

# Stratégie numérique et expérimentale pour la maîtrise de l'Usinage à Grande Vitesse

M. WATREMEZ<sup>a 1</sup>, K. LE MERCIER<sup>a</sup>, Y. SENECAUT<sup>a</sup> et L. DUBAR<sup>a</sup>

a. LAMIH, CNRS UMR 8201, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Le Mont Houy, 59313 VALENCIENNES CEDEX 9, France

1. michel.watremez@univ-valenciennes.fr

## Résumé :

*L'usinage à grande vitesse présente de nombreux avantages comparé à l'usinage conventionnel mais reste soumis aux contraintes économiques et écologiques. L'optimisation des paramètres de coupe nécessite de développer des approches numériques perspicaces de l'interface outil-copeau. Cela impose de déterminer précisément le comportement rhéologique des antagonistes et d'établir des modèles de frottement objectifs.*

*Il est ici proposé de déterminer une loi de frottement à paramètres multiples au moyen de deux tribomètres spécifiques. La méthodologie proposée utilise des modèles numériques des deux types d'essais tribologiques. La réalisation de nombreux essais permet d'estimer une loi de frottement dépendante des conditions locales dans le contact. Un modèle éléments finis de la coupe orthogonale à deux dimensions est développé avec le logiciel Abaqus Explicit en utilisant une formulation ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). Ce modèle éléments finis peut alors prédire la formation des copeaux, les températures d'interface, les longueurs de contact et les forces de coupe.*

*Il est finalement montré dans cette étude qu'il est nécessaire de prendre en compte une loi de frottement à paramètres multiples qui tient compte des pressions, températures et vitesses de glissement locales pour aboutir à une simulation numérique objective de l'usinage à grande vitesse.*

## Abstract :

*High-speed machining is submitted to economical and ecological constraints. Developments of numerical approaches to simulate accurately high-speed machining process are therefore necessary. To get this purpose, rheological behavior of both antagonists and representative friction models at tool-chip interface has to be studied as encountered during high-speed machining process.*

*This paper proposes a new approach to characterize friction behaviour at the contact interface and intends to formulate an empirical friction law depending on local interfacial variables like contact pressure, interfacial temperature and sliding velocity. Two specific devices are designed to carry out several tests. A two-dimensional finite element model of orthogonal cutting is developed with Abaqus/explicit software. An Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation is used to predict chip formation, temperature, chip-tool contact length, chip thickness, and cutting forces.*

*Finally, it is shown in this study that it is necessary to take into account a multi-parameters friction law depending on local pressures, temperatures and sliding velocities into the interface to improve numerical simulation of high-speed machining.*

## Mots clefs : lois de frottement, tribologie, formulation ALE, usinage grande vitesse

### 1 Introduction

Comme toute autre technique de production, l'Usinage à Grande Vitesse est soumis à de fortes contraintes économiques et écologiques. L'optimisation du processus de la coupe doit permettre d'augmenter la productivité, de diminuer l'usure des outils, d'usiner écologiquement en limitant la quantité des fluides de coupe et de maîtriser l'état résiduel des contraintes dans la pièce. Les modélisations théoriques et les simulations numériques de la coupe restent aujourd'hui insuffisantes et l'optimisation des procédés passe donc souvent par une démarche empirique basée sur le savoir-faire. Actuellement, la plupart des modèles numériques de l'usinage utilisent une relation de type Coulomb pour décrire les phénomènes de frottement à l'interface outil-copeau. Cependant, à la pointe de l'outil et sur la face de coupe, les fortes pressions d'une part, et les grandes vitesses de glissement d'autre part, activent des phénomènes physiques tout à fait spécifiques. Pour étudier plus précisément ces phénomènes, des plateformes de tribométries à grande vitesse et à haute température sont utilisées. Celles-ci permettent d'obtenir des données expérimentales de contact représentatives de l'UGV. Ces données tribologiques vont permettre de définir une loi d'interface en fonction des paramètres de contact tels que la pression de contact, la température d'interface et la vitesse de glissement locale.

### 2 Caractérisation expérimentale du frottement

Les travaux sur les nombreux dispositifs dédiés à la caractérisation du frottement [1, 2, 3, 4, 5, 6] montrent qu'il est important d'utiliser un tribomètre adapté aux conditions expérimentales observées. L'originalité du travail consiste à séparer et à étudier le contact outil-copeaux en 2 zones (Zone de Cisaillement Primaire et Zone de Cisaillement Secondaire) (Fig. 1).

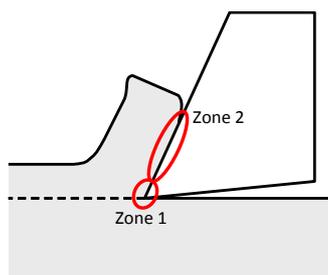


Fig. 1. Séparation de l'étude de l'interface outil-copeau en deux zones.

La première zone (ZCP) est étudiée à l'aide de l'UST (Upsetting Sliding Test) pour de basses vitesses de glissement. Cet essai permet de simuler expérimentalement des pressions de contact jusqu'à 2 GPa, des températures d'interfaces supérieures à 1200 °C et des vitesses de glissement maximales de 0,5m.s<sup>-1</sup>.

La seconde zone (ZCS) où les vitesses de glissement sont beaucoup plus importantes fera l'objet d'une seconde étude sur le HST (High Speed Tribometer). Ce dispositif permet de caractériser le contact outil copeau pour des pressions et des températures élevées avec des vitesses de glissement pouvant aller jusqu'à 1,7 m.s<sup>-1</sup>.

## 2.1 Méthodologie expérimentale

A partir d'un modèle éléments finis de coupe orthogonale (Fig. 2) les caractéristiques du contact outil-copeau peuvent être récupérées. Les dispositifs d'essais expérimentaux (UST et HST) permettent de simuler ces variables de contact local. Ensuite, un modèle numérique de l'essai expérimental (UST ou HST) permet de déterminer les paramètres d'entrée pour réaliser chaque test. Celui-ci permet d'obtenir des forces normales et tangentielles.

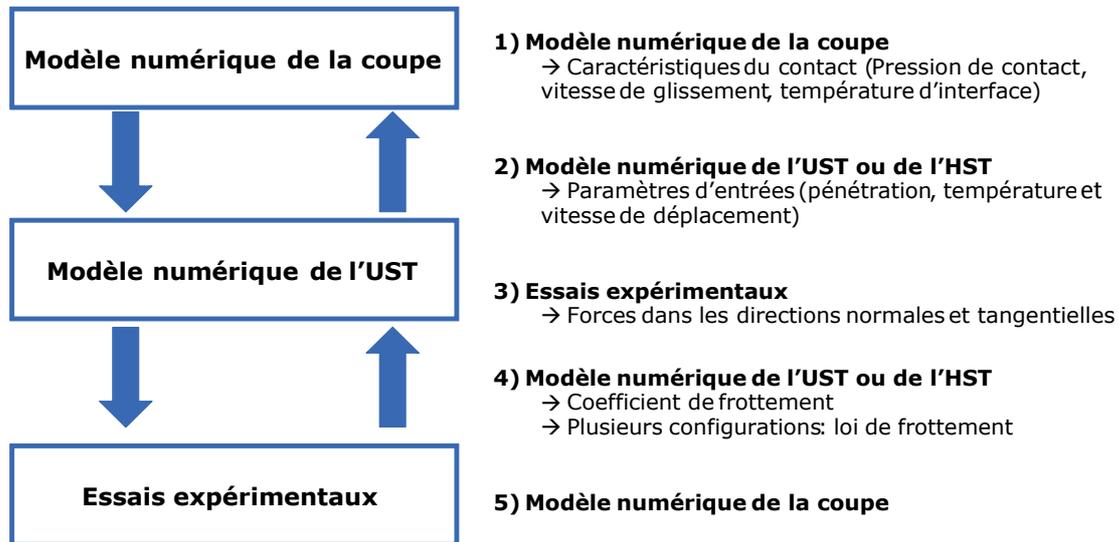


Fig. 2. Méthodologie d'analyse des résultats expérimentaux

Le coefficient de frottement est déterminé par le modèle numérique de l'essai en utilisant une méthode inverse. Cette méthodologie est répétée pour plusieurs configurations et permet d'obtenir des données de friction en fonction de la vitesse de glissement, de la température et de la pression de contact.

## 2.2 Caractérisations expérimentales du frottement

L'Upsetting Sliding Test (UST) est utilisé pour simuler les conditions de contact spécifiques de la zone d'interface proche de l'arête de coupe. Ce dispositif (fig .3) est composé d'une partie mobile et d'une partie fixe installées sur une machine de traction standard. L'échantillon est placé sur un support spécial V-bloc et est totalement serré.

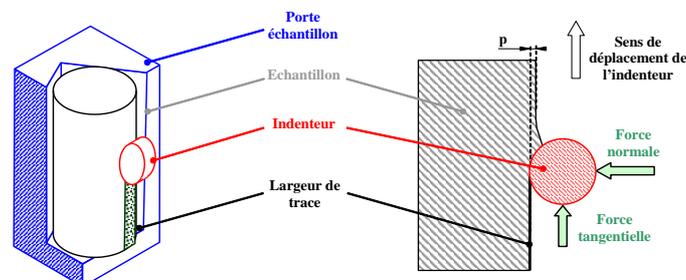


Fig.3. Principe de l'Upsetting Sliding Test (UST).

La partie mobile permet d'emporter l'indenteur avec une pénétration relative  $p$  dans l'échantillon. L'échantillon est chauffé à l'aide d'un inducteur. Pendant l'essai, le contacteur pénètre l'échantillon et

coulisser le long de sa surface à une vitesse de glissement constante pour générer une trace de frottement résiduel. Les configurations pour étudier les influences de la vitesse de glissement, de la pénétration et de la température de l'échantillon sur le coefficient de frottement sont proposées dans le Tableau 1. Pour chaque configuration, trois essais sont réalisés de manière à pouvoir vérifier leur reproductibilité.

Tableau 1 : Synthèse des configurations d'essais effectués pour un acier AISI 1045.

Numéro de configuration	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pénétration ( $\mu\text{m}$ )	80	80	100	100	80	80	100	100	120	120	120
Vitesse ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	12	24	12	24	12	24	12	24	3,6	12	24
Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	377	377	377	377	477	477	477	477	677	677	677

La figure 4 représente les résultats en termes de forces normales et tangentielles et températures d'interfaces pour les trois essais de la configuration 6. La zone stationnaire permet de faire une corrélation avec les modèles numériques.

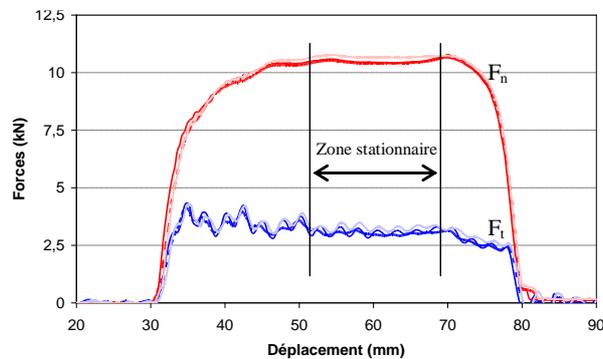


Fig. 4. Résultats expérimentaux pour la configuration 6 ( $80\mu\text{m}$ ,  $24\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  et  $477^{\circ}\text{C}$ ).

Une analyse profilométrique permet de récupérer le profil de la surface frottée et un modèle éléments finis 3D utilisant une formulation A.L.E a été développé (fig. 5). L'échantillon est modélisé à l'aide de deux surfaces eulériennes qui permettent à la matière de se déplacer d'une surface à l'autre au travers d'un domaine défini. L'outil est considéré comme indéformable et est modélisé à l'aide d'un corps rigide fixe. La loi rhéologique de comportement est prise en compte à l'aide d'un modèle de Johnson-Cook. Des travaux précédents décrivent la totalité du modèle utilisé [7]. Le frottement à l'interface outil-copeau est modélisé par un coefficient de frottement de type Coulomb et est optimisé à l'aide de plusieurs simulations.

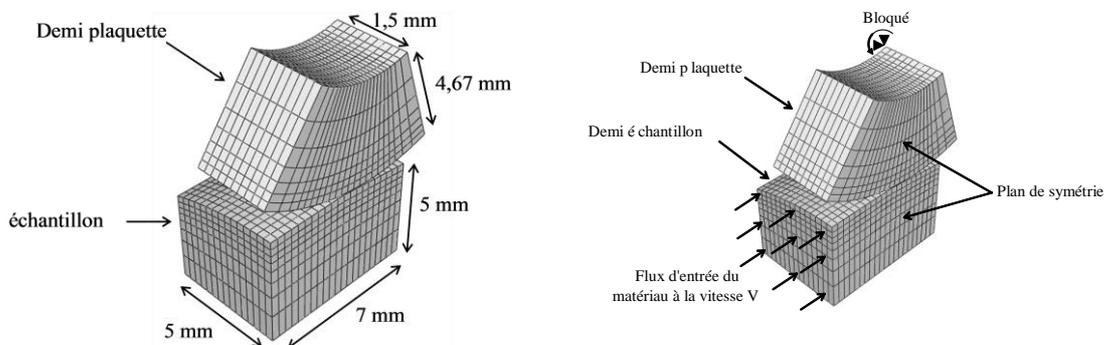


Fig. 5. Description du modèle éléments finis de l'UST.

A titre d'exemple, le coefficient de frottement optimal pour la configuration 6 est égal à 0,24. Pour cette configuration, une pression moyenne de 1Gpa, une température moyenne de 607°C et une vitesse de glissement moyenne de 20,4m.min<sup>-1</sup> sont associées à ce coefficient de frottement (Fig.6).

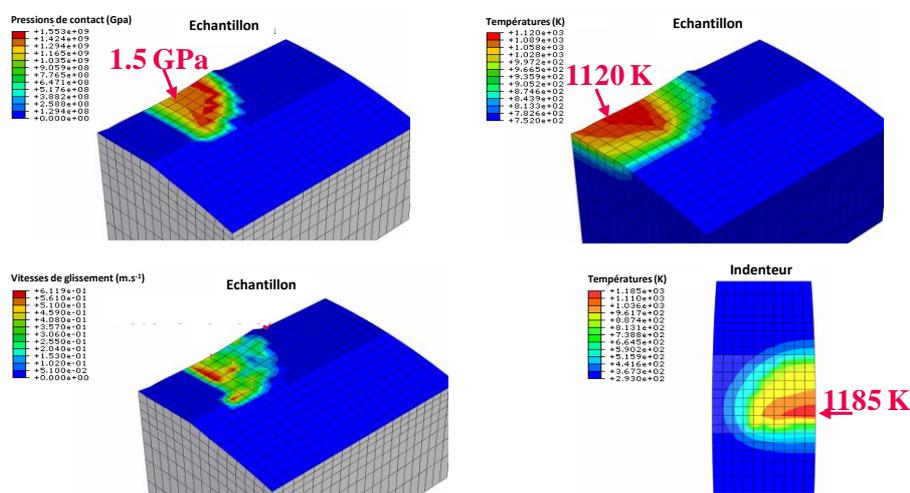


Fig. 6. Analyses des variables locales d'interfaces pour la configuration 6.

L'essai HST est disposé sur une machine d'usinage grande vitesse Siemens MT01 et permet d'atteindre des vitesses de rotation jusqu'à 15000tr.min<sup>-1</sup> pour une puissance nominale de 41kW. L'essai est effectué en une seule passe sur l'échantillon. L'outil est fixe et la bague est en rotation (Fig. 7). L'outil est retiré avant que l'échantillon n'ait fait un tour, le but étant de ne pas dégrader la trace effectuée par celui-ci lors du premier passage.

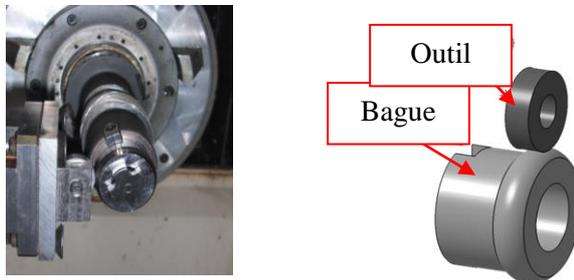


Fig. 7. Principe de l'High Speed Tribometer (HST).

La méthodologie d'exploitation est identique à celle utilisée pour les essais HST. Après essai, la pénétration effective de l'indenteur et la largeur de la trace sont déterminées par analyse profilométrique. Un modèle 3D éléments finis sous ABAQUS/Explicit est associé à cet essai (Fig. 8).

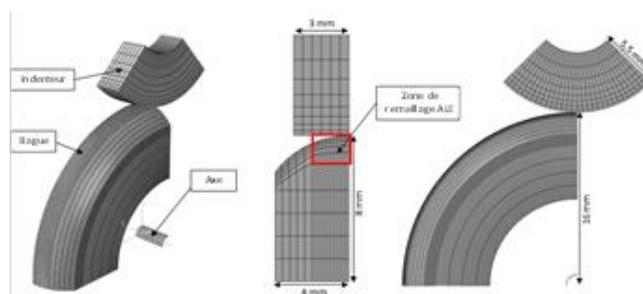


Fig. 8. Description géométrique du modèle.

## 2.3 Identification d'une loi de frottement à paramètres multiples

A partir de l'ensemble des résultats obtenus sur les deux dispositifs, une loi de frottement dépendante de la température, de la pression de contact et de la vitesse de glissement peut être formulée :

$$\mu = c_1 \cdot \sigma_n^{c_2} \cdot V_s^{c_3} \cdot T_{int}^{c_4} \quad (1)$$

avec  $\sigma_n$  la pression de contact interfaciale,  $V_s$  la vitesse de glissement locale,  $T_{int}$  la température interfaciale et  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$  des constantes ayant des dimensions physiques. Les coefficients  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$  sont identifiés par une méthode de minimisation des écarts moindres carrés (tableau 2)

Tableau 2 : Constantes identifiées à hautes vitesses et basses températures

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
3.141	0.537	-0.621	-2.114

Lorsque la vitesse de glissement augmente, le coefficient de frottement a tendance à diminuer. Le même phénomène est observé pour une élévation de la température. A l'inverse, le coefficient de frottement augmente lorsque la pression de contact croît.

## 3 Exploitation et analyse des résultats

### 3.1 Modèle numérique de coupe orthogonale

Un modèle par éléments finis à deux dimensions de la coupe orthogonale et avec une formulation de type ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) est développé sur le logiciel Abaqus/Explicit. Seule la zone de formation du copeau est maillée. L'outil a un rayon d'arête de 50 $\mu$ m et est modélisé comme étant un corps rigide avec une conductivité thermique.

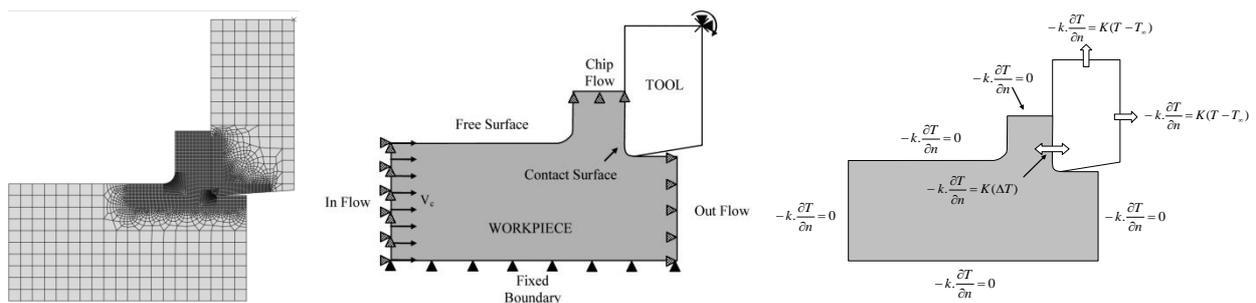


Fig. 10. Maillage initial et conditions aux limites du modèle numérique [7].

La figure 9 représente les conditions aux limites thermiques et en déplacements appliquées à la pièce et à l'outil. L'entrée de la pièce (In Flow), la sortie (Out Flow) et la sortie de copeau (Chip Flow) sont des surfaces eulériennes alors que toutes les autres surfaces sont lagrangiennes. La température de l'outil et de l'éprouvette est numériquement initialisée à 20°C. Pour le transfert de chaleur entre la pièce et l'outil, le contact outil-copeau est considéré comme thermiquement parfait. Une conductivité thermique élevée de 10<sup>6</sup>°CW<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> est appliquée dans le contact. Les conditions d'essais expérimentales pour les modèles numériques sont données dans le tableau 3.

Tableau 3 : Conditions de référence pour les modèles numériques

Matériau de la pièce	AISI 1045
Matériau de l'outil	Carbure non revêtu
Vitesses de coupe	40 et 64m.min <sup>-1</sup>
Profondeurs de passe	0,1, 0,2, 0,3 et 0,4mm
Largeur de passe	3mm
Angle de coupe	0°
Angle de dépouille	4°
Frottement de Coulomb	0,4

L'ensemble du modèle est développé sur Abaqus/Explicit (propriétés des matériaux et implémentation de la loi à paramètres multiples à partir d'une routine) et décrit dans d'autres travaux [7,8].

### 3.2 Analyse des résultats

La figure 10 résume les résultats de simulation numérique obtenus avec un coefficient de frottement égal à 0,4 (en Blanc sur la figure 10) et avec la loi de frottement identifiée (en gris sur la figure 10). Ces simulations sont comparées aux résultats expérimentaux (en noir sur la figure 10) menés par Micari [9] et réalisés avec une vitesse de coupe de 100m.min<sup>-1</sup>, une profondeur de passe de 0,1mm, une largeur de coupe de 3mm et une température initiale de 20°C. Cette comparaison est effectuée en termes de longueur de contact outil-copeau, d'épaisseur de copeau, d'effort normal et d'effort tangentiel. La loi à haute vitesse n'améliore pas les résultats obtenus par un coefficient de frottement constant en termes d'épaisseur de copeau et de longueur de contact mais elle a une influence positive sur les efforts normaux (gain de 11%) et tangentiels (gain de 24%).

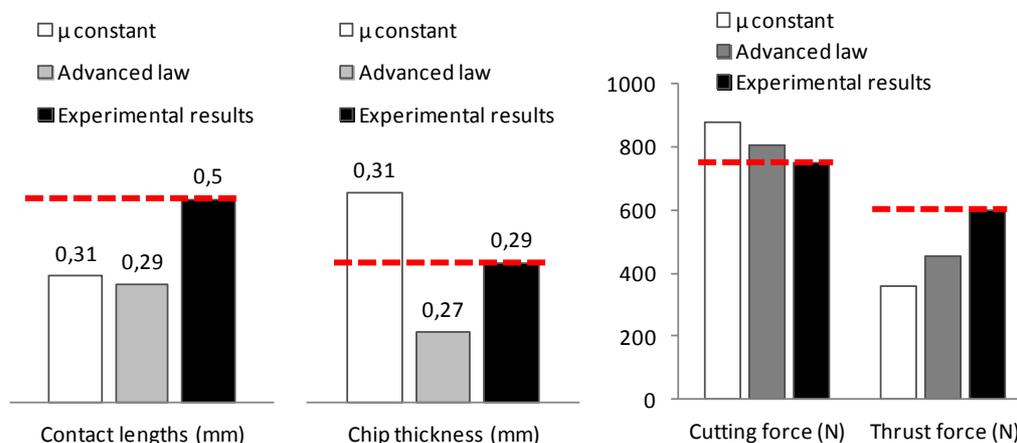


Fig. 10. Analyse des résultats

## 4 Conclusion et perspectives

Le comportement en frottement à l'interface outil-copeaux a été étudié à partir de deux dispositifs expérimentaux spécifiques. Le premier est défini pour une plage de vitesses allant de 3,6 à 24m.min<sup>-1</sup> et des températures supérieures à 400°C. Le second est déterminé pour des vitesses comprises entre 30 et 90m.min<sup>-1</sup> et une température initiale d'essai égale à 20°C. L'ensemble des données obtenues a permis de formuler une loi empirique de frottement en fonction des variables locales au sein du

contact. Un modèle numérique de coupe orthogonale a été établi et l'implémentation de la loi de frottement à paramètres multiples est réalisé dans le code éléments finis Abaqus à l'aide d'une sous-routine. Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance d'utiliser une loi de frottement dépendante de la pression et de la température interfaciale ainsi que de la vitesse de glissement locale par rapport à un frottement de type Coulomb constant. De nouvelles campagnes d'essais de coupe orthogonale dans différentes conditions d'essais doivent être menées afin d'appuyer ces résultats dans d'autres configurations. Il est également envisagé de développer et de tester d'autres lois de rhéologie intégrant des phénomènes de recristallisation dynamique.

## 5 Remerciements

Les auteurs remercient l'Institut Carnot ARTS, la Fédération de Recherche CNRS Transports Terrestres et Mobilité, les projets CISIT et ELSAT2020 supportés par la Communauté Européenne, le ministère de l'Education National et de la Recherche, le conseil Régional des Hauts de France sans qui ces travaux n'auraient pu aboutir.

## Références

- [1] M. Olsson, S. Söderberg, S. Jacobson, S. Hogmark, Simulation of cutting tool wear by a modified pin-on-disc test, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 29(3), 1989, pp. 377-390.
- [2] P. Hedenqvist, M. Olsson, Sliding wear testing of coated cutting tool materials, *Tribology International*, vol. 24(3), 1991, pp. 143-150.
- [3] W. Grzesik, Z. Zalisz, P. Nieslony, Friction and wear testing of multilayer coatings on carbide substrates for dry machining applications, *Surface and Coatings Technology*, vol. 155(1), 2002, pp. 37-45.
- [4] F. Zemzemi, J. Rech, W. Ben Salem, P. Kapsa, A. Dogui, Development of a friction model for the tool-chip-workpiece interface during dry machining of AISI 4142 steel with TiN coated carbide cutting tools, *International Journal for Machining and Machinability of Materials*, vol. 2, 2007, pp. 361-367.
- [5] C. Bonnet, F. Valiorgue, J. Rech, C. Claudin, H. Hamdi, M. Bergheau, P. Gilles, Identification of a friction model—Application to the context of dry cutting of an AISI 316L austenitic stainless steel with a TiN coated carbide tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.48(11), 2008, pp. 1211-1223.
- [6] H. Ben Abdelali, C. Claudin, J. Rech, W. Ben Salem, Ph. Kapsa, A. Dogui, Experimental characterization of friction coefficient at the tool–chip–workpiece interface during dry cutting of AISI 1045, *Wear*, vol. 286–287, 2012, pp. 108-115.
- [7] J. Brocail, M. Watremez, L. Dubar, Identification of a friction model for modelling of orthogonal cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, 2010, pp. 807-814.
- [8] Watremez M., Meresse D., Dubar L., Brocail J. (2012). Finite element modelling of orthogonal cutting : sensitivity analysis of material and contact parameters. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 7, pp. 262-274, ISSN 1740-2131.
- [9] L. Filice, F. Micari, S. Rizzuti, D. Umbrello, A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, 2006, pp. 709-714.