



**HAL**  
open science

## Simulation Eulérienne thermomécanique 3D du tournage

Mathieu Girinon, Frédéric Valiorgue, Eric Feulvarch, Alexandre Mondelin,  
Joël Rech, Jean-Michel Bergheau

► **To cite this version:**

Mathieu Girinon, Frédéric Valiorgue, Eric Feulvarch, Alexandre Mondelin, Joël Rech, et al.. Simulation Eulérienne thermomécanique 3D du tournage. 11e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01722056

**HAL Id: hal-01722056**

**<https://hal.science/hal-01722056>**

Submitted on 2 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

## Simulation Eulérienne thermomécanique 3D du tournage

M. GIRINON<sup>1\*</sup>, F. VALIORGUE<sup>2</sup>, E. FEULVARCH<sup>3</sup>, A. MONDELIN<sup>4</sup>, J. RECH<sup>5</sup>, J.M. BERGHEAU<sup>6</sup>

1 Université de Lyon, LTDS\ENISE, mathieu.girion@enise.fr\*

2 Université de Lyon, LTDS\ENISE, frederic.valiorgue@enise.fr

3 Université de Lyon, LTDS\ENISE, eric.feulvarch@enise.fr

4 Université de Lyon, LAMCOS\INSA, alexandre.mondelin@enise.fr

5 Université de Lyon, LTDS\ENISE, joel.rech@enise.fr

6 Université de Lyon, LTDS\ENISE, jean-michel.bergheau@enise.fr

\* Auteur correspondant

---

**Résumé** — Les travaux présentés portent sur la simulation thermo fluide 3D du tournage-chariotage du matériau 304L. Ce modèle utilise des éléments finis particuliers de type P1+/P1 avec une loi de comportement visqueuse afin d'obtenir les champs de températures et de contraintes. Contrairement à l'ensemble des modèles présents dans la littérature, cette approche présente l'intérêt d'être capable d'accéder aux grandeurs physiques en régime stabilisé en 3D avec des temps de calculs satisfaisants.

**Mots clés** — Tournage, Simulation Eulérienne, Modélisation thermomécanique, Régime stabilisé

---

### 1. Introduction

La simulation numérique des procédés de fabrication, et notamment du tournage, devient de plus en plus stratégique pour les industriels désireux de comprendre, d'anticiper et d'améliorer les conséquences induites sur les pièces et les outillages. En effet, le tournage peut être à l'origine de modifications sévères de la matière en surface et sub-surfaces tendant à augmenter significativement les contraintes résiduelles de surface, à modifier la microstructure et à changer l'état métallurgique [1]. Depuis de nombreuses années diverses approches numériques ont été mises en œuvre en allant des modèles Lagrangiens aux modèles ALE [2]. Chacun de ces modèles présentent des avantages et des inconvénients mais aucun n'est capable de répondre correctement à l'ensemble des problématiques rencontrées. Les travaux présentés dans cet article proposent une modélisation de type Eulérienne thermomécanique, capable de simuler en régime stabilisé les phénomènes thermiques et mécaniques liés à l'écoulement de la matière dans le copeau et autour du rayon d'arête.

### 2. Simulation thermomécanique Eulérienne

#### 2.1 Approche Eulérienne

L'utilisation de l'approche eulérienne est très intéressante pour notre modèle puisqu'elle ne nécessite pas une adaptation du maillage du copeau au cours de la simulation. En effet dans cette approche, l'outil est fixe et une vitesse de déplacement correspondante à la vitesse de coupe est imposée à la matière. Cette approche est plus performante au niveau du temps de calcul qu'une approche classique, ce qui nous permet de réaliser la simulation en 3 dimensions.

#### 2.2 Géométrie et Maillage

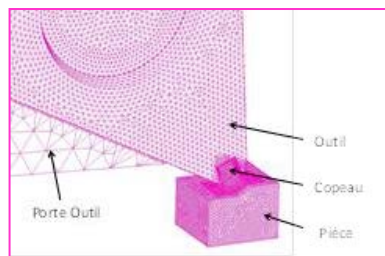
La simulation thermomécanique eulérienne du tournage (chariotage) sous SYSWELD nécessite un maillage incluant l'ensemble des principaux composants (porte-outil, cale, insert, outil, matière usinée, copeau) avec une géométrie stabilisée. Ceci s'explique par l'importance des échanges thermiques qui ont lieu pendant l'opération d'usinage et qui sont mal représentés si le porte outil n'est

pas modélisé [3]. Si les géométries de l'ensemble plaquette/cale/porte-plaquette/insert et de la pièce sans le copeau sont connues, la géométrie du copeau dépend quant à elle de l'outil utilisé, du matériau usiné et des conditions de coupe. Pour connaître cette géométrie, des essais Quick Stop Test (QST) ont été réalisés. Ils permettent de stopper quasi instantanément l'opération de chariotage pour recueillir l'intégralité des données géométriques nécessaires à la modélisation géométrique du copeau. La figure suivante (figure 1) présente les résultats des essais QST.



**Figure 1: Copeau obtenu par QST**

La figure 2 présente le maillage issu de ces essais.



**Figure 2: Maillage complet outil, pièce, copeau**

Seulement quelques millimètres cubes de matière usinée sont modélisés, l'objectif étant de minimiser les temps de calcul tout en représentant l'ensemble des phénomènes observés au cours de l'usinage.

## **2.3 Ecoulement matériel**

Cette partie permet de présenter les différentes équations qui devront être traitées lors de la simulation numérique afin que le comportement mécanique du matériau lors de l'usinage soit correctement modélisé.

### **2.3.1 Conservation de la quantité de mouvement**

$$\overrightarrow{div}(\overline{\sigma}) + \overline{f}_v = \rho \frac{d\vec{v}}{dt}$$

➤ Forces volumiques :

*Hypothèse:*  $\overline{f}_v = \vec{0}$ , on néglige l'influence des forces volumiques (poids propre du matériau).

➤ Forces d'inertie :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overline{\text{grad}}(\vec{v}) ; \text{ en régime stabilisé } \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{0}$$

✓ L'équation de bilan de quantité de mouvement devient:

$$\overline{\text{div}}(\vec{\sigma}) = \rho \vec{v} \cdot \overline{\text{grad}}(\vec{v}).$$

### 2.3.2 Lois de comportement du matériau

La loi de comportement est de type rigide visqueux et permet de représenter l'écoulement pâteux au voisinage de l'arête de coupe. En effet au cours de l'usinage, le matériau monte en température et son état n'est alors plus solide mais pâteux. On considère donc dans l'étude que la contrainte ne dépend que de la vitesse de déformation et non de la déformation elle-même.

Pour un fluide, on a :  $\sigma_{ij} = 2\mu * D_{ij} - p * \delta_{ij}$ , avec  $\mu$ ,  $p$  et  $D_{ij}$  qui représentent respectivement le coefficient de viscosité, la pression hydrostatique et les composantes du tenseur des taux de déformation défini par:

$$\overline{D} = \frac{1}{2} * (\overline{\text{grad}}(\vec{v}) + \overline{\text{grad}}^T(\vec{v}))$$

En décomposant le tenseur des contraintes en une partie sphérique  $\vec{s}$  et une partie déviatorique, le bilan de quantité de mouvement peut s'écrire sous la forme :

$$\overline{\text{div}}(\vec{\sigma}) = \overline{\text{div}}(\vec{s} - p\vec{I}) = \overline{\text{div}}(\vec{s}) - \overline{\text{grad}}(p) = \vec{0}$$

Le coefficient de viscosité est défini par

$$\mu = K * (\sqrt{3} * Deq)^{m-1} \text{ avec } Deq = \sqrt{\frac{2}{3} * \overline{D} : \overline{D}}$$

Tableau 1 : Valeurs de K et de m pour le matériau 304L

T (°C)	K	m
20	827	0,0057
100	573	0,0057
200	463	0,0057
300	404	0,0057
400	367	0,0057
500	353	0,0043
600	347	0,005
700	273	0,00396
800	196	0,08
900	137	0,107
1000	98	0,1125

Les valeurs de K et de m représentent la sensibilité de la contrainte à la vitesse de déformation pour le matériau 304L, elles sont déterminées grâce à des essais de compression dynamique.

La variation des paramètres K et m de la loi de comportement en fonction de la température permet de tenir compte de l'influence des phénomènes thermiques sur les phénomènes mécaniques.

### 2.3.3 Conservation de la masse

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \text{div}(\vec{v}) = 0$$

où  $div(\vec{v})$  représente le taux de dilatation volumique. Cette équation peut être interprétée par le fait qu'une variation de volume doit obligatoirement être compensée par une variation de la masse volumique. Pour un écoulement visqueux incompressible:  $div(\vec{v}) = 0$ .

## 2.4 Lois de frottements et échanges thermiques outil/copeau

Contraintes tangentielles à l'interface outil/copeau :

$$\vec{\tau} = G \|\overline{\Delta V}\|^{n-1} \overline{\Delta V}$$

G et n sont deux paramètres matériaux représentant la sensibilité de la contrainte tangentielle au delta de vitesses des deux parties frottantes.

La chaleur produite par frottement à l'interface outil/copeau est répartie grâce à l'utilisation d'un coefficient de partage thermique identique à celui utilisé et calibré lors d'essais de frottement par Frédéric Valiorgue au cours de sa thèse [4], soit 90% de la chaleur partant dans le copeau et 10% dans la plaquette.

La valeur de résistance thermique de contact pour le contact outil (TiN) –copeau (304L) de 1 mm<sup>2</sup>.K/W permet d'après Umbrello [5] d'obtenir les résultats numériques les plus cohérents.

## 2.5 Transferts de chaleur

Cette partie définit les équations qui devront être prises en compte dans la résolution numérique afin que le comportement thermique du système soit correctement représenté dans le modèle numérique.

### 2.5.1 Conservation d'énergie

$$r - div(\vec{q}) = \rho c \frac{d\theta}{dt}$$

r: source interne de chaleur ;  $\vec{q}$ : flux de chaleur;  $\theta$  : température

➤ Source interne:

$$r = \bar{\sigma} : \bar{D}$$

L'unique source de chaleur interne est apportée par la mécanique à travers les contraintes et les vitesses de déformations. Cette partie permet de lier la mécanique avec la thermique et justifie le couplage fort entre les deux phénomènes physiques.

➤ Inertie thermique:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overline{grad}(\theta) ; \text{en régime stabilisé } \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$$

➤ Loi de Fourier :

$$\vec{q} = -\lambda \overline{grad}(\theta)$$

✓ L'équation de la chaleur devient :

$$\bar{\sigma} : \bar{D} + \text{div} \left( \lambda \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) \right) = \rho c \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(\theta)$$

### 2.5.2 Calibration des résistances thermiques de contact de l'ensemble plaquette/vis/assise/porte-plaquette

Grâce à des essais de chauffe laser couplant simulations numériques et essais expérimentaux, les résistances thermiques de contact entre les différents éléments de l'outil de coupe ont ainsi pu être définis à une valeur de 700 mm<sup>2</sup>.°C/W.

### 2.5.3 Détermination des coefficients d'échange acier/air et acier/acier

Le coefficient d'échange thermique entre l'air et le matériau 304L est fixé à 35.10<sup>-6</sup> W/mm<sup>2</sup>/°C.

## 2.6 Éléments finis utilisés

Nous souhaitons donc résoudre le problème thermomécanique couplé en prenant en compte le bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Nous utiliserons ici des éléments tétraédriques de type P1+/P1 [6]. Ces éléments sont des tétraèdres à vitesse « bulle » et pression linéaire. Ils possèdent l'avantage de pouvoir traiter l'incompressibilité et donnent des résultats avec une précision intéressante.

Le tétraèdre P1+/P1 est schématisé sur la figure ci-dessous. La différence principale entre cet élément et un élément classique P1/P1 est la présence d'un nœud supplémentaire au centre de l'élément qui est nécessaire à la discrétisation de la vitesse puisque le champ des vitesses doit être suffisamment « riche » pour satisfaire à la fois l'équilibre des efforts et l'incompressibilité. Cette condition assure l'existence et l'unicité de la solution.

L'élément P1+/P1 est habituellement mis en œuvre pour simuler des problèmes mécaniques. Pour traiter le couplage thermique fort, un degré de liberté en température a été ajouté. La discrétisation de ce degré de liberté doit être choisie avec soin.

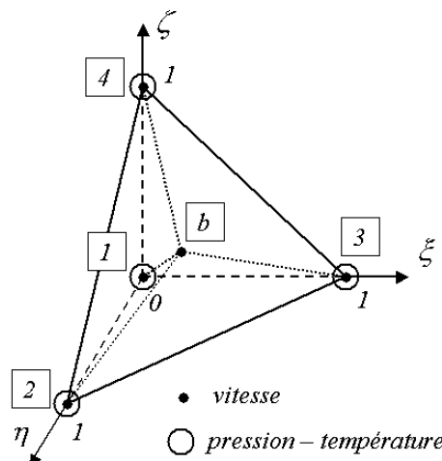
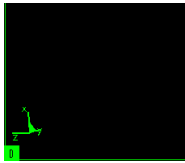


Figure 3 : Tétraèdre P1+/P1 de référence

Pour réaliser la discrétisation de la température, deux méthodes sont proposées et détaillées dans la thèse de M. Feulvarch [7]. La première est d'utiliser un élément P1+ avec la méthode de Galerkin (la même que celle utilisée pour la vitesse et la pression), la seconde est d'utiliser un élément P1 avec la méthode SUPG. La première méthode est plus difficile à mettre en place et nécessite le traitement d'inconnues supplémentaires (champ bulle), la seconde assure la stabilité et la qualité de la solution et sera donc celle choisie pour notre étude.

### **3. Résultats**

L'ensemble des travaux réalisés en terme de maillage et de programmation numérique ont permis d'obtenir les champs de température en régime stabilisé dans la pièce et l'outil ainsi que les champs de contraintes infligés à la matière de la pièce au niveau des bandes de cisaillement. La figure suivante (Figure 4) est un exemple de champs de température obtenus en régime stabilisé.



**Figure 4: Exemple de champ de température en régime stabilisé dans du 304L.**

A termes ce modèle de simulation d'usinage permettra de connaître les flux de chaleur, les contraintes, les vitesses de glissement entre l'outil et le copeau, le tout en régime stabilisé. Ces informations extraites sont d'une grande importance pour la compréhension de l'ensemble des phénomènes vécus par la pièce au cours de l'usinage et de leurs conséquences.

### **4. Conclusion**

Le modèle présenté ci-dessus est un des premiers du genre puisque c'est un modèle 3D qui permet d'accéder à des informations telles que les champs de pressions, de températures... subis par la matière au cours de l'usinage. L'approche eulérienne choisie permet d'obtenir toutes ces informations en régime stabilisé. Comme il a été dit précédemment des évolutions sont en cours pour améliorer ce modèle et des choix devront être effectués, l'incompressibilité du matériau par exemple est un élément actuellement à l'étude afin de déterminer son influence sur les résultats. De plus le modèle ne prend en compte aujourd'hui que les phénomènes thermiques et mécaniques, dans un objectif de perfectionnement, une prise en compte des phénomènes métallurgiques devra être étudiée.

L'étude de ce modèle est un enjeu majeur dans la compréhension des phénomènes physiques vécus par la matière au cours de l'usinage. Il permettra d'obtenir des informations sur l'état de la matière et sur l'outil de coupe après l'usinage. Les différentes informations qu'il fournit permettront d'aboutir aux contraintes résiduelles, aux modifications microstructurales et aux changements métallographiques de la matière. Il permet également de connaître les conditions de sollicitations des

outils de coupe qui sont des facteurs majeurs dans l'usure de ceux-ci. Ce modèle 3D thermomécanique présente donc un double avantage, fournir des informations qui permettront à la fois de maîtriser les pièces réalisées en termes de qualité et d'améliorer la durée de vie des outils de coupe.

## **5. Références bibliographiques**

- [1] J. Paulo Davim, *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer, vol. 14 ISBN 1848002122, 2008.
- [2] C. Bonnet, F. Valiorgue, J. Rech, H. Hamdi, Improvement of the numerical modeling in orthogonal dry cutting of an AISI 316L stainless steel by the introduction of a new friction model, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier, vol. 1 (2008) 114–118
- [3] Alexandre Mondelin, Frédéric Valiorgue, Eric Feulvarch, Joël Rech, Michel Coret. Calibration of the insert/tool holder thermal contact resistance in stationary 3D turning. *ATE\_4631*.
- [4] F. Valiorgue. Simulation des processus de génération de contraintes résiduelles en tournage du 316L. Nouvelle approche numérique et expérimentale, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (2008).
- [5] Umbrello, D., Filice, L., Rizzuti, S., Micari, F., Settineri, L. 2007. On the effectiveness of Finite Element simulation of orthogonal cutting with particular reference to temperature prediction. *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1-3), 284 – 291.
- [6] E. Feulvarch, J.C.Roux, J.M. Bergheau, A simple and robust moving mesh technique for the finite element simulation of Friction Stir Welding, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Elsevier, DOI : 10-1016/j.cam.201207.013
- [7] E.Feulvarch. Modélisation numérique du soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding), Thèse de doctorat, Université Jean Monnet de Saint-Etienne (2005)