

# Modélisation physique de l'usinage de l'alliage de titane aéronautique Ti-6Al-4V pour la prédiction performante des forces et de la morphologie du copeau

Z. ATMANI<sup>1,2,\*</sup>, B. HADDAG<sup>2</sup>, S. ATLATI<sup>1,2</sup>, M. NOUARI<sup>2</sup>, M. ZENASNI<sup>1</sup>

1. Université de Mohamed I, Equipe de Mécanique et Calcul Scientifique (EMCS), ENSAO, Oujda, Maroc.

2. Université de Lorraine, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, LEMTA CNRS-UMR 7563, Mines Nancy, Mines Albi, GIP-InSIC, 27 rue d'Hellieule, 88100 Saint-Dié-des-Vosges, France.

\*Auteur correspondant. Tel: +212 6 77 25 38 70, E-mail address: z.atmani@ump.ac.ma

## Résumé

La compréhension de la coupe de l'alliage de titane Ti-6Al-4V est un défi très important pour une bonne planification du processus de l'usinage dans l'industrie aéronautique en raison de leur utilisation primordiale dans ce domaine et dans le domaine aérospatiale en générale. Les recherches récentes avancées basées sur l'outil de simulation en physique montrent de grandes capacités pour réduire le coût d'exploitation tout en maintenant les propriétés souhaitées du produit. Ce travail présente une nouvelle approche du modèle physique de matériaux usinés basée sur la physique de la dislocation capable de capturer avec précision l'évolution du comportement thermomécanique de l'alliage Ti-6Al-4V. Le modèle utilise la contrainte mécanique seuil en tant qu'un variable d'état interne dite Mechanical Threshold Stress (MTS) comme base pour les prédictions. La capacité du modèle à prédire les dimensions de la bande de cisaillement est évaluée en comparant la simulation par éléments finis et les résultats expérimentaux.

**Mots clés :** *Usinage, bande de cisaillement, endommagement, alliage de titane, MTS.*

## 1. Introduction

On se basant sur l'examen récent des recherches académiques et de l'état de l'art dans l'usinage des alliages de titane, il est clair que la formation du copeau n'est pas encore élucidée. Différents problèmes liés à la formation des bandes de cisaillement adiabatique et de la rupture positionnée dans le copeau segmentée doit être expliqué. Dans cette étude, nous proposons un modèle basé sur la physique de dislocation pour aider à répondre à ces questions à caractère industriel. Le modèle numérique basé sur les éléments finis est validé par la comparaison avec des résultats expérimentaux. Le modèle est également validé par une comparaison de la longueur de la bande de cisaillement. L'état des contraintes est simulé pour mieux interpréter la morphologie du copeau et le positionnement de la fracture. Enfin, le modèle est utilisé pour étudier le copeau obtenu à différentes conditions de coupe.

## 2. Descriptif expérimental

Les tests de la coupe orthogonale des alliages de titane Ti6Al4V ont été réalisés avec Airbus France sur le site de Bordeaux [1]. Les caractéristiques et les propriétés des matériaux sont présentées dans le tableau 1. L'angle

de coupe est de  $0^\circ$ . Le chanfrein est mesuré à  $-6^\circ$  comme il est montré dans le modèle de la figure 2

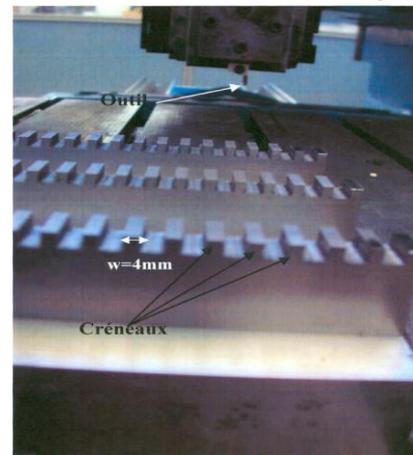


Figure 1. Pièce usinée (Crénneau de 4mm de largeur)

Trois conditions de coupe sont effectuées en fins de cette étude. L'usinage à différentes vitesses de coupe est effectuée.  $V_c = 15$  m / min,  $V_c = 30$  m / min et  $V_c = 60$  m / min. La profondeur de coupe est fixée à  $f = 0,12$  mm. Les forces de coupe sont mesurées à l'aide d'un banc dynamométrique Kistler. Le copeau obtenu est caractérisé en utilisant un microscope optique en termes de morphologie et bande de cisaillement.

## 3. Modélisation physique

### 3.1. Descriptif élément finis

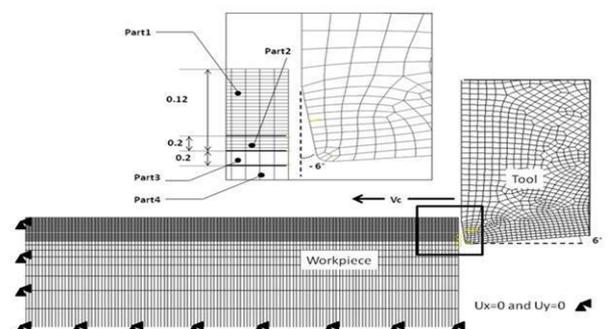


Figure 2. Description du modèle d'éléments finis avec maillage, géométrie de l'outil et conditions aux limites.

Un modèle de coupe orthogonale 2D basé sur l'approche numérique lagrangienne est développé dans le logiciel Abaqus / Explicit, à la fois pour simuler le processus de coupe en utilisant le modèle MTS et la prédiction de segmentation dans le copeau par le couplage MTS-endommagement de Johnson Cook [2]. La formulation lagrangienne a été considérée comme une méthode intéressante pour simuler la formation discontinue de copeaux sous une condition d'état stationnaire Mabrouki et al [3]. Elle permet principalement la simulation avec la nécessité d'un critère de séparation, tel qu'un état de contrainte critique atteint à une distance spécifiée en amont de la pointe d'outil ou un paramètre d'évolution pour la suppression d'éléments. Chaque couche du maillage de la pièce est définie avec un comportement spécifique. Dans la partition 1 'Part1', MTS est prise avec endommagement, en 'Part2', MTS est prise sans endommagement. Cependant, en 'Part3' MTS est prise avec endommagement en utilisant la technique de la suppression des éléments. Enfin, en 'Part4' le modèle MTS est implémenté sans endommagement (voir figure 2).

. Tableau 1. Caractéristiques physique de l'outil/pièce.

Propriétés mécaniques	E(GPa)	G(GPa)	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	T <sub>m</sub> (K)	Cond thermique (W/m k)	Cp (J/kg.k)
Pièce (Ti6AL4V)	110	49.02	0.3	4430	1905	16	670
Carbide de tungstène	534	*	0.22	11900	*	50	400

### 3.2. Comportement physique

Pendant le processus d'usinage, le chargement thermomécanique complexe conduira à une déformation du matériau complexe et à l'évolution de la microstructure. La capacité du modèle à dominer ces changements est donc critique. La précision de la prédiction de la contrainte d'écoulement est fondamentale pour capturer des paramètres de déformation précis. Dans ce travail, nous nous basons sur la prévision de la contrainte seuil pour prédire la variation de l'énergie de dislocation au stade de l'écrouissage de matériau usiné. Pendant de nombreuses années le modèle JC souvent utilisé est a montré une limitation claire en raison de la déformation élevée et la vitesse de déformation utilisée dans les processus d'usinage. Dans cette étude, nous proposons d'intégrer un modèle basé sur la physique de la contrainte de seuil mécanique MTS. Le modèle Kocks-Mecking décrit essentiellement la contrainte d'écoulement du matériau en fonction de la température actuelle T, de la vitesse de déformation et de l'évolution de la 'contrainte seuil' par une décomposition de contraintes additive Da Silva et al [4]. Pour l'application à la déformation à température ambiante de l'alliage Ti-6Al-4V en contrainte uni axiale, on peut supposer que la relation est de la forme :

$$\sigma_y = \sigma_a + S_I(\dot{\epsilon}, T)\hat{\sigma}_I + S_S(\dot{\epsilon}, T)\hat{\sigma}_S + S_D(\dot{\epsilon}, T)\hat{\sigma}_D \quad (1)$$

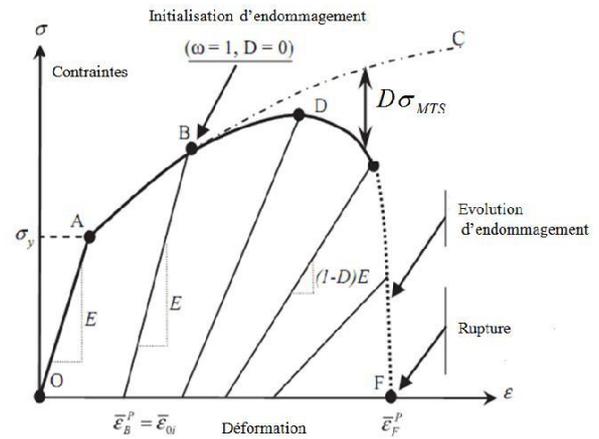


Figure 3. Couplage de la loi MTS avec l'endommagement de JC.

### 3.3. Endommagement

L'initialisation des dommages est décrite par la relation suivante où la contrainte à la rupture du matériau, donnée

$$\bar{\epsilon}_i = [d_1 + d_2 \exp(d_3(P/\bar{\sigma}))] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\bar{\epsilon}_y}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - d_5 \left( \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right) \right] \quad (2)$$

Où  $\bar{\sigma}$  est la contrainte équivalente de von Mises,  $P$  est la pression hydrostatique. Le  $P/\bar{\sigma}$  fait référence à la triaxialité des contraintes. Les coefficients de l'endommagement JC utilisés dans cette étude sont ( $d_1$ : -0,09,  $d_2$ : 0,25,  $d_3$ : -0,5,  $d_4$ : 0,014  $d_5$ : 3,87) tel que rapporté dans les travaux antérieurs de Johnson et Cook [2]. Une étude antérieure par Xue et al [5] de la fracture dans la bande de cisaillement du copeau usinée a conclu que les trois stades de la fracture sont observés. Il a rapporté des preuves expérimentales de la nucléation, la croissance et la coalescence de la fracture dans les bandes. Il a conclu que ces sites sont le lieu de fracture lors de l'usinage de Ti6Al4V.

### 4. Résultats et discussion

Les forces prédites sont comparées avec l'expérience après étalonnage. La procédure d'étalonnage a consisté à utiliser les données expérimentales recueillies à partir de  $V_c = 15\text{m/s}$  et adapter le modèle pour le rendre capable de prédire avec précision, le coefficient de frottement local est de 0.4. Ensuite, les données expérimentales sont mesurées à la moyenne en raison de la segmentation du copeau, certaines variations sont observées. La figure 4 montre les résultats obtenus pour le cas où  $V_c = 60\text{m/min}$ . Il est clair que le modèle était capable de capturer les forces de coupe dans les deux directions. Le modèle de prédiction est également capable de prédire la variation des forces de coupe associées aux phénomènes de segmentation du copeau dans certains cas, elles sont importantes, car on peut observer une variation allant jusqu'à 50% dans certains cas. Cela pourrait être associé plus à une

initiation de rupture dans la bande de cisaillement plutôt que l'apparition de la bande de cisaillement adiabatique. Dans cette étude, une interprétation basée sur la physique de l'initiation de la fracture décrite initialement dans la littérature est discutée.

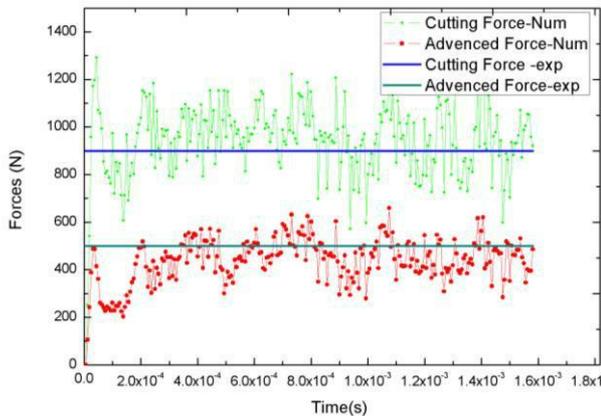
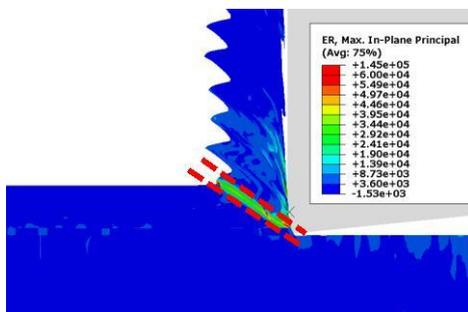


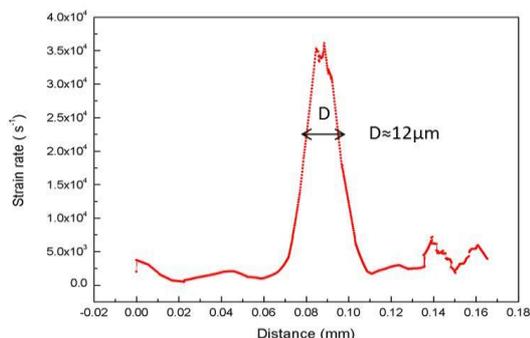
Figure 4. Comparaison entre les forces de coupe prédites et la moyenne des forces mesurées à l'aide du dynamomètre pour la vitesse de coupe  $v_c=60\text{m/min}$  et la profondeur de coupe  $f=0.12\text{mm}$ .

L'une des caractéristiques des bandes de cisaillement dans l'usinage de l'alliage de titane peut-être caractérisée par sa largeur. Dans ce travail, l'image du microscope de la bande de cisaillement est comparée aux résultats simulés obtenus. La figure 6 montre clairement la bande de cisaillement obtenue.

(a)



(b)



(c)

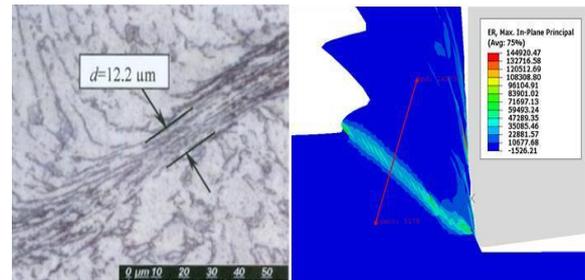


Figure 5. (a) vitesse de la déformation dans la bande de cisaillement, (b) vitesse de la déformation en fonction de la distance, (c) la taille expérimentale de la bande de cisaillement adiabatique pour la vitesse de coupe  $v_c=60\text{m/min}$  et la profondeur de coupe  $f=0.12\text{mm}$ .

## 5. Conclusion

Les résultats montrent une bonne prévisibilité des forces de coupe et de la morphologie du copeau. Le modèle a une grande capacité de prédire exactement la taille de la bande de cisaillement, ensuite le couplage de ce modèle physique avec le modèle de zener-Hollomon peut répondre à d'autres problématiques tel que le changement de la microstructure de la surface usinée. Dans l'ensemble, il est suggéré que le modèle puisse être utilisé pour la planification des processus industrielle complexe.

## Références

- [1] EADS CCR-LAMEFIP ENSAM Bordeaux
- [2] Johnson G. R., and Cook W. H., 1985, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures," Eng. Fract. Mech., 21(1), pp. 31–48.
- [3] Mabrouki, T., Girardin F., Asad, M., Rigal, J.F, 2008. Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351). International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48, 1187-1197
- [4] Da Silva M.G, Ramesh K .T, the rate-dependent deformation and localization of fully dense and porous *ti-6al-4v*, Materials Science and Engineering: Volume 232, Issues 1–2, 31 July 1997, Pages 11-22.
- [5] Xue, Q., Meyers, M. A., and Nesterenko, V. F., 2002, "Self-Organization of Shear Bands in Titanium and Ti-6Al-4V alloy," Acta Mater., 50(3), 575–596.