

# Simulation 3D des transferts de chaleur en perçage par une approche Rigid-ALE

K. Chenegrin<sup>1,2</sup>, M. Girinon<sup>3</sup>, F. Valiorgue<sup>1</sup>, J-M. Bergheau<sup>1</sup>, H. Karaoui<sup>2</sup>, E. Feulvarch<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Lyon, ENISE, LTDS UMR 5513 CNRS, 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne cedex 2, France, {kevin.chenegrin,frederic.valiorgue,jean-michel.bergheau,eric.feulvarch}@enise.fr

<sup>2</sup> SAFRAN Tech, rue des Jeunes Bois, Châteaufort – CS 80112, 78772 Magny-les-Hameaux, France, {kevin.chenegrin,habib.karaoui}@safrangroup.com

<sup>3</sup> CETIM, 52 avenue Félix Louat, 60300 Senlis, France, Mathieu.Girinon@cetim.fr

**Résumé** — Le perçage est l'un des procédés d'enlèvement de matière les plus répandus dans l'industrie, notamment dans les secteurs aéronautique et spatial. La simulation numérique est un outil qui revêt un grand intérêt pour mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu et leurs interactions dans les procédés de fabrication. Dans ce travail, un modèle numérique 3D thermo-viscoplastique a été développé pour simuler une opération de perçage en évitant les distorsions de maillage grâce à une approche de type R-ALE. Le modèle numérique présenté est mis en œuvre pour l'acier inoxydable austénitique 316L dans le cas d'un perçage sans lubrification.

**Mots clefs** — Perçage, couplages multi-physiques, Rigid-ALE, éléments finis

## 1. Introduction

De nos jours, les industriels cherchent à atteindre un haut niveau de performance pour la tenue en fatigue des composants critiques. Dans un contexte de production de pièces toujours plus légères, dans des temps de plus en plus courts, et devant respecter un haut degré de sûreté, l'intégrité de surface de ces pièces est d'une importance capitale. Le perçage est l'un des procédés d'enlèvement de matière les plus répandus dans l'industrie, mais aussi l'un des moins étudiés de par sa complexité. Le développement d'un modèle numérique de perçage a pour objectif de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu lors de la coupe et leur impact sur l'intégrité des surfaces usinées.

Les cinétiques thermiques dans le trou percé peuvent être déterminées à l'aide d'un modèle numérique. Dans la littérature, les auteurs utilisent principalement des modèles numériques basés sur les lois d'endommagement avec génération des copeaux. Nan *et al.* [1] utilisent Abaqus/Explicit pour simuler le perçage de trous de 3 mm de diamètre dans un acier AISI 1045. Le temps de perçage simulé est de seulement 0,03 s pour un temps de calcul qui n'est pas précisé. Abouridouane *et al.* [2] simulent sous Deform-3D la formation des copeaux ainsi que les chargements thermiques induits par une opération de perçage (voir Figure 1).

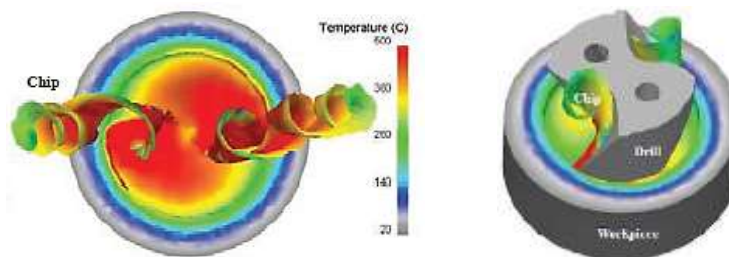


Figure 1 – Modèle numérique de perçage dans Deform-3D

Le temps simulé est d'environ 0,08 s pour une faible profondeur percée (0,25 mm). Wu et Han [3] utilisent un modèle numérique 2D afin d'étudier les températures au cours du perçage tandis que Shen and Ding [4] prédisent les modifications microstructurales en surface d'un trou percé dans un acier AISI 1060 à l'aide du logiciel Advantedge. Le temps de perçage simulé est très faible (0,012 s) et les températures obtenues à partir du modèle numérique 3D sont appliquées dans un modèle numérique 2D (sous Abaqus) afin de simuler les changements microstructuraux.

En définitive, ces modèles numériques montrent les difficultés de simuler une opération de perçage pour une profondeur importante. En effet, ces modèles utilisent un formalisme Lagrangien pour simuler la formation des copeaux. La nécessité d'étapes de remaillage du modèle pour éviter les distorsions de maillage augmente significativement le temps de calcul. L'identification d'une loi de comportement dans les gammes de vitesse de déformation et de température des procédés d'usinage reste très complexe puisque celle-ci dicte à la fois la géométrie des copeaux, et la dissipation thermique. Les principaux inconvénients de ces modèles numériques sont les temps de calcul très longs pour des avances simulées de seulement quelques dixièmes de millimètres. Par conséquent, ils ne permettent pas de simuler des profondeurs de perçage utilisées en contexte industriel.

Le travail proposé porte sur le développement d'un modèle numérique R-ALE (pour Rigid-ALE) permettant d'étudier l'influence de paramètres physiques sur l'histoire thermique d'une pièce percée. Le modèle développé se base sur les travaux de Girinon *et al.* [5] qui proposent une nouvelle stratégie de simulation permettant de reconstruire l'histoire thermique vécue par la surface usinée en évitant les distorsions de maillage, grâce à une approche de type R-ALE. Le modèle R-ALE est couplé à un modèle de calcul de contraintes résiduelles. La finalité de ce travail est de projeter les chargements thermiques dans un second modèle numérique 3D afin d'obtenir l'état de contraintes résiduelles dans le trou après perçage. La géométrie des copeaux n'est pas simulée, mais est obtenue par des essais Quick Stop Test (QST) adaptés au procédé de perçage [6]. Le copeau obtenu est ensuite scanné puis maillé dans le modèle numérique 3D afin de calculer les cinétiques thermiques obtenues dans l'ensemble de la pièce pendant l'opération de perçage. La loi de comportement utilisée dans le modèle R-ALE prend seulement en compte les contraintes et les vitesses de déformation plastique induites par l'écoulement viscoplastique de la matière. L'écrouissage et la limite élastique du matériau n'ont pas besoin d'être considérés, ce qui a pour but de simplifier la loi de comportement utilisée.

La méthodologie de simulation est appliquée à l'acier inoxydable austénitique 316L dans le cas d'un perçage sans lubrification. Les résultats numériques obtenus sont comparés aux mesures expérimentales afin de valider l'approche numérique R-ALE qui ouvre de nouvelles perspectives dans la simulation numérique du procédé de perçage.

## **2. Modélisation thermomécanique du procédé de perçage**

### **2.1. Écoulement du matériau**

L'objectif de l'approche numérique présentée dans ces travaux est de simuler l'histoire thermique d'une pièce percée. L'écoulement de matière dans les copeaux est simulé à l'aide d'un calcul thermomécanique. Le calcul mécanique est uniquement réalisé dans les deux copeaux afin de réduire significativement le temps de calcul. Le calcul thermique est quant à lui réalisé dans l'ensemble du modèle afin de prendre en compte la géométrie de la pièce et les échanges avec le milieu environnant.

Les effets visqueux sont prépondérants comparés aux effets d'inertie. Par conséquent, l'hypothèse de Stokes est utilisée afin de modéliser l'écoulement de matière dans les copeaux. Les équations d'équilibre en tout point intérieur des copeaux s'écrivent :

$$\overline{div}(\overline{\sigma}) = \overline{0} \quad (1)$$

$\overline{\sigma}$  représente le tenseur des contraintes de Cauchy :

$$\overline{\sigma} = \overline{S} - p\overline{I} \quad (2)$$

où  $p$  représente la pression hydrostatique,  $\overline{I}$  un tenseur unitaire du second ordre et  $\overline{S}$  le tenseur déviateur des contraintes. Dans l'hypothèse d'un écoulement incompressible, l'équation qui relie le tenseur des taux de déformation  $\overline{D}$  à la vitesse matérielle  $\vec{v}$  s'écrit :

$$\overline{D} = \frac{1}{2}(\overline{grad}(\vec{v}) + \overline{grad}^T(\vec{v})) \quad (3)$$

avec l'incompressibilité viscoplastique :

$$div(\vec{v}) = 0 \quad (4)$$

Par conséquent, l'écoulement de matière est considéré comme étant incompressible de type Stokes. De plus, on présume que le comportement du matériau dépend du tenseur des taux de déformation  $\overline{D}$ . La loi de comportement qui relie le déviateur des contraintes  $\overline{S}$  au tenseur des taux de déformation  $\overline{D}$  est définie via la viscosité dynamique  $\mu$  de la façon suivante :

$$\overline{S} = 2 \mu \overline{D} \quad (5)$$

L'intérêt d'une telle approche est qu'elle ne dépend pas du temps puisque les effets d'histoire et les effets d'inertie ne sont pas pris compte. Elle est donc mise en œuvre afin de s'affranchir du suivi de la matière dans son mouvement.

## 2.2. Transfert de chaleur

Dans le modèle présenté, la chaleur due à l'enlèvement de matière est générée par la dissipation d'une partie de la puissance mécanique mise en jeu dans la zone de cisaillement primaire. Les transferts thermiques au cours du perçage sont régis par l'équation de la chaleur :

$$Q + div(\lambda \overline{grad}(\theta)) = \rho C_p \left( \overline{v}_{conv} \cdot \overline{grad}(\theta) + \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \quad (6)$$

Où  $\lambda$  représente la conductivité thermique,  $\rho$  la masse volumique,  $\theta$  la température,  $C_p$  la chaleur spécifique à pression constante, et  $Q$  le terme source de la chaleur qui s'écrit :

$$Q = \alpha \overline{S} : \overline{D} \quad (7)$$

avec  $\alpha$  est le coefficient de Taylor-Quinney qui représente la proportion de la puissance mécanique dissipée sous forme de chaleur.

Une condition aux limites est introduite dans modèle numérique afin de prendre en compte les échanges thermiques qui se produisent avec le milieu extérieur, mais aussi avec le milieu dans le trou percé. Ainsi, le flux de chaleur aux interfaces est calculé comme suit :

$$q = h_{ext} (\theta_{ext} - \theta) \quad (8)$$

avec  $h_{ext}$  le coefficient d'échange thermique de l'interface,  $\theta_{ext}$  la température du milieu environnant et  $\theta$  la température calculée aux nœuds de la surface.

### 2.3. La méthode R-ALE pour la simulation numérique du perçage

La méthode R-ALE présentée dans ces travaux est basée sur une approche ALE associée à un déplacement du maillage par mouvement de corps indéformables. Cette approche présente plusieurs avantages dans la simulation numérique du perçage. En effet, entre deux étapes de calcul, le maillage se déplace, mais il n'est pas déformé comme c'est le cas dans une approche purement Lagrangienne. La méthode R-ALE permet donc de s'affranchir du remaillage du modèle entre deux étapes de calcul. Cependant, la géométrie des copeaux n'étant pas simulée, celle-ci est obtenue par des essais Quick Stop Test (QST). L'opération de perçage est instantanément stoppée et la géométrie de copeau obtenue est scannée et reconstruite dans le modèle R-ALE. Tous les composants du perçage sont maillés avec des éléments tétraédriques linéaires.

Une stratégie de déplacement du maillage a été développée afin de déterminer les transferts de chaleur au cours de l'opération de perçage. La Figure 2 illustre le positionnement du maillage à différentes étapes de simulation.

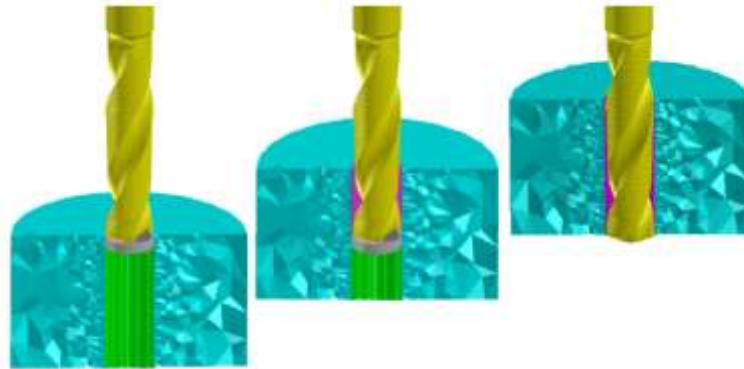


Figure 2 – Représentation de la cinématique du modèle R-ALE

Tout au long de la simulation, le foret reste fixe. La pièce bleue a un mouvement simultané de translation et de rotation afin de représenter la trajectoire hélicoïdale du foret sur la surface usinée. Le problème thermomécanique est uniquement résolu dans les deux copeaux dans le but d'optimiser le temps de calcul. Pour ce faire, les vitesses de coupe et d'avance sont imposées à la base de chaque copeau afin de calculer les vitesses d'écoulement en tout point des copeaux. De plus, la vitesse vérifie la condition de non-pénétration sur la surface libre des copeaux afin d'obtenir un écoulement de matière qui suive la géométrie des copeaux. Dans le reste du modèle, le problème résolu est purement thermique. La dernière étape de simulation représente la phase de refroidissement du modèle qui se fait uniquement par conduction de la chaleur dans la pièce et par convection avec le milieu extérieur.

Dans chaque partie du maillage, le terme  $\vec{v}_{cv}$  représente la vitesse de convection de la matière qui est définie avec une approche ALE classique et s'écrit comme suit :

$$\vec{v}_{cv} = \vec{v} - \vec{v}_{mesh} \quad (9)$$

L'originalité de l'approche R-ALE est d'introduire un terme supplémentaire  $\vec{v}_{mesh}$  qui correspond au mouvement du maillage pendant le perçage. L'intégration temporelle implicite utilisée pour ce modèle permet l'utilisation de grands pas de temps qui contribuent à la réduction du temps de calcul. Le schéma d'intégration Euler implicite s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t_{t+\Delta t}} \approx \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (10)$$

### 2.3. Résultats numériques de températures

Le modèle R-ALE présenté dans ces travaux fournit les températures en chaque nœud du maillage pour le cas d'un perçage sans lubrification dans l'acier inoxydable austénitique 316L. Les simulations sont réalisées avec le code de calcul Sysweld<sup>®</sup> développé par ESI Group. Les températures numériques obtenues sont présentées en Figure 3.

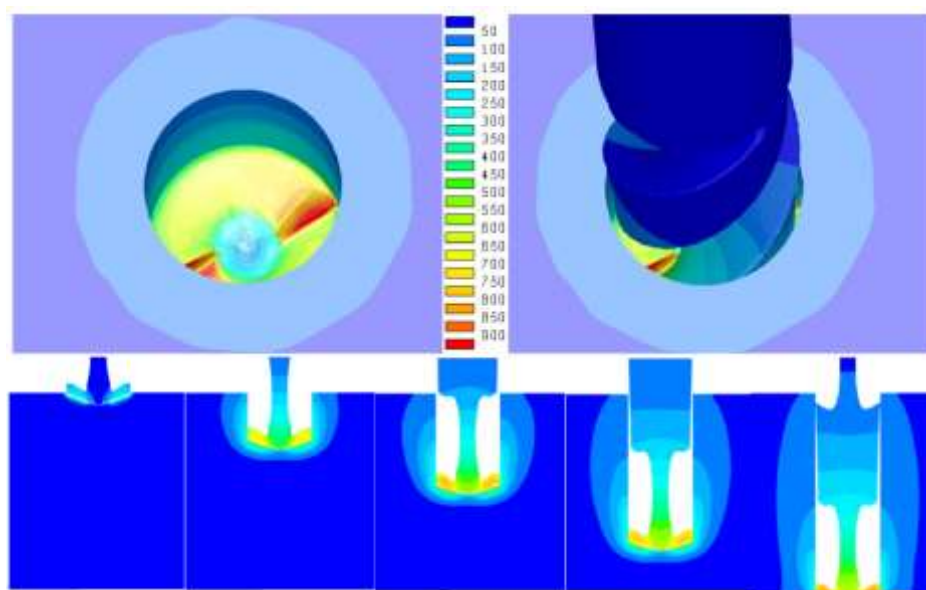


Figure 3 – Résultats de températures obtenues avec le modèle R-ALE de simulation du perçage

### Références

- [1] X. Nan, L. Xie and W. Zhao. On the application of 3D finite element modeling for small-diameter hole drilling of AISI 1045 steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 84, pp. 1927-1939, 2015.
- [2] M. Abouridouane, F. Klocke and B. Döbbeler. Characterisation and modelling of the machinability of ferritic-pearlitic steels in drilling operations. *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 79-84, 2017.
- [3] J. Wu and R. Di Han, A new approach to predicting the maximum temperature in dry drilling based on a finite element model, *J. Manuf. Process.*, vol. 11, n° 1, pp. 19-30, 2009.

- [4] N. Shen and H. Ding, Physics-Based Microstructure Simulation for Drilled Hole Surface in Hardened Steel, *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 136, n<sup>o</sup>. 4, p. 044504, 2014.
- [5] M. Girinon, F. Valiorgue, H. Karaoui and E. Feulvarch, 3D numerical simulation of drilling residual stresses. *C. R. Mécanique*, vol. 346, pp. 701-711, 2018.
- [6] M. Girinon, F. Valiorgue, V. Robin, E. Feulvarch, 3D stationary simulation of a turning operation with an Eulerian approach, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 76, pp. 134-146, 2015.