

# Prédiction des contraintes résiduelles après emboutissage : influence des changements de trajets de déformation

D. HERAULT<sup>a,b</sup>, S. THUILLIER<sup>a</sup>, P.Y. MANACH<sup>a</sup>

a. Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France, diane.herault@univ-ubs.fr

b. ESI Group, 3 bis Saarinen, CP 50 229, 94528 Rungis Cedex, France

## Résumé :

*Dans le cadre des procédés de mise en forme des tôles métalliques, les changements de trajet de déformation ont une influence sur le comportement des tôles et sur leur formabilité. Cette dépendance a soulevé un certain intérêt depuis plusieurs décennies, tout d'abord sur le plan expérimental, ce qui a conduit au développement d'indicateurs permettant de classer les trajets de déformations en 3 grandes catégories : monotone, inverse et orthogonal. Plusieurs modèles de comportement ont ensuite été développés pour prendre en compte l'influence des changements de trajet de déformation sur l'écrouissage, comme récemment le modèle HAH (Homogeneous Anisotropic Hardening). Pour estimer l'impact de ces changements sur l'état de contrainte final, un procédé de mise en forme à l'échelle du laboratoire est proposé, l'emboutissage en deux étapes d'un godet cylindrique. Cet article présente tout d'abord le comportement d'un acier dual phase DP600 vis-à-vis des changements de trajets de déformation, en comparaison avec les prédictions de deux lois de comportement : un écrouissage isotrope et le modèle HAH, tous deux couplés au critère de plasticité anisotrope Yld2000-2d. La simulation du procédé d'emboutissage est réalisée avec ces deux modèles pour comparer la prédiction des contraintes résiduelles.*

## Abstract :

*In the context of sheet metal forming process, strain path changes impact the material behavior and its formability. For several decades, a growing interest has been observed for this phenomenon, first with an experimental point of view leading to the development of strain path change indicators. Then, advanced constitutive models taking into account the influence of the strain path changes on the material behavior have been developed, as the HAH model (Homogeneous Anisotropic Hardening). To estimate the impact of these changes on the final stress state, a forming process at the laboratory scale is proposed, the direct redrawing of a cylindrical cup. First, the behavior of a dual phase steel DP600 regarding to strain path changes is presented in comparison with the predictions of two constitutive models : isotropic hardening and HAH model, both coupled with the anisotropic yield criterion Yld2000-2d. The forming process simulation is then performed with these two models to compare the prediction of residual stresses.*

**Mots clefs : Simulation numérique, Emboutissage multi-passes, Acier dual phase, Changement de trajet de déformation**

# 1 Introduction

Le prototypage virtuel est de nos jours communément utilisé pour le dimensionnement de pièces automobiles. Afin d'optimiser ce processus, le couplage de plusieurs volets du dimensionnement, appelé conception intégrée, est une perspective intéressante. Dans le domaine de la mise en forme des tôles métalliques, le couplage de la mise au point du procédé et du dimensionnement en fatigue est particulièrement recherché car la tenue en service d'une pièce dépend notamment des contraintes résiduelles après la mise en forme. Il est donc nécessaire d'avoir une prédiction la plus précise possible du champ de contraintes résiduelles dans la pièce.

Au cours de la mise en forme, des trajets de déformation complexes ont lieu et affecte le comportement du matériau dont dépend l'état final de contrainte de la pièce. Des indicateurs permettent de classer ces trajets de déformation et de les prendre en compte dans la modélisation du comportement du matériau. Le premier indicateur proposé dans la littérature est le facteur de Schmitt  $\theta$  [1], correspondant au cosinus de l'angle entre la direction initiale de la déformation et celle après le changement de trajet de déformation. Il prend les valeurs extrêmes de  $-1$  pour une inversion du trajet de déformation et  $1$  pour un trajet monotone ; la valeur intermédiaire nulle correspond au trajet orthogonal. Cependant, cet indicateur n'est pas capable de capter des changements progressifs du trajet de déformation ou plusieurs changements successifs. Des améliorations prenant en compte l'historique de déformation ont été proposées, comme l'indicateur  $\cos \chi = H \hat{\mathbf{h}} : \hat{\mathbf{s}}$  du modèle HAH qui considère l'évolution des contraintes au lieu des déformations. En effet, il compare le déviateur du tenseur des contraintes  $\mathbf{s}$  au tenseur relatif à la microstructure  $\mathbf{h}$  représentant l'historique du chargement,  $\hat{\mathbf{h}}$  et  $\hat{\mathbf{s}}$  correspondant aux tenseurs normalisés. Ce modèle a tout d'abord été développé comme une alternative à l'érouissage cinématique [2] pour modéliser les changements de trajet de type Bauschinger ( $\cos \chi = -1$ ) puis a été amélioré (e-HAH) pour considérer l'influence des changements de trajet orthogonaux [3] sur le comportement du matériau ( $\cos \chi = 0$ ).

Grâce à ce type de modèle, il est possible d'évaluer l'influence des changements de trajets sur le champ de contraintes résiduelles après mise en forme. Dans ce but, un dispositif d'emboutissage en deux étapes, à l'échelle du laboratoire, est proposé car des changements de trajets orthogonaux ont déjà été observés à la deuxième étape sur des procédés similaires [4, 5]. Le matériau sélectionné est un acier dual phase de grade DP600 et d'épaisseur 1,2 mm. Pour estimer l'influence des changements de trajet, deux lois de comportement sont considérées pour décrire son comportement : le modèle e-HAH et un érouissage isotrope, associés au critère de plasticité anisotrope Yld2000-2d. Tout d'abord, les paramètres matériaux sont identifiés à partir d'une base d'essai originale et comparés avec un jeu de paramètres issu de la littérature pour un acier de même grade et épaisseur [6], qui est ensuite utilisé pour la simulation de l'emboutissage. La sensibilité du procédé aux changements de trajets est analysée à partir de l'évolution de  $\cos \chi$  et plus localement par comparaison des contraintes résiduelles prédites par les deux modèles.

## 2 Comportement du matériau

Une campagne expérimentale a été réalisée pour caractériser le comportement de l'acier dual phase DP600 d'épaisseur 1,2 mm et calibrer les deux lois de comportement considérées. L'identification est réalisée avec une approche inverse, qui minimise l'écart entre les résultats expérimentaux et les prédictions numériques, calculées par éléments finis avec l'algorithme développé par M.G. Lee [7] ; cet écart est quantifié par une fonction objectif calculée au sens des moindres carrés par le logiciel SiDoLo [8].

Tout d'abord, les paramètres matériaux du modèle de référence, c'est à dire de l'érouissage isotrope de type Swift couplés au critère de plasticité anisotrope Yld2000-2d sont identifiés sur une base d'essais monotones en traction et cisaillement simple. Ensuite, ces paramètres sont utilisés lors de l'identification des paramètres du modèle e-HAH sur une base d'essais impliquant des changements de trajet inverses et orthogonaux. Les prédictions obtenues pour le jeu de paramètres identifiés sont comparées avec celles données par des paramètres issus de la littérature pour un acier de même grade et de même épaisseur [6].

## 2.1 Ecrouissage isotrope et critère de plasticité anisotrope

Le critère de plasticité Yld2000-2d a été développé pour décrire l'anisotropie des tôles métalliques. Il est défini par la fonction de charge  $\phi$ , Eq. 1, calculée à partir des tenseurs  $\mathbf{X}'$  et  $\mathbf{X}''$ . Ils sont obtenus par deux transformations linéaires du tenseur des contraintes de Cauchy  $\boldsymbol{\sigma}$ , dépendantes des paramètres  $\alpha_i$ ,  $i=1,\dots,8$ . Ces huit paramètres ainsi que les trois paramètres de l'érouissage de type Swift,  $\sigma_y(\bar{\varepsilon}_p) = K \left[ \left( \frac{\sigma_0}{K} \right)^{\frac{1}{n}} + \bar{\varepsilon}_p \right]^n$ , sont identifiés simultanément à partir d'essais de traction uniaxiale réalisés tous les  $15^\circ$  de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  par rapport à la direction de laminage et un essai de cisaillement simple selon la direction de laminage. L'optimisation des paramètres est réalisée à la fois sur la contrainte et la déformation transverse en traction uniaxiale pour décrire au mieux l'anisotropie du matériau. Les résultats de l'identification ainsi que les paramètres issus de la littérature sont présentés dans le Tableau 1. Les deux matériaux ont des comportements très similaires en traction. Cependant, les paramètres d'anisotropie de la littérature sont identifiés sur des données issues seulement de traction alors que la prise en compte du cisaillement simple dans l'identification réalisée conduit à des paramètres sensiblement différents.

$$\phi = |X'_1 - X'_2|^a + |2X''_2 + X''_1|^a + |2X''_1 + X''_2|^a = 2\sigma_y^a(\bar{\varepsilon}_p) \quad (1)$$

avec  $X'_i$  et  $X''_i$ ,  $i = 1, 2$ , les valeurs propres des tenseurs  $\mathbf{X}'$  et  $\mathbf{X}''$ ,  $\sigma_y$  la limite d'élasticité et  $\bar{\varepsilon}_p$  la déformation plastique équivalente.

TABLE 1 – Paramètres de l'érouissage isotrope et du critère de plasticité ( $a = 6$ )

Paramètres	K(MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	n	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$
Identifiés	1057	371	0.171	0.982	1.01	1.017	1.016	1.007	0.982	0.935	1.068
Liao et al. (2017)	1020	391	0.166	0.935	0.968	0.89	0.981	1.017	0.939	0.987	1.072

## 2.2 Modèle e-HAH couplé à Yld2000-2d

La version originale du modèle HAH est considérée comme une alternative à l'érouissage cinématique car la translation de la surface de plasticité est remplacée par une distorsion. La fonction de charge, Eq. 2, est composée de deux termes,  $\phi$  donné par Eq. 1, et  $\phi_h$  qui modélise la distorsion de la surface de plasticité en fonction des changements de trajet captés par  $\cos \chi$ . En l'absence de changement de trajet, le tenseur relatif à la microstructure  $\hat{\mathbf{h}}$  et le déviateur des contraintes  $\hat{\mathbf{s}}$  sont égaux. Lorsqu'un changement intervient, le tenseur  $\hat{\mathbf{h}}$ , dont l'évolution est contrôlée par les paramètres  $z$ ,  $k$ ,  $k_R$  et  $k'_R$ , tend progressivement vers le déviateur  $\hat{\mathbf{s}}$ . De plus, les deux fonctions  $f_1$  et  $f_2$  sont calculés à partir de variables d'états qui contrôlent l'effet Bauschinger. Les variables  $g_1$  et  $g_2$  contrôlent l'amplitude et la vitesse de distorsion avec les paramètres  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$  alors que  $g_3$  et  $g_4$  servent à modéliser l'adoucissement permanent avec les paramètres  $k_4$ ,  $k_5$ .

$$\Phi(\mathbf{s}) = [\phi^q + \phi_h^q] = \{[\phi(\mathbf{s})]^q + f_1^q |\hat{\mathbf{h}} : \mathbf{s} - |\hat{\mathbf{h}} : \mathbf{s}||^q + f_2^q |\hat{\mathbf{h}} : \mathbf{s} + |\hat{\mathbf{h}} : \mathbf{s}||^q\}^{\frac{1}{q}} = \sigma_y(\bar{\varepsilon}_p),$$

$$f_{i \in [1,2]} = \left[ \frac{\sqrt{6H}}{4} \left( \frac{1}{g_i} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{q}} \quad (2)$$

Dans l'amélioration du modèle, la fonction de charge est modifiée pour introduire deux nouvelles variables d'état qui contrôlent les effets des chargements orthogonaux. En effet,  $\phi(s)$  donnée par Eq. 2 est remplacée par  $\xi(s)$ , Eq. 3, où  $\mathbf{s}_c$  et  $\mathbf{s}_o$  sont les composantes du déviateur des contraintes, respectivement coaxiale et orthogonale au tenseur  $\hat{\mathbf{h}}$ . Les variables d'état  $g_L$  et  $g_S$  contrôlent respectivement l'expansion et la contraction de la surface de plasticité due à l'écrouissage latent ou aux chargements orthogonaux grâce aux paramètres  $L$ ,  $k_L$ ,  $S$  et  $k_S$ . Dans le cas des aciers dual phase, l'écrouissage latent n'est pas observé donc les paramètres  $L$ ,  $k_L$  sont respectivement fixés à 1.0 et 0.0 pour ne pas considérer cet aspect du modèle. L'identification des huit paramètres restants est réalisée simultanément sur 3 essais de cisaillement inversés selon la direction de laminage et 3 essais de traction uniaxiale suivis de cisaillement simple, tous deux selon la direction de laminage. Les résultats de l'identification ainsi que ceux de la littérature sont présentés dans le Tableau 2. Les comportements issus de la littérature et de l'identification vis-à-vis des changements de trajets de déformation sont assez similaires, Fig. 1(a) et 1(b). En effet, les courbes ont la même tendance, cependant un décalage du niveau de contrainte est visible qui s'explique notamment par l'absence d'essais de cisaillement lors de l'identification des paramètres de la littérature. De plus, l'évolution de  $\cos \chi$  est représentée pour chaque type d'essai, Fig. 1(c) et 1(d). Les valeurs de  $\cos \chi$  sont proches des valeurs attendues pour ce type d'essai, avec cependant une dépendance de l'intensité du changement de trajet aux paramètres matériaux.

$$\xi(\mathbf{s}) = \sqrt{\phi^2 \left( \mathbf{s}_c + \frac{1}{g_L} \mathbf{s}_o \right) + \phi^2 \left( \frac{4(1-g_S)}{g_L} \mathbf{s}_o \right)} \quad (3)$$

TABLE 2 – Paramètres du modèle e-HAH ( $q = 2$ ,  $H = \frac{8}{3}$ ,  $z = 5$ ,  $k_r = 15$ ,  $k'_r = 0.2$ ,  $L = 0$ ,  $k_L = 1$ )

Paramètres	$k$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$S$	$k_S$
Identifiés	79.6	106	65.8	0.374	0.834	5.11	0.764	157
Liao et al. (2017)	43.8	200.7	16.1	0.31	0.85	3.0	0.825	148.0

### 3 Dispositif d'emboutissage

De précédentes études ont montré que des trajets de déformations complexes ont lieu lors des procédés d'emboutissage, en particulier pour ceux en plusieurs étapes. Des changements de trajets orthogonaux sont prédits à la deuxième étape lors de l'emboutissage inverse d'un Benchmark de Numisheet99 [4]. Avec pour objectif de miniaturiser les dispositifs existants, un dispositif d'emboutissage est proposé dans cette étude. A partir d'un flan circulaire de diamètre 100 mm, un godet de diamètre 45 mm est obtenu après deux étapes d'emboutissage réalisées successivement dans la même direction. Au cours de la première étape, un godet de diamètre 60 mm est formé par le déplacement du poinçon et le maintien du flan entre le serre-flan et la matrice avec un effort de 40 kN. Lors de la deuxième étape, le premier godet maintenu par la deuxième matrice et le poinçon de l'étape 1, qui a maintenant le rôle de serre-flan, est embouti par le déplacement du deuxième poinçon dans la même direction pour obtenir un godet de diamètre final 45 mm. Les deux étapes d'emboutissage sont représentées sur la figure 2.

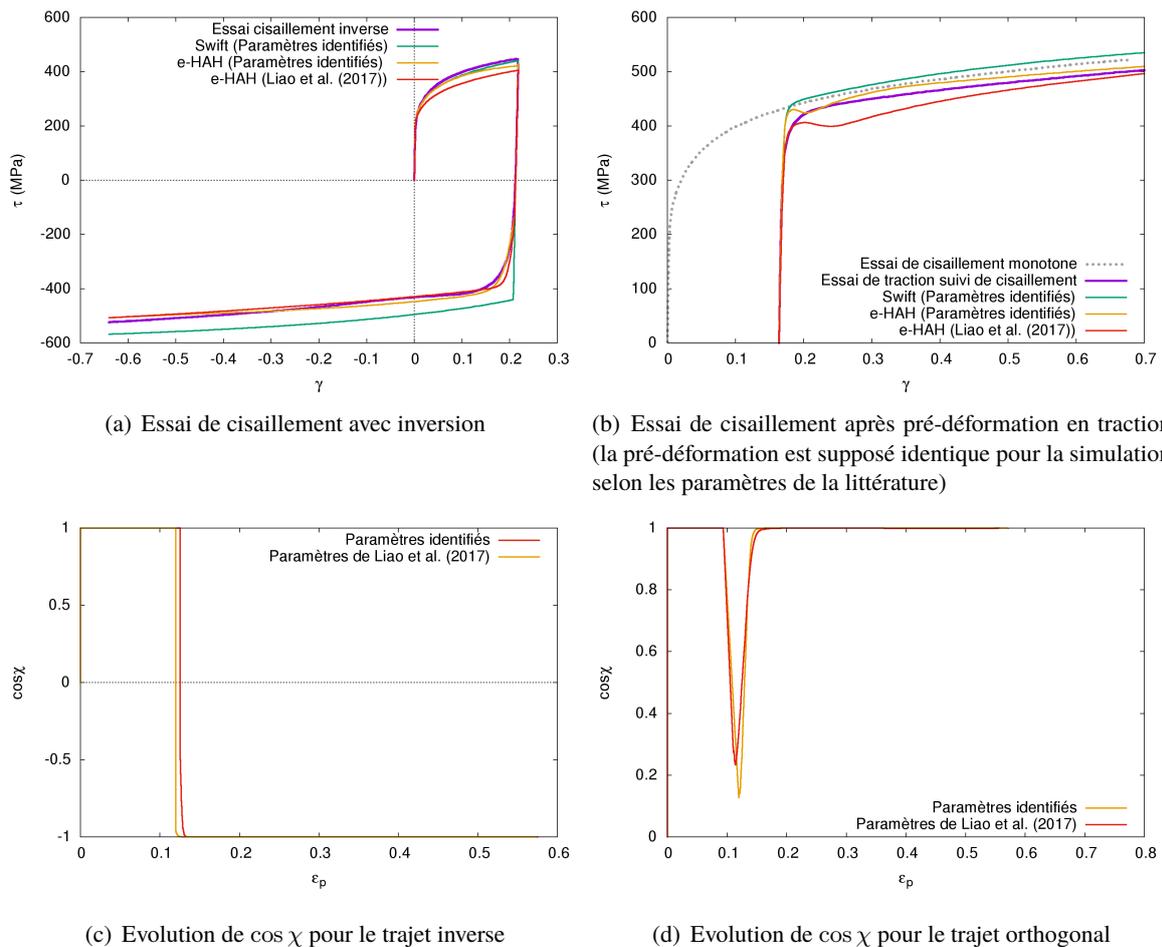


FIGURE 1 – Comparaison des résultats de l’identification des modèles avec ceux obtenus pour les paramètres de la littérature ainsi que de l’évolution de  $\cos \chi$  pour chaque type d’essai. ( $\epsilon_p$  représente la déformation plastique équivalente,  $\tau$  est la contrainte de cisaillement et  $\gamma$  la mesure de déformation en cisaillement)

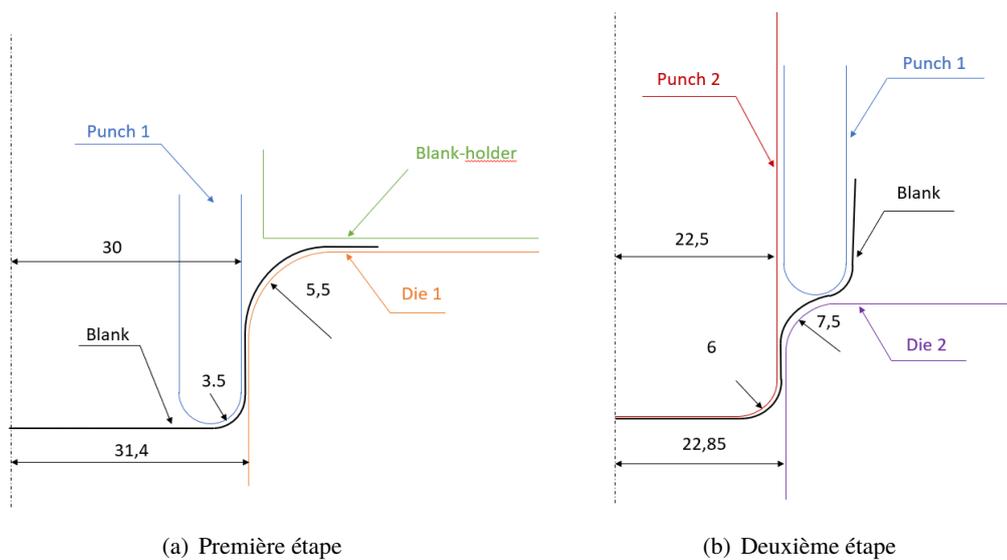


FIGURE 2 – Schémas des deux étapes d’emboutissage (les dimensions sont en mm)

Le procédé est simulé numériquement avec les lois de comportement présentées dans la section 2 et les paramètres issus de la littérature. Pour réduire les temps de calcul, seul un quart du flan est modélisé avec des éléments coques à 4 noeuds et intégration réduite. Le maillage est divisé en deux parties avec un maillage fin (taille de maille d'environ 0,3 mm) sur la partie du flan en contact avec les outils et plus grossier sur le reste du flan. Le nombre total d'éléments est de 8644 avec 9 points d'intégration dans l'épaisseur. Les outils sont modélisés rigides et le contact avec le flan suit la loi de Coulomb avec une méthode de pénalisation. Le coefficient de frottement est fixé à 0.2 pour tous les contacts.

## 4 Résultats et discussion

L'objectif de cette étude est de valider la géométrie proposée, à partir des prédictions numériques des changements de trajet et de vérifier la sensibilité du champ de contraintes résiduelles à la loi de comportement. La simulation du procédé de mise en forme avec le modèle e-HAH permet de visualiser l'évolution de  $\cos \chi$  dans toute la pièce. Les isovaleurs de  $\cos \chi$  à la fin de chaque étape sont représentées sur la figure 3. A la fin de la première étape, l'indicateur est majoritairement égal à 1 correspondant donc à des trajets monotones ou à des changements de trajet minimes. Des changements de trajets plus importants se produisent aux alentours du rayon du poinçon, ce qui explique que l'indicateur ne soit pas revenu à sa valeur initiale. A la deuxième étape la proportion du godet soumise à des changements de trajet importants est beaucoup plus grande, puisque seul le centre du godet et l'extrémité du mur ne sont pas ou peu impactés. Les changements de trajet de type orthogonal ont lieu dans le mur du godet notamment au niveau du rayon du premier godet formé. Pour quantifier l'impact des changements de trajets quasi-orthogonaux sur les contraintes résiduelles, une analyse plus locale est réalisée dans cette zone en considérant seulement l'étape 2. Un élément situé dans la zone entourée sur la figure 3, pour un rayon de 31 mm exactement, et à  $45^\circ$  de la direction de laminage est choisi.

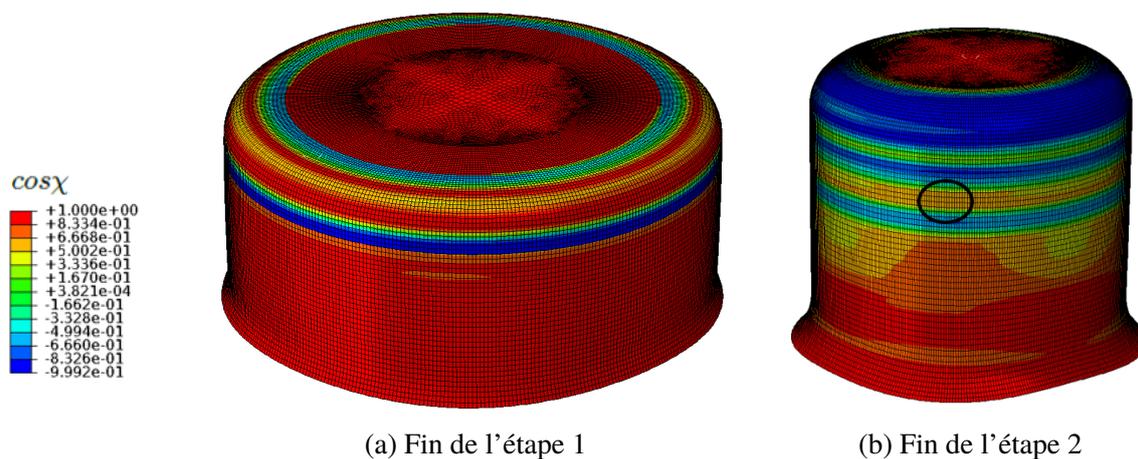


FIGURE 3 – Isovaleurs de  $\cos \chi$  à la fin de chaque étape d'emboutissage

L'évolution de  $\cos \chi$  pour le dernier point d'intégration de l'épaisseur de l'élément, c'est à dire sur la face au contact du poinçon, montre un changement de trajet quasi-orthogonal entre 0 mm et 15 mm, Fig. 4(a). Lorsque que  $\cos \chi$  est revenu à la valeur 1, après 15 mm de déplacement, la contrainte prédite par le modèle e-HAH pour la composante  $\sigma_{11}$ , (Fig. 4(b)) devient plus faible que celle prédite par le modèle de référence. Cet écart de 100 MPa environ est ensuite conservé jusqu'à la fin de l'emboutissage. L'évolution des autres composantes  $\sigma_{12}$  et  $\sigma_{22}$  est aussi impactée par le changement de trajet en particulier  $\sigma_{12}$  (écart final de 175 MPa environ). Les résultats de la simulation avec le modèle e-HAH valident donc la sensibilité de ce procédé au changements de trajet.

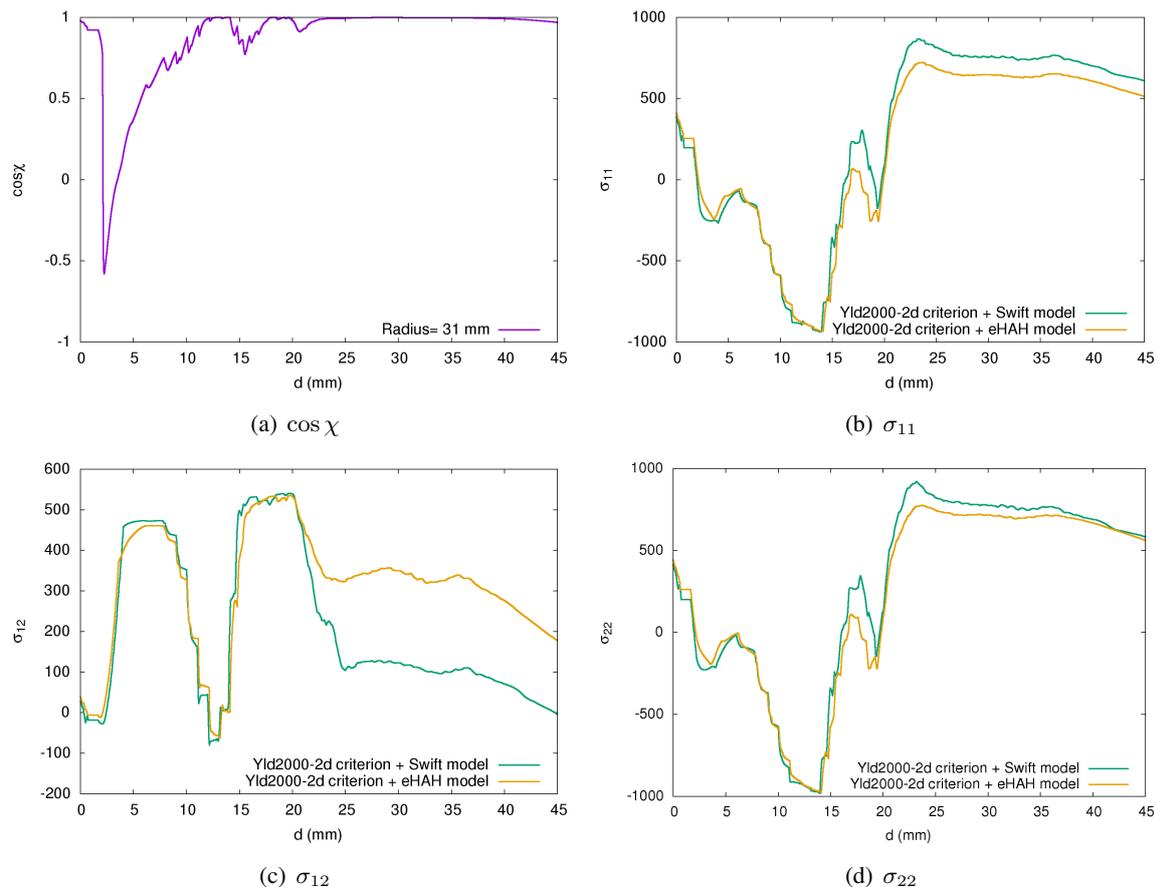


FIGURE 4 – Evolution de  $\cos \chi$  et des composantes  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{12}$ , et  $\sigma_{22}$  des contraintes dans le repère local lié à l'élément coque, similaire pour les deux modèles, en fonction du déplacement du poinçon  $d$  pour un élément situé à  $45^\circ$  de la direction de laminage et à un rayon de 31 mm

## 5 Conclusion

La simulation du procédé d'emboutissage permet d'estimer l'influence des changements de trajet de déformation sur la déformation plastique équivalente et sur le champ de contraintes résiduelles de la pièce finale. Deux modèles de comportement, calibrés pour un acier DP600 d'épaisseur 1,2 mm, sont utilisés dans cette étude, le critère de plasticité anisotrope Yld2000-2d couplé à un écrouissage isotrope de type Swift ou au modèle e-HAH. L'indicateur  $\cos \chi$  de ce dernier modèle permet de visualiser les changements de trajet de déformation lors du procédé. En particulier, il permet de conclure que les changements de trajets de déformation de la première étape sont faibles, contrairement à ceux de la

deuxième étape où la différence est plus marquée entre les prédictions des modèles.

## Références

- [1] J. H. Schmitt, E. Aernoudt, and B. Baudelet, “Yield loci for polycrystalline metals without texture,” *Materials Science and Engineering*, vol. 75, no. 1-2, pp. 13–20, 1985.
- [2] F. Barlat, J. J. Gracio, M.-G. Lee, E. F. Rauch, and G. Vincze, “An alternative to kinematic hardening in classical plasticity,” *International Journal of Plasticity*, vol. 27, pp. 1309–1327, Sept. 2011.
- [3] F. Barlat, G. Vincze, J. Grácio, M.-G. Lee, E. Rauch, and C. Tomé, “Enhancements of homogenous anisotropic hardening model and application to mild and dual-phase steels,” *International Journal of Plasticity*, vol. 58, pp. 201–218, July 2014.
- [4] S. Thuillier, P. Manach, and L. Menezes, “Occurrence of strain path changes in a two-stage deep drawing process,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 226–232, Jan. 2010.
- [5] D. Herault, S. Thuillier, P.-Y. Manach, and J.-L. Duval, “Strain path changes in Reverse Redrawing of DP Steels,” in *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 418, p. 012042, IOP Publishing, 2018.
- [6] J. Liao, J. A. Sousa, A. B. Lopes, X. Xue, F. Barlat, and A. B. Pereira, “Mechanical, microstructural behaviour and modelling of dual phase steels under complex deformation paths,” *International Journal of Plasticity*, vol. 93, pp. 269–290, June 2017.
- [7] J. Lee, D. Kim, Y.-S. Lee, H. Bong, F. Barlat, and M.-G. Lee, “Stress update algorithm for enhanced homogeneous anisotropic hardening model,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 286, pp. 63–86, Apr. 2015.
- [8] G. Cailletaud and P. Pilvin, “Identification and inverse problems : a modular approach,” *ASME Applied Mechanics Division-Publications-AMD*, vol. 168, pp. 33–33, 1993.