revêtement précédent, ceci grâce notamment à la présence de la couche de revêtement [Ti(AlN)]. L'analyse des faciès d'usure sur le cratère des plaquettes testées, montre qu'il y a des différences de comportement considérables. Ces différences se manifestent dès la première passe. En effet, la figure 5 illustre une usure en cratère très importante qui montre clairement la formation d'une cuvette profonde montrant le substrat. En revanche la figure 6, illustre la morphologie de l'usure en cratère des plaquettes à triples revêtements [Ti (CN) + Al₂O₃ + TiN]. Dans ce cas la dégradation de la surface d'attaque est relativement plus faible par rapport à celle de l'outil à revêtement bicouches. Ceci est probablement dû à l'effet de la couche de revêtement Al₂O₃ qui a joué le rôle d'une barrière de diffusion de la chaleur vers le substrat.

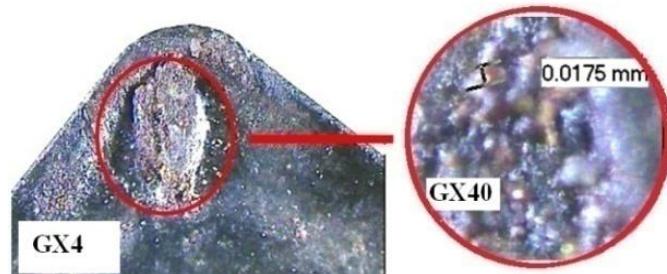


Fig. 5. Morphologie de l'usure en cratère de l'outil à revêtement bicouches (TiAlN/TiN)

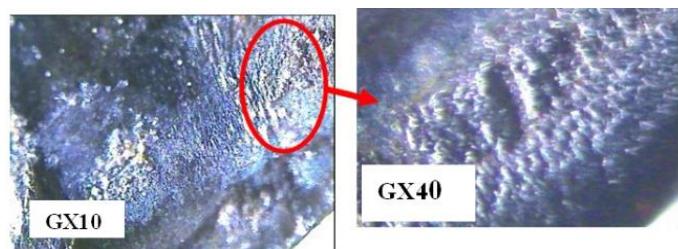


Fig. 6. Morphologie de l'usure en cratère de l'outil à triple revêtements [Ti (CN) + Al₂O₃ + TiN]

Les microographies des figures 7 et 8, illustrent la morphologie de l'usure en fin d'usinage des différents matériaux à outils testés. L'analyse approfondie montre que les surfaces de dépouille se caractérisent par des bandes d'usure striées, témoignant la présence de l'usure par abrasion. L'intersection des surfaces de dépouille et d'attaque est le siège d'une usure au niveau du bec de l'outil. Cette dernière se caractérise par une poche striée ayant la forme d'un cratère au niveau du bec, ce qui conduit à l'effondrement de l'arête tranchante principale et auxiliaire. Concernant les plaquettes à triples revêtements (Ti (CN) + Al₂O₃ + TiN), lors de la réalisation de la combinaison du plan d'expériences ($V_c = 120\text{m/mn}$, $f = 0.24\text{mm/tr}$ et $a_p = 0.25\text{mm}$), l'usure s'est manifestée initialement sous forme d'une bande striée régulière et brillante, suivie par la formation d'une entaille (Fig. 7). Il est à noter également que l'usure en dépouille et celle en cratère se développe à une vitesse très lente. Par contre avec la combinaison ($V_c = 250\text{m/mn}$, $f = 0.24\text{mm/tr}$ et $a_p = 1\text{mm}$) qui est la plus contraignante, la dégradation de la partie active suivant ses deux surfaces de dépouille et d'attaque devient intense ce qui se traduit en pratique par des tenues très réduites, pouvant ainsi se répercuter négativement sur l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce usinée. La figure 8 illustre la morphologie de l'usure en fin de l'usinage des plaquettes à doubles revêtements (Ti(AlN)+ TiN) à différentes combinaisons du plan des expériences. À la combinaison la moins contraignante ($V_c = 120\text{m/mn}$, $f = 0.24\text{mm/tr}$ et $a_p = 0.25\text{mm}$) l'usure se présente sous forme d'une bande striée régulière et brillante, suivie par la formation d'une entaille (Fig. 8). Les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus par les auteurs (Khalil et al., 2007).

=0.08mm/tr et ap=0.25mm), la plaquette à double revêtement a montré une faible résistance à l'usure en dépouille et en cratère par rapport à celle de la plaquette à triples revêtements (Ti (CN) + Al₂O₃ + TiN). Par contre la combinaison la plus contraignante (Vc=250m/mn, f=0.24mm/tr et ap=1mm), l'usure s'accentue sur les deux surfaces de dépouilles principale et axillaire, et l'usure en cratère devient assez profonde. Par conséquent la qualité des surfaces usinées et la précision dimensionnelle se dégradent.

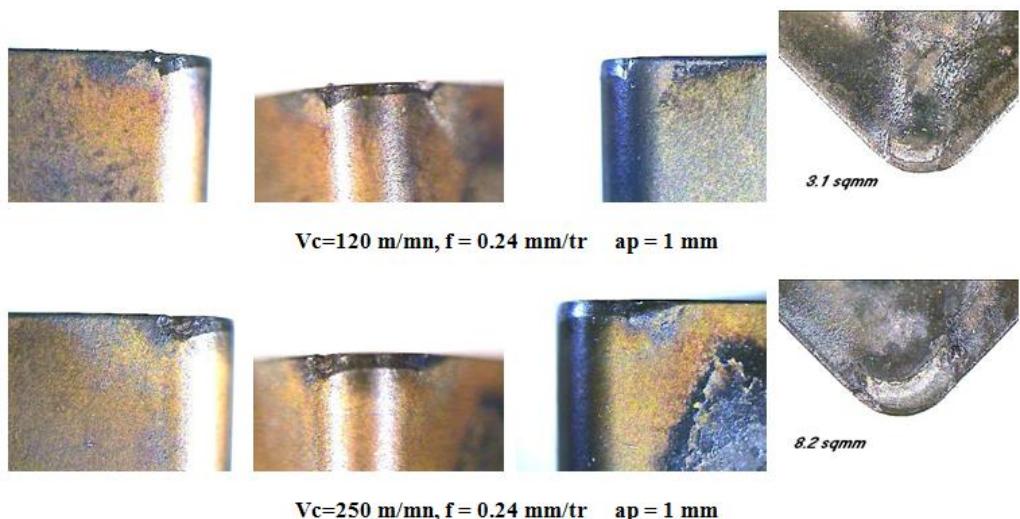


Fig. 7. Morphologie de l'usure en dépouille et en cratère de l'outil à triple revêtements [Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN]

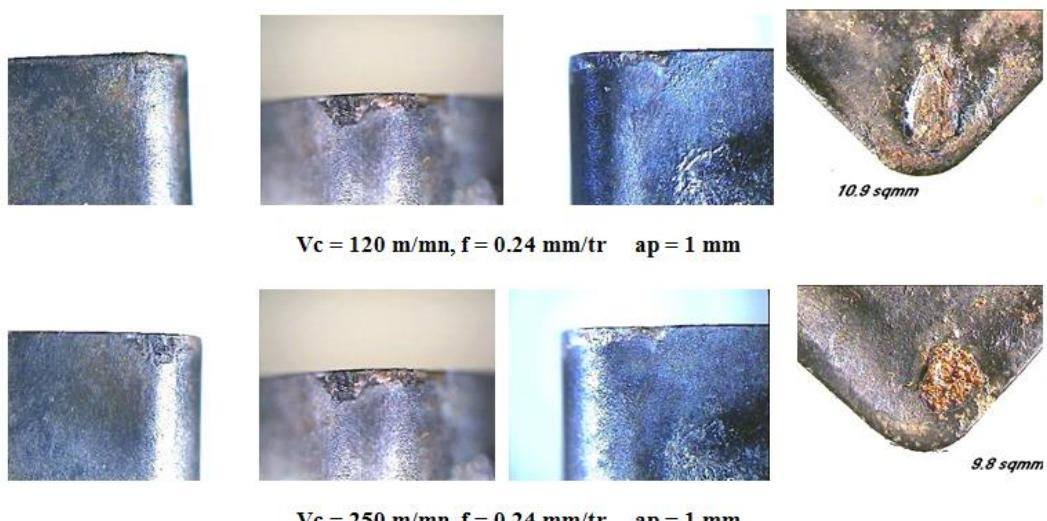


Fig. 8. Morphologie de l'usure en dépouille et en cratère de l'outil à revêtement double [TiAlN + TiN]

3.2 Résultats de l'ANOVA de la tenue

Les résultats de l'ANOVA pour la tenue sont présentés dans le tableau 4. L'analyse des résultats de l'ANOVA fait ressortir que l'effet du revêtement est le plus important avec un PC de 20.13%. En effet, le revêtement tri-couches a présenté une grande résistance à l'usure grâce à la présence de la couche de revêtement (Al_2O_3), qui a constitué une barrière à la diffusion de la chaleur vers le substrat. Le facteur suivant du point de vue d'importance est la vitesse d'avance avec un PC de 16.29%. En effet, avec l'accroissement de l'avance la tenue de l'outil à l'usure diminue. Ceci s'explique par l'augmentation de la section du copeau causée par l'accroissement de l'avance. L'effet de la vitesse de coupe a été avec un PC de 12.56%. Ceci est ainsi car avec l'augmentation de la vitesse de coupe la température dans la zone de coupe augmente ce qui conduit à la diminution de la dureté et par conséquent la résistance à l'usure de l'outil chute. Enfin, l'effet de la profondeur de coupe et l'effet mutuel entre les facteurs ont été très faibles avec un pourcentage de contribution inférieur à 2%. La valeur du coefficient de corrélation multiple est $R^2 = 0.9722$.

Tableau 4

Analyse de la variance pour la tenue (T)

Source	Df	Somme des carrés	Moyen des carrés	F-value	P-value	Pc(%)
MODEL	10	17195.37	1719.54	17.39	0.0028	28.76
A-R	1	5088.33	5088.33	51.45	0.0008	20.13
b-Vc	1	3560.81	3560.81	36.00	0.0018	12.56
C-f	1	2222.42	2222.42	22.47	0.0051	16.29
D-ap	1	2881.27	2881.27	29.13	0.0029	1.43
AB	1	252.73	252.73	2.56	0.1708	1.64
AC	1	289.26	289.26	2.92	0.1479	3.00
AD	1	530.04	530.04	5.36	0.0685	6.36
BC	1	1125.43	1125.43	11.38	0.0198	6.30
BD	1	1114.39	1114.39	11.27	0.0202	0.74
CD	1	130.70	130.70	1.32	0.3023	0.35
Erreurs	5	494.50	98.90	-	-	0.90
TOTAL	15	17689.87	-	-	-	-

3.3 Résultats de l'ANOVA pour la rugosité Ra

Les résultats de l'ANOVA de la rugosité Ra sont présentés dans le tableau 5. Cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification $\alpha = 0,05$ et un intervalle de confiance de 95%. L'analyse des résultats de l'ANOVA de la rugosité fait ressortir qu'en se référant sur la valeur du pourcentage de contribution 63.31%, la vitesse de coupe s'est montrée comme facteur significatif sur le critère de la rugosité (R_a). Les facteurs suivant du point de vue importance sont le type de revêtement avec un pourcentage de contribution de 9.03%, l'effet mutuel de

l'interaction de la vitesse de coupe et de l'avance ($Vc*f = 7.68\%$), ensuite l'effet mutuel de l'interaction du couple formé par l'avance et la profondeur de passe ($f*ap = 3.93\%$) et enfin l'effet de la profondeur de passe sur le critère R_a , est le plus faible ($ap = 3.77\%$). La valeur du coefficient de détermination est de $R^2 = 0.9346$.

Tableau 5

Analyse de la variance pour le critère de la rugosité (Ra)

Source	Df	Somme des carrés	Moyen des carrés	F value	P-value	Pc(%)
MODEL	10	13.19	1.32	7.15	0.0212	9.13
<i>A-R</i>	1	1.29	1.29	6.98	0.0458	0.84
<i>B-Vc</i>	1	0.12	0.12	0.65	0.4583	63.32
<i>C-f</i>	1	8.94	8.94	48.45	0.0009	3.77
<i>D-ap</i>	1	0.53	0.53	2.89	0.1500	9.03
<i>AB</i>	1	0.27	0.27	1.44	0.2843	7.68
<i>AC</i>	1	0.25	0.25	1.35	0.2969	0.88
<i>AD</i>	1	0.040	0.040	0.22	0.6611	1.87
<i>BC</i>	1	1.08	1.08	5.86	0.0600	3.93
<i>BD</i>	1	0.12	0.12	0.66	0.4522	1.8
<i>CD</i>	1	0.56	0.56	3.01	0.1434	0.28
ERREURS	5	0.92	0.18	-	-	-
TOTAL	15	14.12	-	-	-	-

3.4 Surface de réponse 3D

Les figures 9 et 10, montrent la variation de la rugosité de la surface usinée (R_a) sous l'effet de l'avance et de la vitesse de coupe. En effet, la figure 9 montre que la vitesse de coupe à une influence plus significative sur la rugosité de la surface usinée. On remarque aussi que la rugosité (R_a) diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c). La valeur minimale de la rugosité de surface (R_a) est observée avec la plus basse avance (0.08 mm/tr) et la plus grande vitesse de coupe (250 m/min). La figure 10 illustre également l'effet de l'avance et celui de la vitesse de coupe sur la tenue. Les figures 11 et 12 montrent le diagramme des probabilités normales en fonction des résultats expérimentaux. Cette analyse graphique est utilisée pour mettre en évidence si les données traitées s'ajustent avec la loi de distribution ou non. L'analyse de ces graphes permet de constater que les données suivent grossièrement une ligne droite.

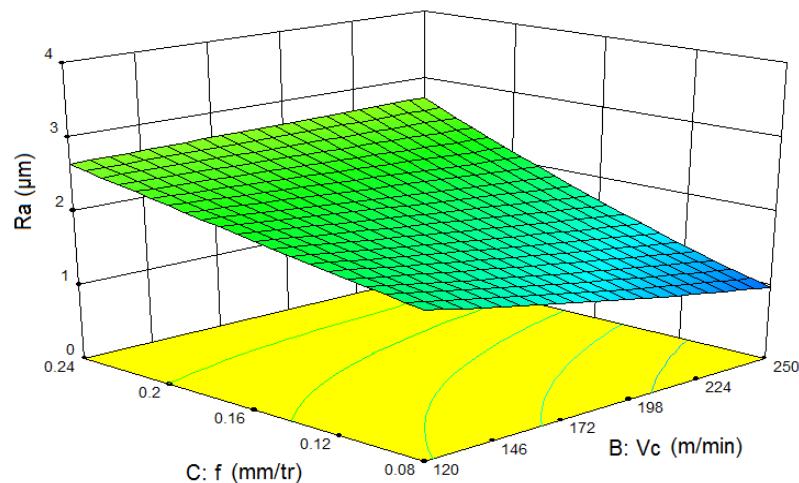


Fig. 9. Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la qualité de la surface usinée (R_a).

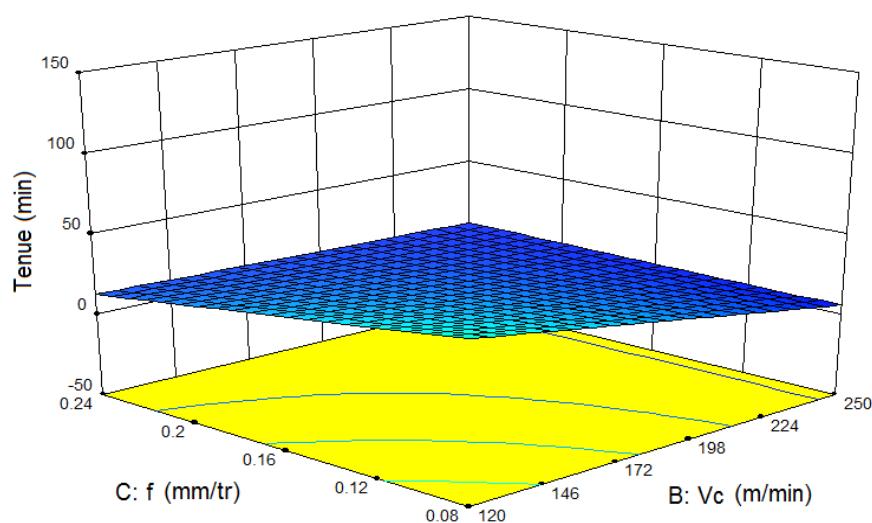


Fig. 10. Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la tenue à l'usure de l'outil de coupe.

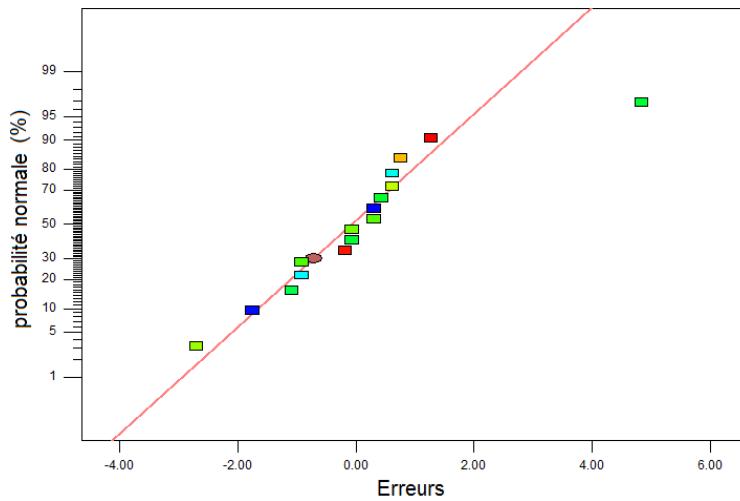


Fig. 11. Diagramme de probabilités normales résiduelles pour la rugosité Ra.

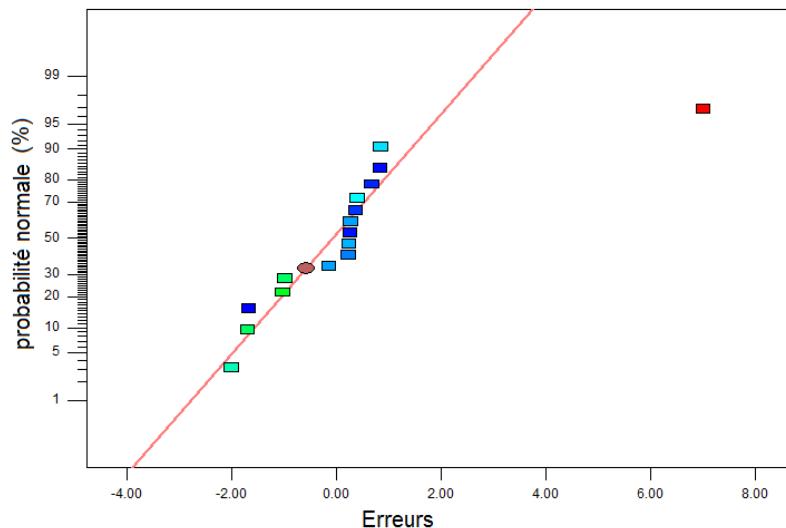


Fig. 12. Diagramme de probabilités normales résiduelles pour la tenue T.

4. Conclusions

Le travail présenté vise à étudier l'effet des revêtements à base de titane et céramique des outils de coupe et des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sur le comportement à l'usure de deux outils avec des revêtements différents et sur la qualité des surfaces usinées. Les principales conclusions tirées de cette étude sont:

Dans la zone de contact "Outil-Pièce-Copeau" le processus de détérioration de l'arête tranchante a été extrêmement rapide et ceci a été remarqué dès la première passe. Les couches de revêtement externes de TiN ayant des épaisseurs faibles (quelques micromètres) sont éliminées dès les premières secondes d'usinage. Des résultats remarquables sont signalés lors de l'usinage avec les plaquettes à triple revêtements [Ti(C, N) +Al₂O₃+TiN]. En effet, ces dernières offrent des caractéristiques particulièrement intéressantes en apportant une augmentation de la durée de vie plus de 5 fois supérieures à celles des outils à revêtement bicouches. Les modes d'usures observés sont ceux d'abrasion et de diffusion. L'usure en cratère progresse très lentement par rapport à celle en dépouille. L'analyse des courbes du suivi de l'usure en fonction du temps montre que l'allure de cette dernière obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique. L'influence de l'avance sur la tenue est minime par rapport à celles de la vitesse de coupe et du revêtement.

Les résultats obtenus de la rugosité montrent que la vitesse de coupe et l'avance ont des influences antagonistes sur la qualité de l'état de surface. En effet, l'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de surface alors que l'accroissement de l'avance le dégrade. Cependant les rugosités obtenues aux vitesses élevées sont nettement plus faibles que celles occasionnées par la variation de l'avance.

Les meilleures conditions de frottement aux interfaces "Outil-Copeau - Pièce", occasionnées par les revêtements, ont conduit à l'amélioration de la qualité de la surface usinée.

La méthode d'analyse des résultats expérimentaux (ANOVA) et la méthode de traitement (Surfaces de Réponse) ont montré une très bonne efficacité grâce à leurs indicateurs d'adéquation à savoir les coefficients de détermination et le niveau de signification.

R E F E R E N C E S

- [1]. *W. Kalss, A. Reiter, V. Derflinger, C. Gey, & J. Endrino*, "Modern coatings in high performance cutting applications", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 24 (2006) 399-404.
- [2]. *W. Grzesik*, "Friction behaviour of heat isolating coatings in machining: mechanical thermal and energy-based considerations" International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43 (2003) 145-150.
- [3]. *A. Kusiak, J. L. Battaglia, & J. Rech*, "Tool coatings influence on the heat transfer in the tool during machining" Surface and Coatings Technology, 195 (2005) 29-40.
- [4]. *T. MacGinley, & J. Monaghan*, "Modelling the orthogonal machining process using coated cemented carbide cutting tools" Journal of materials processing technology, 118 (2001) 293-300.
- [5]. *M. Nouari & A. Ginting*, "Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy", Surface and Coatings Technology, 200 (2006) 5663-5676.

- [6]. *J. Rech, A. Kusiak & J. Battaglia*, "Tribological and thermal functions of cutting tool coatings", Surface and Coatings Technology, **186** (2004) 364-371.
- [7]. *W. Grzesik*, "The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts", Journal of materials processing technology, **79** (1998) 133-143.
- [8]. *I. Jawahir, & C. Van Luttervelt*, "Recent developments in chip control research and applications", CIRP Annals-Manufacturing Technology, **42** (1993) 659-693.
- [9]. *W. Grzesik*, "An integrated approach to evaluating the tribo-contact for coated cutting inserts", Wear, **240** (2000) 9-18.
- [10]. *K. Zhang, J. Deng, R. Meng, P. Gao & H. Yue*, "Effect of nano-scale textures on cutting performance of WC/Co-based Ti 55 Al 45 N coated tools in dry cutting", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, **51** (2015) 35-49.
- [11]. *M. C. Cakir, C. Ensarioglu, & I. Demirayak*, " Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material, Journal of materials processing technology, **209** (2009) 102-109.