

Perçage à sec des alliages d'aluminium recyclés : influence des paramètres de coupe et de la dureté sur l'usinabilité

Jean Brice MANDATSY MOUNGOMO et Donatien NGANGA KOUYA *

*Laboratoire de Recherche en Technologie des Systèmes (LARTESY), Département Génie Mécanique,
ENSET Libreville, BP 3989 Libreville, Gabon*

* Correspondance, courriel : ngad1109@yahoo.com

Résumé

Actuellement, l'usinage des alliages d'aluminium recyclé est en train de se développer. Il est donc temps, de disposer des ressources nécessaires à la maîtrise de l'usinabilité de ces alliages. Lors de l'usinage de tout alliage, la connaissance de certaines caractéristiques, pour garantir la qualité pièces mécaniques est très importante. Pour continuer les recherches sur l'usinage de ces alliages, nous avons axé cette étude, sur l'influence de l'avance, la vitesse de coupe et de la dureté sur la rugosité de surface, la force de coupe, la concentration massique des particules métalliques et la morphologie des copeaux. Trois alliages d'aluminium recyclé par fonderie, ont été étudiés lors de leur perçage à sec. Dans cet article, sont présentés les résultats de cette étude, qui montrent l'influence de l'avance, de la vitesse de coupe et de la dureté sur les caractéristiques de l'usinabilité. Ils montrent aussi l'existence des relations entre la concentration massique des particules métalliques et la morphologie des copeaux. Des modèles ont été aussi établis, pour l'évaluation l'usinabilité.

Mots-clés : *usinabilité, perçage à sec, rugosité de surface, force de coupe, particules métalliques, morphologie des copeaux.*

Abstract

Drilling aluminum alloys dry recycling : influence of the parameters of cutting and hardness on machinability

The recycling of aluminium alloys is growing, and is becoming year effective, environmentally friendly and low-cost way to produce aluminum parts. Recycled aluminium parts are proposed for engineering applications, some of which require machining, and as a result, understanding the machinability of these alloys is a must. This research work focuses on the drilling behaviour of recycled cans and machining chips obtained using the remelting process. The influence of cutting parameters and workpiece condition we're leaving quality, cutting forces, chip morphology and metallic particle emission is investigated. It is found that the effect of the feed rate we cutting forces and surface finish surpasses that of the workpiece origin and condition (T0, T6), as well as that of the cutting speed. Correlations between metallic particle emission, workpiece hardness and chip morphology are established.

Keywords : *machinability, drilling dry, surface finish, cutting force, metallic particle emission, chip formation.*

1. Introduction

Le recyclage des alliages d'aluminium a connu une croissance de l'intérêt et des applications au cours de ces quarante dernières années et est devenu un moyen efficace, écologique et de faible coût pour produire des pièces en aluminium. Parmi de nombreux produits en aluminium recyclé, il y a des canettes de boisson et des copeaux d'usinage. Tout ce qui est produit sur la base des canettes de boisson et des copeaux d'usinage recyclés, n'est pas encore très exploité, pour la production des pièces mécaniques par usinage. Si cela est fait, ces pièces peuvent être employées dans le secteur industriel, notamment celui du transport. Pour montrer que ces pièces en aluminium recyclé par fonderie peuvent avoir aussi une bonne usinabilité, comme celles en aluminium vierge, l'étude a été menée sur le perçage à sec. La rugosité de surface (R_a) est très utilisée dans le domaine de la mécanique, pour la définition de la qualité des pièces. Le modèle de [1], qui tient compte de deux paramètres (l'avance et le rayon de l'outil) a été très utilisé pour l'évaluation de la rugosité de surface. D'autres paramètres, dans d'autres études ont été pris en compte, comme celles de [2, 3]. [4], ont aussi considéré la microstructure, lors du perçage des alliages d'aluminium A 319 et A 356 à T0 et T6. Dans le but, d'étudier l'état de surface des pièces en aluminium, [5], ont considéré les effets de l'angle de coupe lors de l'usinage de l'alliage d'aluminium 6061. Tout usinage génère toujours les forces de coupe, qui sont le résultat des efforts de cisaillement et de frottement exercés par l'outil sur la pièce.

Les forces de coupe interviennent dans la précision d'usinage, dans la formation de l'état de surface, dans le processus de la formation du copeau. Plusieurs paramètres influencent les forces de coupe pendant l'usinage parmi lesquelles: l'avance par tour, la profondeur de coupe, la géométrie et l'enduit de l'outil. De nombreuses techniques expérimentales ont été exploitées pour examiner la force de coupe. Ainsi, on note la mise en place de certains modèles analytiques, comme celui de [6, 7]. En tenant compte de l'importance des paramètres et des conditions de coupe, dans le phénomène des forces de coupe, [8] a montré que la vitesse de coupe très basse, n'a pas d'influence sur les forces de coupe. Ce qui est confirmé par [9], en précisant que la force nodale (F_n) est fonction de l'avance par tour. Pendant le perçage de l'alliage d'aluminium, [10] avait proposé une méthode pour l'étude de la force nodale avec la prise en compte de la géométrie du foret. Selon [11] l'usinage à sec entraîne une augmentation de la température dans la zone de coupe, et peut influencer la force nodale. De même [12] ont émis l'hypothèse que le frottement constant augmente la température et, ont proposé la prise en compte de la température à l'interface pour faire varier le coefficient de frottement. [13] ont montré que le coefficient de frottement décroît fortement avec la vitesse de glissement du copeau sur la face de coupe. L'usinage à sec produit des particules métalliques de tailles micrométriques et nanométriques, qui s'oxydent dans l'air et restent pendant longtemps en suspension en fonction de la concentration.

La maîtrise de la production des particules métalliques, lors de l'usinage est nécessaire aujourd'hui. Pour ces alliages d'aluminium recyclé, la maîtrise de la production de ces particules métalliques, peut permettre de savoir à quel degré, la santé de l'opérateur peut être mis en danger, comme signifié par [14 - 16]. Etudier la concentration massique des particules métalliques lors d'un usinage, nécessite une configuration expérimentale particulière, comme celle de [17]. Ils ont montré que la quantité des particules fines produites est influencée par le matériau et le traitement thermique, la température et la formation du copeau. [18] en perçant les alliages 6061 - T6 et A 356, ont montré que la production des particules métalliques est aussi influencée par la profondeur de coupe. Cette production est plus importante en début de l'usinage, et les matériaux ductiles en produisent plus que les matériaux fragiles. La formation du copeau est aussi une caractéristique pour l'évaluation de l'usinabilité, car le phénomène de la formation du copeau fait intervenir un grand nombre de paramètres, tels que les différents paramètres d'usinage, la nature du contact outil-matière et la rhéologie du matériau usiné. Ces copeaux sont classés en trois catégories par [19], les copeaux continus, les copeaux avec arête rapportée et les copeaux discontinus, segmentés ou festonnés. La génération des surfaces par usinage entraîne systématiquement la production des copeaux qui ont des formes en fonction

des paramètres de coupe. D'un point de vue macrographique, selon la norme ISO DIS 3685 [20], la forme des copeaux varie et dépend des conditions d'usinage et du couple outil/matière. [21] ont étudié les copeaux d'aluminium 6063-T6 obtenus dans les conditions de coupe à sec, avec lubrification abondante et en MQL. En fonction de la vitesse de coupe [4] les copeaux d'aluminium A319-T0 et T6, A356-T0. Les alliages d'aluminium recyclés par fonderie, sont très moins utilisés dans le cadre de l'usinabilité, par manque de données nécessaires. Afin de disposer de quelques données relatives à l'usinabilité de ces alliages, des études ont été faites par [22, 23, 24], qui ont mis un accent sur le tournage à sec et avec lubrification, en considérant comme paramètre de coupe la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Cette étude a donc été réalisée, dans le but d'apporter une solution partielle, liée à la problématique sur l'usinabilité des différents alliages d'aluminium recyclés par fonderie. Trois alliages d'aluminium recyclés par fonderie nommés 3000 R, 5000 R et 6061 R, ont été usinés en perçage à sec. L'étude a donc consisté à étudier l'influence des paramètres de coupe (l'avance, la vitesse de coupe et la dureté) sur la rugosité de surface, les forces de coupe, la concentration massique des particules métalliques et la morphologie des copeaux. De montrer l'existence d'une relation entre les différentes caractéristiques de l'usinabilité. Pour cela, des modèles ont été établis pour l'évaluation de la force de coupe et de la rugosité de surface en fonction de l'avance.

2. Matériel et méthodologie

Les matériaux utilisés sont trois alliages d'aluminium recyclé par fonderie. Ces alliages sont l'alliage recyclé 3000 R (issu du recyclage des corps des canettes de boisson), l'alliage recyclé 5000 R (issu du recyclage des couvercles des canettes de boisson) et l'alliage recyclé 6061 R (issu du recyclage des copeaux d'usinage de l'alliage 6061). Ce dernier alliage recyclé a été aussi traité thermiquement. D'où son utilisation aux états T0 et T6. L'analyse a permis d'avoir la dureté et la composition chimique de chaque alliage recyclé (*Tableau 1*).

Tableau 1 : Dureté (MPa) et composition chimique de chaque alliage (%)

Alliage	HRE	Al	Cr	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
3000 R	39	97	-	0.3	0.2	0.25	1.5	0.5	0.25
5000 R	31	94.85	0.1	0.3	0.4	0.1	0.3	3.8	0.15
6061 R-T0	45	97.65	-	0.7	0.2	0.1	0.15	1.2	-
6061 R-T6	75	97.65	-	0.7	0.2	0.1	0.15	1.2	-

Les opérations de perçage ont été effectuées sur une fraiseuse CNC 3-axes Huron K2x10 Graffenstaden (*Figure 1a*), ayant une fréquence de rotation de 28000 tr/min et une avance de coupe de 30 m/min, une puissance de 40 kw, un couple de 50 Nm, une accélération par axe de 6m/s² et une résolution de 1µm. La mesure de la rugosité a été effectuées sur un rugosimètre SurfTest 301 Mitutoyo (*Figure 1b*). La mesure des particules métalliques produites a été faite avec le Dust Track (*Figure 1c*). L'observation et l'analyse des copeaux a été faite au microscope optique (*Figure 1d*) et la segmentation des copeaux sur le microscope électronique à balayage (*Figure 1e*). L'opération effectuée était un perçage de diamètre 8 mm et de profondeur 12 mm, avec un fortet HSS BLACK OXIDE à goujures classiques, angle de pointe de 118°, angle d'hélice de 35° et le diamètre de l'âme de 2 mm.



Figure 1 : *Equipement expérimental : a) Machine CNC, b) Rugosimètre SurfTest 301 Mitutoyo, c) Dust Track, d) Microscope optique, e) Microscope Electronique à balayage*

Plusieurs paramètres d'entrée sont utilisés pour étudier la rugosité de surface, la force de coupe, la concentration massique des particules métalliques et la morphologie des copeaux comme critère d'usabilité. Dans cette étude, trois paramètres ont été considérés l'avance, la vitesse de coupe et la dureté pour la rugosité de surface et la force de coupe. Un paramètre, l'avance pour la concentration massique des particules métalliques et la morphologie des copeaux. Le plan d'expérience de type surface de réponse a été utilisé pour étudier l'influence de ces paramètres (douze essais incluent trois essais au centre) sur les rugosités de surface (Ra) et la force de coupe (Fz). Le *tableau II* montre la matrice d'expérience.

Tableau 2 : *Matrice d'expérience*

	Rugosité de surface Ra		Force de coupe Fz	
	f (mm/tr)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	HRE (MPa)
Haut	0.03	100	0.03	45
Centre	0.115	155	0.115	60
Bas	0.2	210	0.2	75

Dans un premier temps, la méthode multifactorielle a permis d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir les paramètres d'entrée les plus influant sur la rugosité de surface Ra et la force de coupe. Ces plans d'expérience ont fourni les graphes de Pareto, les actions directes et les ANOVA pour la détermination de l'influence de chaque paramètre. Les résultats obtenus, ont conduit à l'utilisation des modèles de régression multiple (1) pour exprimer les rugosités de surface et la force de coupe. Dans ces modèles de régression, la variable de réponse Y (Rugosité ou force de coupe) est exprimée comme une fonction de plusieurs variables prédictives X (vitesse de coupe, avance, dureté) plus un bruit.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_{1i} + \beta_2 \cdot X_{2i} + \beta_k \cdot X_{ki} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Avec Y : caractéristique à évaluer ; X : paramètre influant ; i : i-ème observation dans l'échantillon des données, β : coefficients inconnus du modèle, ε : écart.

Dans un deuxième temps, et vu les résultats de l'analyse à partir des graphes de Pareto et les ANOVA, la méthode uni factoriel a été utilisée. Cette méthode a consisté à définir les effets du paramètre le plus influant sur la rugosité de surface, la force de coupe, la concentration massique des particules métalliques et la morphologie des copeaux. La forme (2) a permis d'écrire les modèles.

$$Y = A \cdot X^n \tag{2}$$

avec, Y : caractéristique à évaluer ; A : constante, X : paramètre influant ; n : coefficient d'influence.

3. Résultats et discussion

Les tests d'usinabilité ont permis de comprendre :

- pour la rugosité de surface Ra des alliages recyclés 3000 R et 5000 R, que l'avance et la vitesse de coupe sont significatifs et positifs. L'avance a l'effet le plus élevé, suivi de la vitesse de coupe. Les interactions sur la rugosité de surface, vitesse de coupe - vitesse de coupe, avance - vitesse de coupe et avance - avance ont des effets non significatifs et positifs.
- pour la rugosité de surface Ra de l'alliage recyclé 6061 R, que l'avance, la dureté et l'interaction avance - avance sont significatifs. L'avance a l'effet le plus élevé et positif. Elle est suivie respectivement de la dureté et de l'interaction de l'avance - avance qui ont des effets négatifs. Les interactions sur la rugosité de surface, dureté - dureté et avance - dureté ont des effets non significatifs et négatifs.

Pour les trois alliages recyclés 3000 R, 5000 R et 6061 R, les rugosités de surface Ra augmentent lorsque l'avance évolue de 0.03 à 0.2 mm/tr. Dans le cas de la rugosité de surface Ra en fonction de la vitesse de coupe, on constate qu'elles diminuent quand la vitesse de coupe évolue de 100 à 155 m/min. Puis, elles augmentent quand la vitesse de coupe évolue de 155 à 210 m/min. Sauf pour la rugosité de surface Ra de l'alliage recyclé 5000 R qui présente une augmentation légère quand la vitesse de coupe, va de 100 à 210 m/min. Pour l'alliage recyclé 6061 R, la rugosité de surface Ra augmente lorsque la dureté évolue de 45 à 75 MPa. L'analyse des ANOVA *du Tableau 3* a montré que la rugosité de surface Ra des alliages recyclés 3000 R et 5000 R, peuvent être évaluées en fonction de l'avance et de la vitesse de coupe. Les statistiques R^2 expliquent 96.30 % de variabilité de la rugosité de surface Ra de l'alliage 3000 R et 97.32 % de variabilité de la rugosité de surface Ra de l'alliage recyclé 5000 R. La rugosité de surface Ra de l'alliage recyclé 6061 R, peut être évaluée en fonction de l'avance et de la dureté. Les statistiques R^2 expliquent 98.54 % de variabilité de la rugosité de surface Ra. Il existe une relation très forte entre les paramètres (avance, vitesse de coupe, dureté) et la rugosité de surface.

Tableau 3 : ANOVA de la rugosité de surface des alliages recyclés

ANOVA Ra 3005 R $R^2 = 96.30\%$					
Source	DDL	Sum of squares	Average quadratic	Report F	Probability
f	1	5.63183	5.63183	143.38	0.0000
Vc	1	0.268393	0.268393	6.83	0.0399
ANOVA Ra 5083 R $R^2 = 97.32\%$					
Source	DDL	Sum of squares	Average quadratic	Report F	Probability
f	1	6.02202	6.02202	200.36	0.0000
Vc	1	0.52274	0.52274	17.39	0.0059
ANOVA Ra 6061 R $R^2 = 98.54\%$					
Source	DDL	Sum of squares	Average quadratic	Report F	Probability
f	1	5.17082	5.17082	338.07	0.0000
HRE	1	0.52215	0.52215	34.14	0.0011
f-f	1	0.436051	0.436051	28.51	0.0018

Les résultats de cette analyse, ont permis de conclure que la rugosité de surface est influencée par l'avance et la vitesse de coupe. En maintenant la vitesse de coupe fixe à 100 m/min, les résultats ont montré que, la rugosité de surface est aussi influencée par la dureté des alliages. Les modèles 3 à 5 tenant compte de ces résultats, ont été établis pour évaluer la rugosité de surface de ces alliages recyclés.

$$Ra_{3000R} = 1.418 + 11.398 * f + 0.003 * Vc \quad (3)$$

$$Ra_{5000R} = 1.459 + 11.786 * f + 0.005 * Vc \quad (4)$$

$$Ra_{6061R} = 3.321 + 10.921 * f - 0.019 * HRE \quad (5)$$

avec, Ra (μm): rugosité de surface de l'alliage recyclé 3000 R, 5000 R et 6061 R f (mm/tr): avance par tour, Vc (m/min): vitesse de coupe, HRE (MPa): dureté.

Sachant que l'avance est le paramètre le plus influent sur les rugosités de surface Ra des alliages recyclés 3000 R, 5000 R et 6061 R, d'autres essais d'usinabilité ont été réalisés. Dans ce cas, la rugosité de surface Ra a été évaluée en fonction de l'avance, et en fixant la vitesse de coupe à 100 m/min pour les alliages recyclés 3000 R et 5000 R. une vitesse de coupe fixée à 100 m/min et une dureté fixée à 45 et 75 MPa. On observe toujours que, pour tous les alliages recyclés, la rugosité de surface Ra est élevée, lorsque la vitesse de coupe augmente. Les rugosités de surface les basses sont obtenues à une vitesse de coupe de 100 m/min et à une dureté de 75 Mpa. Ce qui confirme l'influence de la vitesse de coupe et de la dureté. Les **Formules 6 à 9**, représentent les modèles pour l'évaluation des rugosités de surface Ra de chaque alliage recyclé.

$$Ra_{3005R} = 5.95 * f^{0.29} \quad (6)$$

$$Ra_{5083R} = 6.27 * f^{0.28} \quad (7)$$

$$Ra_{6061R-T0} = 6.29 * f^{0.22} \quad (8)$$

$$Ra_{6061R-T6} = 6.06 * f^{0.28} \quad (9)$$

Les forces de coupe ont été mesurées, les données obtenues ont été convertie pour être lues par le logiciel Matlab. Cette acquisition a été faite pour tous les trois alliages recyclés, et pour chaque essai d'usinabilité, suivant le plan d'expérience. De l'analyse de toutes les images obtenues, il ressort que les forces de coupe F_x et F_y sont très faibles par rapport à la force de coupe F_z . C'est ainsi que, la force de coupe F_z a été la seule force étudiée. Les tests d'usinabilité ont permis de comprendre, pour la force de coupe F_z des alliages recyclés 3000 R et 5000 R, que l'avance a un effet significatif, positif et plus élevé. L'effet de l'avance est suivi de celui de l'interaction avance - avance. La vitesse de coupe et les autres interactions sur la force de coupe F_z , n'ont pas d'effets significatifs. Sachant que la vitesse de coupe n'influence pas la force de coupe, les tests d'usinabilité sur les l'alliage recyclé 6061 R, ont tenu compte de l'avance et de la dureté. Ces résultats montrent que la force de coupe F_z de l'alliage recyclé 6061 R, l'avance a un effet significatif, positif et plus élevé. L'effet de l'avance est suivi de celui de la dureté. Les autres interactions, n'ont pas d'effets significatifs. L'analyse des résultats, a permis d'observer pour les trois alliages recyclés, que la force de coupe F_z augmente lorsque l'avance évolue de 0.03 à 0.2 mm/tr. La vitesse de coupe de 100 à 210 m/min ne présente quasiment aucune évolution, pour les alliages recyclés 3000 R et 5000 R. La force de coupe F_z augmente lorsque la dureté évolue de 45 à 75 MPa. Pour l'alliage recyclé 6061 R. L'analyse de l'ANOVA du **Tableau 4** a montré que la force de coupe F_z peut être évaluée en fonction de l'avance pour les alliages recyclés 3000 R et 5000 R, et en fonction de l'avance et de la dureté pour l'alliage recyclé 6061 R. Les statistiques R^2 expliquent

99.99 % de variabilité de la force de coupe Fz des alliages recyclés 3000 R et 5000 R et 99.96 % de variabilité de la force de coupe Fz de l’alliage recyclé 6061 R. Il existe une relation très forte entre l’avance, la dureté et la force de coupe des alliages recyclés.

Tableau 4 : ANOVA de la force de coupe Fz des alliages recyclés

ANOVA Fz 3000 R R ² = 99.99 %					
Source	DDL	Sum of squares	Average quadratic	Report F	Probability
f	1	366449	366449	445681.59	0.0000
Vc	1	3.84	3.84	4.67	0.0740
f - f	1	8482.56	8482.56	10316.63	0.0000
ANOVA Fz 5000 R R ² = 99.99%					
Source	DDL	Sum of squares	Average quadratic	Report F	Probability
f	1	473923	473923	566733.92	0.0000
Vc	1	3.87207	3.87207	4.63	0.0749
f - f	1	21769.5	21769.5	26032.76	0.0000
ANOVA Fz 6061 R R ² = 99.96 %					
Source	DDL	Sum of squares	Average quadratic	Report F	Probability
f	1	437400	437400	16014.65	0.0000
HRE	1	2521.5	2521.5	92.32	0.0001

Les résultats de cette analyse, ont permis de conclure que la force de coupe est influencée par l’avance. En maintenant la vitesse de coupe fixe à 100 m/min, les résultats ont montré que, la force de coupe est aussi influencée par la dureté des alliages. Les modèles 10 à 12 tenant compte de ces résultats, ont été établit pour évaluer la force de coupe de ces alliages recyclés.

$$Fz_{3000 R} = 179.514 + 1118.39 * f + 7778.55 * f^2 \tag{10}$$

$$Fz_{5000 R} = 132.004 + 434.376 * f + 12487.2 * f^2 \tag{11}$$

$$Fz_{6061 R} = 38.706 + 3176.47 * f + 1.366 * HRE \tag{12}$$

avec, Fz (N) : force de coupe les alliages recyclés 3000 R et 5000 R, f (mm/tr) : avance par tour, HRE (MPa) : dureté de l’alliage recyclé.

Sachant que l’avance est le paramètre le plus influent sur la force de coupe Fz des trois alliages recyclés, d’autres essais d’usinabilité ont été réalisés. Ces résultats confirment les études de [8, 9]. Dans ce cas, force de coupe Fz a été évaluée en fonction de l’avance, et en fixant la vitesse de coupe à 100 m/min pour les alliages recyclés 3000 R et 5000 R. Une vitesse de coupe fixée à 100 m/min et une dureté fixée à 45 et 75 MPa, pour l’alliage recyclé 6061 R. La **Figure 2**, montre l’évolution des forces de coupe Fz. On observe toujours que, la force de coupe Fz lorsque l’avance augmente. Les forces de coupe Fz sont aussi élevées quand la dureté augmente.

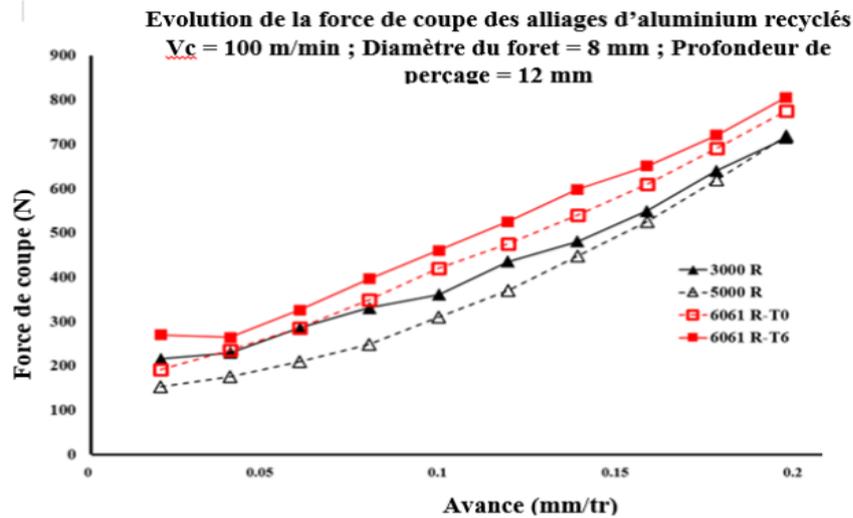


Figure 2 : *Évolution de la force de coupe en fonction de l'avance à $V_c = 100$ m/min*

Les **Formules de 13 à 16** représentent les modèles expérimentaux pour l'évaluation de la force de coupe F_z de chaque alliage recyclé.

$$F_{Z_{3005R}} = 1435 * f^{0.54} \quad (13)$$

$$F_{Z_{5083R}} = 1776.4 * f^{0.7} \quad (14)$$

$$F_{Z_{6061R-T0}} = 1868.3 * f^{0.62} \quad (15)$$

$$F_{Z_{6061R-T6}} = 1633.9 * f^{0.52} \quad (16)$$

avec, F_z (N) : force de coupe les alliages recyclés 3000 R et 5000 R, f (mm/tr) : avance par tour.

La concentration massique des particules métalliques, de chacun des alliages recyclés, a été mesurée en fonction du temps et de l'avance, allant de 0.03 à 0.2 mm/tr. L'analyse des résultats a montré que, pendant l'usinage, la concentration des particules métalliques est élevée en début de l'usinage. Elle diminue au fur et mesure que l'opération se produit, quel que soit l'avance. Sur la base des valeurs moyennes, la concentration massique des particules métalliques a été analysée. Les résultats montrent que, la concentration massique des particules métalliques, est plus élevée quand les avances sont basses, et diminue au fur et à mesure que l'avance augmente. Ces résultats montrent aussi que la concentration massique des particules métalliques, est fonction de la dureté de l'alliage recyclé et également de nature de l'alliage. Cela va dans le même sens que [17, 18]. Ces résultats ont permis d'avoir des modèles expérimentaux pour l'évaluation de la concentration massique des particules métalliques en fonction de l'avance.

$$C_{3000R}^m = 0.0065 * f^{-0.64} \quad (17)$$

$$C_{5000R}^m = 0.007 * f^{-0.65} \quad (18)$$

$$C_{6061R-T0}^m = 0.0062 * f^{-0.62} \quad (19)$$

$$C_{6061R-T6}^m = 0.011 * f^{-0.21} \quad (20)$$

C^m : Concentration massique en mg/cm^3 , f : avance en mm / tr.

Cette analyse a consisté à observer la morphologie des copeaux, produits pendant le perçage sec des alliages recyclés 3000 R, 5000 R et 6061 R à T0 et T6. Le paramètre d'entrée pris en compte est l'avance (allant de 0.03 à 0.2 mm/tr) et la vitesse de coupe constante à 100 m/min. Les données de sortie sont les copeaux prélevés, mesurés et observés. Le **Tableau 5** montre un extrait des copeaux obtenus pendant le perçage de ces alliages recyclés. Les résultats montrent que la morphologie des copeaux est quasiment identique pour tous les deux alliages recyclés. De 0.03 à 0.07 mm/tr, les copeaux sont courts et assimilables à un empilement de cylindre de différents diamètres. Au-delà de 0.07 mm/tr, les copeaux sont fragmentés. Les résultats montrent une différence sur l'évolution de la morphologie des copeaux en fonction de l'avance. Dans l'ensemble, les copeaux des alliages recyclés 3000 R, 5000 R et 6061 R sont longs et hélicoïdaux lorsque les avances sont très basses. Au fur et à mesure que les avances augmentent, les copeaux sont de plus en plus courts et fragmentés. Les copeaux de l'alliage recyclé 6061 R à T6, sont tous courts et fragmentés quel que soit l'avance.

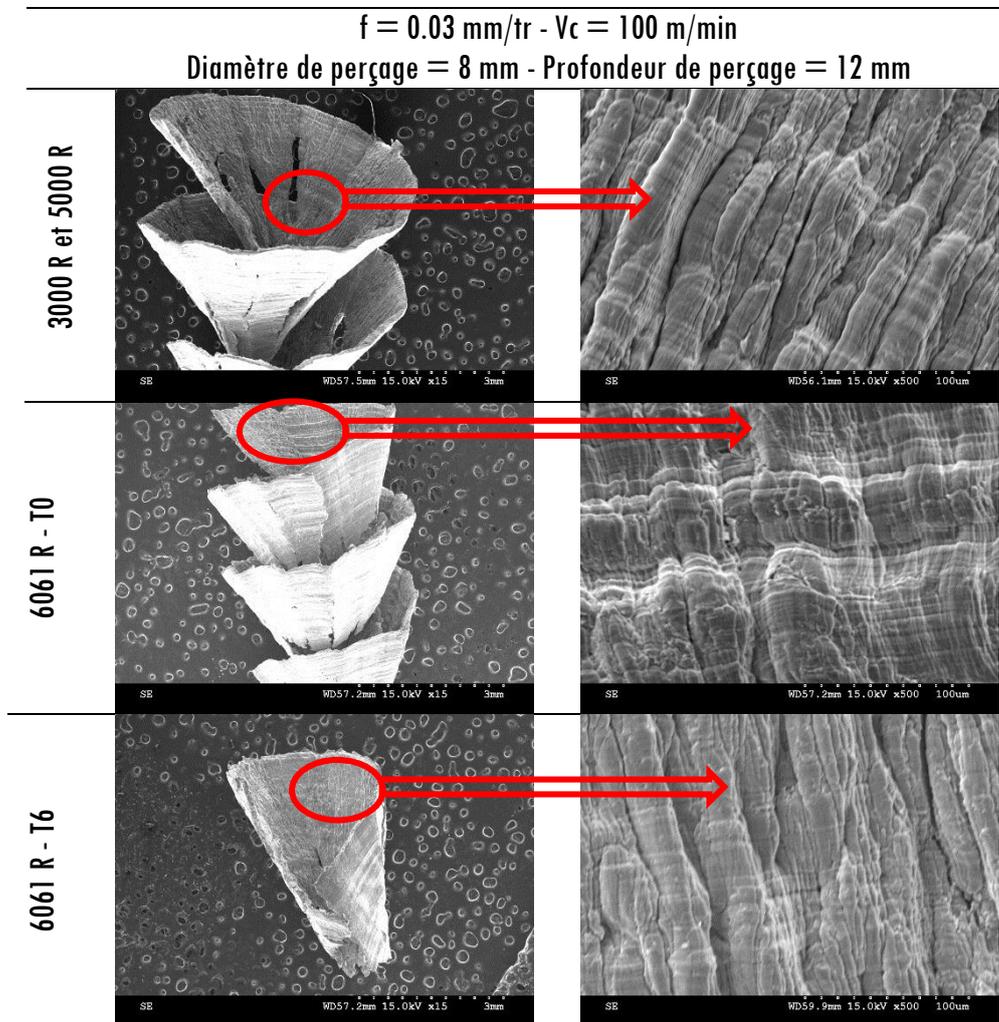
Tableau 5 : Extrait des copeaux d'usinage

Morphologie des copeaux des alliages recyclés à $V_c = 100$ m/min Diamètre de perçage 8 mm et profondeur de perçage of 12 mm		
f (mm/tr)	3000 R	5000 R
0.03 à 0.07		
0.11 à 0.2		
f (mm/tr)	6061 R - T0	6061 R - T6
0.03 à 0.07		
0.11 à 0.2		

L'analyse montre que lorsque les copeaux sont longs et hélicoïdaux, la concentration massique des particules métalliques est élevée. Lorsque les copeaux sont courts et fragmentés, la concentration massique des particules métalliques est basse. A une vitesse de coupe constante de 100 m/min, la segmentation des copeaux

a été faite et observée au microscope électronique à balayage. Le **Tableau 6** montre la segmentation des copeaux des alliages recyclés 3000 R et 5000 R, pour deux avances différentes (0.03 et 0.2 mm/tr). Le **Tableau 6** montre la segmentation des copeaux de l'alliage recyclé 6061 R à T0 et à T6, à une avance de 0.03 mm/tr.

Tableau 6 : Segmentation des copeaux des alliages recyclés 3000 R et 5000 R



L'analyse montre que lorsque les avances sont faibles, $f = 0.03 \text{ mm/tr}$ par exemple, la segmentation des copeaux est presque la même pour les alliages recyclés 3000 R, 5000 R. Bien que la morphologie des copeaux est quasiment identique, une différence a été observée entre la segmentation des alliages recyclés 3000 R, 5000 R et l'alliage recyclé 6061 R-T0. Pour l'alliage recyclé 6061 R-T6, la segmentation du copeau est bien différente des autres alliages recyclés. Elle est pratiquement la même à toutes les avances. Le changement de segmentation entre les alliages recyclés, montre sa relation avec la concentration massique des particules métalliques. Une analyse a été faite pour montrer l'existence entre d'une relation entre la concentration massique des particules métallique et la morphologie des copeaux. A cause des frottements des copeaux sur l'outil de coupe, qui occasionne l'usure, leur morphologie peut être influencée. Aucune usure de l'outil de coupe n'a été constatée. Par contre, un phénomène de copeau adhérent a été observé pendant l'usinage de l'alliage recyclé 6061 R-T6 aux avances de 0.15 et 0.2 mm/tr. Ce copeau adhérent est susceptible d'influencer la morphologie du copeau et la concentration massique des particules métalliques. Les **Figures 3 et 4** comportent deux zones. La première zone, est celle dont les avances sont inférieures à 0.1 mm/tr et, la deuxième est celle dont les avances sont supérieures à 0.1 mm/tr. Les résultats montrent l'existence d'une relation qui existe entre la concentration massique des particules métallique et la morphologie des copeaux.

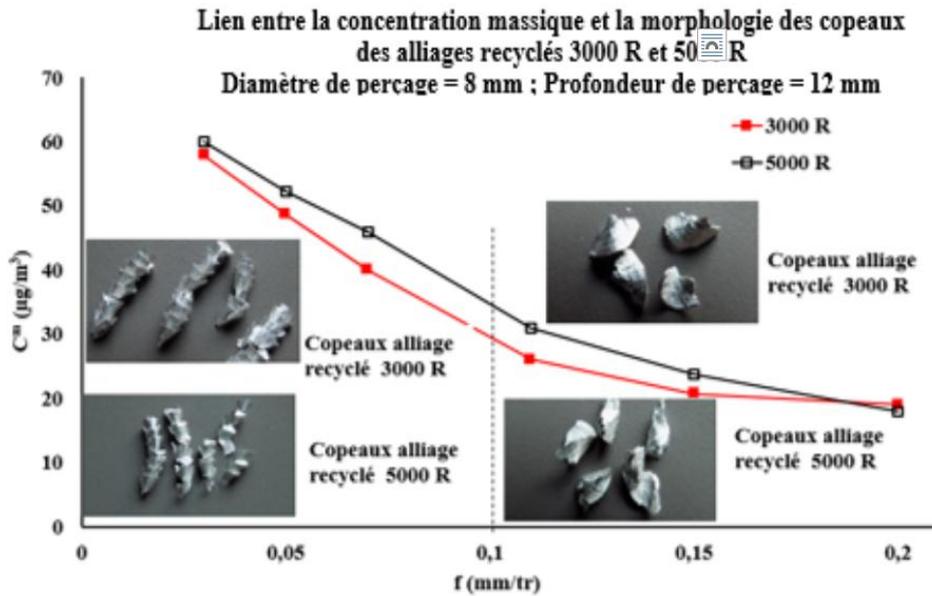


Figure 3 : Relation entre la morphologie des copeaux et la concentration massique des alliages recyclés 3000 R et 5000 R à $V_c = 100$ m/min

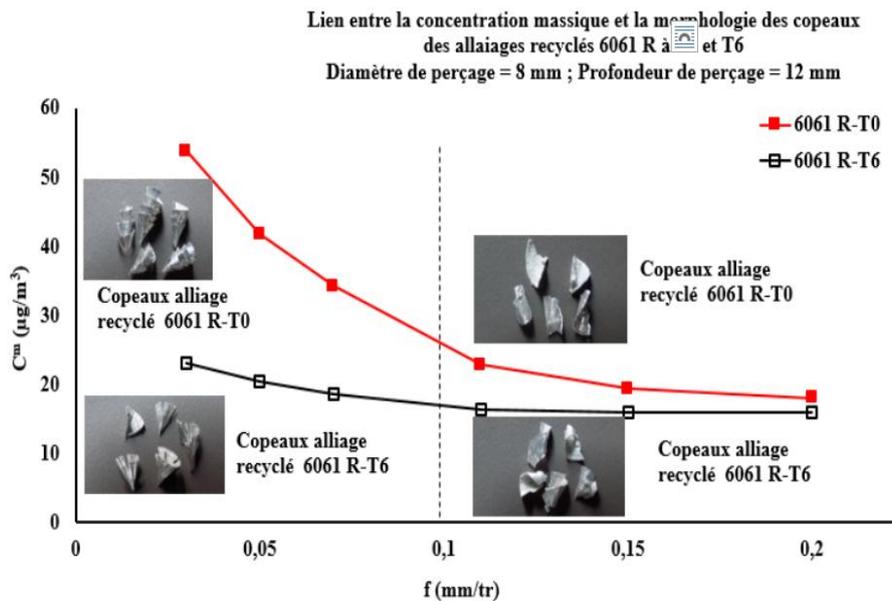


Figure 4 : Relation entre la morphologie des copeaux et la concentration massique lors du perçage de 6061 R en fonction du traitement thermique et à $V_c = 100$ m/min

La **Figure 5** montre, pour chaque alliage recyclé, l'évolution de la concentration massique des particules métalliques en fonction de l'épaisseur moyenne du copeau. Aussi, plus les copeaux sont épais, la concentration massique des particules métalliques est basse. L'analyse montre que, pour les alliages recyclés 3000 R, 5000 R et 6061 R-T0, lorsque les copeaux sont longs et hélicoïdaux, ils sont moins épais, et la concentration massique des particules métalliques est élevée. Pour l'alliage recyclé 6061 R-T6, les copeaux sont courts, fragmentés et moins épais. Plus les copeaux sont épais, la concentration massique des particules métalliques est basse.

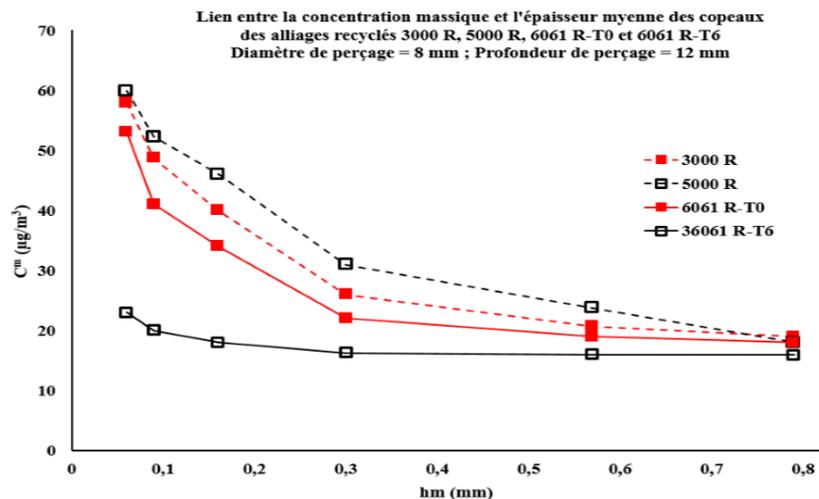


Figure 5 : Concentration des particules métalliques en fonction de l'épaisseur moyenne du copeau des alliages recyclés

4. Conclusion

Cette étude a donné un certain nombre d'information, concernant l'influence des paramètres de coupe et de la dureté, sur l'usinabilité en perçage des alliages d'aluminium recyclé par fonderie. Les résultats obtenus ont montré l'influence de l'avance, la vitesse de coupe et de la dureté sur l'usinabilité de chaque alliage recyclé. La rugosité de surface est influencée, quel que soit l'alliage recyclé, par l'avance, la vitesse de coupe et la dureté de l'alliage recyclé. De ces trois paramètres, l'avance est celui qui a la plus grande influence sur la rugosité de surface. En maintenant la vitesse de coupe à 100 m/min, la rugosité de surface reste fonction de l'avance et de la dureté de l'alliage recyclé. La vitesse de coupe, n'a aucune influence sur la force de coupe pour tous les alliages recyclés. L'avance et la dureté ont une influence sur la force de coupe. A une vitesse de coupe constante de 100 m/min, la force de coupe augmente avec l'élévation de de l'avance et de la dureté. La production des particules métalliques, dont la concentration massique a été mesurée à une vitesse de coupe 100 m/min, est fonction de l'avance et de la dureté. Ces particules métalliques, sont plus élevées en début de l'usinage et aux avances faibles. Les copeaux des alliages recyclés, obtenus en fonction de l'avance, à une vitesse de coupe de 100 m/min, ont des similitudes. Ils sont longs et hélicoïdaux aux avances faibles (inférieure à 0.1 mm/tr), courts et fragmentés aux avances fortes (supérieures à 0.1 mm/tr). Sauf, pour l'alliage recyclé 6061 R à T6, qui a des copeaux courts et fragmentés à toutes les avances. Comme les alliages d'aluminium vierges, les alliages recyclés 3000 R, 5000 R et 6061 R présentent un bon comportement à l'usinabilité en perçage à sec.

Références

- [1] - BOOTHROY, WINSON AK, Fundamentals of machining and machine tools. Marcel Dekker, New York, (1989)
- [2] - RABINDRA BEHERA, Study on Machinability of Aluminium Silicon Carbide Metal Matrix Composites Transactions of 61st Indian Foundry Congress, (2013)
- [3] - M. S. RANGANATH, VIPIN, R. S. MISHRA, Optimization of Surface Roughness and Material Removal Rate on Conventional Dry Turning of Aluminium (6061). *International Journal of Advance Research and Innovation*, Vol. 1, (2014) 62 - 71, ISSN 2347 - 3258
- [4] - J. KOUAM, V. SONGMENE, Y. ZEDAN, A. DJEBERA and R. KHETTABI, On chip formation during drilling of cast aluminum alloys *Machining Science and Technology*, 17 (2013) 228 - 245 p.

- [5] - Z. KARIM, S. A. S. AZUAN, A. YASIR. M. S., A Study on Tool Wear and Surface Finish by *Applying Positive and Negative Rake Angle during Machining Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7 (10) (2013) 46 - 51, ISSN 1991 - 8178
- [6] - M. E. MERCHANT, Mechanics of the metal cutting process, orthogonal cutting and a type 2 chip. *Journal of Applied Physics*, 16 (5) (1945) 267 - 275 p.
- [7] - M. E. MERCHANT, Mechanics of the metal cutting process, plasticity conditions in orthogonal cutting. *Journal of Applied Physics*, 16 (6) (1945) 318 - 324 p.
- [8] - M. C SHAW, Principle of cutting, ASME, Vol. 77, (1957) 103 - 114 p.
- [9] - E. MORIN, J. MASOUNAVE, LAUFER, Effect of drill wear on cutting forces in drilling of metal - matrix composites, *Wear*, N° 184 (1995) 11 - 16 p.
- [10] - E. J. A. ARMAREGO, Predictive models for drilling thrust and torque a comparison of three flank configurations, *Annals of the CIRP*, Vol. 33, (1984) 5 - 10 p.
- [11] - MASOUNAVE, S. MAUGENDRE, L. SCHEED, Prédiction des efforts de perçage des métaux, *Matériaux et Techniques*, N° 9-10 (1998) 7 - 16 p.
- [12] - A. MOUFGI, A. MOLINARI et D. DUDZINSKI, Modelling of orthogonal cutting with temperature dependent friction law. *Journal of Mechanical Physics of Solids*, (1998) 46
- [13] - F. ZEMZEMI, J. RECH, W. BEN SALEM, A. DOGUI et P. KAPSA, Identification of a friction model at tool/chip/workpiece interfaces in dry machining of aisi4142 treated steels. *Journal of Materials Processing Technology, In Press, Corrected Proof*, (2008)
- [14] - B. LEVRESQUE, P. L AUGER, J. BOURBEAU, J. F DUCHESNE, P. LAJOIE, D. MENZIES, Qualité de l'air à l'intérieur, Environnement et santé publique : Fondement et pratiques, Vol. 12, (2003) 317 - 332 p.
- [15] - W. G KREYLING, M. SEMMLER, W. MOLLER, *Disimetry and toxicology of ultrafine particules*, *J. Aerosol Medecine*, 17 (2004) 140 - 152 p.
- [16] - C. OSTIGUY, G. LAPOINTE, M. TROTTIER, L. MENARD, L. CLOUTIER, Y. BOUTIN, M. ANTOUN, Health effects of nanoparticules, Normand, Christian Studies and Research Projects/Rapport R-469, Montreal, IRSST, (2006) 55 p.
- [17] - B. BALOUT, V. SONGMENE, J. MASOUNAVE, An experimental study of dust generation durind dry drilling of pre-cooled and pre-heated workpiece materiels, *Journal of manufacturing Process*, Vol. 9, N°1 (2007)
- [18] - V. SONGMENE, B. BALOUT, J. MASOUNAVE, Clean machining experimental investigation on dust formation : Influence of machining parameters and chip formation, *International Journal of Environmentally Conscious Design and manufacturing (ECDM)*, Vol. 14, N°1 (2008) 1 - 16 p.
- [19] - G. LIST, Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-CO par la caractérisation de l'interface outil-copeau. Application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351, *PhD thesis*, Bordeaux, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, (2004) 156 p.
- [20] - ISO 3685, Tool-life testing with single-point turning tools; ISO 3685, 1993, Tool-Life Testing with Single-Point, Turning Tools, Annex G: 41, (1993)
- [21] - S. M KRISHNAM, G. R IRUSA, Prediction and analysis of multiple quality characteristics in drilling under minimum quality lubrication, *Journal of Engineering Manufacture*, 226 (6) (2012) 1061 - 1072
- [22] - J. B. MANDATSY MOUNGOMO, D. NGANGA-KOUYA, V. SONGMENE, J. KOUAM & J. P. KENNÉ, Machinability Study of Recycled Aluminum Cans and Machining Chips, *Advanced Manuf. Technology*, on line April 4th 2016, DOI 10.1007/s00170-016-8564-x, (2016)
- [23] - J. B. MANDATSY MOUNGOMO, D. NGANGA KOUYA and V. SONGMENE, Turning Machinability of Recycled Aluminum Alloys. *Key Engineering Materials*; ISSN : 1662 - 9795, DOI : 10.4028/www.scientific.net/KEM.710.77, on - line 20-09, (2016) 77 - 82
- [24] - J. B. MANDATSY MOUNGOMO, D. NGANGA KOUYA and V. SONGMENE, Aluminum Machining Chips Formation, Treatment and Recycling: A Review. *Key Engineering Materials*; ISSN :1662 - 9795, DOI : 10.4028/www.scientific.net/KEM.710.71, on - line 20-09, (2016) 71 - 76