

## SIMULATION DE LA FORMATION DU COPEAU CONTINUE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS EN COUPE ORTHOGONALE.

Khalidi K., GUESSAB Ahmed, GOUASMI Sadek, ARIS Abdelkader

Laboratoire de Recherche en Technologie de Fabrication Mécanique (LaRTFM), ENP d'Oran- MA., Algérie  
ahmed.guessab@enp-oran.dz; sadek.gouasmi@enp-oran.dz; abdelkader.aris@enp-oran.dz

### Résumé :

L'objectif de cette étude met en évidence les relations entre les déformations plastique et la loi de frottement de coulomb isotrope (pièce-outil) et la loi de Johnson-Cook, qui sont nécessaire pour simuler la formation du copeau en coupe orthogonale sur la face de coupe de l'outil par la méthode des éléments finis à l'aide de l'approche Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE).

**Mots Clés:** ALE / Déformation plastique / Coupe orthogonale / Eléments finis.

### Nomenclature

A : Limite d'élasticité [MPa]  
B : Décalage en contrainte [MPa]  
C : Sensibilité à la vitesse de déformation  
 $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  : les constantes de rupture de Johnson-Cook.  
n : Coefficient d'écrouissage  
m : Coefficient de dépendance à la température

$T_f$  : Température de fusion [K]  
 $T_0$  : Température ambiante [K]  
T : Température instantanée [K]  
 $V_c$  : Vitesse de coupe [m/s]  
 $\varepsilon_p^n$  : Vitesse de déformation de référence  
 $\sigma_{eq}$  : Contrainte équivalente [MPa]

### 1. Introduction

En tournage trois principales configurations de coupe, sont généralement utilisées: la coupe réelle tridimensionnelle, la coupe orthogonale et la coupe oblique. La coupe orthogonale est particulièrement adaptée aux études de la modélisation numérique. La simulation de la coupe contribue à mieux comprendre les phénomènes de formation du copeau cette formation se fait par cisaillement de la matière dans une zone très proche de l'arête de coupe. Pendant la coupe on distingue trois zone de cisaillement [1,2], Figure 1: Zone 1 de cisaillement primaire, Zone 2 de cisaillement secondaire et la troisième zone c'est la zone mort. La simulation numérique de la coupe orthogonale devient de plus en plus performante grâce aux développement des codes de calculs capable de modélisé toutes les phénomène engendré pendant l'usinage et leurs interaction. Mais le point le plus important dans la simulation et surtout sur l'utilisation de ces codes de calculs qu'il faut prendre en considération la rhéologie réelle ou bien le comportement correcte du matériau à usiné afin de permettre pour la méthode numérique à produise des résultats numériquement proche de la réalité. Pour cela, ont introduit dans le code des lois de comportement réel du matériau, par exemple la méthode de paramètres de la loi de Johnson-Cook du matériau [3, 4 et 5]. En usinage bien que ces méthode qui intègrent le

comportement réelle du matériau, il faut modélisé l'interface de frottement outil-copeau. L'objectif final de notre étude est de modéliser numériquement la coupe orthogonale d'un bloc de matière en Aluminium avec un outil non déformable (rigide), en utilisant les lois de comportement et d'endommagement de Johnson-Cook. Notre étude consistera donc à décrire toutes les étapes nécessaires à l'obtention d'un modèle réaliste avec le logiciel de calculs numérique [6]. Ont faite, la modélisation de processus de coupe orthogonale passe par plusieurs étapes (Figure 2). Dans cette figure en trouve les étapes suivantes: 1. Définition de la problématique, 2. Création du modèle géométrique, 3. Définition des propriétés des matériaux, 4. Création de l'assemblage constitué de la pièce et de l'outil de coupe, 5. Définition des paramètres du calculs, 6. Description de l'interface de contact, 7. Application des chargements et des conditions aux limites, 8. Définition du maillage, 9. Création de la tâche du calcul et son lancement, 10. Résultats.

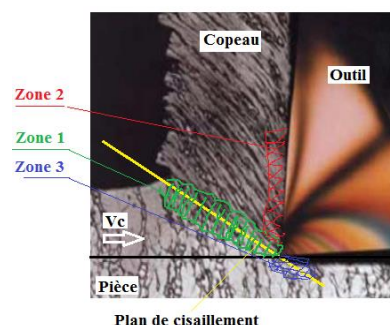


**Fig. 1:** Formation du copeau

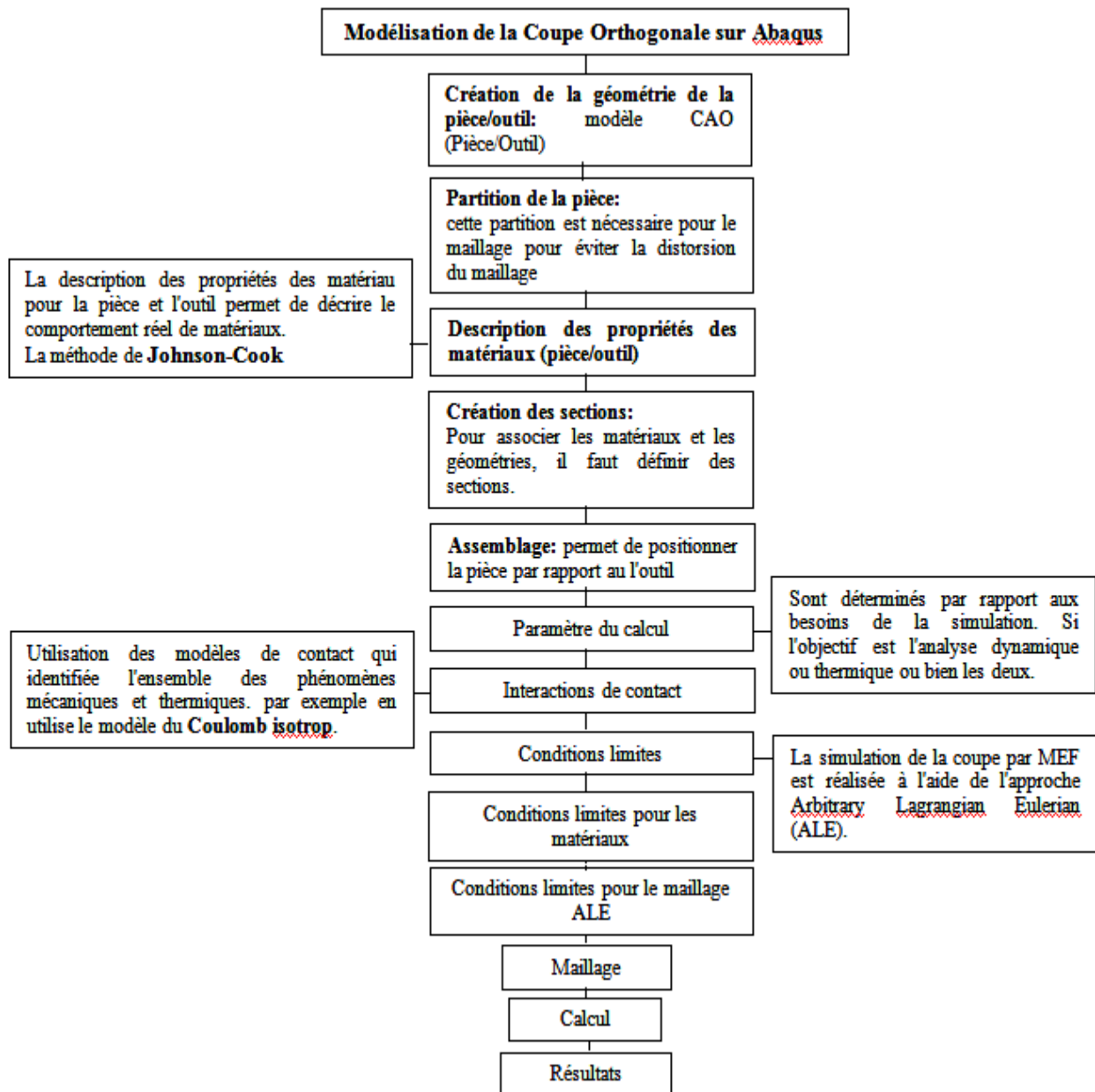


**Figure 2:** Processus de modélisation de la coupe orthogonale.

## 2. Définition de la problématique de processus de la coupe orthogonale

La coupe orthogonale est réalisée dans le cas du tournage orthogonale avec un outil couteau rigide, La Figure 3 illustre la géométrie de l'outil utilisé dans cette étude. L'outil est animé par un mouvement rectiligne avec une vitesse de coupe  $V_c = 100$  m/min et une avance de 0.15 mm. Les modèles DAO de l'outil de coupe et de la pièce usinée ont été élaborés avec Abaqus en utilise le module "Part". C'est cette modélisation qui va servir de base à la réalisation du modèle numérique sur le code de calcul. La pièce est modélisée en déformations planes, elle est fixée par un encastrement à sa base ( $U_1 = U_2 = U_3 =$

$UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ ), sa longueur est de 30 mm et sa hauteur est de 5 mm (Figure 4). La température initiale de la pièce et de l'outil est de 293K. La profondeur de passe  $a_p = 0.4$  mm. Dans le code de calcul utilisé, l'outil est considéré comme surface 'maitre' car c'est un corps rigide et la pièce est surface 'esclave', le contact entre l'outil et la pièce usiné est considéré avec frottement et le coefficient est estimé à  $\mu = 0.15$ . Le maillage d'ensembles (Pièce/Outil) est illustré sur la Figure 4. La pièce, elle formé par 4400 éléments type CPE4RT avec 8 nœuds. Pour notre pièce on a choisit un alliage d'aluminium comme matériau à usiné. Et pour la modélisation du comportement de ce matériau en utilise la

méthode de Johnson-Cook [5,7,8]. Le tableau 1 donne respectivement les caractéristiques et les coefficients de la loi de Johnson-Cook du matériau pour la pièce à usiné [9]. Les critères de l'écoulement et d'endommagement du matériau de Johnson-Cook sont donnés respectivement par les équations suivantes:

$$\sigma_{eq} = \underbrace{(A + B\epsilon_p^n)}_{\text{Elasto-plastic term}} \underbrace{\left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_{p0}}\right)}_{\text{Viscosity term}} \underbrace{\left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right)}_{\text{Softening term}} \quad (1)$$

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \times \left[1 + d_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right] \times \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{fusion}} - T_0}\right)\right] \quad (2)$$

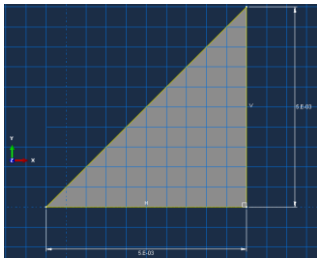


Fig. 3: Géométrie de l'Outil

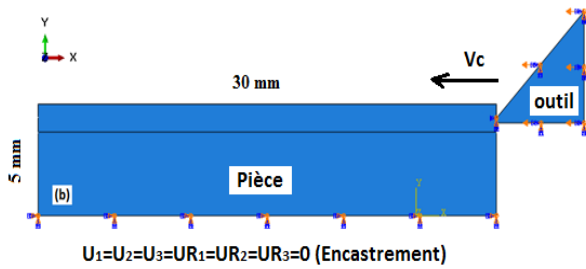


Fig. 4: Conditions aux limites et la formulation Lagrangienne et Eulérienne dans A.L.E.

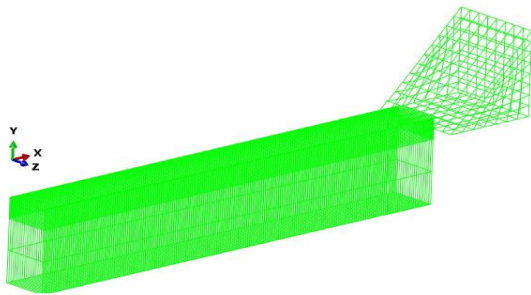
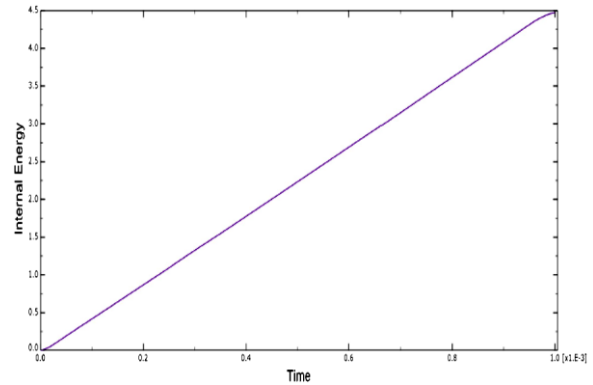


Figure 5: Le maillage d'assemblage (pièce + outil).

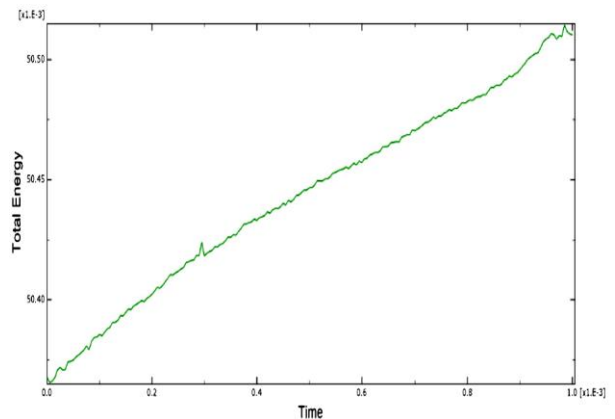
### 3. Résultats

Dans notre modèle numérique, nous arrivons à obtenir la formation d'un copeau de forme continue. Cette forme est généralement synonyme d'un processus de coupe stable. On observe bien sur la Figure 5, que la face de coupe de l'outil applique sur le matériau une pression, générant un

copeau continu. Le matériau subit alors une déformation plastique le long d'une zone de cisaillement primaire. A la fin du calcul, le copeau se détache bien du bloc de matière. Les contraintes engendrées lors de cette coupe semblent cohérente avec une contrainte maximale d'environ 414 MPa. Ces dernières dépendent entre autres des conditions de coupe, du matériau usiné et des outils de coupe. Dans le cas du copeau continu, la contrainte de cisaillement n'atteignant pas la limite de rupture du matériau usiné, le copeau s'écoule de manière continue sur la face de coupe de l'outil. Généralement, les copeaux continus peuvent compromettre le processus de coupe, c'est-à-dire l'enroulement d'un copeau sur lui-même ou sur la face de coupe comme dans notre cas de simulation, peut accentuer l'usure des outils de coupe. Le bilan des énergies permet d'assurer que l'énergie 'hourglass' reste négligeable tout au long du calcul (Fig. 6). L'énergie totale est principalement transformée en chaleur évacuée par le copeau. Dans notre simulation, sous l'effet de l'avance de l'outil, le copeau se détache de la pièce usiné et s'écoule en roulant sur lui même et sur la face de coupe sous une pression de l'ordre de 1.3 GPa. Ce processus de l'usinage génère une déformation plastique (énergie de déformation), cette énergie augmente progressivement pendant l'usinage.



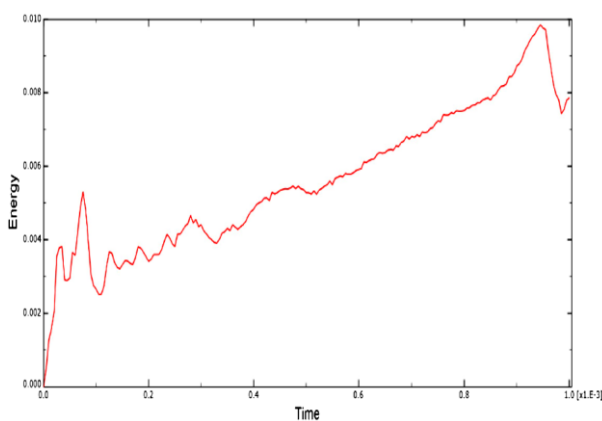
(a) Energie interne



(b) Energie totale

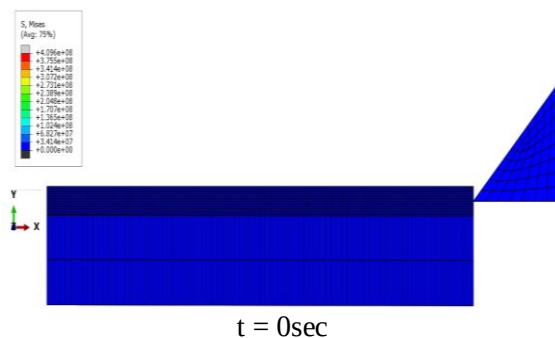
| Mode de la propriété | Propriété                            | Type                       | Paramètre                            | Valeur     |               |
|----------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------|---------------|
|                      |                                      |                            |                                      | Pièce (Al) | Outil (Acier) |
| Générale             | Densité                              | -                          | Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ] | 2700       | 7870          |
| Mécanique            | Elasticité                           | Isentropique               | Module de Young [MPa]                | 70e+9      | 2e+11         |
|                      |                                      |                            | Coefficient de poisson               | 0.33       | 0.29          |
|                      | Paramètres de la loi de comportement | Ecrouissage Johnson-Cook   | A [MPa]                              | 3.241e+8   | 375e+6        |
|                      |                                      |                            | B [MPa]                              | 1.136e+8   | 552e+6        |
|                      |                                      |                            | n                                    | 0.42       | 0.457         |
|                      | Paramètres de la loi d'endommagement | Endommagement Johnson-Cook | d <sub>1</sub>                       | -0.77      | 0.25          |
|                      |                                      |                            | d <sub>2</sub>                       | 1.45       | 4.38          |
|                      |                                      |                            | d <sub>3</sub>                       | -0.47      | 2.68          |
|                      |                                      |                            | $\varepsilon_p^n$                    | 1.0        | 1.0           |

**Tableau 1 :** Caractéristiques et les constantes de Johnson-Cook pour le comportement de matériau (Pièce/Outil) [9].

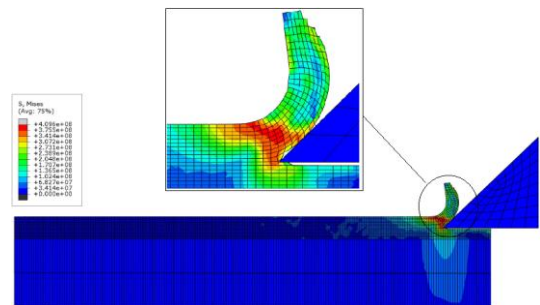


(c)

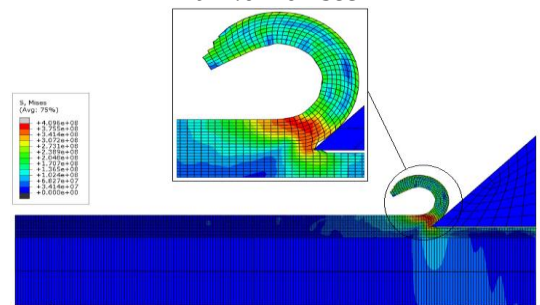
**Figure 6:** Bilan des énergies du calcul réalisé avec le logiciel ABAQUS



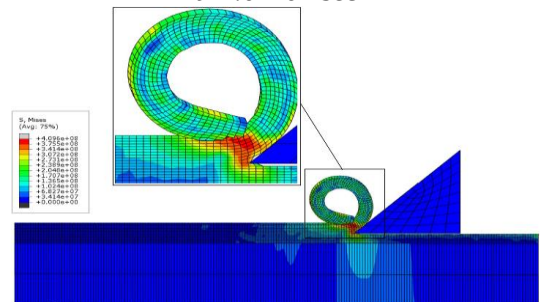
t = 0sec



t=1.0E-04 sec



t=2.0E-04 sec



t=3.5E-04 sec

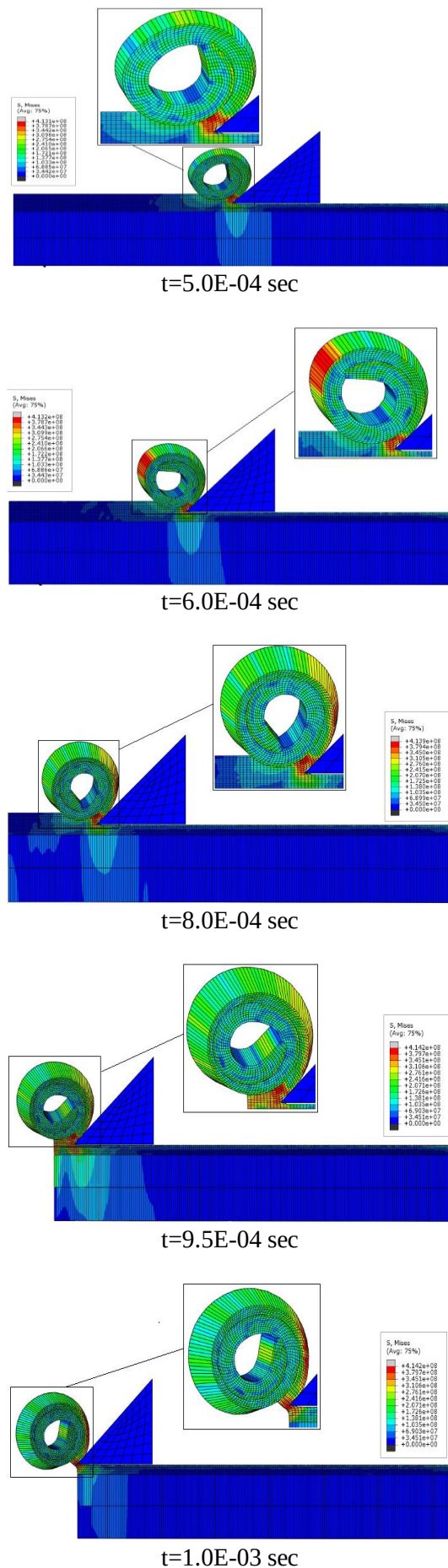


**Figure 5 :** Formation du copeau continu obtenu par la coupe orthogonale en tournage.

#### 4. Conclusion

Cette étude numérique porte sur la modélisation d'un procédé de la coupe orthogonale à l'aide d'un outil rigide. Elle rend compte de la complexité de l'usinage par enlèvement de matière. L'étude utilise la méthode des éléments finis basée sur l'approche Arbitraire Lagrange d'Euler (ALE) et la méthode de Johnson-Cook pour bien représenter correctement le comportement du matériau de la pièce pendant l'usinage. L'étude a montré que pour le matériau d'alliage d'aluminium, l'évolution de la vitesse d'avance de l'outil a conditionné la formation du copeau continu sur la face de coupe de l'outil, bien que le processus est principalement contrôlé par l'effet de la contrainte de déformation plastique et le découlement du matériau usiné de la face de coupe de l'outil.

#### Références

- [1] H. Sydorva, Pratique de la modélisation des processus de coupe avec assistance, **2014**.
- [2] L. Yohann, J. Narcisse. Simulation numérique de l'usinage avec Abaqus, **2012**
- [3] Kone, F. F., et al. **2011**. Finite element modelling of the thermo-mechanical behavior of coatings under extreme contact loading in dry machining. Surface & Coatings Technology. 011, №005, pp. 3553–3566.
- [4] Tuğrul Özel et Erol Zeren, Finite Element Method Simulation of Machining of AISI 1045 Steel With A Round Edge Cutting Tool. Département des Systèmes Industriels, Université d'Etat de New Jersey Piscataway. New Jersey 08854 USA. **2010**.
- [5] C.Z Duan, T Dou, Y J Cai, YY Li, Finite element simulation and experiment of chip formation process during high speed machining of AISI 1045 hardened steel. AMAE. Université de Technologie, Ecole de Mécanique. Chine. **2011**.
- [6] Abaqus, Abaqus user's manual. Simulia. **2010**.
- [7] Everton Ruggeri, Finite Element Simulation of chip formation in machining process, Education Académique, Université de Estado de Santa Catarina, DEM, Alumnus, Brasil. **2014**.
- [8] Khaldi K., Modélisation et Simulation Numérique du procédé de Tournage sur Abaqus, PFE de Master, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran-Maurice Audin, Algérie, **2018**
- [9] F. KALAY, Simulation numérique de l'usinage – Application à l'aluminium AU4G. Techniques de l'Ingénieur, Réf : BM7002v1.