

ANALYSE THERMIQUE ET ETUDE DE LA FORMATION DES COPEAUX EN TOURNAGE DE L'ACIER AISI 1045

Fairouz BOUROUIS¹, Billel HAMADI², Yassine CHIKH³

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de la matière qui se traduit par la formation de copeaux en utilisant un outil coupant. La forme du copeau ainsi que les mécanismes de sa formation affectent directement la qualité des pièces usinées. Notre étude expérimentale s'intéresse aux mécanismes de la génération de copeaux et les phénomènes thermomécaniques intervenant conduisent, à la formation de copeaux de nature et de morphologies très différentes. Des essais en tournage sec des pièces en acier AISI 1045 ont permis d'examiner par caméra infrarouge et microscope optique les aspects thermiques de la zone de coupe et d'analyser la morphologie des copeaux. Plusieurs techniques d'analyses thermomécaniques ont permis de mieux comprendre l'influence des paramètres de coupe sur les mécanismes de la génération des copeaux et l'usinabilité de l'acier AISI 1045 en tournage sec.

Mots clés : Tournage, Morphologie des copeaux, Analyse thermomécanique, Usinabilité.

1. Introduction

L'analyse de la formation des copeaux fournit une source de données très riche pour les chercheurs que les industriels pour mieux comprendre le phénomène de coupe et d'améliorer l'usinabilité des pièces mécaniques. La recherche dans le domaine des copeaux s'est orientée autour trois axes [1]. Le premier axe s'intéresse à la description des modes de formation des copeaux, le deuxième sur la caractérisation géométrique et morphologique et le troisième sur la caractérisation microstructurale et métallurgique des copeaux. Une analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée pour montrer l'influence des paramètres de coupe et la géométrie de l'outil coupant sur l'effort de coupe et la morphologie des copeaux en tournage de l'acier à outils AISI D2 d'une dureté de 55 HRC en utilisant trois types des plaquettes [2]. Une étude tomomodensitométrie (CT) est

¹ Maître de Conférences. Laboratoire de Génie Mécanique, Université des Frères Mentouri Constatine 1, BP 325, Route Ain EL Bey, 27017 Constantine, Algérie, e-mail: famo006@yahoo.fr

² Chercheur., Centre de Recherche en Mécanique de Constantine (C.R.M), Campus Universitaire de Chaab Erssas, , BP 73B Frères Ferrad , Algérie, e-mail: billelhamadi@yahoo.fr

³ Centre de Recherche en Mécanique de Constantine (C.R.M), Campus Universitaire de Chaab Erssas, BP 73B Frères Ferrad, Algérie, e-mail: chikhyassineemo@gmail.com

utilisée pour la caractérisation de la forme des pièces usinées à partir d'expériences de tournage orthogonal 2D. La méthode est très avantageuse pour les formes complexes. La représentation 3D de la morphologie des copeaux est obtenue avec la précision nécessaire, ce qui permet d'assurer la validation pratique de la simulation par la méthode des éléments finis de la formation de copeaux dans les opérations d'usinage pratiques [3]. L'analyse de la morphologie des copeaux en fonction des paramètres de coupe en fraisage de l'aluminium 2050 montre que l'augmentation de l'avance permet d'accroître les efforts de coupe. L'utilisation de la lubrification permet de limiter les efforts de coupe. Les vitesses d'avance et de coupe faibles, les copeaux sont continus alors que pour des vitesses plus élevées, les copeaux sont festonnés et segmentés [4]. Le processus de la formation de copeaux avec un nouvel outil de tournage à micro-rainures développé de manière indépendante pour le tournage de produits tubulaires pour puits de pétrole lors l'usinage de l'alliage 40CrMnMo est étudié, combinant les essais d'usinage avec une analyse théorique. La morphologie des copeaux résulte de l'effet des deux processus ; la séparation de la pièce lors du passage à travers la zone de déformation par cisaillement et le processus de la rupture du copeau en traversant la face de coupe de l'outil [5]. Les caractéristiques microstructurales lors la formation de martensite induite par déformation tout au long de l'usinage des aciers inoxydables austénitiques sont comparés aux résultats thermiques obtenus par l'analyse de la méthode des éléments finis. La martensite induite par déformation formée dans le processus d'usinage n'est pas uniforme à travers le copeau et sa formation peut également être liée à la température [6]. G.Sharma et al. ont montré que les conditions de lubrification et les paramètres de coupe influent sur la nature des copeaux de l'acier AISI 304l en tournage. Les copeaux qui résultent par l'utilisation d'huile de canola sont discontinus de structure et de taille irrégulière en raison d'une rupture fragile. L'épaisseur des copeaux augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et la profondeur de passe [7]. D. M. Naigade et al. ont étudié l'effet de la quantité minimale de lubrification (MQL) pour le refroidissement en tournage de l'acier trempé AISI 4340 sur la formation des copeaux et la comparée à un environnement sec ou humide [8]. J.M. Rodríguez et al. ont montré que la méthode des éléments finis de particules (PFEM) avec un nouvel algorithme d'intégration temporelle permet de traiter les grandes déformations et la conduction thermique ainsi que le couplage thermomécanique, en contact pièce-outil y compris les effets de frottement. Les performances de la méthode sont étudiées avec un ensemble de différents tests bidimensionnels d'usinage orthogonal. Les résultats ont été comparés à des tests expérimentaux montrant une bonne compétitivité du PFEM par rapport aux autres outils de simulation disponibles [9]. Des expériences ont été menées pour évaluer la réponse des vitesses en ultra micro usinage et de macro usinage conventionnel de l'alliage d'aluminium. Les résultats ont montré la dépendance du taux de

rotation orthogonale et la morphologie des copeaux [10]. Dans les travaux de Matsumoto et al. un thermocouple à une profondeur de 0.025 mm de la surface usinée a été exploité pour étudier l'évolution de la température en fonction de la dureté du matériau AISI 4340 et les paramètres technologiques de coupe [11].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des paramètres de coupe sur la formation des copeaux en tournage sec des pièces en acier dans une approche d'identifier la possibilité d'exister d'une relation entre la variation de la température et les paramètres technologiques d'usinage. Pour atteindre cet objectif nous avons présenté une approche expérimentale de la formation des copeaux suivie par une analyse thermique lors des opérations de chariotage sur un tour parallèle. Cette approche est les résultats d'essais d'usinabilité sur un acier AISI 1045, durant lesquels nous avons observé l'évolution de la température dans la zone de coupe secondaire ou zone de frottement intense et montrer l'effet des paramètres de coupe sur la morphologie des copeaux.

2. Démarche expérimentale

Les expériences ont été réalisées au niveau des ateliers de fabrication mécanique du centre de recherche en mécanique de Constantine (C.R.M) et le laboratoire de génie mécanique sur un tour conventionnel « TURNADO 230/1500V » de marque KNUTH (GMBH Allemand) d'une puissance 7,5 KW. Les plaquettes de coupe utilisées sont en carbure ayant la désignation WNMG080412-M5, TP2501 marque SEKO. Elles sont montées sur un porte-outil portant la désignation MWLNR2525M08 (fig1). La température est prise dans la zone de coupe par une caméra infrarouge portable type FLIR T650 SC. La morphologie des copeaux a été identifiée par un microscope optique binoculaire de type (YF-2010) équipé d'une caméra, doté de deux chariots à mouvements croisés et à affichage digital avec une précision de 0,001mm avec un grossissement compris entre G/0.7, G/2, G/2.5 - G/100. (fig2).



Fig.1. Montage de la pièce usinée sur le tour TURNADO 230/1500V

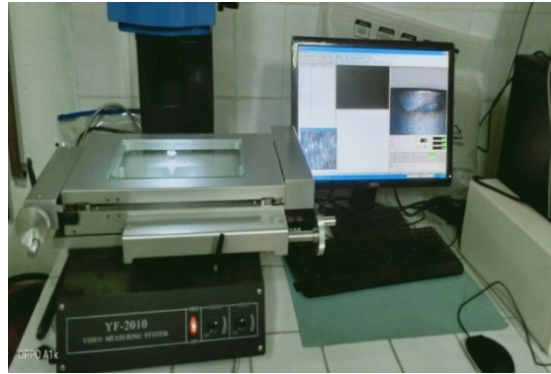


Fig.2. Microscope optique (YF-2010)

Les pièces usinées sont des diamètres 45 mm et des longueurs 200 mm en acier AISI 1045. La composition chimique de l'acier a été identifiée par un spectromètre type CCD PLUS marque SOLARIS GNR au niveau du laboratoire de l'Entreprise Tracteur Agricole (ETRAG). Les résultats de l'analyse sont illustrés dans le tableau 1.

Table 1

Composition chimique de l'acier AISI 1045 (% en poids)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,53	0,2	0,66	0,037	0,027	0,23	0,014
Ni	Ti	Cu	Al	Sn	Co	Fe
0,084	0,014	0,231	0,007	0,015	0,004	97,847

Le régime de coupe a été choisi en fonction du matériau utilisé et la géométrie de l'outil coupant [12]. Les paramètres d'usinage sont résumés dans le tableau 2.

Table 2

Les paramètres de coupe

Test N°	fn (mm/tr)	Vc (m/min)	N (tr/min)	ap (mm)
1	0,053	365	2583	1
2	0,106	365	2583	1
3	0,212	365	2583	1
4	0,424	365	2583	1
5	0,248	305	2158	1
6	0,248	335	2370	1
7	0,248	355	2583	1
8	0,248	395	2795	1
9	0,248	365	2583	0,5
10	0,248	365	2583	1
11	0,248	365	2583	1,5
12	0,248	365	2583	2

3. Analyses des résultats

3.1 Impact des conditions de coupe sur la température de coupe

Afin d'étudier la variation de la température dans la zone de coupe en fonction des paramètres technologiques d'usinage (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe) on a établi une série d'essais de chariotage sur des pièces en acier AISI 1045, la température ambiante été $T=22^{\circ}\text{C}$. La température de coupe est mesurée à distance sans contact à l'aide d'une caméra thermique infrarouge modèle T650 SC.

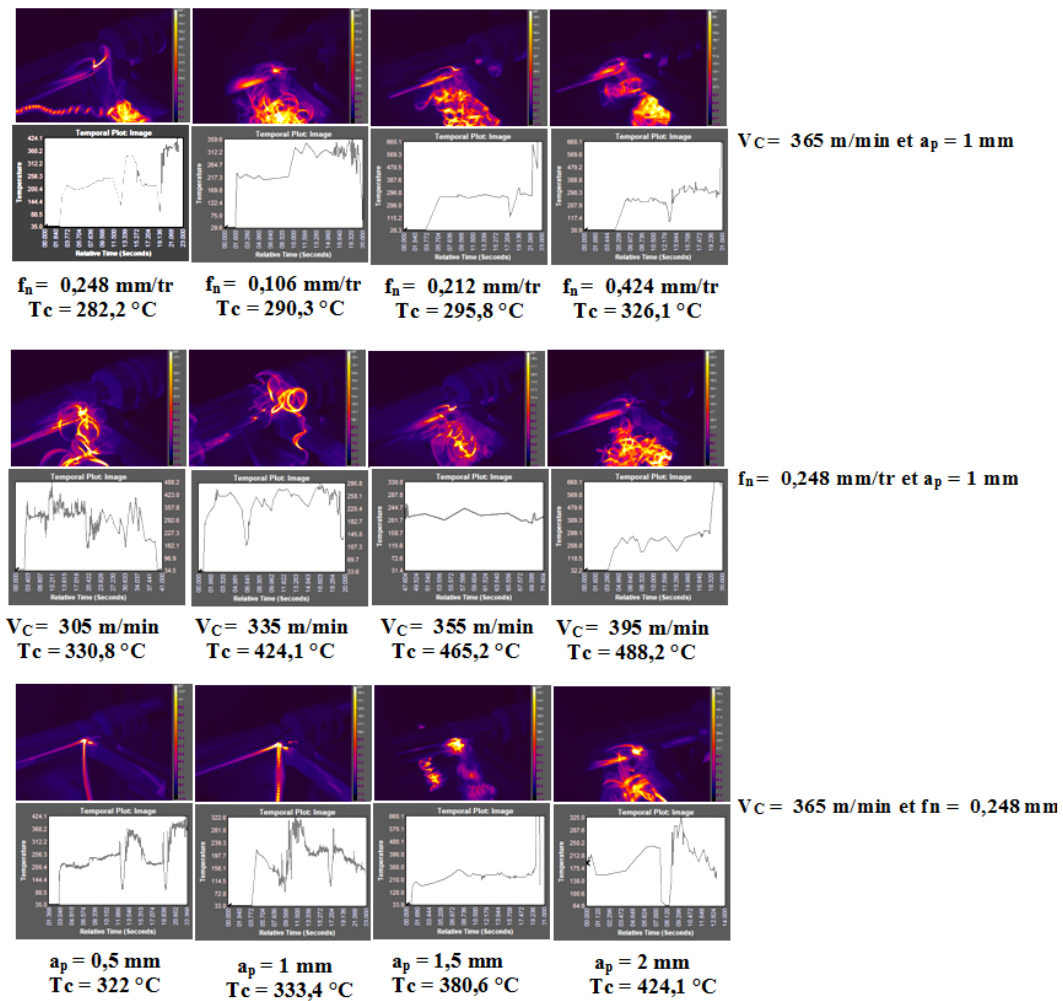


Fig. 3 . Thermographies infrarouges montrant les températures de coupe sous différents paramètres de coupe en utilisant l'outil revêtu en carbure

La figure 3 illustre les images IR de la température de la zone de coupe et les profils de température maximale avec des avances, des vitesses de coupe et des profondeurs variables en utilisant le logiciel de traitement spécial FLIR. Les résultats obtenus montrent que la coupe est caractérisée par un écoulement de copeau chaud de couleur rouge. La quantité de chaleur dégagée est due aux frottements, et aux déformations plastiques intenses et aux cisaillements.

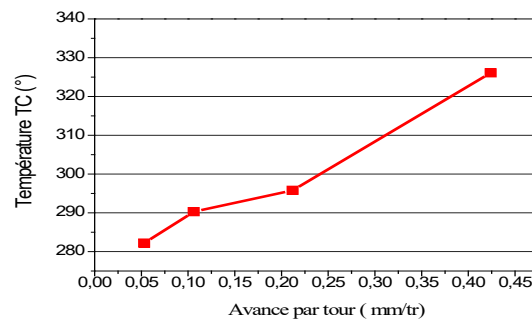


Fig.4. Effet de l'avance par tour sur la température de coupe Tc °C, Vc = 365 m/min, ap = 1 mm

On remarque d'après la figure 4, que la variation de la vitesse d'avance de 0.053 au 0.424 mm/tr a pour conséquence une élévation de la température faible 15.55%. Les échanges thermiques outil pièce sont minimes la majorité de la chaleur dégagée lors des processus de coupe est évacuée par le copeau.

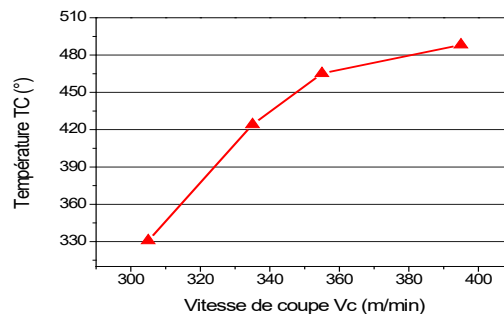


Fig.5. Effet de la vitesse de coupe sur la température de coupe Tc °C fn= 0,248 mm/tr, ap = 1mm

Il ressort de la figure 5, que l'augmentation de la vitesse de coupe engendre une augmentation des frottements et des déformations ce qui traduit par l'accroissement de la température dans la zone de coupe. Les échanges thermiques outil pièce sont importants. On remarque qu'une élévation de la vitesse de coupe de 305 au 395 m/min, conduit à une élévation de la température de 73%.

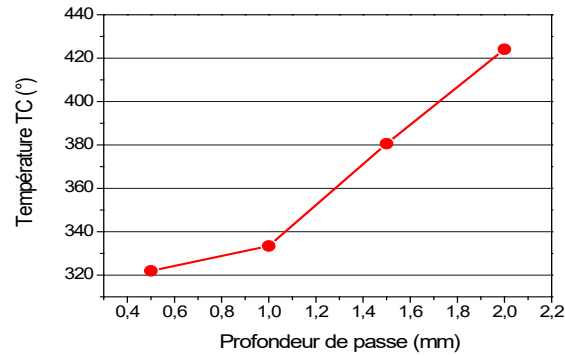


Fig.6. Effet de la profondeur de passe sur la température de coupe T_c °C, $V_c = 365$ m/min, $f_n = 0,248$ mm/tr

L'évolution de la température en fonction de la profondeur de passe est présentée dans la figure 6. La température maximale dans la zone de coupe est observée lorsque la profondeur est 2 mm, Cela est expliqué par l'augmentation des efforts de coupe. En pratique, l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une élévation de la température de 31% due aux échanges thermiques outil pièce.

3.2 Impact des conditions de coupe sur la morphologie du copeau

Les figures 7, 8, 9 présentent une comparaison de la morphologie du copeau en introduisant l'effet des paramètres de coupe. La figure 7 montre que la variation de l'avance n'a d'effet significatif sur la forme du copeau ruban enchevêtré.

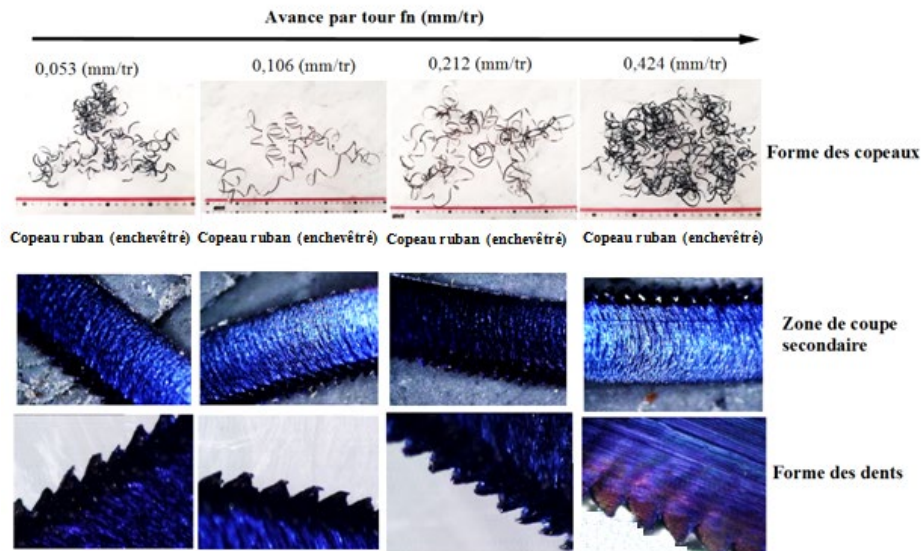


Fig.7. Morphologies microscopiques des copeaux en fonction de l'avance par tour.
 $V_c = 365$ m/min, $a_p = 1$ mm

La zone de coupe secondaire est de couleur bleu due à la stabilité des caractéristiques métallurgiques et thermoplastiques du matériau avec un écoulement stationnaire de la matière usinée dans lequel les contraintes restent constantes tout au long de la coupe.

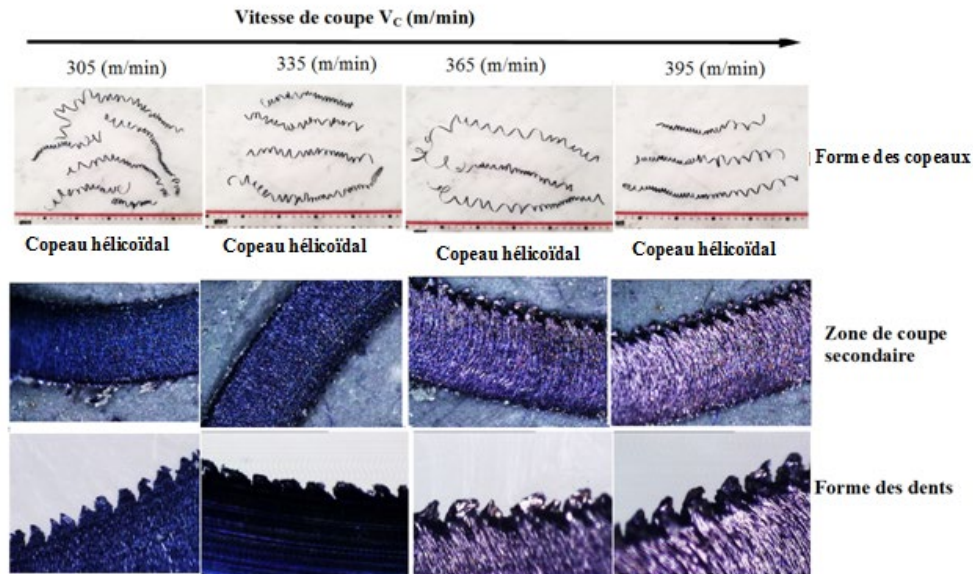


Fig.8. Morphologies microscopiques des copeaux en fonction de la vitesse de coupe
 $f_n = 0,248$ mm/tr , $a_p = 1$ mm

D'après la figure 8, la variation de la vitesse de coupe n'a pas d'effet significatif sur la forme des copeaux qui sont continus de formes hélicoïdales ceci est probablement dû au maintien d'une profondeur de passe constante $a_p = 1$ mm, d'où une faible variation de la force de coupe. L'augmentation de la vitesse de coupe provoque un changement de la couleur au niveau de la zone de cisaillement secondaire qui est variée du bleu au gris avec l'apparition des bandes blanches qui sont associées à des modifications de la microstructure lors la transformation des phases du matériau et aux échanges thermiques outil pièce dans la zone d'interface outil copeau.

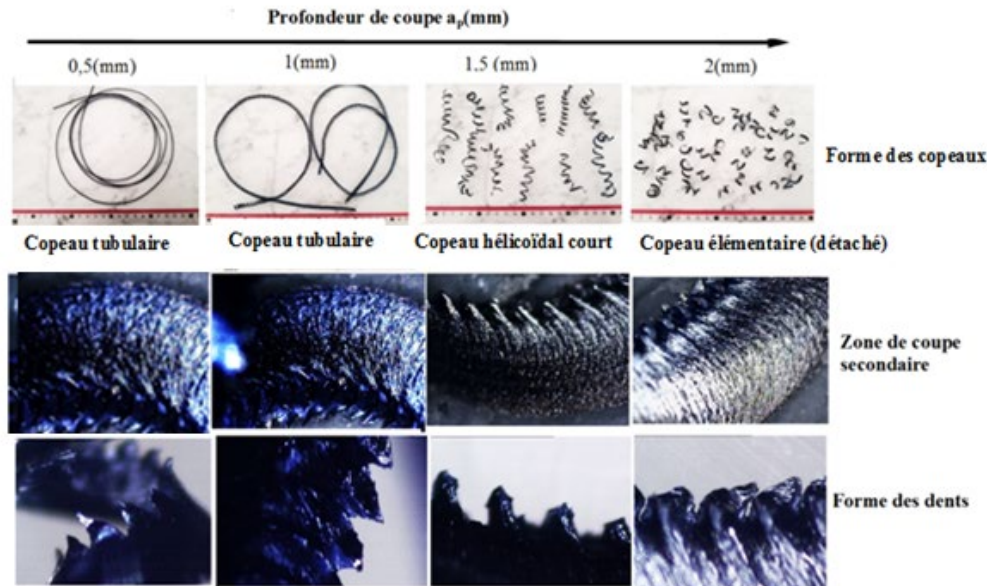


Fig..9. Morphologies microscopiques des copeaux en fonction de la profondeur de passe,
 $V_c = 365 \text{ m/min}$, $f_n = 0,248 \text{ mm/tr}$

Les essais de tournage de l'acier AISI 1045 ont révélé une forte influence de la profondeur de passe sur la forme des copeaux. La figure 9 résume ces résultats. En effet, pour les faibles profondeurs de coupe, 0,5 et 1 mm les copeaux sont tubulaires longs. La zone de coupe secondaire est caractérisée par la couleur bleu.

La variation de profondeur de passe de 1,5 au 2 mm entraîne l'apparition d'une variété de copeaux hélicoïdaux courts et élémentaires. Le changement de la morphologie des copeaux peut être expliqué comme une conséquence de la forte déformation plastique à l'interface outil-copeau lors la formation du copeau et les contraintes thermomécaniques générées lors l'augmentation de la température en créant une instabilité plastique qui provoque un cisaillement brutal du copeau lors leur évacuation.

La caractérisation de la zone de coupe secondaire montre la variation de la couleur de bandes de cisaillement due aux sollicitations thermomécaniques imposées sur le matériau et le changement de la microstructure lors l'usinage.

3.2 Analyse dimensionnelle

L'analyse de la morphologie des copeaux consiste à déterminer un certain nombre de paramètres dimensionnels, longueur, épaisseur, volume. Les figures 10,11,12 montrent l'effet des paramètres de coupe sur la température de coupe et les caractéristiques dimensionnels du copeau qui permettent de contribuer à l'étude de l'usinabilité de l'acier AISI 1045.

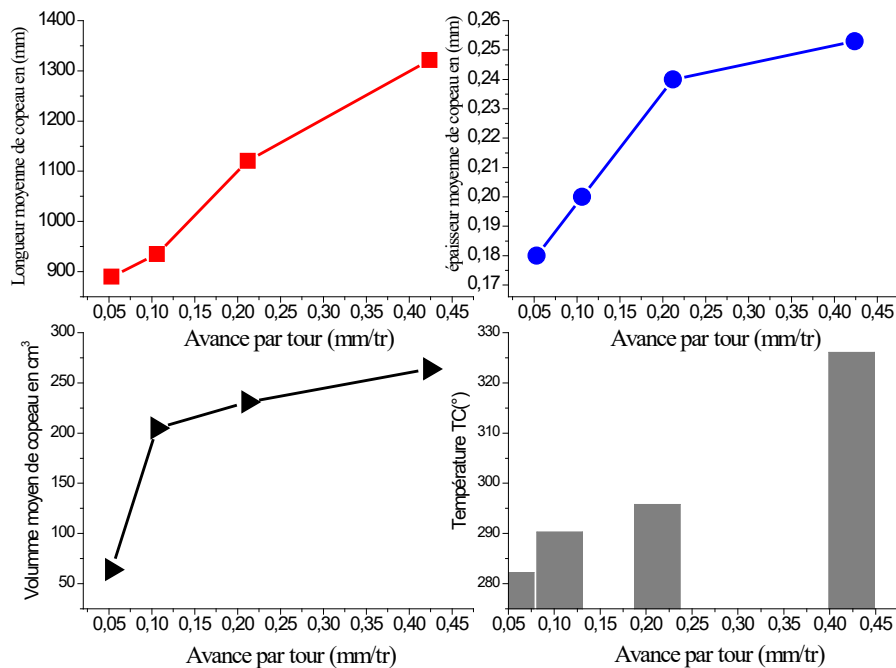


Fig.10. La variation dimensionnelle des copeaux en fonction de l'avance par tour
 $V_c = 365$ m/min , $a_p = 1$ mm

La figure 10 montre l'effet de l'avance sur les trois paramètres dimensionnels de la morphologie du copeau ainsi que la température générée dans la zone de coupe secondaire dans le cas de l'usinage de l'acier AISI 1045. On remarque que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne l'accroissement de l'épaisseur de la longueur, et le volume du copeau type ruban continu. La chaleur générée dans la zone de cisaillement secondaire est proportionnelle à la vitesse d'avance qui est due notamment à l'augmentation des efforts de frottement entre outil copeau.

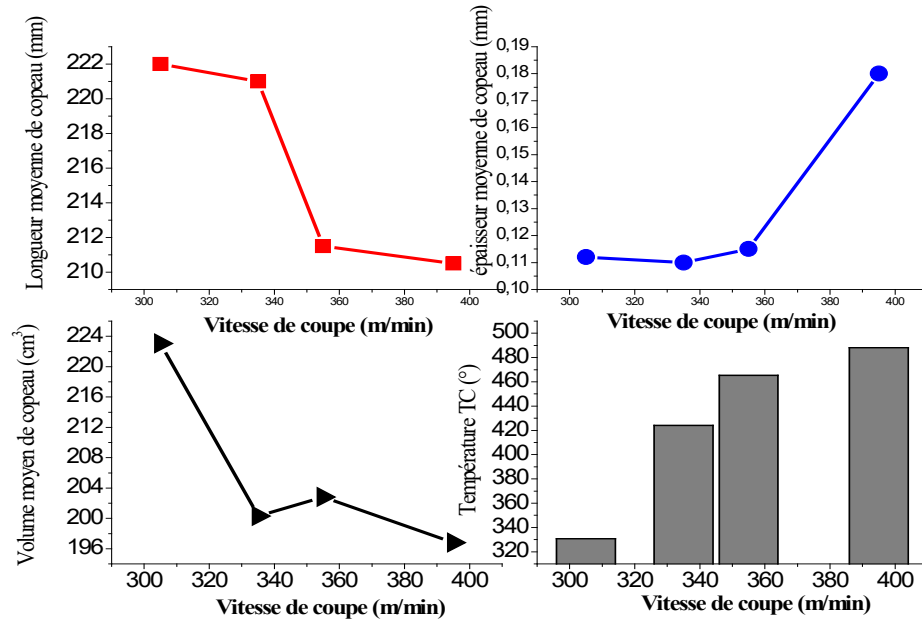


Fig. 11. La variation dimensionnelle des copeaux en fonction de la vitesse de coupe
 $f_n = 0,248 \text{ mm/tr}$, $a_p = 1 \text{ mm}$

La figure 11 montre que l'augmentation de la vitesse de coupe engendre un accroissement de l'épaisseur et décroissement de la longueur et le volume des copeaux.

La variation thermo dimensionnelle des copeaux en fonction de la profondeur de passe avec $V_c = 365 \text{ m/min}$, $f_n = 0,248 \text{ mm/tr}$ lors l'usinage de l'acier AISI 1045 est illustrée dans la figure 12. Le changement de la profondeur de passe entraîne des modifications sur la morphologie des copeaux et le comportement de matériau usiné. Le copeau tubulaire long plus épais résulte des petites profondeurs et des variations thermiques faibles. Les grandes profondeurs conduisent à des déformations plastiques importantes et des hautes températures dans la zone de cisaillement qui se traduisent par la variation de la géométrie des copeaux moins épais et de types hélicoïdaux courts ou discontinus élémentaires. Une profondeur de passe plus importante permette de réduire le volume du copeau.

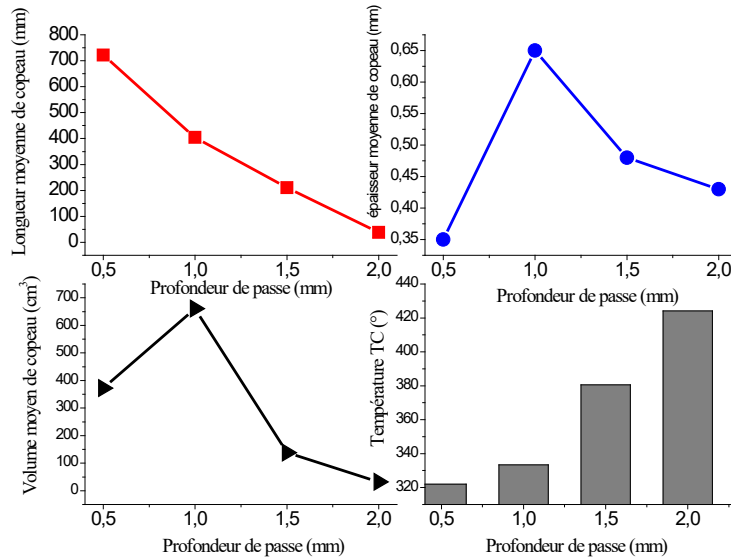


Fig. 12. La variation dimensionnelle des copeaux en fonction de la profondeur de coupe.

$V_c = 365 \text{ m/min}$, $f_n = 0,248 \text{ mm/tr}$

4. Conclusions

Actuellement, l'usinage par enlèvement de la matière reste encore le procédé le plus répandu, malgré l'apparition de nouvelles techniques de fabrication. Cependant l'optimisation des paramètres de coupe s'avère nécessaire afin d'améliorer la qualité des surfaces des pièces usinées. La génération de copeaux donne lieu à des déformations élastiques et plastiques puis rupture de la matière à usiner. Le contact outil pièce donne aussi des efforts de frottements causant un dégagement de la chaleur et l'apparition des microsoudures. Dans cet esprit, ce travail a pour objectif d'analyser la morphologie des copeaux et la température engendrée dans la zone de coupe pour cela nous avons effectué une série d'essais sur des pièces en acier AISI 1045 sur un tour parallèle. La caractérisation morphologique des copeaux permet de mesurer l'impact de la température de contact outil pièce et de montrer l'influence des paramètres de coupe sur le type et la géométrie du copeau (épaisseur, longueur, volume). Les résultats montrent que :

- L'augmentation de la vitesse de coupe V_c favorise l'apparition des copeaux moins longs et plus épais avec des échanges thermiques importants de l'ordre 73%. La variation de la vitesse n'a pas d'effet significatif sur la forme du copeau qui est hélicoïdal.

- L'accroissement de la vitesse d'avance f_n n'influe pas sur la nature du copeau qui est de forme ruban enchevêtré et favorise l'apparition des copeaux plus longs et plus épais sous un changement thermique faible soit une élévation de température de 15,55°C.
- La formation des copeaux est affectée par des instabilités qui apparaissent avec le changement de la profondeur de passe qui entraîne l'apparition de plusieurs morphologies tubulaires longs, hélicoïdaux courts et élémentaires. L'accroissement de la profondeur de passe a_p conduit à la formation des copeaux courts et moins épais sous une élévation de la température de 31%.

L'analyse des résultats obtenus montrent que la compréhension et le contrôle des paramètres qui conditionnent la formation des copeaux de l'acier AISI 1045 est difficile et que la formation des copeaux est directement liée aux chargements thermiques et aux contraintes intenses vécues par l'outil de coupe et la matière usinée. La démarche expérimentale proposée dans cette étude peut être exploitée comme base des données expérimentales applicable aux procédés de fabrication dans le cas du tournage sans lubrification des aciers à carbone moyen.

REFERENCES

- [1] J. D. P. Velasquez, "Etude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V", Thèse de doctorat, Université de Metz, 12 mars 2007
- [2] X. M. Anthony, "Analysis of cutting force and chip morphology during hard turning of AISI D2 steel", Journal of Engineering Science and Technology, vol. 10, no. 3, March 2015, pp. 282-290.
- [3] A.Devotta, T. Beno, R. Löf and E. Espesc, "Quantitative characterization of chip morphology using computed tomography in orthogonal turning process", Procedia CIRP, vol. 33, 2015, pp. 299 – 304.
- [4] W. Vincent, V. Arnaud, C. Hélène, D. Emmanuel, "Etude de la relation entre les conditions de coupe et la morphologie des copeaux en fraisage de l'aluminium 2050", MUGV 2012, 16-18 Octobre 2012, Saint Etienne, France.
- [5] H. Jiang, Z. Ren, L. He, S. Yuan, Z. Zou, "Forming process and evaluation of chip in machining of high-strength steel by an independent-developed microgroove turning tool" Science Progress, vol.104, n°. 3, 2021, pp.1-18.
- [6] G. M. P. Chagas, P. A. Barbosa, C. A. Barbosa, I. F. Machado, "Thermal analysis of the chip formation in austenitic stainless steel", Procedia CIRP, vol.8, 2013, pp. 293-298.
- [7] G.Sharma1, S.Shrivastva, "Chip morphology study during turning of AISI 304l alloy steel under different cutting fluid conditions", International Journal of Applied Engineering, vol.13, n°. 6, 2018, pp. 209-214.
- [8] D. M. Naigade, C. Y. Seemikeri, "Study of chip formation in hard turning of AISI 4340 alloy steel in different cutting environments", International Journal of Engineering Research & Technology, vol.4, n°.9, September-2015, pp.955-961.
- [9] J.M. Rodríguez, J.M. Carbonell, J.C. Cante, J. Oliver, "Continuous chip formation in metal cutting processes using the Particle Finite Element Method (PFEM)", International Journal of Solids and Structures, vol.120, , April-2017, pp.81-102.

- [10]. *M.A. Rahman , M.S. Bhuiyan, S. Sharma , M. S. Kamal, M. M. Musabbir Imtiaz, A. Alfaiy, T.T. Nguyen , N Khanna , S. Sharma, M. K. Gupta , S. Anwar, M. Mia*, “Influence of feed rate response (FRR) on chip formation in micro and macro machining of al alloy”, *Metals*, vol.11 (159), January 2021, pp. 1-20.
- [11]. *Y. Matsumoto, M. M. Barash, C. R. Liu*, “Cutting mechanism during machining of hardened steel”, *Materials Science and Technology*, vol. 3, no. 4, 1987, pp. 299–305.
- [12]. Secotools, “Catalogue et guide technique tournage”, 2015.