



HAL
open science

Simulation de l'emboutissage en multi-passes par l'Approche Pseudo Inverse

Yu-Ming Li, Fabien Bogard, Ying-Qiao Guo

► **To cite this version:**

Yu-Ming Li, Fabien Bogard, Ying-Qiao Guo. Simulation de l'emboutissage en multi-passes par l'Approche Pseudo Inverse. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812958

HAL Id: hal-01812958

<https://hal.science/hal-01812958>

Submitted on 12 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Simulation de l'emboutissage en multi-passes par l'Approche Pseudo Inverse

Yu-Ming Li - Fabien Bogard - Ying-Qiao Guo

*Groupe de Mécanique, Matériaux et Structures, Université de Reims Champagne Ardenne, Moulin de la Housse, BP 1039, 51687, Reims Cedex 2, France
yuming.li@univ-reims.fr, fabien.bogard@univ-reims.fr, yq.guo@univ-reims.fr*

RÉSUMÉ. Le procédé d'emboutissage en multi-passes permet d'obtenir un chemin de déformation idéal pour éviter la striction et le plissement de la tôle. A partir d'une approche simplifiée appelée Approche Inverse, l'Approche Pseudo Inverse a été développée récemment pour prendre en compte l'historique de déformation et améliorer l'estimation de contraintes tout en gardant la simplicité et la rapidité de l'Approche Inverse. Trois développements sont réalisés pour simuler l'emboutissage en multi-passes : des configurations intermédiaires sont générées par la minimisation de la surface de tôle, une méthode de transfert de champs est développée pour assurer la cohérence des maillages entre deux configurations, un nouvel algorithme direct basé sur une méthode scalaire est proposé pour l'intégration plastique.

ABSTRACT. The deep drawing process in multi-steps allows to obtain an ideal deformation path in order to avoid the necking and wrinkling of the sheet. Based on a simplified approach called Inverse Approach, Pseudo Inverse Approach has been developed recently in order to consider the loading history and to improve the stress estimation in keeping the simplicity and rapidity of the Inverse Approach. Three developments are realized to simulate the deep drawing process in multi-steps: some intermediate configurations are generated by the minimization of the sheet surface, a method of field transfer is developed to ensure the coherence of the FE mesh between two configurations, a new direct algorithm based on a scalar method is proposed for the plastic integration.

MOTS-CLÉS : Emboutissage, multi-passes, Approche Pseudo Inverse, configurations intermédiaires, transfert de champs, nouvel algorithme de plasticité.

KEYWORDS : Sheet forming, multi-steps, Pseudo Inverse Approach, intermediate configurations, field transfer, new algorithm of plasticity.

1. Introduction

Le procédé d'emboutissage de tôles minces est largement utilisé pour la fabrication de carrosseries automobiles. Deux approches numériques sont souvent utilisées : l'approche incrémentale permet de simuler le problème physique pas à pas d'une façon précise mais coûteuse ; l'Approche Inverse (AI), moins précise mais beaucoup plus rapide, permet d'étudier différents paramètres pour la conception et l'optimisation des outillages (Guo, 1990 ; Batoz, 1998). L'AI donne une bonne estimation des déformations mais une estimation médiocre des contraintes en raison de l'ignorance de l'historique des déformations. Elle est donc limitée au calcul des déformations et non adaptée aux problèmes de retour élastique, d'endommagement et de multi-passes.

Le procédé en multi-passes est souvent nécessaire pour obtenir un meilleur chemin de déformation et ainsi éviter la striction et plissement. L'Approche Pseudo Inverse (API) récemment développée à partir de l'AI permet de prendre en compte l'historique de déformation et de bien estimer l'état de contraintes. Trois aspects seront présentés dans ce papier : 1) de "vraies" configurations intermédiaires sont déterminées par la minimisation de la surface de tôle et introduites pour considérer l'historique de déformation ; 2) le passage d'information entre deux maillages indépendants est réalisé par un transfert de champs dans le flan initial ; 3) un nouvel algorithme de plasticité permet une intégration rapide de plasticité sans processus itératif (Guo, 2004 ; Titeux, 2004). Enfin nous mettrons en évidence la possibilité de simuler l'emboutissage en multi-passes par l'API.

2. Génération de configurations intermédiaires

Des configurations intermédiaires sont introduites dans l'API pour tenir compte de l'historique de déformation. Elles sont générées géométriquement en amont du calcul inverse pour éviter le traitement classique du contact.

Considérons une tôle mince entre la matrice et le poinçon. La tôle est supposée comme une membrane tendue entre les outils, alors sa forme peut être déterminée par minimisation de sa surface. Un problème d'optimisation est établi en prenant les coordonnées verticales des nœuds de la tôle comme variables de conception, les surfaces de la matrice et du poinçon comme limitations, et la minimisation de l'aire de la tôle comme fonction objectif (Fig. 1). Ce problème est résolu par l'algorithme SQP (Sequential Quadratic Programming).

La présente méthode donne une bonne forme géométrique mais un maillage trop distordu : les éléments sur les parois quasi-verticales deviennent tellement étroits au premier pas que la convergence devient difficile. Une technique de rabattement est utilisée pour "uniformiser" les tailles d'éléments dans le maillage. Nous notons que les maillages ainsi obtenus sont indépendants entre eux, un transfert de champs est utilisé pour établir un lien physique entre ces maillages.

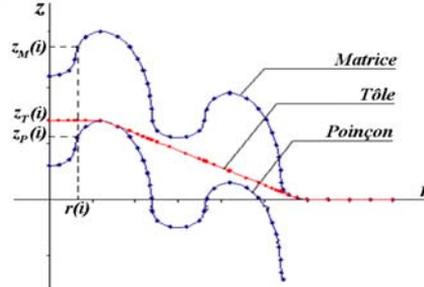


Figure 1. Génération des configurations intermédiaires entre outils

3. Transfert des champs de contraintes et de déformations

Dans l'API, un calcul inverse (AI) est effectué sur chaque configuration intermédiaire en prenant l'état de déformations et de contraintes du pas précédent pour tenir compte de l'historique du chargement.

Le transfert de champs est impossible entre deux maillages 3D indépendants (à la fin du pas P et à chaque itération du pas P+1). C'est dans le flan initial où on peut établir un lien physique entre les deux maillages, mais les tailles d'éléments irrégulières et les champs discontinus entre éléments peuvent impliquer l'instabilité numérique donc la divergence. Pour obtenir un champ lisse et continu au pas P, les contraintes (ou déformations) constantes par élément sont assemblées aux nœuds avec la pondération d'angles, et les interpolations linéaires des valeurs nodales sont utilisées pour calculer les valeurs à un point dans chaque élément :

$$v_n = \frac{\sum_{e=1}^m (v^e \alpha^e)}{\sum_{e=1}^m \alpha^e} \quad (m \text{ éléments réunis au nœuds } n) \quad [1]$$

$$v_g = (v_1 \Delta_{23g} + v_2 \Delta_{31g} + v_3 \Delta_{12g}) / \Delta_{123} \quad (\text{point } g \text{ dans l'élément } 123) \quad [2]$$

où le point g peut être le centre de gravité d'un élément du pas P+1.

4. Algorithme direct d'intégration plastique

Les algorithmes de plasticité classiques consistent à exprimer le critère de Hill en fonction du multiplicateur plastique λ et à trouver λ par une résolution itérative (Simo *et al.*, 1986). Dans cette étude, le vecteur de contraintes est exprimé en fonction de λ et ensuite transformé en une équation scalaire en utilisant la notion de contrainte équivalente. Ainsi le vecteur de contraintes inconnues est remplacé par sa contrainte équivalente connue et λ est obtenu directement sans itération.

Le critère de plasticité de Hill avec les hypothèses de contraintes planes et d'écroutissage isotrope s'écrit :

$$f = \sigma_{eq} - \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p) = \left(\langle \sigma \rangle [P] \{ \sigma \} \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p) = 0 \quad [3]$$

où σ_{eq} est la contrainte équivalente, $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p)$ la courbe de traction uniaxiale, $\bar{\varepsilon}_p$ la déformation plastique équivalente, $[P]$ la matrice définie par le coefficient d'anisotropie moyen $r = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$.

En utilisant le critère de Hill, la loi de normalité et la décomposition des déformations, le vecteur des contraintes peut être exprimé en fonction du multiplicateur plastique $\Delta\lambda$:

$$\{ \Delta \varepsilon_p \} = \Delta\lambda \frac{\partial f}{\partial \{ \sigma \}} = \Delta\lambda [P] \{ \sigma \} / \sigma_{eq} \quad [4]$$

$$\{ \sigma_{n+1} \} = \{ \sigma_n \} + [H_e] \{ \Delta \varepsilon \} - \Delta\lambda E \{ \sigma_{n+1} \} / \sigma_{eq} \quad [5]$$

où nous avons utilisé $\nu = r/(1+r)$ et donc $[H_e][P] = E[I]$ car les déformations élastiques sont très petites devant les déformations plastiques en emboutissage.

a) Séparation des déformations élastiques et plastiques

Un phénomène important dans l'emboutissage est la décharge et la recharge élastiques dues aux cambrages et décambrages de la tôle sur le rayon d'entrée matrice. La séparation des déformations élastiques et plastiques est indispensable dans l'intégration de plasticité. Supposons que la partie de déformation élastique $\gamma \{ \Delta \varepsilon \}$ permet d'amener l'état de contraintes à la surface d'écoulement :

$$f \left(\{ \sigma_{n+1}^\gamma (\gamma \{ \Delta \varepsilon \}) \} \right) = 0 \quad \text{avec} \quad \{ \sigma_{n+1}^\gamma \} = \{ \sigma_n \} + \gamma [H_e] \{ \Delta \varepsilon \} \quad [6]$$

Au lieu de résoudre [6] itérativement, nous calculons la contrainte équivalente :

$$\left(\sigma_{eq,n+1}^\gamma \right)^2 = \left(\sigma_{eq,n} \right)^2 + E^2 \gamma^2 \Delta \bar{\varepsilon}^2 + 2E\gamma \langle \sigma_n \rangle \{ \Delta \varepsilon \} \quad [7]$$

La condition $\sigma_{eq,n+1}^\gamma = \sigma_{eq,n}^\gamma$ signifie que l'état de contraintes quitte la surface d'écoulement et revient après une décharge-recharge élastique. Cela permet de déterminer γ :

$$\gamma = -2 \langle \sigma_n \rangle \{ \Delta \varepsilon \} / (E \Delta \bar{\varepsilon}^2) \quad [8]$$

où γ doit être une valeur entre 0 et 1, $\gamma = 0$ si $\gamma < 0$ et $\gamma = 1$ si $\gamma > 1$ ($\{ \Delta \varepsilon \}$ ne permet pas à l'état de contraintes de revenir à la surface d'écoulement). Ainsi la déformation plastique équivalente est calculée comme suit:

$$\bar{\varepsilon}_{p,n+1} = \bar{\varepsilon}_{p,n} + (1-\gamma)\Delta\bar{\varepsilon} \quad [9]$$

b) Calcul directe du multiplicateur $\Delta\lambda$

Le critère de plasticité est une fonction implicite et non linéaire de $\Delta\lambda$ (Eqs. 3 et 5). Une résolution itérative est nécessaire dans un algorithme classique (Return Mapping, Simo *et al.*, 1986). Dans la présente étude, le vecteur des contraintes inconnues (Eq. 5) est transformé en contrainte équivalente $\sigma_{eq,n+1}$ qui est un scalaire et peut être obtenu par la courbe de traction uniaxiale $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p)$:

$$(1 + \Delta\lambda E / \sigma_{eq,n+1}) \{\sigma_{n+1}\} = \{\sigma_n\} + [H_e] \{\Delta\varepsilon\} \quad [10]$$

$$(\sigma_{eq,n+1} + \Delta\lambda E)^2 = (\{\sigma_n\} + [H_e] \{\Delta\varepsilon\})^T [P] (\{\sigma_n\} + [H_e] \{\Delta\varepsilon\}) \quad [11]$$

L'équation [11] permet de trouver $\Delta\lambda$ directement et ensuite de calculer $\{\sigma_{n+1}\}$.

5. Résultats numériques

L'emboutissage d'une pièce axisymétrique est simulé avec l'API en une seule passe ou en 2 passes (courses des poinçons : 10 mm et puis -20 mm). Les données sont : poinçon $\phi d=100$ mm, $r=5.5$ mm, matrice $\phi d=104.5$ mm, $r=8$ mm pour la passe 1 ; poinçon $\phi d=73.4$ mm, $r=8.5$ mm, matrice $\phi d=78$ mm, $r=5.5$ mm pour la passe 2 ; tôle en Alu. $E=70000$ MPA, $\nu=0.3$, $K=559.66$, $n=0.226$, $\phi d=180$ mm, $h=1.13$ mm, frottement $\mu=0.144$, anisotropie $\bar{r}=0.95$, pression=1000 daN.

Un quart de la pièce est discrétisé en 2422 éléments et 1291 nœuds. Le temps CPU est de 1 mn en une seule passe et de 5 mn en 2 passes. On observe que le procédé en deux passes permet d'améliorer la variation d'épaisseur (-33.23% au lieu de -34.84% obtenu par une seule passe, Fig. 2), mais la variation d'épaisseur n'est pas très sensible au nombre de passes.

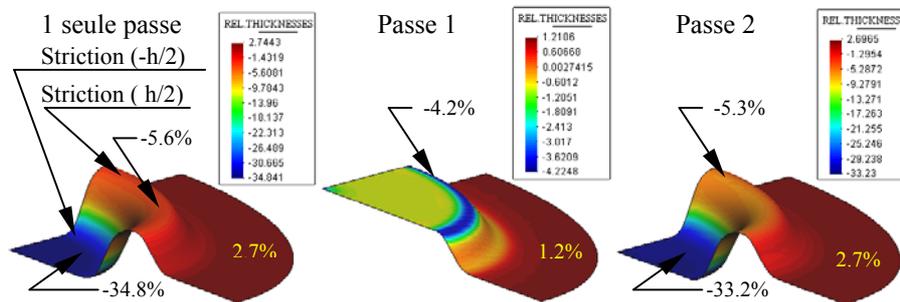


Figure 2. Variation d'épaisseur obtenue par une passe et deux passes

Dans les diagrammes de limite de formage (Fig. 3), nous constatons qu'en une seule passe l'état de déformations en certains points dépasse la courbe limite de formage et donc implique la striction (zones indiquées sur Fig. 2), et qu'en deux passes la striction est évitée grâce à un meilleur chemin de déformation de la tôle.

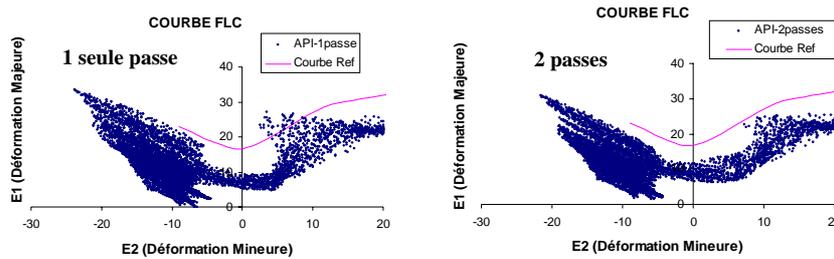


Figure 3. Diagrammes de limite de formage (FLD) en une passe et deux passes

6. Conclusions

L'API est développée à partir de l'AI pour prendre en compte l'historique de déformation de tôles minces embouties. De "vraies" configurations intermédiaires sont introduites afin de tenir compte de l'historique de déformation. Le transfert de champs de contraintes est utilisé pour établir un lien physique entre des maillages indépendants. Un nouvel algorithme de plasticité très rapide basé sur la théorie d'écoulement est proposé pour l'intégration plastique. L'API donne une possibilité de simuler rapidement l'emboutissage en multi-passes. Les résultats numériques montrent que la pièce cassée par une seule passe peut être réalisée par deux passes.

Les auteurs tiennent à remercier le Pôle Mécanique, Matériaux Champagne-Ardenne pour son soutien financier dans le cadre d'un projet CPER.

7. Bibliographie

- Simo J.C., Taylor R.L., 1986, "A return mapping algorithm for plane stress elastoplasticity", Int. J. Num. Meth. Engng., 22, 649-670, 1986.
- Guo Y.Q., Batoz J.L., Detraux, J.M., Duroux, P., "Finite element procedures for strain estimations of sheet metal forming parts", IJ Num Meth Eng, Vol 30, p1385-1401, 1990.
- Batoz J. L., Guo Y. Q., Mercier F., "The inverse approach with simple triangular shell elements for large strain predictions of sheet metal forming parts", Engineering Computations, Vol. 15, n° 6, 7, p. 864-892, 1998.
- Titeux I., Li Y.M., Debray K., Guo Y.Q., "Un algorithme efficace d'intégration plastique pour un matériau obéissant au critère de Hill", Comptes Rendus Mécanique, sept., 2004.
- Guo Y.Q., Li Y.M., Bogard F., Debray K., "An efficient Pseudo Inverse Approach for damage modelling in sheet forming process", J. of Mat Proc Tech, n°151, p. 88-97, 2004.