

# Modélisations et simulations de la mise en forme d'un connecteur d'épaisseur ultra-mince par un processus multi-passes

L.BIZET<sup>a</sup>, L. TABOUROT<sup>b</sup>, P.BALLAND<sup>c</sup>, F.ADZIMA<sup>d</sup>, P.Y.MANACH<sup>e</sup>,  
T.BALAN<sup>f</sup>, S.TOUTAIN<sup>g</sup>

a. Laboratoire SYMME : [laurent.bizet@univ-smb.fr](mailto:laurent.bizet@univ-smb.fr)

b. Laboratoire SYMME : [laurent.tabourot@univ-smb.fr](mailto:laurent.tabourot@univ-smb.fr)

c. Laboratoire SYMME : [pascale.balland@univ-smb.fr](mailto:pascale.balland@univ-smb.fr)

d. Laboratoire LEM3 : [francis.adzima@ensam.eu](mailto:francis.adzima@ensam.eu)

e. Laboratoire LIMATB : [pierre-yves.manach@univ-ubs.fr](mailto:pierre-yves.manach@univ-ubs.fr)

f. Laboratoire LEM3 : [tudor.balan@ensam.eu](mailto:tudor.balan@ensam.eu)

g. Société Delta Composants : [stoutain@dic.fr](mailto:stoutain@dic.fr)

## Résumé :

*Trois modèles du comportement plastique du cuivre sont utilisés pour simuler la mise en forme par pliage d'un connecteur d'épaisseur ultra-fine. Les modèles proposés sont des modèles qui induisent différents schémas de contraintes internes et donc de stockage d'énergie élastique. Ainsi l'impact d'un modèle phénoménologique élasto-plastique avec écrouissage mixte, d'un modèle de plasticité cristalline et d'un modèle compartimenté sur le retour élastique est évalué dans le cas d'un composant industriel.*

## Abstract :

*Three plastic behavior models are used for the simulation of thin metallic sheets forming by folding. Those models induce different schemas of internal stress and therefore induce some different storage of elastic energy. The impact on the springback of a phenomenological elastoplastic model with the use of a mixed hardening rule, a compartmentalized model and a crystal plasticity finite-element modeling is estimated.*

**Mots clefs : élasticité, plasticité, hétérogénéités, mise en forme des matériaux, retour élastique**

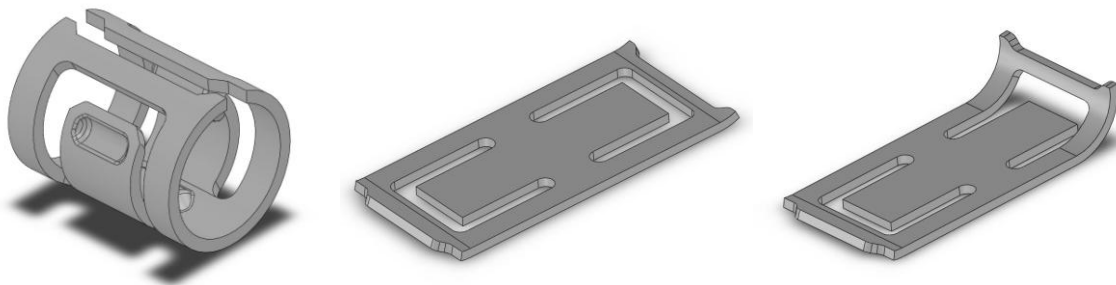
## 1 Introduction

Lorsqu'on utilise la mise en forme des matériaux pour produire des composants mécaniques, le retour élastique est un phénomène qui obère l'obtention de pièces précises par ce moyen. En effet, lors du

retrait des outils de mise en forme, un retour élastique se produit quasiment systématiquement. Il est donc nécessaire d'anticiper cette déformation lors de la conception des outils pour produire des pièces qui respectent les cotations imposées. Dans un souci de minimisation du coût et du temps nécessaire pour la mise au point, les industriels ont recours, entre autres, à la simulation de l'opération par éléments finis afin de concevoir ces outils. Le modèle de comportement plastique joue un rôle important dans la distribution des contraintes au sein du matériau et donc sur la précision avec laquelle est déterminé le retour élastique.

Pour cette étude, trois modèles sont utilisés lors de la simulation d'une étape de la mise en forme d'un connecteur à partir d'une tôle de cuivre d'épaisseur 0,1mm. Ces modèles se distinguent par le fait qu'ils sont capables de restituer plus ou moins finement l'état de contrainte interne du matériau et donc par leur influence sur le retour élastique. On recourt dans un premier temps à un modèle phénoménologique qui ne restitue pas d'état fin de contraintes internes. A l'opposé, on utilise un modèle de plasticité cristalline pour décrire finement l'état des contraintes internes. Enfin de façon intermédiaire nous utilisons un modèle hybride, phénoménologique mais qui, par construction, reproduit les mécanismes essentiels de stockage d'énergie élastique qui se développent lorsque des hétérogénéités de propriété sont intégrées.

La figure 1a présente la géométrie finale du connecteur après l'ensemble des opérations de formages et de découpes. Seule la simulation d'une opération de cambrage fait l'objet de cette étude (figure 1b et 1c).



**Figure 1** : a : vue du connecteur formé – b : avant l'opération de cambrage – c : après l'opération de cambrage

## 2 Modélisations proposées

### 2.1 Modèle phénoménologique

Dans un premier temps, un modèle élasto-plastique avec prise en compte d'un écrouissage mixte est proposé. La simulation est effectuée sous Abaqus/Standard couplé à une routine UMAT. Cette routine est utilisée pour implanter un modèle de comportement spécifique dans Abaqus. Le modèle élasto-plastique est un modèle avec critère de plasticité anisotrope défini par Bron et Besson en 2004 [1-2]. Ce modèle prend aussi en compte la description d'écrouissage mixte.

### 2.2 Modèle de plasticité cristalline

Du fait de la faible épaisseur du connecteur, une simulation de cette opération de mise en forme en utilisant un modèle de plasticité cristalline est envisageable. Une analyse de la microstructure a été

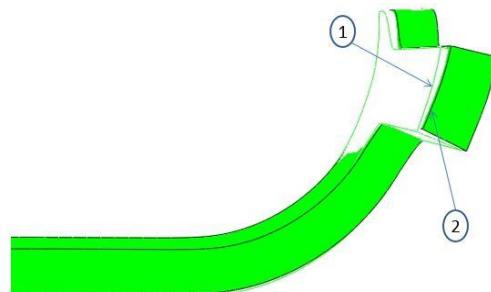
effectuée sur le matériau utilisé industriellement. Une cartographie de la taille et de l'orientation des grains a été définie. La modélisation de cette microstructure est ensuite implantée dans Abaqus grâce à la définition d'un jeu de sets géométriques. Chaque set géométrique est composé d'un certain nombre d'éléments de maillage contigus et représente le comportement d'un grain de matière. La simulation de l'opération de cambrage est effectuée sous Abaqus/Explicit couplé à une routine VUMAT. Cette routine attribue à chaque élément d'un set géométrique une orientation et un modèle de comportement matériau identique. Le modèle de plasticité cristalline utilisé est le modèle défini par Tabourot en 1992 [3]. Les paramètres de ce modèle sont identifiés en optimisant une simulation d'un essai de traction en comparaison à un essai expérimental sur un monocristal de cuivre.

## 2.3 Modèle compartimenté

Une approche intermédiaire entre le modèle phénoménologique et le modèle de plasticité cristalline est ensuite proposé. Ce modèle compartimenté [4] permet la prise en compte de l'influence de la microstructure sur le comportement global du matériau. Celui-ci est alors considéré comme étant hétérogène. Chaque élément de maillage élément fini se voit attribuer un modèle de comportement spécifique. Le modèle local utilisé pour chaque élément est un modèle de comportement à écrouissage bilinéaire constant et dont le deuxième niveau d'écrouissage est saturant. Ainsi, pour chaque élément du maillage éléments finis, seule la contrainte de limite élastique est variable et est distribuée suivant une loi de type Rayleigh. Les paramètres de ce modèle sont identifiés en optimisant une simulation d'un essai de traction en comparaison à un essai expérimental réalisé sur le matériau utilisé industriellement.

## 3 Résultats

La comparaison entre les différentes simulations est effectuée sur la valeur du retour élastique après retrait des outils de mise en forme (figure 2). L'outillage permettant la production du connecteur n'étant pas finalisé, cette comparaison sera validée ultérieurement de façon expérimentale. L'analyse des résultats permet déjà de conclure sur les performances des modèles proposés et notamment sur le rôle des hétérogénéités



**Figure 2** : profil 1 : déformée à la course maximum des outils – profil 2 : déformée après retour élastique

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale de la Recherche pour son financement dans le cadre du projet XXS Forming (programme ANR : Matériaux et Procédés pour des Produits Performants MATETPRO 2012 - référence du projet : ANR-12-RMNP-0009).

## Références

- [1] F. Bron, J. Besson, A yield function for anisotropic materials, application to aluminum alloys, *Int. J. Plasticity* 20 (4-5), 937-963
- [2] S. Gallée, P.Y Manach, S. Thuillier, Mechanical Behavior of a Metastable Austenitic Stainless Steel under Simple and Complex Loading Paths, *Materials Science and Engineering, A* 466, no. 1–2 (September 25, 2007): 47–55. doi:10.1016/j.msea.2007.02.054
- [3] L. Tabourot, Loi de comportement élastoviscoplastique du monocristal en grandes transformations, Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble 1992
- [4] M. Vautrot, P. Balland, O.S. Hopperstad, L. Tabourot, J. Raujol-Veille, F. Toussaint, Characterization of high carbon steel C68 at elevated temperatures and different strain rates, *Technische Mechanik*. 32, 2-5, (2012) 577-586.