

# LA SIMULATION NUMERIQUE DU PROFIL DE LA TEMPERATURE A L'INTERFACE OUTIL-COPEAU PAR LES ELEMENTS FINIS

AOUAD Razika<sup>1</sup>, AMARA Idriss<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université des frères de Mentouri Constantine, Algeria aouadrazika@yahoo.fr

<sup>2</sup> Universités des frères de Mentouri Constantine, Algeria a.idriss.2011@gmail.com

## RÉSUMÉ

Les phénomènes tribologiques à l'interface Outil/Surface usinée/Copeau sont très complexes à modéliser et pourtant ce sont la clef du comportement de l'outil, et notamment de sa résistance à l'usure. Dans ce contexte, nous avons étudié la compréhension de la phénoménologie de formation du copeau et défini l'influence de la vitesse de coupe sur le profil de la température à l'interface outil-copeau à travers l'utilisation d'un logiciel des éléments finis.

**Mots Clés:** Contact, Simulation numérique, éléments finis et phénomènes thermomécaniques

---

## NOMENCLATURE

### **Symboles :**

ap: profondeur de passe

Cp : Capacité calorifique

E : Module de Young

t:temps

Vc: vitesses de coupe

### **Lettres grecques :**

$\gamma$  : L'angle de coupe

$\beta$ : Rayon du bec d'outil

$\alpha$ : L'angle de dépouille

$\mu$  :Frottement outil-pièce

$\rho$  : Densité

$\nu$  : Coefficient de Poisson

$\lambda$  : Conductivité thermique

### **Indices / Exposants :**

T<sub>fus</sub> : Température de fusion

T<sub>amb</sub> :Température ambiante

---

## 1. INTRODUCTION

Dans l'industrie, les méthodes d'optimisation sont encore largement basées sur les connaissances acquises au cours des années et sur des essais longs et coûteux. Mais avant de mettre en place des solutions ou de développer des modèles, il est nécessaire de caractériser de manière précise les différents modes d'endommagement et de maîtriser tous les facteurs qui conduisent à l'usure des outils. L'étude de répartition de la température sur l'outil, la pièce et le copeau apporte des éléments fondamentaux pour la compréhension et l'optimisation des conditions de coupe. Le travail de Weiner [1] était cité parmi les premiers travaux d'étude de la distribution du champ de températures dans les zones de cisaillement. Il est bien connu que la majeure partie de la chaleur résultante du travail plastique reste dans le copeau et est emportée avec lui, alors qu'un faible pourcentage est conduit dans la pièce en augmentant sa température. La température atteinte dans la zone de coupe est un paramètre qui peut accélérer l'usure de l'outil suivant un mécanisme faisant intervenir la diffusion d'éléments chimiques du matériau vers l'outil. Ainsi la figure 1 obtenue par G. Bittes [1] en utilisant le code Sysweld,

correspond au cas de l'usinage à 100 m/min d'un acier mi-dur avec un outil en carbure de tungstène. On observe que le cisaillement primaire est globalement responsable d'une température de 350°C à la racine du copeau. Le cisaillement secondaire provoque sur la face interne du copeau un échauffement jusqu'à 1100°C. L'outil est soumis à un fort gradient de température. La peau de la pièce, quant à elle, atteint 200°C pendant un court instant.

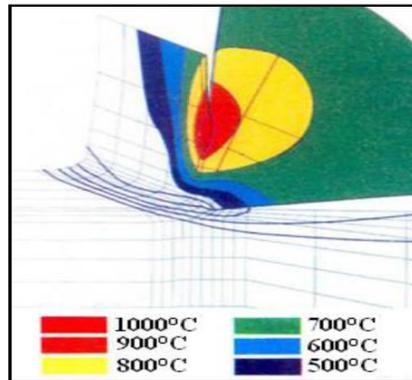


FIGURE 1 .Carte de température dans un copeau et dans l'outil obtenu par la modélisation thermomécanique [1]

## 2. METHODE DE SIMULATION

### 2.1. Présentation du modèle géométrique

On commence par l'outil de coupe est modélisé par un corps déformable. La modélisation de l'outil de coupe a été simplifiée en prenant  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\beta = 0.4$  et  $\alpha$  égale =  $15^\circ$  (figure 2).

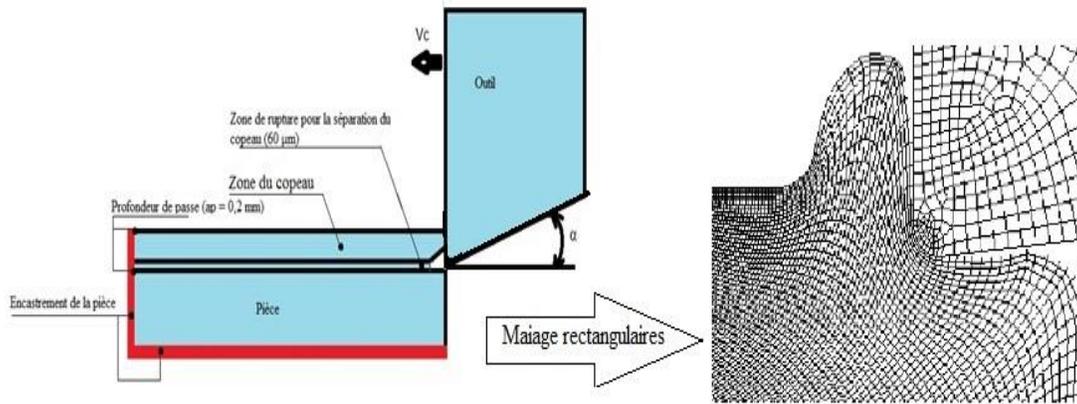


FIGURE 2. Modèle utilisé dans la simulation numérique de la coupe orthogonale.

### 2.2. Modélisation de la pièce à usiner

On a choisie l'acier 42CD4 comme matière de la pièce et le carbure métallique P20 pour l'outil. La pièce à usiner et l'outil sont maillés en un certain nombre d'éléments finis rectangulaires. Le nombre de nœuds pour l'outil est 1378 et pour la pièce est 15920. Le nombre d'éléments pour l'outil est 1301 et pour la pièce est 15701. Dans le but de prendre en compte les échanges thermiques aux interfaces pièce/outil/copeau. Le mouvement relatif de la pièce et de l'outil est obtenu en déplaçant ce dernier à vitesse imposée pour une  $a_p$ . Ces deux paramètres de régime de coupe sont choisis lors des simulations comme suit :  $a_p = 0,2$  mm, et six vitesses de coupe,  $V_c = 1$  m.s-1 (60 m/min) -  $10$  m.s-1 (600 m/min).

### 2.3. Conditions aux limites et chargement

La pièce et l’outil sont modèles déformables: la pièce est fixée par un encastrement à sa base. Sa longueur est de 120 mm et sa hauteur est de 48 mm, (figure 2. ap=0,2mm. Le contact entre l’outil et la pièce usinée est considéré avec  $\mu=0.2$ . Le temps de calcul est 72 h environ et on a arrêté la simulation. Les propriétés du matériau de la pièce AISI 4340 et l’outil présenté dans le tableau 1. [2]. Les propriétés thermo-élasto-plastique de l’outil sont un E 630000 MPa. La loi de comportement de l’outil est définie à partir de la courbe présentée dans la figure 3.

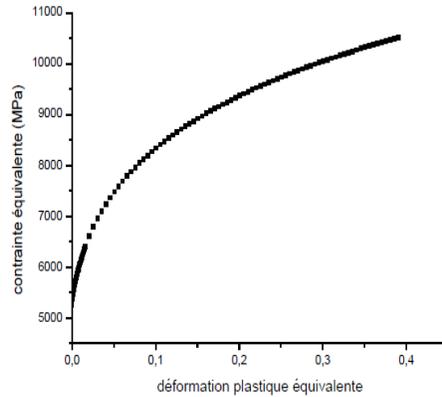


FIGURE 3 . Loi d’écrouissage approchée pour l’outil, [3].

Propriétés mécaniques et thermiques

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	Cp (J kg <sup>-1</sup> C <sup>o</sup> -1)	$\lambda$ (Wm <sup>-1</sup> C <sup>o</sup> -1)	Dilatation thermique ( $\mu\text{m m}^{-1}$ C <sup>o</sup> -1)	Tfus (C <sup>o</sup> )	Tamb (C <sup>o</sup> )
Pièce	7850	205	0.3	475	44.5	13.7	1520	25
Outil	12900	534	0.22	400	50	×	×	25

TABLEAU 1. Caractéristiques du matériau de la pièce et de l’Outil. [4].

2.4.Loi de comportement et d’endommagement de la pièce

La loi de Johnson et Cook [5] a été choisie, dans cette étude, pour représenter le comportement du matériau de la pièce. La contrainte d’écoulement du matériau est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_{eq} = (A + B\epsilon^n) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_{amb}}{T_{fus} - T_{amb}} \right)^m \right) \dots \dots \dots (1)$$

TABLEAU 2 : Paramètres de la loi de Johnson et Cook de l’acier AISI4340 [12].

Constantes	A(MPa)	B(MPa)	n	c	m	$\beta$
Valeurs	792	510	0.26	0.014	1.03	0.9

TABLEAU 3 : Paramètres de la loi d’endommagement de Johnson et Cook de l’acier AISI4340 [12].

Constantes	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>
Valeurs	0.05	3.44	-2.12	0.002	0.61

$$\epsilon_f = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0^p} \right) \right] \left[ 1 + d_5 \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \right] \dots \dots \dots (3)$$

4. RESULTATS

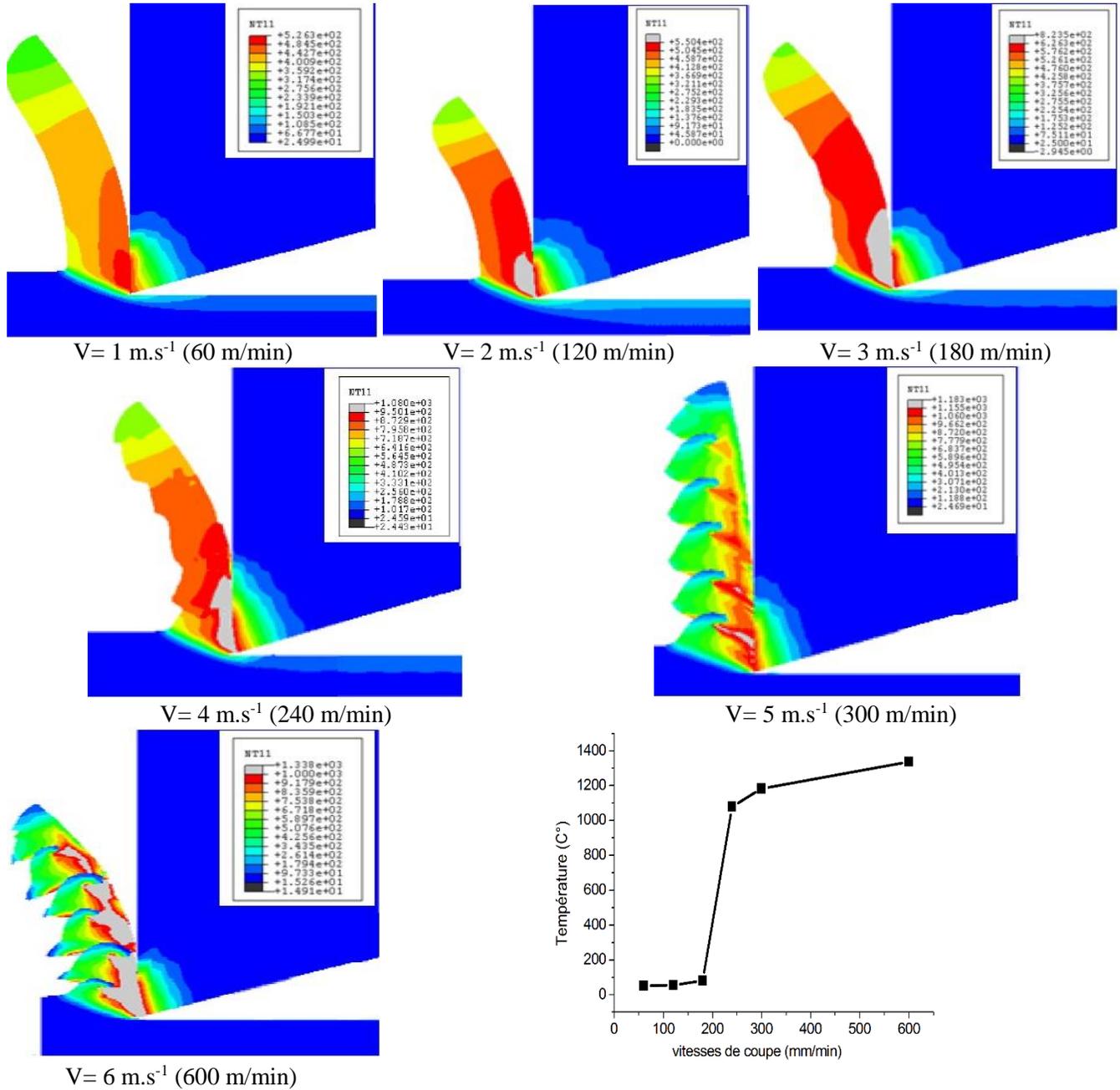


FIGURE 4 : L'évaluation des températures pour les différentes vitesses de coupe.

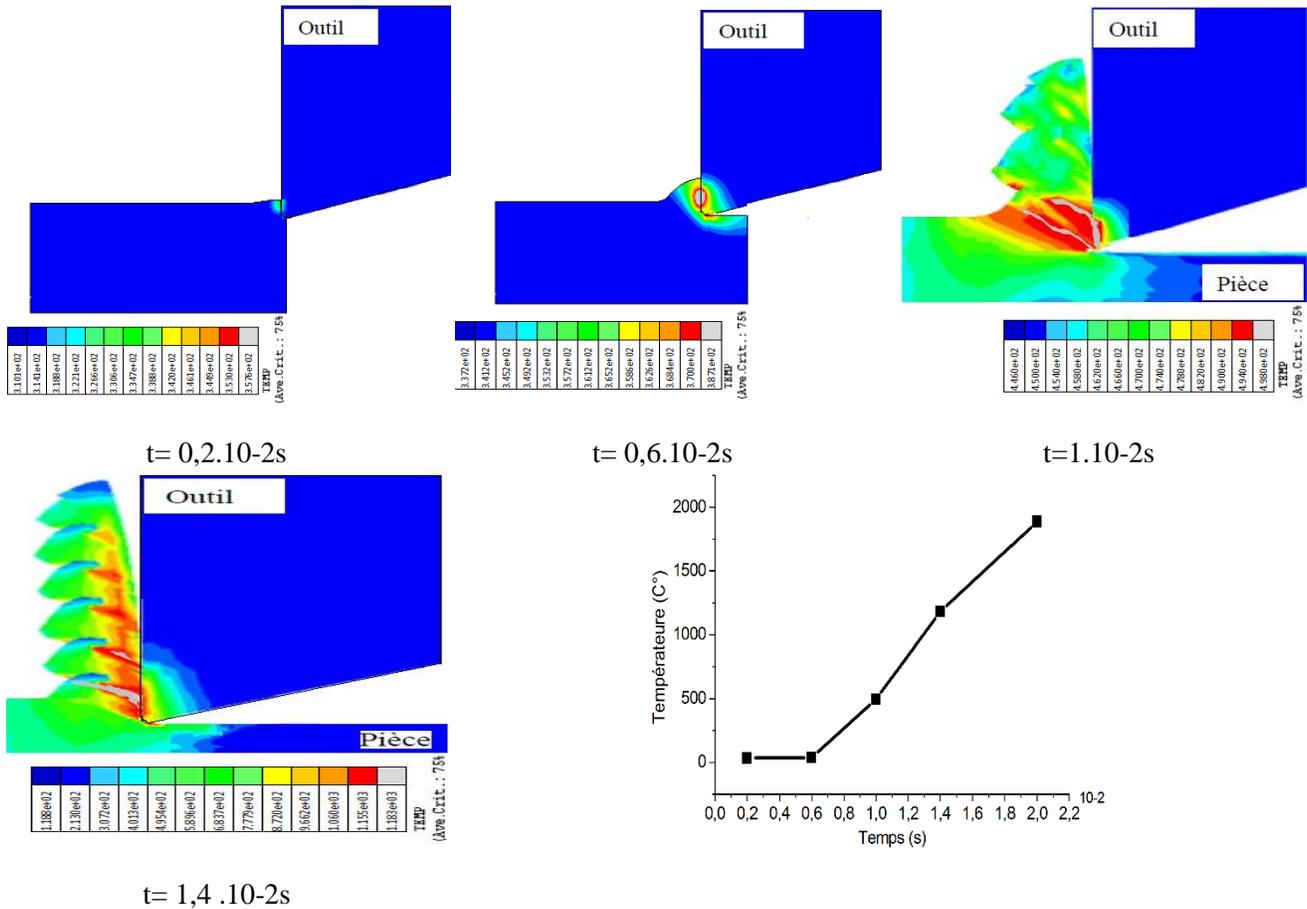


FIGURE 5 : L'évaluation des températures par le temps avec  $V = 5 \text{ m.s}^{-1}$  (300 m/min)

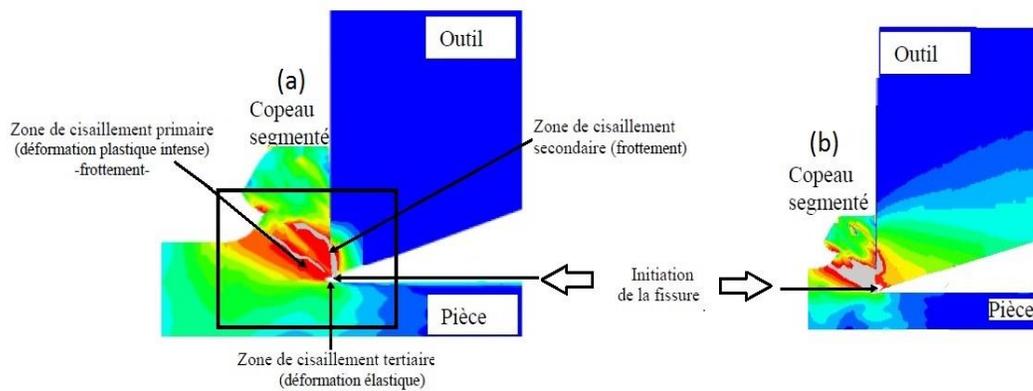


FIGURE 6 : La répartition des sources de chaleurs, Point chaud à l'interface outil-copeau et l'initiation de la fissure avec (a)  $V_c = 5 \text{ m.s}^{-1}$  (300 m/min), temps =  $1.1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$  et (b) temps =  $2.1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

#### 4. DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE

Les résultats des simulations numériques de la coupe orthogonale en fonction de la vitesse de coupe sont illustrés sur les figures 4 et 5. L'analyse de ces résultats montre que la température dans la zone de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et montre aussi une partie de la chaleur générée à l'interface outil-copeau est aussi dissipée dans le corps de l'outil. Nous observons aussi le début de l'émergence

du phénomène de formation de copeau segmenté à partir de l'arrivée de la température  $180^{\circ}\text{C}$  et  $V_c = 240$  m/min. Il est important de noter que malgré la concentration de contrainte en surface libre du copeau pour les vitesses de coupe 1 m.s-1 et 2 m.s-1. Aux vitesses de coupe 3 m.s-1 et 4 m.s-1 on remarque l'initiation de fissure qui semblent tendre vers l'allure d'un copeau segmenté. A partir de la vitesse de coupe 5 m.s-1 (figure 5) on a obtenus un copeau segmenté du fait de l'augmentation de la température dans la zone de coupe. Les résultats présentés sur la figure 6 montrent que la source principale de chaleur est clairement identifiée comme se trouvant dans la bande de cisaillement primaire. Il est alors troublant de constater que le point de maximum de température ne coïncide pas avec cette localisation. Néanmoins, on constate sur la même figure, des sources secondaires de chaleur d'amplitudes inférieures. Le point chaud coïncide avec la fin de l'apport de chaleur, et est maximal à l'interface outil/copeau (figure 6a). Ce point chaud coïncide avec la profondeur maximale de cratère [6]. Dans la figure 6b nous remarquons, la première phase serait l'initiation d'une fissure dans le plan de cisaillement primaire, qui commence à la pointe de l'outil et se propage vers la surface libre du copeau [7]. La propagation de cette fissure par cisaillement serait alors favorisée par les températures élevées constatées au niveau de la pointe de l'outil.

## CONCLUSIONS

Les principales conclusions tirées de cette partie sont :

- ✓ le contact entre la pièce et l'outil produit une température importante qui se dégage avec le copeau.
- ✓ Le terme de conduction présente une influence sur la répartition des températures dans le copeau. En effet ce dernier met en évidence la compétition entre les phénomènes de transports, qui ont tendance à évacuer la chaleur dans le copeau, et de conduction, qui tendent à transmettre la chaleur dans la partie massive de la pièce. Cette compétition entre les deux phénomènes conduit à l'apparition d'un point de maximum de température au niveau de l'interface de contact outil/copeau. Ce point chaud coïncide avec la profondeur maximale de cratère [6].
- ✓ L'utilisation du critère de rupture de Johnson et Cook sur la surface libre du copeau conduit à l'obtention du copeau segmenté [8].

## RÉFÉRENCE

- [1] F. Leroy, « Endommagement des outils de coupe ». Ingénieur Civil des Mines. Techniques de l'Ingénieur, Génie mécanique. B 7042.
- [2] Mabrouki, J.-F. Rigal, A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning, *Journal of Materials Processing Technology* 176 (2006) 214–221.
- [3] Hélène Sydorova, Pratique de la modélisation des processus de coupe avec assistance. Université nationale technique de Donetsk, Ukraine. 8 April 2014.
- [4]. Farouk Mahfoudi, Étude de l'influence de la machine-outil sur les paramètres technologiques en particulier lors de l'usinage des matériaux durs. Thèse de l'obtention du diplôme de doctorat, université Badji-Mokhtar – Annaba. Année 2010.
- [5] G. R. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, strain rates and high temperatures, 7th Int. Symp. Ballistics, 1983, pp. 541-547.
- [6] J. D. P. Velásquez, Etude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V, Thèse de doctorat, Metz, 2007.
- [7] A. Molinari, M. Nouari, Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting, *Wear* 252 (2002) 135–149.
- [8] G. R. Johnson, W. H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, vol. 21, pp. 31–48.