Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

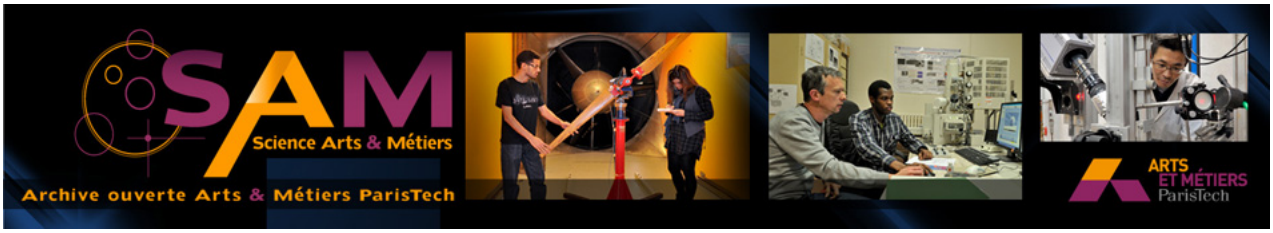
This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/10395

To cite this version :

Badis HADDAG, Farid ABED-MERAIM, Tudor BALAN - Modèle élasto-plastique à écrouissage microstructural : Application à la mise en forme des tôles métalliques - In: Congrès Algérien de Mécanique de Construction CAMC07, Algérie, 2007-04-29 - Actes du Congrès CAMC07 - 2007

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

Arts et Métiers Institute of Technology



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: http://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/null

To cite this version :

Badis HADDAG, Tudor BALAN, Farid ABED-MERAIM - Modèle élasto-plastique à écrouissage microstructural : Application à la mise en forme des tôles métalliques - In: Congrès CAMC07, Algérie, 2007-04-29 - Actes du Congrès CAMC07 - 2007

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository
Administrator : archiveouverte@ensam.eu

Modèle élasto-plastique à écrouissage microstructural Application à la mise en forme des tôles métalliques

LPMM (Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux)
ENSAM de Metz, 4, rue Augustin Fresnel
57078, Metz cedex 03, France
badis.haddag@metz.ensam.fr

Résumé :

Ce travail consiste à étudier par simulation le phénomène du retour élastique dans le procédé d'emboutissage des tôles métalliques. Un modèle phénoménologique d'élasto-plasticité, incluant deux modèles d'écrouissage combiné, a été implanté dans le code d'éléments finis ABAQUS/Standard, via la routine UMAT, suivant un schéma d'intégration implicite. Des simulations de tests rhéologiques, à trajet direct et séquentiels, ont été réalisées pour montrer la capacité de chaque modèle à reproduire les phénomènes de changement de trajet de déformation. Également, un essai d'emboutissage spécialement conçu pour mettre en évidence le retour élastique a été étudié. L'influence du modèle d'écrouissage sur le niveau du retour élastique a été mise en évidence pour différents paramètres du procédé, notamment l'effort de serrage du serre-flan.

Mots-clefs :

Trajets de déformation ; écrouissage combiné ; prédiction EF ; retour élastique.

Abstract:

This work aims to study by simulation the spring-back phenomenon in the deep drawing process of sheet metals. An elasto-plastic phenomenological model, including two combined hardening models is implemented in the finite elements code ABAQUS/Standard, via the UMAT routine, using an efficient implicit integration scheme. Direct and sequential rheological tests are simulated in order to show the capability of each hardening model to reproduce strain-path change phenomena. Also, a deep drawing test, specially designed for spring-back is studied. The impact of each hardening model on the amount of spring-back is highlighted for different process parameters, specifically the blank holder force.

Key-words:

Strain-path ; combined hardening ; FE prediction ; spring-back.

1. Introduction

L'emboutissage des tôles métalliques est un procédé largement utilisé dans diverses industries (automobile, emballage, etc.). De nombreux phénomènes indésirables peuvent apparaître au cours ou à la fin de la mise en forme de ces tôles. Les pièces embouties peuvent présenter ainsi différents défauts, tels que la striction due aux grandes déformations que subit la tôle au cours de la mise en forme, les ondulations aux bords par flambement et la distorsion de la pièce par retour élastique après enlèvement de outils. Dans le but d'optimiser ce procédé, il est très pratique, voire indispensable de nous jours, de passer par des simulations numériques afin de prédire correctement de tels défauts.

La méthode des éléments finis est l'un des outils numériques les plus largement utilisés dans la prédiction de ces phénomènes de déformation. Avec les progrès réalisés autour de cette méthode (large choix d'éléments finis, méthodes de résolutions performantes, génération automatique de maillages, etc.) des simulations sur des géométries complexes peuvent être réalisées. Dans le contexte de cette méthode, l'introduction de modèles performants de comportement anisotrope de la tôle est l'un des éléments clés dans la prédiction fiable du comportement local et global des pièces embouties. Ainsi, un modèle élasto-plastique à écuissage combiné a été introduit dans ce travail. Deux modèles d'écrouissage ont été retenus dans cette étude ; le modèle à écrouissage isotrope et cinématique saturants de Chaboche, disponible dans le code ABAQUS (Hibbitt et al., 1995), et le modèle microstructural basé sur les structures de dislocations proposé par Teodosiu et Hu (1998) ont été introduits dans le modèle élasto-plastique. Chaque modèle d'écrouissage est capable de reproduire un certains nombres de phénomènes de changement du trajet de déformation, tel qu'il sera montré au paragraphe 3 par des simulations de tests rhéologiques.

Dans le but de montrer l'impact du modèle de comportement sur le niveau du retour élastique et ainsi pouvoir retrouver les conditions optimales permettant de le compenser dans les applications industrielles, un essai spécialement conçu pour le quantifier a été introduit. L'essai standard proposé initialement lors de la conférence Numisheet'93 et qui consiste à emboutir une tôle pour obtenir une forme dite en « Oméga » a été sélectionné dans cette étude. La distorsion de la déformée obtenue après enlèvement des outils donne une idée sur le niveau du retour élastique de la tôle. Des simulations numériques ont été réalisées avec les deux modèles d'écrouissage et pour différents efforts de serrage du serre-flan afin de montrer l'impact du comportement et de l'un des paramètres principaux du procédé d'emboutissage.

2. Description du comportement

Le comportement est décrit par un modèle élasto-plastique phénoménologique où le taux de la contrainte de Cauchy $\boldsymbol{\sigma}$ est relié à la vitesse de déformation élastique, $\mathbf{D}^e = \mathbf{D} - \mathbf{D}^p$, par une loi hypo-élastique de la forme :

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{C} : \left(\mathbf{D} - \mathbf{D}^p \right) \tag{1}$$

où $\mathbf{C}$ est le tenseur des constants élastique et $\mathbf{D}$ est la vitesse de déformation totale.

Le taux de déformation plastique est donné par la loi de normalité :

$$\mathbf{D}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \tag{2}$$

où $\dot{\lambda}$ est le multiplicateur plastique et F est la fonction de charge définie par :

$$F = \bar{\sigma} - Y \leq 0 \tag{3}$$

où $\bar{\sigma}$ est la contrainte équivalente et Y est la contrainte d'écoulement. Comme les tôles sont généralement obtenues par laminage, elles présentent une anisotropie initiale que nous considérons décrite par la surface de charge quadratique de Hill'48.

Pour la description de l'écrouissage, Teodosiu et Hu (1995) ont introduit plusieurs variables internes. Dans ce modèle, Y est supposée de la forme :

$$Y = Y_0 + R + f \left| \mathbf{S} \right| \tag{4}$$

où Y_0 est la limite élastique initiale, f est un paramètre du matériau, par contre R et $f\left|\mathbf{S}\right|$ décrivent respectivement, les contributions à l'écrouissage isotrope des dislocations distribuées aléatoirement et des structures de dislocations planaires perssistantes. L'écrouissage cinématique est décrit par la contrainte de rappel $\mathbf{X}$. En tout, le modèle contient quatre

variables internes $(R,\ \mathbf{X}, \mathbf{P},\ \mathbf{S})$. Les variables R, $\mathbf{X}$ et $\mathbf{S}$ ont la dimension d'une contrainte, $\mathbf{P}$ est sans dimension. Les variables $\mathbf{X}$ et $\mathbf{P}$ sont des tenseurs d'ordre deux et $\mathbf{S}$ est un tenseur d'ordre quatre. La variable $\mathbf{S}$ décrit la résistance directionnelle des structures de dislocations planaires persistantes qui se décompose en une partie active S_D (scalaire) et une partie latente $\mathbf{S}_L$ (tenseur d'ordre quatre). La variable $\mathbf{P}$ décrit la polarité de ces structures de dislocations.

L'évolution de R et $\mathbf{X}$ est donnée par des lois saturantes de la forme :

$$\dot{R} = C_R \left(R_{sat} - R \right) \dot{\lambda} \tag{5}$$

$$\dot{\mathbf{X}} = C_X \left(X_{sat} \mathbf{n} - \mathbf{X} \right) \dot{\lambda} \tag{6}$$

avec

$$\mathbf{n} = \left(\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X} \right) \big/ \bar{\sigma} \tag{7}$$

$$X_{sat} = X_0 + \left(1 - f\right) \sqrt{r \left|\mathbf{S}\right|^2 + \left(1 - r\right) S_D^2} \tag{8}$$

où $\boldsymbol{\sigma}'$ est le déviateur des contraintes et C_R, R_{sat}, C_X, X_{sat}, X_0 et r sont des paramètres du matériau. Les parties active S_D et latente $\mathbf{S}_L$ sont reliées à $\mathbf{S}$ par la relation :

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_L + S_D \mathbf{N} \otimes \mathbf{N} \tag{9}$$

avec $\mathbf{N} = \mathbf{D}^p \big/ \left| \mathbf{D}^p \right|$ définissant la direction de la vitesse de déformation plastique. Leurs évolutions sont, respectivement, définies par :

$$\dot{S}_D = C_S \left[g \left(S_{sat} - S_D \right) - h S_D \right] \dot{\lambda} \tag{10}$$

$$\dot{\mathbf{S}}_L = -C_{SL} \left(\frac{\left|\mathbf{S}_L\right|}{S_{sat}} \right)^{n_L} \mathbf{S}_L \dot{\lambda} \tag{11}$$

où g et h sont deux fonctions scalaires dépendantes des variables internes et C_S, S_{sat}, C_{S_L} et n_L sont des paramètres du matériau.

L'évolution de $\mathbf{P}$ est supposée de la forme :

$$\dot{\mathbf{P}} = C_{\ p} \left(\mathbf{N} - \mathbf{P} \right) \dot{\lambda} \tag{12}$$

La formulation générale précédente est seulement valable en petites déformations. En grandes déformations, les taux des variables tensorielles doivent être définis par des dérivées objectives. Dans cette étude, la dérivée de Jaumann est adoptée.

3. Application

Les applications réalisées dans ce travail concernent une tôle en acier doux. Les paramètres du matériau relatifs à chaque modèle d'écrouissage sont rapportés dans Haddadi (2003). En premier lieu des simulations de tests rhéologiques à trajets directes et séquentiels seront réalisées dans le but de montrer la différence entre les deux modèles en terme de reproduction des phénomènes de changement de trajets de déformation. L'étude du retour élastique sera abordée par la suite en utilisant ces deux modèles d'écrouissage.

3.1. Simulations de tests rhéologiques

Un modèle de comportement doit être capable de prédire non seulement des trajets directs de chargement mais également divers trajets séquentiels. La figure 1 montre les simulations du comportement rhéologique du matériau considéré. Ils regroupent l'ensemble des essais utilisés pour identifier le modèle microstructural, qui sont :

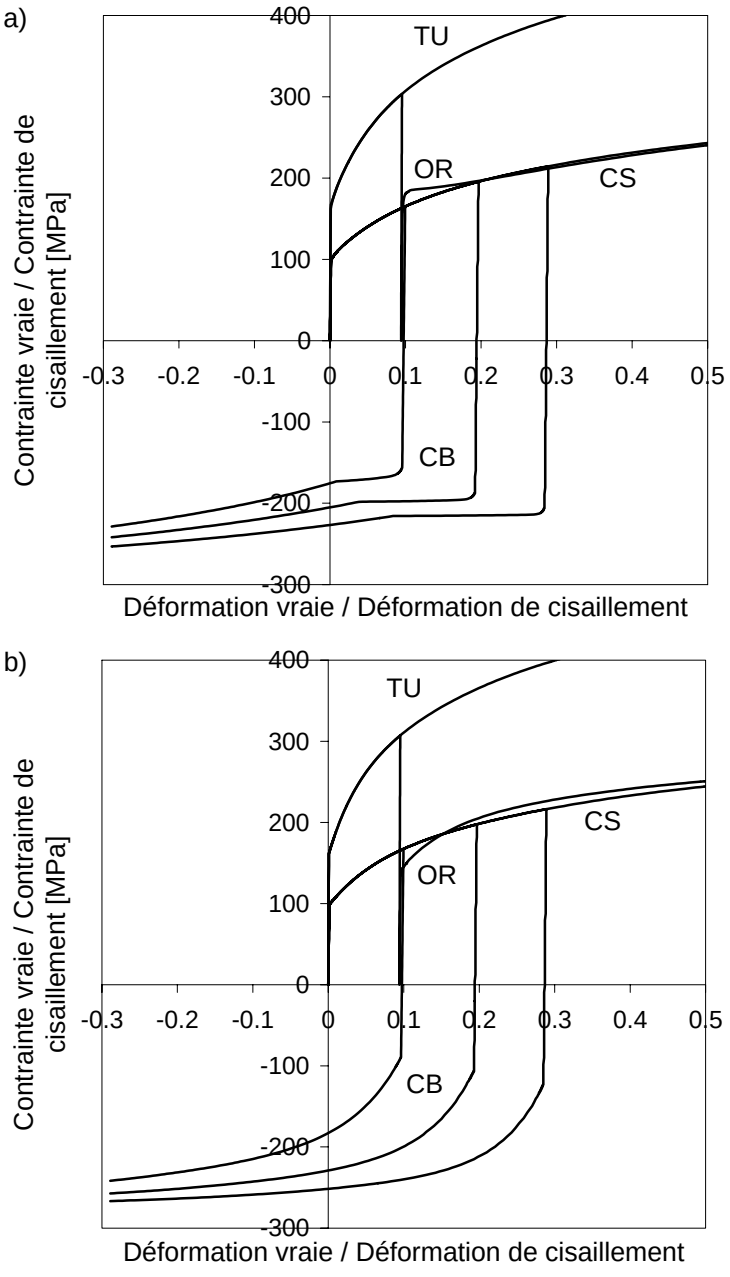


Figure 1. Prédictions rhéologiques avec a) le modèle microstructural de Teodosiu et Hu et b) le modèle classique de Chaboche. TU: traction uniaxiale ; CS: cisaillement simple; BS: cisaillement Bauschinger à 10, 20 et 30% de pré-déformation ; OR: traction uniaxiale à 10% de pré-déformation suivie d'un cisaillement simple dans la même direction.

— Deux essais monotones : une traction uniaxiale (TU) et un cisaillement simple (CS).

— Trois essais de cisaillement Bauschinger (CB).

— Un essai orthogonal composé d'une pré-déformation en traction suivi d'un cisaillement simple (OR).

Tous les chargements sont appliqués selon la direction initiale de laminage.

Ces tests sont utilisés par Teodosiu et Hu (1995) pour mettre en évidence les principaux effets d'un changement du trajet de chargement sur l'écrouissage. La figure 1 montre la capacité des deux modèles d'écrouissage à prédire le comportement transitoire après un changement brusque du trajet de déformation. Comme mentionné par Bouvier et al. (2003), les prédictions des deux modèles différents spécialement au niveau de la zone de transition, tandis que leur comportement en trajet monotone est pratiquement identique. Le modèle microstructural décrit mieux le comportement transitoire réel pour une large nuances de tôles métalliques (Teodosiu et Hu, 1995 ; Bouvier et al., 2003).

3.2. Étude du retour élastique

Nous considérons la géométrie de la figure 2 du test « Omega ». Les principales caractéristiques géométriques de ce test sont les rapports *L*/*W*, *D*/*W* et *T*/*R*, où *W* est la largeur du poinçon, *L* est la longueur initiale de la tôle, *D* est la course du poinçon, *T* est l'épaisseur de la tôle et *R* est le rayon de courbure du poinçon et de la matrice. Le retour élastique est non seulement grand pour de valeurs élevées de ces rapports mais aussi la simulation est plus sensible aux paramètres de la modélisation. Pour ce test les dimensions suivantes sont considérés : R=3 mm, W=30 mm et D=110 mm.

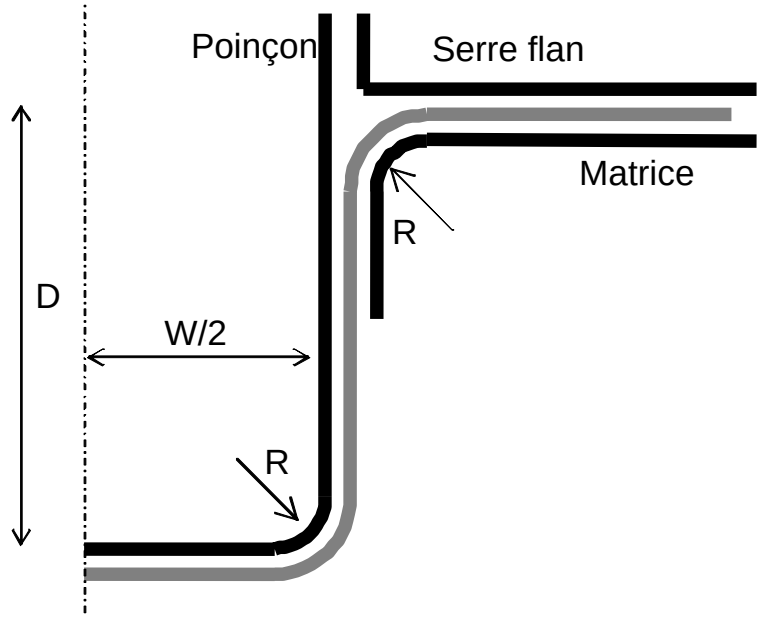


Figure 2. Géométrie de l'essai en « Oméga ».

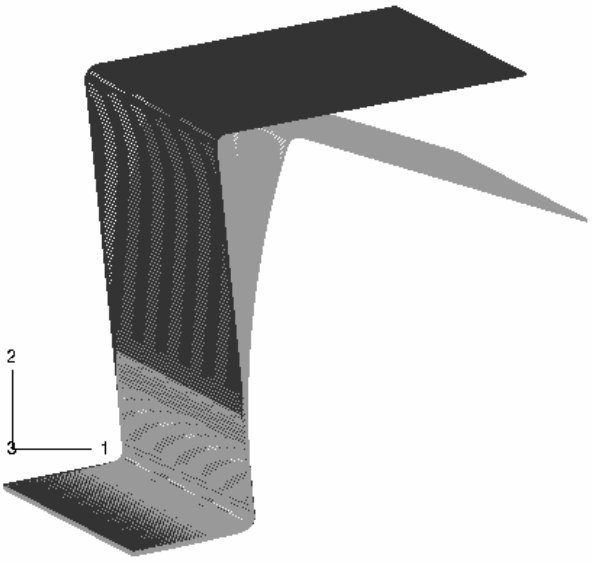


Figure 3. Déformées obtenues à la fin et après l'étape d'emboutissage.

La figure 3 montre les déformées obtenues à la fin et après l'étape d'emboutissage (après enlèvement des outils). La figure 4 montre les déformées obtenues après l'étape d'emboutissage. Deux efforts de serrage ont été utilisés. Pour chaque effort de serrage, la différence est assez nette entre les deux modèles d'écrouissage en terme du retour élastique prédit. Le modèle microstructural prédit un niveau du retour élastique plus faible dans les deux cas. Ainsi, les phénomènes de changement de trajet de déformation, tel que reproduits par le modèle microstructural ont un effet non négligeable sur le retour élastique. Tel que montré sur la même figure, l'augmentation de l'effort de serrage diminue le retour élastique. C'est souvent ce qui est observé expérimentalement. En effet, un grand effort de serrage génère des contrainte de tension dans la paroi qui prédominent par rapport aux contraintes générés par le pliage/dépliage de la tôle au niveau du rayon de courbure de la matrice. Ceci tend à conserver la paroi bien droite après enlèvement des outils, ce qui génère un faible niveau du retour élastique.

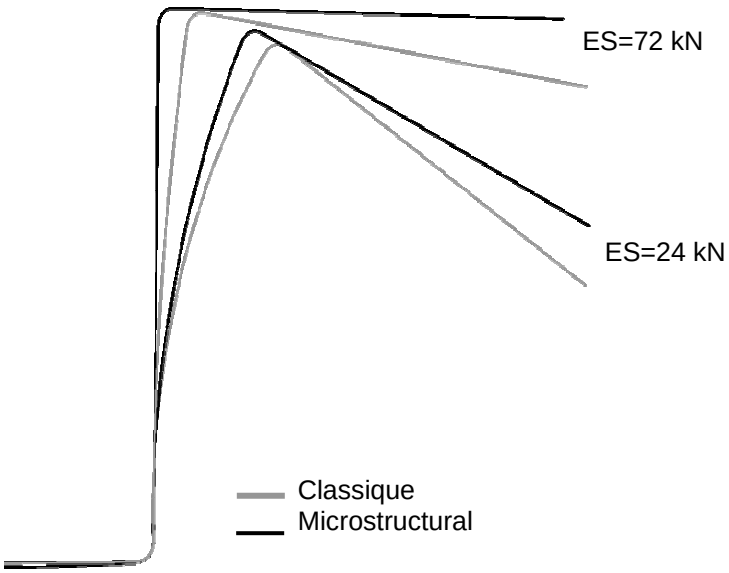


Figure 4. Déformées obtenues après l'étape d'emboutissage (retour élastique) avec les deux modèles d'écrouissage et pour deux efforts de serrage.

L’évolution de la force de réaction du poinçon en fonction de son déplacement lors de l’étape d’emboutissage, obtenues avec les deux modèles d’écrouissage et pour les deux efforts de serrage, est représentée sur la figure 5. Clairement, nous remarquons que pour un effort de serrage donné les deux modèles d’écrouissage n’ont pas beaucoup d’influence sur l’effort d’emboutissage. Par contre, cet effort est d’autant plus grand que l’effort de serrage est grand.

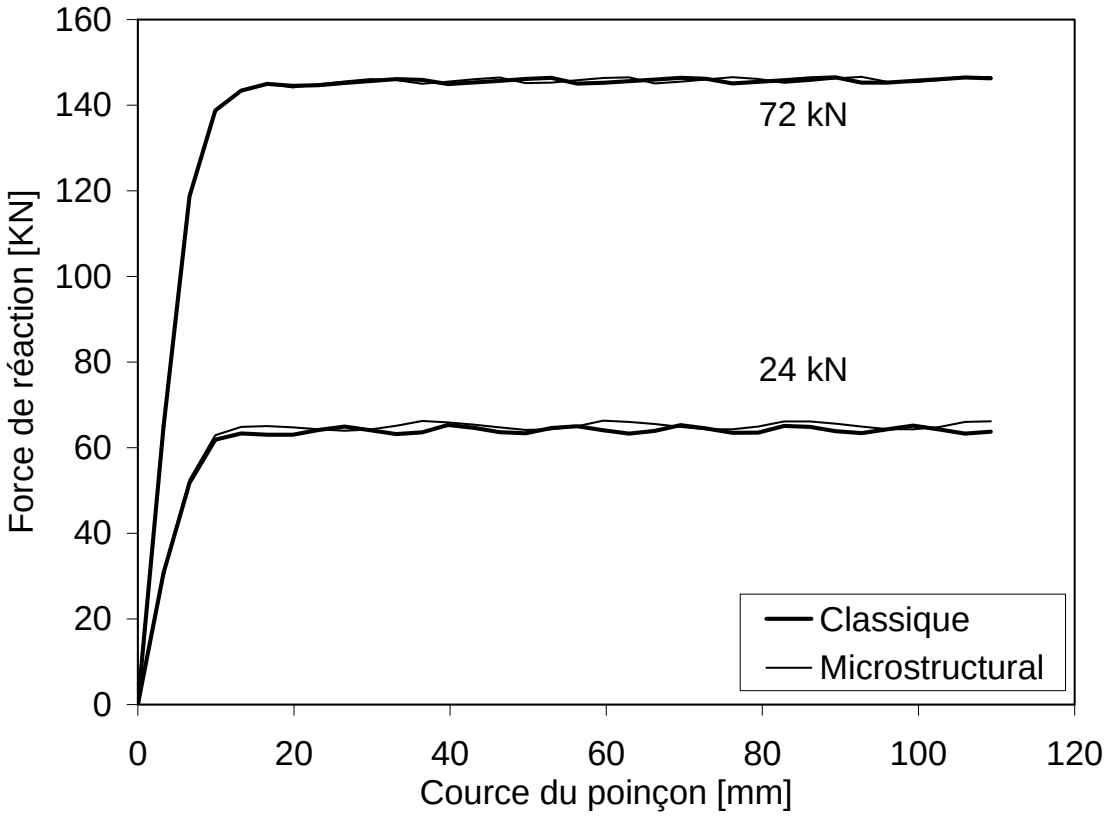


Figure 5. Force de réaction du poinçon.

D’autres paramètres peuvent influencer sur le niveau du retour élastique. Les paramètres numériques, tels que le type d’élément fini et le nombre d’éléments dans l’épaisseur ont un effet considérable. Il est important de s’assurer que le maillage de la tôle est suffisamment raffiné afin de reproduire correctement le comportement mécanique de la tôle lors de l’étape d’emboutissage, notamment lors des changements de trajets de déformation. L’étude est réalisée avec des éléments linéaires à intégration sélective réduite enrichis d’un traitement des modes incompatibles (CPE4I de ABAQUS) et avec quatre couches d’élément dans l’épaisseur.

4. Conclusions

La prise en compte des phénomènes de changement de trajet de déformation dans les modèles de comportement est l’un des éléments clés dans la prédiction fiable du retour élastique en mise en forme des tôles métalliques. A travers un essai standard, l’influence du modèle d’écrouissage sur le retour élastique a été mise en évidence. Cette influence n’est pas négligeable sur la géométrie utilisée, mais peut l’être sur d’autres géométries où la forme de la pièce emboutie ne favorise pas le relâchement des contraintes résiduelles générées lors de l’étape d’emboutissage. Également, l’influence de l’effort de serrage a été mise en évidence, où le niveau du retour élastique obtenu est inversement proportionnel à l’effort de serrage. Enfin, les paramètres numériques, tels que le type d’élément fini et le nombre d’éléments dans

l'épaisseur ont un effet considérable sur le retour élastique ; c'est ce qui rend sa prédiction beaucoup plus délicate.

Références

B. Haddag, T. Balan, F. Abed-Meraim (2006), *Investigation of advanced strain-path dependent material models for sheet metal forming simulations*, Int. J. Plasticity, in press.

C. Teodosiu, Z. Hu (1995), *Evolution of the intragranular microstructure at moderate and large strains: Modelling and computational significance*, Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications, Shen & Dawson editors, pp.173-182.

C. Teodosiu, Z. Hu (1998), *Microstructure in the continuum modelling of plastic anisotropy*. In The 19th Riso Int. Symp. On Materials Science Proceedings, Roskilde, pp. 149-168.

J.L.C.M. Alves (2003), *Simulation numérique du procédé d'emboutissage des tôles métalliques, Modélisation mécanique et méthodes numériques*, Thèse de doctorat, Guimaraes.

S. Bouvier, C. Teodosiu, H. Haddadi et V. Tabacaru (2002), *Anisotropic work-hardening behaviour of structural steels and aluminium alloys at large strains*, Proc. EMMC6-MECAMAT, Liège, pp. 329-336.

H. Haddadi, V. Tabacaru, S. Bouvier, C. Maier et C. Teodosiu (2003), *Essais de Traction/Cisaillement et identification de trois modèles élasto-plastiques pour les aciers DP600, DP500 et DC06*, rapport interne (LPMTM, Université Paris 13).

Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. (1998), *ABAQUS Theory Manual*, V 5.8, section 4.2.2-1.