

# Mise en évidence de l'influence de la loi de comportement sur la génération de la surface d'un copeau lors de la simulation numérique de la coupe orthogonale

PhD. Eng. P. Caestecker\*, PhD. Eng. A. Gavruș\*\*  
and PhD. Eng. E. Ragneau\*\*

\* *Laboratoire des Ingénieries de Fabrication, (LIF),  
ENSAM Lille, 8 bld Louis XIV, 59000 LILLE CEDEX, France*

\*\* *Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM) INSA de  
RENNES, 20, Av. des Buttes de Coësmes, 35043, RENNES CEDEX, France*

## Résumé

*L'objectif de cette communication est de montrer la topologie des copeaux générés lors d'une simulation numérique de la coupe orthogonale en déformation plane pour deux lois de comportements. Cette étude est effectuée pour un acier de type 35 NCD 16, dont les paramètres des deux lois sont identifiés par analyse inverse. La formation d'instabilités géométriques sur la surface du copeau obtenu avec une loi de comportement de type arcsinushyperbolique est ainsi mise en évidence.*

**Mots-clés:** coupe orthogonale, simulation numérique

## 1. Introduction

La modélisation de l'usinage, et notamment dans une configuration simple de coupe orthogonale permettant d'utiliser l'hypothèse de déformation plane, s'est considérablement développée pendant les dix dernières années. La littérature met en évidence deux types de simulations numériques basées sur des chemins d'intégration implicites lagrangiens avec remaillage automatique [1] ou explicites ALE [2].

Les paramètres associés aux lois de comportement sont la plupart du temps identifiés à partir d'essais dynamiques sur des barres d'Hopkinson (test SHBP), avec des échantillons soit cylindriques [4] soit de type « chapeau » [3]. Ce dispositif expérimental permet d'étudier la sensibilité de la variation des contraintes dans des larges gammes de déformation (généralement entre 5 % et 50 %) et de vitesse de déformations ( $10^2 \text{ s}^{-1}$  et  $10^4 \text{ s}^{-1}$ ).

Des résultats récents de simulation numérique du test SHPB, dans une configuration réduite, à l'aide du logiciel FORGE2 de type implicite lagrangien avec remaillage, ont permis de développer une méthode d'identification par analyse inverse [5].

Cette communication utilise les paramètres de la loi de type Johnson Cook [6] et de type arcsinushyperbolique [1], identifiés à partir d'une analyse inverse d'un acier de type 35NCD16 (état doublement recuit). Ces deux lois, avec leurs paramètres respectifs, sont ensuite intégrées dans la simulation de la coupe orthogonale sur le logiciel FORGE2 avec des hypothèses de  $\bar{\epsilon}$  déformation plane. Les résultats de la géométrie des différents copeaux obtenus sont mis en évidence.

## 2. Simulations numériques

### 2.1. Lois de comportement

Le comportement viscoplastique du matériau usiné est introduit par la variation de la contrainte équivalente de Von Mises  $\bar{\sigma}$ , fonction de la vitesse équivalente de déformation  $\dot{\bar{\epsilon}}$ , de la déformation plastique cumulée  $\bar{\epsilon}$  et de la température  $T$  en utilisant la forme multiplicative de la loi de Johnson Cook (Cf. Equation 1), et de sa forme transcendantale (Cf. Equation 2), présentées ci-dessous.

Les paramètres du matériau étudié ont été identifiés par analyse inverse (Tableau 1)

$$\bar{\sigma} = (A + B \bar{\varepsilon}^n) \left( 1 + D \cdot \text{Ln} \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{fusion} - T_0} \right)^m \right) \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = (A + B \bar{\varepsilon}^n) \left( \text{Arcsinh} \left[ \frac{e}{2} \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^D \right] \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{fusion} - T_0} \right)^m \right) \quad (2)$$

**Tableau 1** : Paramètres de la loi de comportement utilisée pour les simulations [5]

Modèle	A [MPa]	B [MPa]	n	D	$\dot{\varepsilon}_0$
<b>Johnson Cook (Loi I)</b>	1010.15	444.25	1.615	0.229	238.235
<b>Arcsinushyperbolique (Loi III)</b>	980.40	373.08	1.102	0.206	205.277

## 2.2. Modèle numérique de la coupe orthogonale

L'opération d'usinage en coupe orthogonale considérée est simulée avec le logiciel implicite Forge2® (version V2.9) dans le cadre de l'hypothèse de déformations planes.

Le modèle utilisé est d'une taille beaucoup plus importante que celle nécessaire pour la modélisation de la coupe à l'échelle mésoscopique. Cette astuce permet de mieux stabiliser l'équilibre mécanique de l'ensemble. En permettant un maillage plus grossier dans les zones plus éloignées de la formation du copeau, on fait un meilleur compromis stabilité-coût de calcul. Le maillage initial de la pièce est au départ assez peu dense; 902 nœuds et 409 éléments triangulaires iso paramétriques à 6 nœuds. Pendant la simulation, un remaillage

plus fin à l'aide de 4 boîtes spécifiques, autour des zones de cisaillement primaire, secondaire, régulant la finesse du maillage. Le maillage final approche le nombre total de 2600 nœuds et 1250 éléments.

Les conditions cinématiques et géométriques de l'opération (outil et conditions de coupe) sont présentées sur la Figure 1.

Des caractéristiques élastiques et thermiques des matériaux de la pièce et de l'outil sont définis dans le Tableau 3. Les données thermiques sont définies par la chaleur massique  $C_p$ , la conductivité  $\lambda$ , les coefficients de transferts thermiques de conduction  $h_{cd}$ , de convection  $h_{cv}$  et l'émissivité  $\varepsilon$ . Les valeurs numériques de ces coefficients ont été choisies dans la littérature [7]. Le contact outil-pièce est modélisé avec une loi de coulomb à coefficient constant.

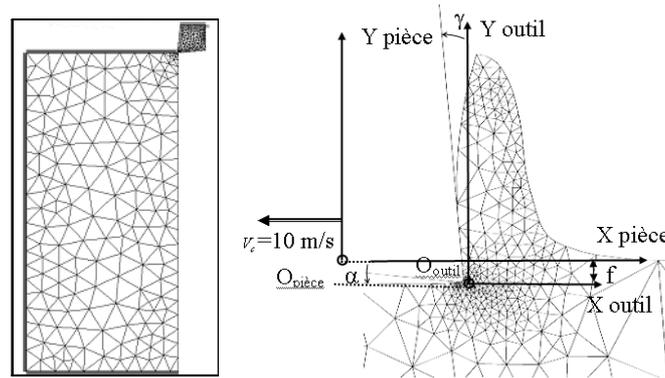


Figure 1. Configuration de la modélisation de coupe, copeau en formation avec les paramètres de la coupe orthogonale et détail sur la zone en bout d’outil.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des conditions de coupe

Vitesse de coupe $V_c$ (m/s)	Profondeur de coupe $a_p$ (mm)	Angle de coupe $\gamma$ (deg)	Angle dépeuille $\alpha$ (deg)	Rayon d’acuité $R_\beta$ (mm)
10	0.2	6	5	0.06

Tableau 3 : Données thermomécaniques générales de la pièce et de l’outil

	Constantes Elastiques		Constantes thermiques						Frottement Coulomb
	E [GPa]	$\nu$	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [JKg/C°]	$\lambda$ [W/mC°]	$h_{cd}$ [W/C°]	$h_{cv}$ [W/C°]	$\epsilon$	$\mu$
<b>Pièce</b>	210	0.3	7890	480	39	6000	8.	0.7	0.23
<b>Outil</b>	$8.10^5$	0.3	11400	376	35	6000	8.	0.7	0.23

2.3. Résultats de simulation: un copeau bien différent.

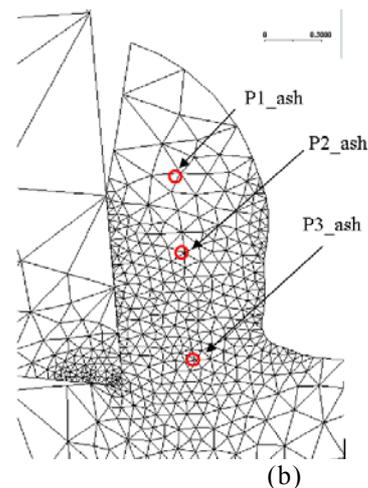
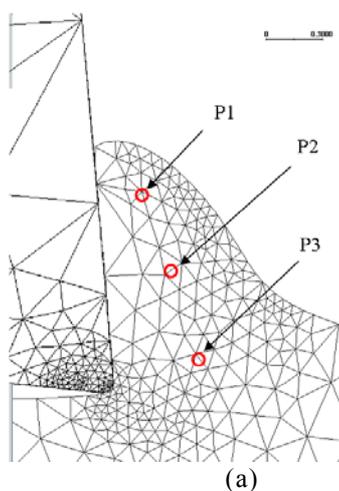


Figure 2. Maillage et géométrie du copeau en formation pour la loi I (a) et la loi III (b) à l’instant  $t=0.27ms$ .

L'étude porte sur l'aspect du copeau en formation pour les deux simulations. Toutes les comparaisons se font au temps  $t=0.27$  ms, ce qui correspond à un déplacement de l'outil de 2.7 mm.

La figure montre un agrandissement de la zone permettant de mettre en évidence la grande différence de forme du copeau.

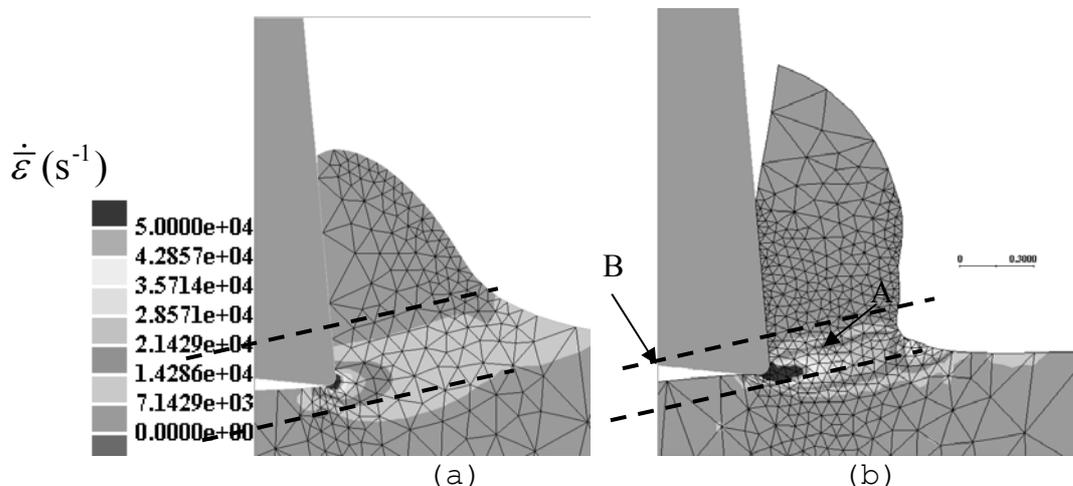
Sur cette figure on constate une forte différence au niveau de l'épaisseur, de la géométrie des surfaces de contact. Concernant l'épaisseur du copeau pour la loi I, s'il est difficile d'en donner une dimension précise, on

peut constater néanmoins, que le copeau semble plus difficile qu'avec la loi II.

Le matériau offre une plus grande rigidité dans cette gamme de sollicitation. De fait, l'angle de cisaillement primaire pour la loi I n'est pas mesurable, mais semble néanmoins plus important que pour la loi II.

### 2.4 Vitesses de déformation.

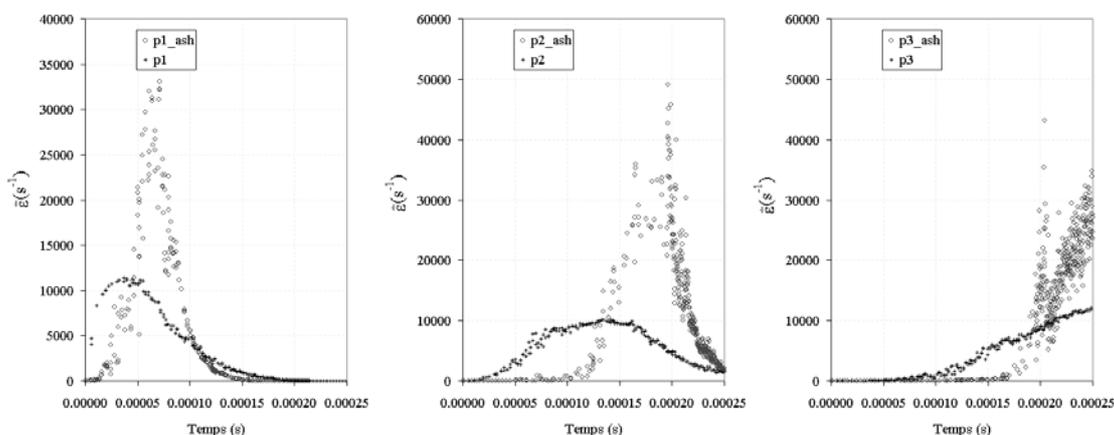
La cartographie des vitesses de déformation à l'instant  $t=0.27$  ms de la simulation de la coupe orthogonale des deux lois est présenté sur la Figure 3 ci dessous.



**Figure 3.** Cartographie de la vitesse de déformation équivalente à  $t=0.27$  ms pour la loi I (a) et la loi II (b)

La cartographie des vitesses de déformation permet d'observer que la loi III génère une bande de vitesse de cisaillement presque fermée pour des vitesses de déformation supérieures à  $3.104s^{-1}$ ; zone dans laquelle les vitesses de déformation sont maximales.

Dés que l'on s'éloigne transversalement de cette bande, la vitesse de déformation chute brutalement, alors que cette répartition semble plus « douce » pour la loi I.



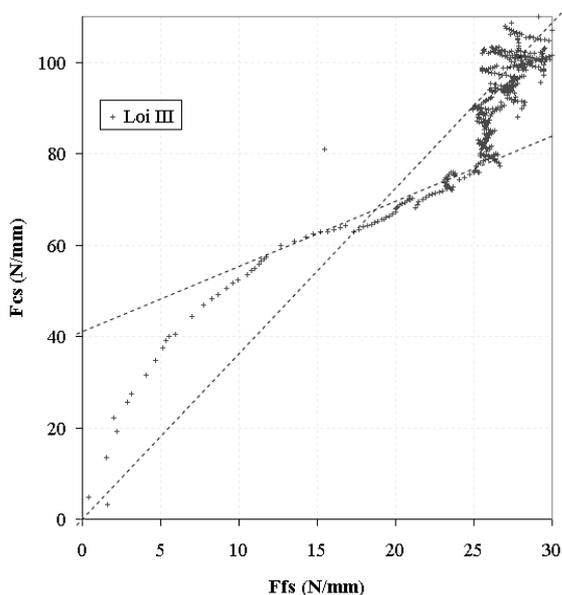
**Figure 4.** Comparaisons des évolutions de aux points P1, P2 et P3 (resp. P1\_ash, P2\_ash et P3\_ash) pour les deux lois I et II.

Figure 4 présente la comparaisons des évolutions en fonction du temps de aux points P1, P2 et P3 (resp. P1\_ash, P2\_ash et P3\_ash) pour les deux lois I et II. Elle permet de constater que la loi II permet aussi un plus fort gradient de vitesse de déformation dans le temps que la loi I. De plus, on remarque l'existence de deux pics de vitesses de déformation dans la phase croissante de vitesse du point P2\_ash. On retrouve ce phénomène dans le cas du point P3\_ash (premier pic avant le pic maximum pas encore atteint).

### 3. Analyse sur les efforts de coupe, instabilités de surfaces.

Afin de conclure sur l'influence des deux lois sur la simulation de l'usinage en coupe orthogonale, une comparaison des efforts de coupe est nécessaire.

Le modèle développé n'est pas prédictif en ce qui concerne les efforts de coupe. Le modèle est à deux dimensions, donc la largeur de coupe n'est pas prise en compte dans la simulation. On constate que pour la loi I, l'effort est uniformément croissant, alors que la loi II semble faire stagner l'effort spécifique de coupe aux alentours de la valeur de 100 N/mm.



(a)

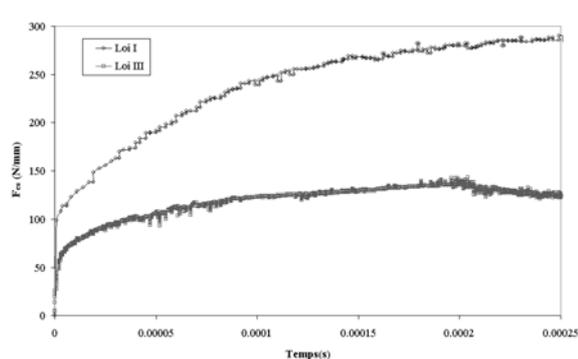
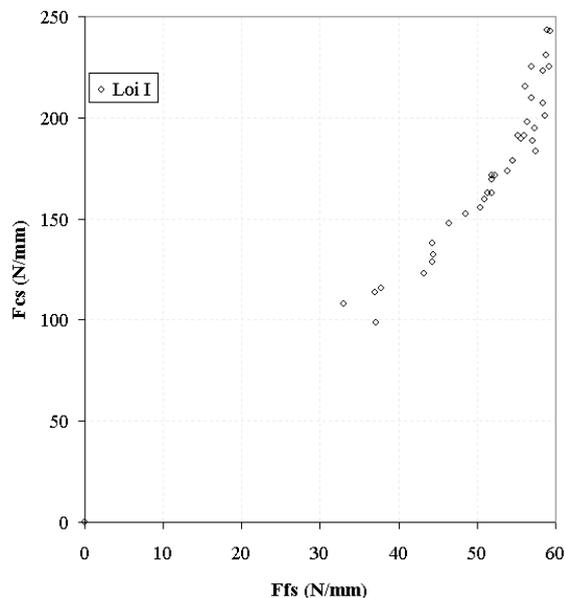


Figure 5. Effort spécifique de coupe en N/mm pour les deux lois identifiées I et III.

Cette tendance s'explique par la longueur spécifique de contact entre l'outil et le copeau, au niveau de la zone de cisaillement secondaire.

Avec des niveaux de contraintes, de déformations de vitesses de déformation et de température équivalente, cette longueur est plus importante pour la loi I que pour la loi II avec les mêmes conditions de contact dans les deux cas.

Cet aspect est confirmé par la comparaison de l'évolution de l'effort de coupe spécifique  $F_{cs}$  en fonction de l'effort d'avance spécifique  $F_{fs}$  montrée sur la Figure 6.



(b)

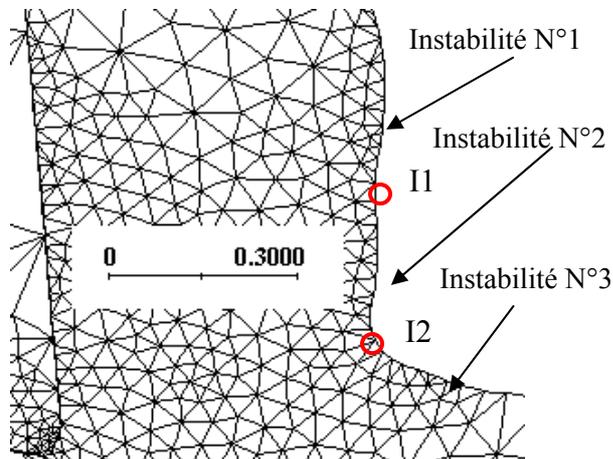
Figure 6. Résultats des simulations numériques de l'effort de coupe spécifique  $F_{cs}$  fonction de l'effort d'avance spécifique  $F_{fs}$

La forme de la courbe de la loi III est très similaire à celle trouvée dans la littérature

[9] montrant l'évolution typique de la courbe

pour la formation de copeau festonné, obtenue à partir de résultats expérimentaux.

Cette constatation est à rapprocher des petites instabilités géométriques observées au niveau de la surface du copeau avec la loi III, visibles sur la Figure 7.



**Figure 7.** Instabilités géométriques sur la surface du copeau en formation.

### Conclusion

La figure 7 montre un zoom de la zone d'instabilités géométriques. Les instabilités 1 et 2 sont déjà formées. L'instabilité N°3 est en cours de formation sur la surface libre de la pièce. Les points I1 et I2 sont deux nœuds de ces instabilités.

De plus, les concentrations « parasites » de vitesses de déformation observées couplée avec des phénomènes d'adoucissement thermique est favorisé par la loi III et pourrait permettre l'apparition de phénomènes de

glissement localisés, et donc de festons dans certain cas ; ce qui rejoint l'hypothèse proposée par Hamann et Meslin [9].

### References

- [1] **Gavrus A., Ragneau E., Caestecker P.** - *Analysis of a constitutive model for the simulation of dynamic forming processes*, International Journal of Forming Processes, s, Vol 6, N°1, pp 33-52, 2003.
- [2] **Pantalé O., Rakotomalala R., Touratier M.** - *An ALE Three-Dimensional Model of Orthogonal and Oblique Metal cutting processes*, Int. Journal of Forming Processes, Vol 1, N°3, pp371-389, 1998.
- [3] **Deltort B., Neme A., Tanguy B.** - *A new specimen geometry for compression Hopkinson bars*, Journal of Physics IV 7, pp 265-270, 1997.
- [4] **Parry D. J., Dixon P. R., Hodson S., Al-Maliky N.** - *Stress equilibrium effects within Hopkinson bar specimens*, Departement of Physics, Loughborough, 1994.
- [5] **Gavrus A., Caestecker P., Ragneau E., Davoodi B.** - *Analysis of the Dynamic SHPB Test Using the Finite Element Simulation*, Journal of Physics IV 110, pp 353-358, 2003.
- [6] **Johnson G.R. and Cook W.H** - *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*, 7th Int. Symposium on Ballistics, Hague, pp. 541-547, 1983.
- [7] **Fourment L., Bouchard P.O** - *Numerical simulation of chip formation and crack propagation during non-steady cutting processes*, Int. Journal of Forming Processes, Vol 3, N°1-2, pp59-76, 2000.
- [8] **Chenot J.L., Bellet M., Fourment L., Massoni E., Montmitonnet P.** - *Séminaire de plasticité. Eléments finis et mise en forme des métaux Tome 2*, CEMEF, chapitre 8, pp15-28, 1994.
- [9] **Meslin F., Hamann J.C.** - *Definition of constitutive equations and friction by inverse method and machining tests*, Int. Workshop on friction and flow stress in cutting and forming, pp 135-157, 2000.

### ABSTRACT

The goal of this paper is to analyse the topology of the shaving generated during a numerical simulation of the orthogonal cutting using plane deformation hypothesis, for two different behaviour laws. This study is made for a special steel of 35 NCD 16 and the identified parameters are obtained from an inverse analysis. Shape instability of the shaving surface is obtained for an arcsinushyperbolic law.

### RESUMAT

Scopul acestei lucrări este de a arata topologia așchiilor generate în urma unei simulări numerice a așchierii ortogonale în deformații plane, pentru două legi de comportare. Acest studiu este efectuat pentru un oțel special de tip 35 NCD 16, parametrii de comportare fiind identificați prin analiza inversă. Formarea instabilităților geometrice pe suprafața așchiei este obținută pentru o lege de comportare de tip arcsinushyperbolic.