

# Influence du comportement matériau (anisotropie et écrouissage) lors de la mise en forme par emboutissage inverse

K. Benothmen<sup>a</sup>, P.Y. Manach<sup>b</sup>, K. Elleuch<sup>a</sup>

a. LGME, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Route Soukra Km 3.5 B.P. 1173 3038 Sfax, Université de Sfax, Tunisia, benothmen\_kh@hotmail.fr, khaled\_elleuch@yahoo.fr

b. Univ. Bretagne Sud, FRE CNRS 3744, IRDL, F-56100 Lorient, France, pierre-yves.manach@univ-ubs.fr

## Résumé :

*L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des lois de comportement sur la simulation numérique d'essais d'emboutissage inverse des tôles minces en acier inoxydable AISI 304L. Plusieurs modèles ont été considérés pour prédire les effets combinés d'anisotropie et d'écrouissage, ainsi que les changements des trajets de déformation. L'identification des paramètres de ces modèles est basée sur des essais de traction monotone dans trois directions (0°, 45° et 90°) par rapport à la direction de laminage (DL), ainsi que des essais de cisaillement inversés à différents niveaux de déformation (0.1, 0.2 et 0.3), pour évaluer l'effet Bauschinger. Sur la base des principaux résultats obtenus, on montre que, lors de la première étape d'emboutissage, quels que soient les critères de plasticité utilisés et pour toutes les lois d'écrouissage, l'évolution numérique de l'effort d'emboutissage est très proche des résultats expérimentaux. Pour la deuxième étape, l'influence des critères de plasticité sur l'évolution de la force d'emboutissage est prépondérante par rapport à celle des lois d'écrouissage cinématique. De plus, la distribution de la déformation majeure s'est avérée dépendante à la fois des critères de plasticité et des lois d'écrouissage.*

## Abstract :

*The aim of this work is to study the influence of constitutive models on the accuracy of finite element predictions of reverse deep drawing of thin stainless steel sheets AISI 304L. Several constitutive models have been considered to predict the combined effects (anisotropy and work-hardening) of the plastic yield criteria, as well as strain paths changes. The material parameters are identified using uniaxial tensile tests at 0°, 45° and 90° to the rolling direction (RD), as well as simple and reversed shear tests at different deformation levels (0.1, 0.2 et 0.3), to evaluate the Bauschinger effect.*

*On the basis of the main results obtained, it has been found that, for the first stage, whatever the yield criteria used and for all the hardening models, the numerical punch force evolution is close to the experimental one. For the second stage, the punch force evolution is perfectly predicted on the yield criteria than the kinematic-hardening. Furthermore, the major strain distribution is strongly influenced by the work hardening and the yield criteria.*

**Mots clefs : Emboutissage inverse ; Lois de comportement ; Acier inoxydable ; Simulation numérique.**

## 1. Introduction

Le procédé d'emboutissage est l'un des procédés de mise en forme des tôles les plus utilisés [1]. Dans certaines conditions, les opérations en plusieurs étapes comme pour le procédé d'emboutissage inverse peuvent être nécessaires, principalement à cause de problèmes de complexité géométrique des pièces ou de formabilité [2,3]. Dans ce type de procédé, le mouvement du poinçon, au cours de la deuxième étape, s'effectue dans le sens opposé. La simulation numérique du procédé d'emboutissage inverse joue un rôle clé dans la réussite de la conception de ce procédé, par exemple l'optimisation des paramètres du procédé peut permettre la résolution de phénomènes complexes, tels que striction, rupture, plissement, retour élastique...

Cependant, la simulation numérique du procédé d'emboutissage inverse est particulièrement ardue [2, 4], due aux nombreuses sources de non linéarités [5]. En effet, une bonne prédiction de la simulation numérique du procédé nécessite une bonne prédiction du comportement matériau [6, 7] et notamment la prise en compte des changements de trajets de déformation.

Dans ce contexte, la simulation numérique du procédé d'emboutissage inverse a été développée, afin de prédire avec précision cette opération de mise en forme. Pour y parvenir, une loi d'écrouissage précis et un critère de plasticité adéquat sont requis, ce procédé étant très sensible au comportement du matériau.

## 2. Modélisation du comportement

Un modèle élastoplastique est étudié, comprenant un écrouissage mixte (isotrope et cinématique), ainsi que, soit un critère de plasticité anisotrope (Hill 48), soit un critère de plasticité isotrope (von Mises) pour comparaison. Des déclinaisons de ce modèle sont aussi considérées, utilisant uniquement la partie isotrope de l'écrouissage (IH), ou un écrouissage mixte avec plusieurs contributions d'écrouissage cinématique (IH+ nKH). Pour le critère anisotrope, la contrainte équivalente de Hill 48 [8]  $\bar{\sigma}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{X})$  s'écrit sous la forme:

$$\bar{\sigma}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{X}) = \sqrt{(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) : \mathbf{H} : (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X})} \quad (1)$$

Avec  $\mathbf{H}$  le tenseur de Hill d'ordre 4 diagonal dans le repère d'orthotropie. L'écrouissage retenu est mixte, la partie isotrope étant non linéaire de type Voce:

$$R = \sigma_0 + Q \left( 1 - \exp(-b\bar{\epsilon}^p) \right) \quad (2)$$

Avec  $\sigma_0$  la contrainte seuil,  $Q$  et  $b$  des paramètres matériau. La partie cinématique de l'écrouissage est non linéaire de type Chaboche :

$$d\mathbf{x}_i = \frac{2}{3} C_i d\boldsymbol{\epsilon}_p - \gamma_i x_i d\bar{\epsilon}_p \quad (3)$$

Avec  $C_i$  et  $\gamma_i$  des paramètres matériaux et  $d\bar{\epsilon}_p$  est l'incrément de la déformation plastique équivalente.

L'identification des coefficients est réalisée à partir d'essais expérimentaux de traction monotones dans les trois directions à 0°, 45° et 90° par rapport à la direction de laminage (DL) et des essais de cisaillement Bauschinger uniquement dans la DL, à différents niveaux de déformation en cisaillement, à savoir 0.1, 0.2 et 0.3. Au cours de l'identification, certains coefficients sont fixés comme le module d'Young (E) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) à 203080 MPa et 0,3, respectivement. Les deux coefficients du critère de Hill, L et M sont supposés être égaux au cas isotrope (c.-à-d. L=M=1,5). Afin d'obtenir la limite élastique initiale égale à la limite d'élasticité dans la DL, la relation G+H=1 est imposée. Les tableaux 1 et 2 récapitulent les résultats d'identification des paramètres matériau des

modèles isotrope et anisotrope, respectivement. Avec IH et nKH désignent l'écroutissage isotrope et n écroutissage cinématique, respectivement.

Tableau 1 : Coefficients identifiés pour les modèles isotrope et anisotrope.

Critère de von Mises			Critère de Hill	
Ecroutissage isotrope (IH)	Ecroutissage mixte (IH+2KH)	écroutissage mixte (IH+3KH)	Ecroutissage mixte (IH+3KH)	
$\sigma_0 = 290$ (MPa) $Q = 1170$ (MPa) $b = 2.3$	$\sigma_0 = 200$ (MPa) $Q = 780$ (MPa) $b = 2.3$ $C_1=470, \gamma_1=0$ $C_2 = 11545,$ $\gamma_2 = 90$	$\sigma_0 = 190$ (MPa) $Q = 740$ (MPa) $b = 1.9$ $C_1 = 1200, \gamma_1 = 200$ $C_2 = 40000, \gamma_2$ $C_3 = 700, \gamma_3 = 0$	$\sigma_0 = 190$ (MPa) $Q = 650$ (MPa) $b=2.6$ $C_1=705, \gamma_1=264$ $C_2=31127, \gamma_2=224$ $C_3=612, \gamma_3=0$	Hill'48 parameters  $F=0.5854$ $G=0.5226$ $N=1.5942$

### 3. Emboutissage inverse

#### 3.1. Dispositif expérimental

Les essais d'emboutissage inverse ont été réalisés sur une machine de traction INSTRON 8803 dont la capacité maximale est de 500 kN. Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1. Les dimensions des outils sont résumées dans le tableau 3. Le dispositif, décrit en [9], a été développé pour réaliser les deux étapes successivement. Le dispositif de la première étape est composé d'une matrice qui favorise le centrage de flan circulaire (voir fig. 1 (partie gauche)). Un dispositif de serrage, permettant le contrôle de la force de serrage au début et durant tout l'essai, est assuré par huit vis avec des ressorts et des cellules de charge. Cette partie est reliée au mors mobile de la machine de traction, par contre le poinçon est relié au mors fixe à travers la cellule de force. Pour le deuxième dispositif (voir fig. 1 (partie droite)), la plupart des pièces sont déjà utilisées dans la première étape. En effet, le poinçon de la première étape devient la matrice de la deuxième étape. A la fin de la première étape, le godet est laissé sur le poinçon prêt à être raccordé à une pièce en forme de chapeau (matrice 2) par des vis et des axes de centrage. Comme pour la première étape, le serre-flan est relié à la matrice par huit vis, ressorts et capteurs d'effort. La matrice est fixée au mors fixe de la machine de traction. Enfin, le poinçon est relié au mors mobile. De plus, les déplacements maximaux du poinçon étaient de 60 mm et de 90 mm pour la première et la deuxième étapes, respectivement. La vitesse d'emboutissage est considérée égale à  $0,5 \text{ mm.s}^{-1}$ . L'effort de serrage est fixé à 200 kN. De même, la lubrification du flan est nécessaire dans cet essai. Pour mesurer les champs de déformation des godets, la technique de corrélation d'image (DIC) a été utilisée pour la première étape. A cause du frottement important de la tôle sur les outils, cette technique n'a pas pu être utilisée pour la deuxième étape.

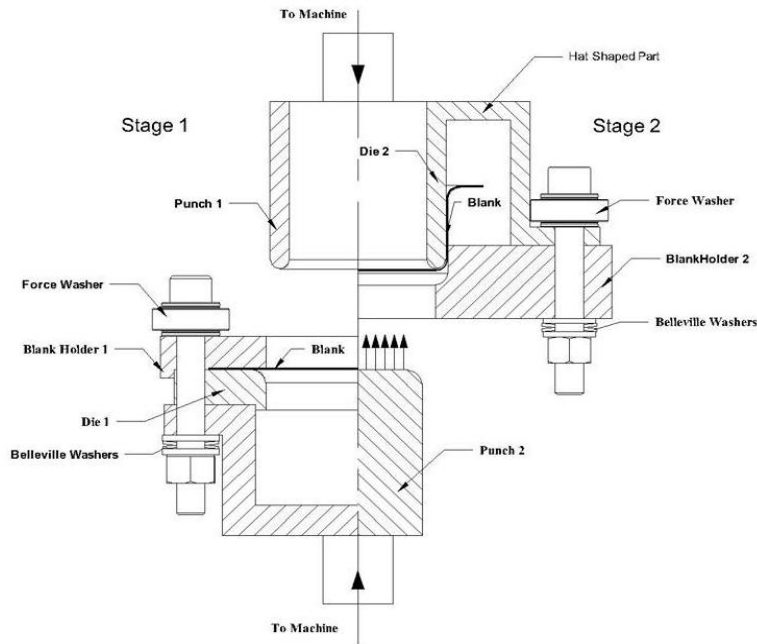


Figure 1: Vue schématique du dispositif expérimental de l'emboutissage inverse (étape 1 à gauche et étape 2 à droite)

Tableau 3 : Dimensions des outils du dispositif et conditions d'emboutissage

	Flan : D, e	Diamètre d'entrée Matrice	Rayon Matrice	Diamètre Poinçon	Rayon Poinçon	Diamètre d'entrée Serre Flan	Rayon Serre Flan	Jeu M/SF
Etape 1	170, 1	104.5	8.0	100.0	5.5	100.0	-	1.0
Etape 2	-	78.0	5.5	73.4	8.5	75	7.0	1.4

### 3.2. Simulation numérique

Les simulations numériques du procédé d'emboutissage inverse ont été effectuées en utilisant le code de calcul élément finis Abaqus / Explicit. Pour des raisons de symétrie, seulement un quart de flan a été modélisé comme corps déformable, tandis que les outils ont été considérés comme des corps rigides discrets (fig. 2). Dans la simulation 3D, les outils ont été maillés avec l'élément R3D4. Des éléments de type coque S4R avec intégration réduite ont été choisis pour mailler le flan. La force de serrage a été fixée à 200 kN/4. La formulation du contact cinématique a été considérée pour modéliser le contact avec lubrification entre le flan et les outils, avec un coefficient de frottement  $f = 0,1$ .

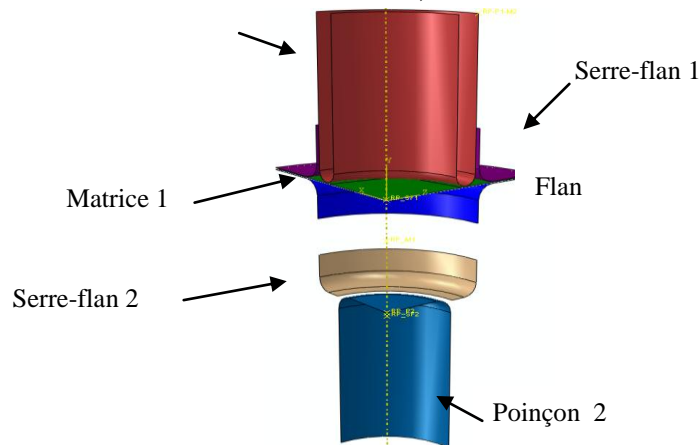


Figure 2: Modèle 3D élément finis du procédé d'emboutissage renversé

## 4. Résultats

### 4.1. Influence de l'écroissage

Afin d'étudier l'influence de l'écroissage dans le procédé d'emboutissage inverse, la figure 3 illustre la comparaison entre les courbes expérimentales et numériques de l'effort en fonction du déplacement du poinçon avec différentes lois d'écroissage en utilisant le critère de plasticité isotrope (Tableau 1). Conformément à [3] pour la première étape (fig. 4 (a)), les simulations numériques avec toutes les lois d'écroissage se sont avérées très proches des résultats expérimentaux. Pour le cas de la deuxième étape (fig. 4 (b)), l'évolution de l'effort d'emboutissage est bien prédite avec les trois lois d'écroissage, mieux que par exemple les résultats obtenus dans [3]. En outre, la distribution de la déformation majeure a également été évaluée à la fin des deux étapes. Comme indiqué dans la figure 4, pour la première étape, une distribution très similaire a été obtenue avec les différents modèles d'écroissage, mais plus faible que celle mesurée expérimentalement (fig. 4 (a)).

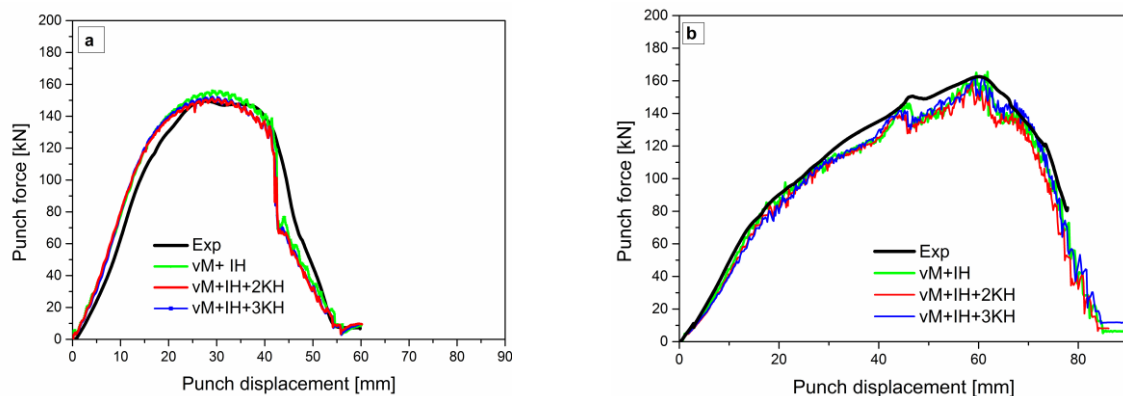


Figure 3. Courbes expérimentales et numériques de l'effort-déplacement du poinçon pour l'étape 1 (a) et l'étape 2 (b) en utilisant le critère de von Mises avec trois modèles d'écroissage

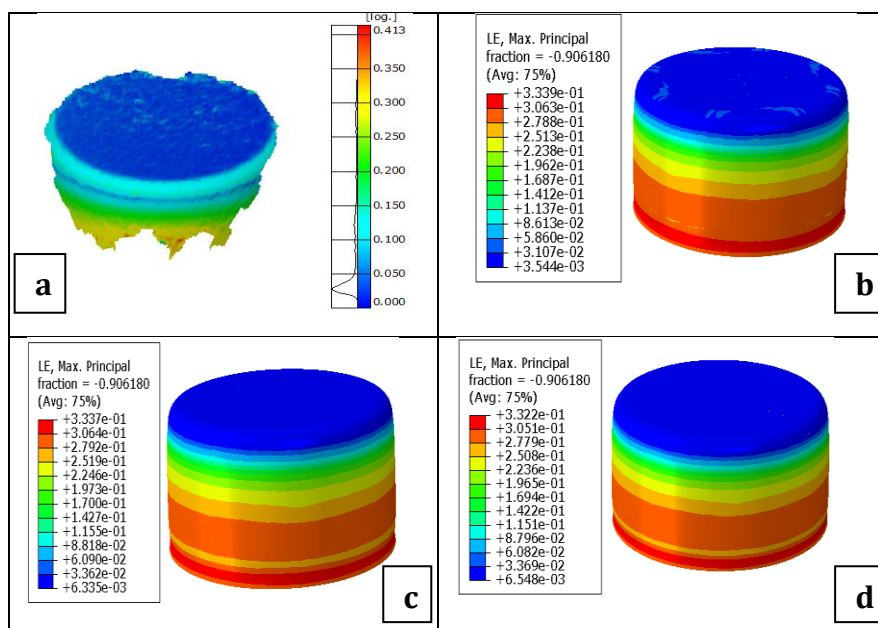
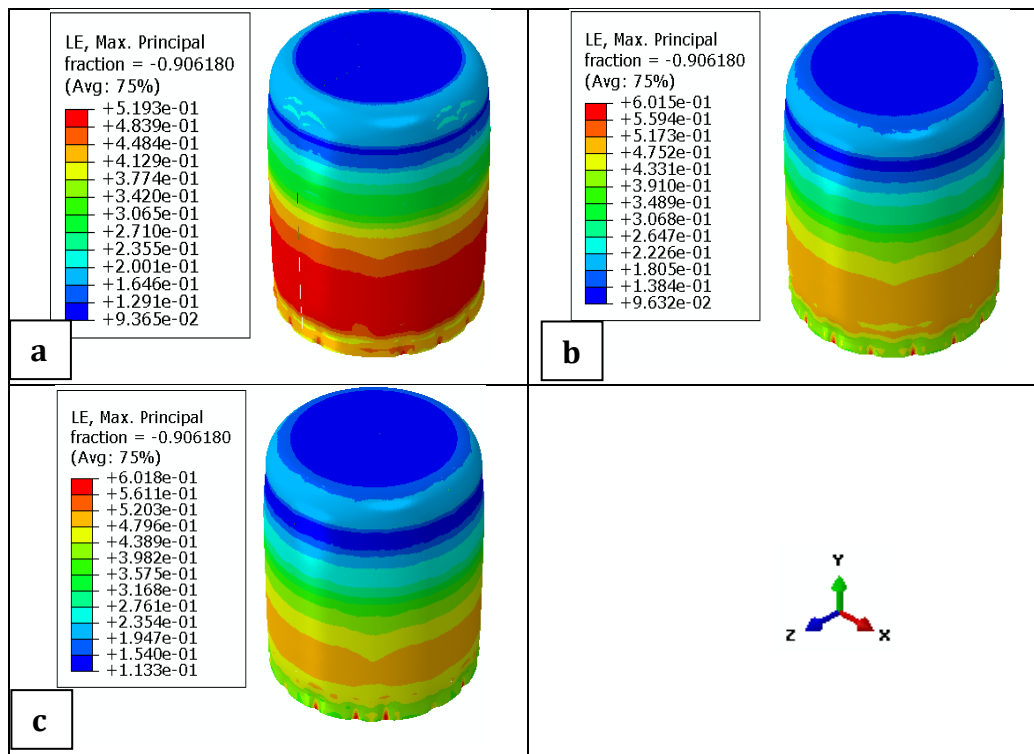


Figure 4. Distribution de déformation majeure à la fin de l'étape 1; (a) expérimentale et numériques avec le critère de von Mises et les lois d'écroissage (b) IH, (c) IH+ 2 KH and (d) IH+3KH.

Dans la deuxième étape, la figure 5 montre une légère augmentation de la déformation majeure avec l'écroutissage mixte (figs. 5 (b et c)).



**Figure 5.** Distribution numérique de la déformation majeure à la fin de l'étape 2 avec le critère de von Mises et les lois d'écroutissage (a) IH, (b) IH+ 2 KH and (c) IH+3KH.

## 4.2. Influence de l'anisotropie

Les courbes numériques et expérimentales de l'effort-déplacement du poinçon pendant la première étape sont illustrées à la Figure 6 (a). Les résultats numériques avec les deux critères de plasticité sont assez semblables montrant une bonne prédiction avec les données expérimentales. L'évolution expérimentale est légèrement supérieure à celles simulées comme déjà démontré par Neto et al. [5]. Ensuite, la distribution de la déformation majeure numérique a été comparée à celle obtenue expérimentalement pour la même étape. Tel que présenté sur les figures 4 (a) et 7 (a), on constate que avec le modèle anisotrope, la distribution de la déformation majeure à 45 ° est supérieure à celles observées à 0 ° et 90 ° par rapport à la DL.

Pour la deuxième étape (fig. 6 (b)), les résultats numériques sont plus élevés que l'évolution expérimentale de l'effort du poinçon. Selon les travaux de Neto et al. [5], cet effet est principalement due à l'écroutissage cinématique. En effet, le critère isotrope conduit à une légère augmentation de l'évolution du poinçon que celle obtenue avec le comportement anisotrope. Par ailleurs, une comparaison entre la distribution de la déformation majeure montre que le critère de Hill a une distribution plus élevée que celle du critère de von Mises (voir figs 5 (c) et 7 (b)).

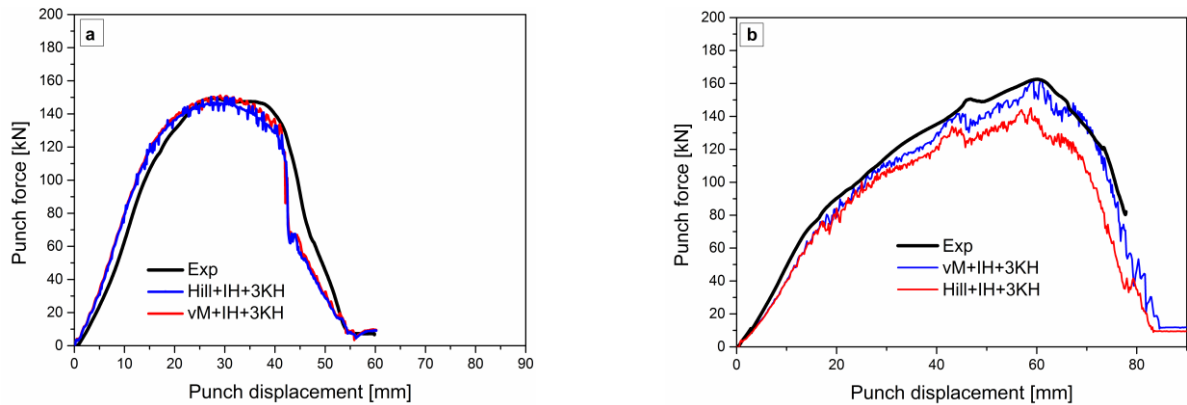


Figure 6. Courbes effort-déplacement expérimentales et numériques des étapes 1 (a) et 2 (b) avec les critères de von Mises et Hill.

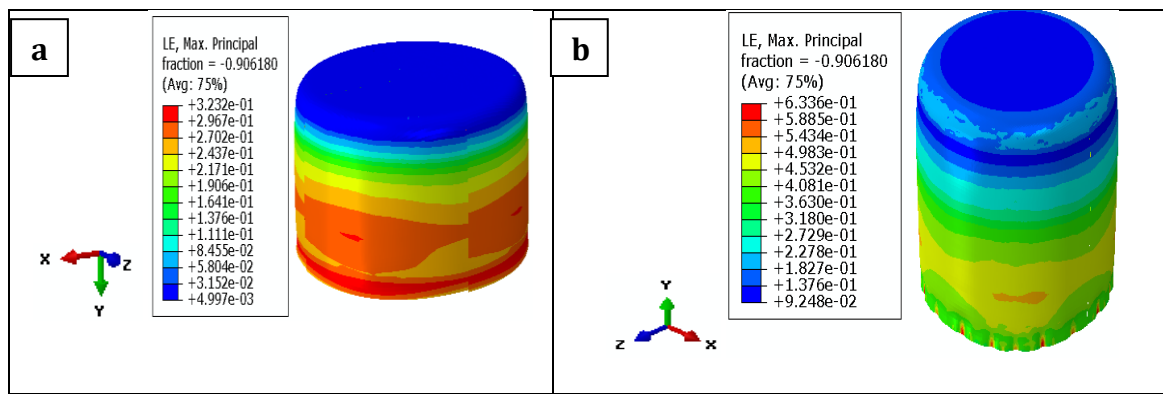


Figure 7. Distributions numériques de la déformation majeure à la fin des étapes 1 (a) et 2 (b) du procédé d'emboutissage renversé avec le critère de Hill.

## 5. Conclusions

Sur la base des principaux résultats obtenus, on montre que, lors de la première étape d'emboutissage, quels que soient les critères de plasticité utilisés et pour toutes les lois d'écoulement, l'évolution numérique de l'effort d'emboutissage est très proche des résultats expérimentaux. Pour la deuxième étape, l'influence des critères de plasticité sur l'évolution de la force d'emboutissage est prépondérante par rapport à celle des lois d'écoulement cinématique. De plus, la distribution de la déformation majeure s'est avérée dépendante à la fois des critères de plasticité et des lois d'écoulement.

## References

- [1] Laurent H, Grèze R, Manach PY, Thuillier S, Influence of constitutive model in springback prediction using the split-ring test, *International Journal of Mechanical Sciences*51(3) (2009) 233-245.
- [2] Min DK, Jeon BH, Kim HJ, Kim N, A study on process improvements of multi-stage deep-drawing by the finite-element method, *Journal of materials processing technology*54(1) (1995) 230-238.
- [3] Thuillier S, Manach P.Y, Menezes L.F, Occurrence of strain path changes in a two-stage deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*210(2) (2010) 226-232.

- [4] Gangadhar J, Reddy K. S. K, Goud R R, Varma P, Prasad, K.E, Varghese G, kumar Singh S, Finite Element Simulation of Direct Redrawing Process of EDD Steel at Elevated Temperatures, *Materials Today: Proceedings*2(4) (2015) 1968-1977.
- [5] Neto D.M, Oliveira M.C, Alves J.L, Menezes L.F, Influence of the plastic anisotropy modelling in the reverse deep drawing process simulation, *Materials & Design*60 (2014) 368-379.
- [6] Abedrabbo N, Pourboghrat F, Carsley J, Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models, *International Journal of Plasticity*23 (2007) 841–75.
- [7] Haddadi H, Belhabib S, Improving the characterization of a hardening law using digital image correlation over an enhanced heterogeneous tensile test, *International Journal of Mechanical Sciences*62 (2012) 47-56.
- [8] Hill R, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*193 (1948) 281-97.
- [9] Thuillier S, Manach PY, Menezes LF, Oliveira MC, Experimental and numerical study of reverse re-drawing of anisotropic sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*125 (2002) 764-771.