



**HAL**  
open science

## Identification des paramètres matériau à partir d'un essai hétérogène par mesures de champs

Pascale Balland, Laurent Tabourot, Olga Incandela, Christophe Déprés

► **To cite this version:**

Pascale Balland, Laurent Tabourot, Olga Incandela, Christophe Déprés. Identification des paramètres matériau à partir d'un essai hétérogène par mesures de champs. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01495626

**HAL Id: hal-01495626**

**<https://hal.science/hal-01495626>**

Submitted on 25 Mar 2017

**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

---

# Identification des paramètres matériau à partir d'un essai hétérogène par mesures de champs.

## Application à l'emboutissage

**Pascale Balland, Laurent Tabourot, Olga Incandela, Christophe Déprés**

*Université de Savoie,*

*Laboratoire SYstèmes et Matériaux pour la MEcatronique, Polytech'Savoie,  
BP 80439, F 74 944 Annecy le Vieux Cedex.*

*pascale.balland@univ-savoie.fr*

---

*RÉSUMÉ. Une méthode d'identification et de recalage des paramètres de la loi de comportement de la tôle et des coefficients de frottement entre la tôle et les outils pour rendre les simulations d'opérations d'emboutissage par code éléments finis réalistes et fiables est proposée.*

*Le principe consiste notamment à rechercher le jeu de paramètres qui permette la meilleure reproduction par simulation numérique d'un essai hétérogène. La méthode de stéréocorrélation est alors utilisée pour déterminer, lors de l'essai, les cartographies de déformations qui serviront, avec l'évolution de la force, de cibles pour l'ajustement des paramètres.*

*ABSTRACT. A method of identification of parameters of behaviour laws for a sheet of metal and of friction parameters between the metal and the tools is proposed to make the simulations of deep-drawing operations by finite element code realistic and accurate.*

*The principle consists in finding the set of parameters which enables to reproduce by numerical simulation the heterogeneous test. The stereo-correlation method is then used to complete the evolution of the load of the punch with the data of the cartography of strains as references in order to adjust the parameters.*

*MOTS-CLÉS :– identification de paramètres – lois de comportement – essai hétérogène – emboutissage.*

*KEYWORDS:– identification of parameters – behaviour constitutive laws – heterogeneous test - deep-drawing operation.*

---

## 1. Introduction

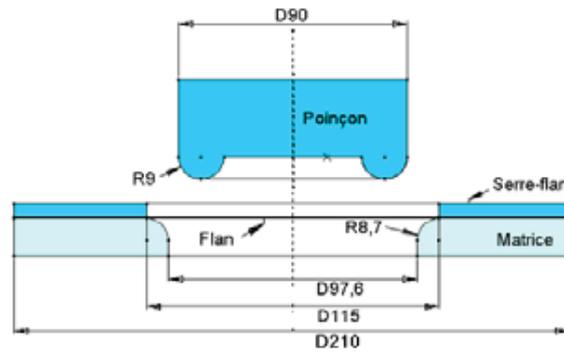
La simulation numérique du procédé de mise en forme par emboutissage par calculs éléments finis à des fins de prédiction n'est réellement exploitable que si toutes les étapes qui vont de la modélisation mécanique du comportement du matériau jusqu'au traitement numérique sont entièrement contrôlées (Moussy, 2002). Actuellement, les étapes successives introduisent systématiquement des imprécisions qui se cumulent et génèrent finalement un écart potentiellement important entre la réalité et les résultats de la simulation numérique qui sont censés la décrire. Ces étapes forment finalement une chaîne qui lie les paramètres matériau aux résultats numériques. Toute chose égale par ailleurs, une variation de ces paramètres entraîne une variation des résultats numériques. On peut donc envisager de mieux retrouver les résultats expérimentaux (réels) si l'on compense la dérive introduite par les étapes en série en adaptant les paramètres du matériau. On accepte alors qu'ils perdent une partie de leur sens physique originel. Une relation analytique globale liant en entrée les paramètres matériau aux résultats numériques en sortie est tout d'abord établie. Cette relation analytique est produite ici par un réseau de neurones (Dreyfus, 2004) éduqué sur une série de simulations produites avec différentes valeurs des paramètres d'entrée variant autour des valeurs initiales déterminées "classiquement". La distribution de ces valeurs est obtenue par un plan d'expériences. On utilise ensuite la relation inverse pour déterminer les paramètres matériau qui donnent finalement les résultats numériques les plus proches des résultats expérimentaux. Les évolutions de la force en fonction du déplacement du poinçon et la déformation le long de la génératrice de l'embouti sont les résultats expérimentaux qui sont retenus pour recalibrer les paramètres.

Dans cet article, on souhaite montrer qu'il est possible avec cette procédure d'améliorer substantiellement la précision des résultats numériques relatifs à la simulation d'un essai simple (mais représentatif) d'emboutissage. Les déformations non homogènes de la surface déformée de l'embouti sont obtenues en utilisant la stéréo-corrélation d'images prises avant et après l'essai. On s'emploie ensuite à effectuer une simulation suivant un schéma classique : identification du comportement du matériau à partir de l'essai de traction, définition du modèle numérique et extraction des résultats. Les étapes suivantes sont le recalage des paramètres du modèle pour s'approcher au mieux des résultats de la simulation et la confrontation de la simulation obtenue avec les paramètres optimisés avec l'essai réel.

## 2. Descriptif du dispositif expérimental

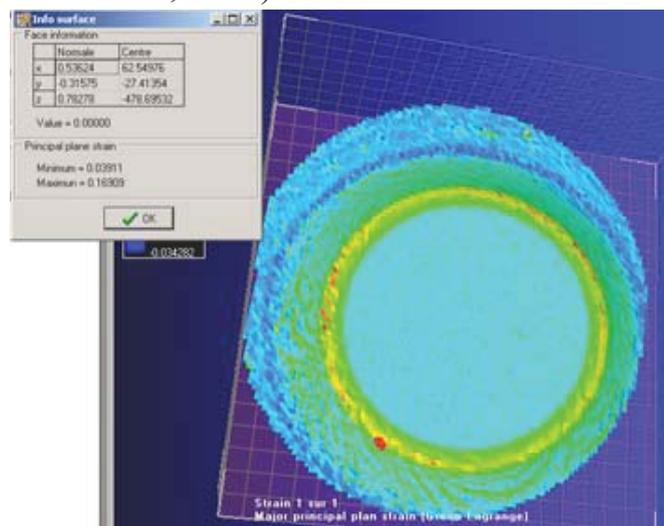
L'opération de mise en forme retenue est la réalisation d'un godet à fond plat présentant principalement des sollicitations de traction plane et d'expansion. Le schéma de l'outillage est présenté sur la Figure 1. L'essai est réalisé à l'aide d'une

presse hydraulique d'une capacité de 600 kN instrumentée. La courbe force appliquée au poinçon en fonction de son déplacement est ainsi accessible.



**Figure 1.** Schéma de l'outillage d'emboutissage de la pièce axisymétrique.

En parallèle, une mesure du champ des déformations de la surface de la tôle à la fin de la mise en forme (Figure 2 pour les déformations maximales) est effectuée en exploitant la technique de mesure de déformations sur surfaces gauches par analyse d'images (Vacher, 2003 – Tabourot, 2005).



**Figure 2.** Iso valeurs des déformations maximales issues de la numérisation 3D.

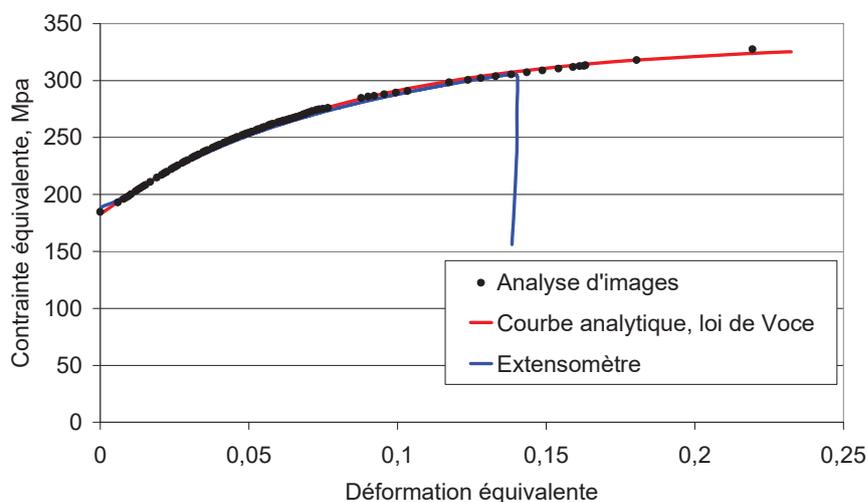
### 3. Simulations éléments finis initiale et optimisée

Le matériau utilisé est un aluminium Al6061T4. Ses constantes élastiques sont : 69 MPa pour le module d'Young et 0,35 pour le coefficient de Poisson. La courbe de référence est obtenue en traction dans la direction de laminage avec l'outil d'analyse d'images (Dumoulin, 2003) pour une vitesse de  $10^{-3}$  /s. Le modèle analytique retenu pour décrire cette courbe est la loi de Voce :

$$\sigma = \sigma_0 + (\sigma_{\max} - \sigma_0)(1 - \exp(-b\varepsilon)) \quad [1]$$

où :  $\sigma$  est la contrainte équivalente courante,  $\sigma_0$  est lié au domaine d'élasticité initiale (182MPa),  $\sigma_{\max}$  est la contrainte équivalente de saturation (333 MPa), b est

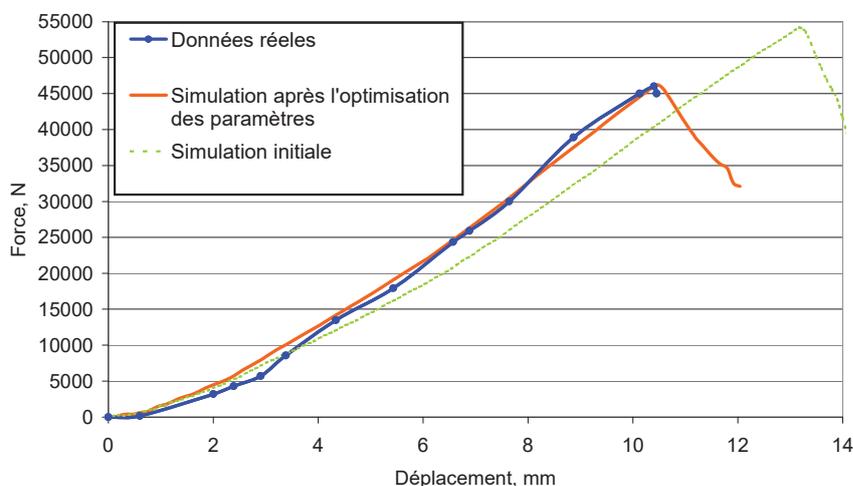
un paramètre matériau responsable de la courbure (12,8) et  $\varepsilon$  est la déformation plastique équivalente courante. Sur la Figure 3, la courbe de traction calculée avec ces paramètres matériau est superposée à celles obtenues expérimentalement. L'érouissage est isotrope avec un coefficient d'anisotropie normale :  $R=0,64$ .



**Figure 3.** Courbes de référence expérimentales et modélisée pour l'aluminium Al6061T4, direction  $0^\circ$ , vitesse de déformation  $10^{-3}$  /s.

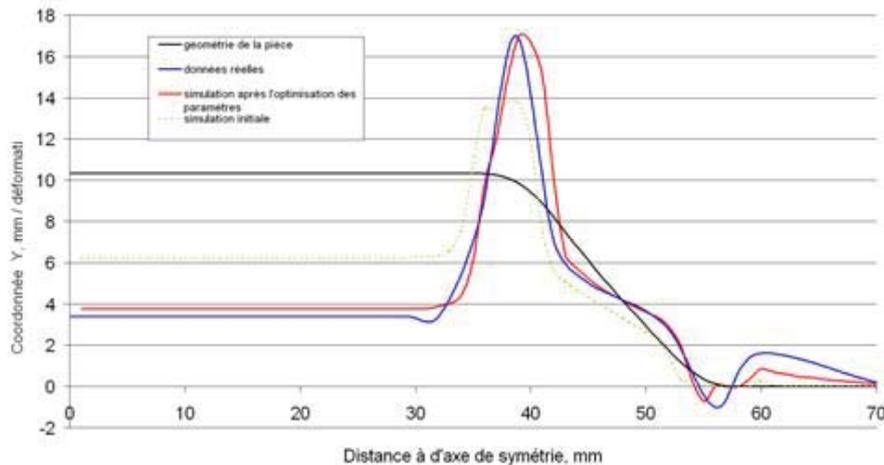
La simulation numérique est réalisée avec le code éléments finis ABAQUS version explicite avec un mode de calcul de type double précision. La géométrie du flan est décrite avec des éléments de type coque axisymétrique (SAX1) avec 7 points d'intégration dans l'épaisseur.

Le contact entre le flan et les outils décrits par des éléments rigides est modélisé par la loi de Coulomb avec un coefficient de frottement initial entre le flan et la matrice et le serre-flan :  $f_1 = 0,2$  et un coefficient de frottement dynamique initial :  $f_2 = 0,1$  entre le poinçon et le flan.



**Figure 4.** Comparaison des courbes force-déplacement réelle et simulée.

Pour cette simulation, on retrouve sur la Figure 4, les courbes force-déplacement expérimentale et simulée (simulation initiale). La localisation de la déformation lors de l'essai réel (respectivement simulé) correspond au déplacement du poinçon de 10,4 mm (respectivement 13,4 mm) et à une force appliquée de 46 000 N (respectivement 53 000 N). La comparaison est également effectuée sur la déformation principale maximale (Figure 5) extraite des données de la Figure 2 le long de la génératrice de l'embouti. La simulation initiale montre qu'en terme de déformations et donc d'épaisseur, la simulation initiale est relativement loin de l'expérience.



**Figure 5.** Comparaison des champs expérimental et simulé de la déformation principale maximale le long de la génératrice de l'embouti.

Pour optimiser la simulation numérique, le jeu de paramètres matériau initial comprenant les 4 paramètres de la loi de comportement de l'alliage d'aluminium :  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $b$ ,  $R$  complété par les 2 coefficients de frottement  $f_1$  et  $f_2$  est recalé.

On crée un modèle mathématique avec un réseau de neurones. La première étape consiste à éduquer le réseau de neurones avec la mise en place d'un plan d'expériences. Sont donnés au réseau de neurones différents jeux des 6 paramètres matériau avec les résultats numériques associés qui sont la courbe force appliquée au poinçon en fonction de son déplacement et le champ de déformation principale maximale le long de la génératrice de l'embouti pour un déplacement du poinçon de 10,4 mm. L'étape suivante consiste à utiliser ce réseau de neurones pour un calcul inverse. Ce réseau inverse a trois valeurs cibles en entrée : la valeur de la déformation principale maximale expérimentale au sommet de la pièce (3,4 %), la valeur de la déformation principale maximale au point de la localisation (16,9 %) et la valeur de la force appliquée au poinçon (46 000 N) pour un déplacement du poinçon de 10,4 mm. Le réseau de neurones inverse donne alors les six paramètres matériau appelés optimisés :  $\sigma_0 = 188$  MPa,  $\sigma_{\max} = 301$  MPa,  $b = 22$ ,  $R = 0,93$ ,  $f_1 = 0,26$  et  $f_2 = 0,25$ . La simulation numérique effectuée avec le jeu des paramètres optimisés donne des résultats réalistes visibles sur les Figures 4 et 5 ; elle prédit

correctement l'évolution de la force appliquée au poinçon au cours de la mise en forme et le moment de l'apparition de la localisation de la déformation principale maximale. L'adéquation entre la déformation principale minimale réelle et celle simulée a également été vérifiée (Incandela 2006), ce qui assure une épaisseur simulée proche de celle de l'embouti réel.

#### 4. Conclusion

Une méthode proposant le recalage des paramètres matériau pour améliorer la précision des simulations par code éléments finis à partir d'un essai hétérogène d'emboutissage est proposée dans cet article. L'exemple traité a montré l'efficacité d'un recalage pragmatique des paramètres. Les valeurs obtenues des paramètres sont alors moins significatives sur le plan physique que les valeurs obtenues en suivant une procédure d'identification classique puisqu'elles corrigent les distorsions inhérentes au calcul par éléments finis. La prédiction réaliste d'opérations d'emboutissage à partir de simulations numériques ouvrant la voie à l'optimisation du procédé de production est cependant à ce prix.

#### 5. Bibliographie

- Dreyfus G., Martinez J.-M., Samuelides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria S., Hérault L., *Réseaux de neurones, Méthodologie et applications*, Groupe Eyrolles, 2<sup>ème</sup> édition, 2004.
- Dumoulin S., Tabourot L., Chappuis C., Vacher P., Arrieux R., « Determination of the equivalent stress-equivalent strain relation of a sample of copper in tensile loading », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 133, 2003, p. 79-83.
- Incandela O., Tabourot L., Porret P., Balland P., Arrieux R., Ducher F., « Modelling and analysis of a deep-drawing operation: key factors for successful comparisons between experimental and simulated results », *J. Mat.Proc.Tech.*, 155-156, 2004, p. 1105-1110.
- Incandela O., Définition de protocoles rationnels d'identification de lois de comportement élastoplastiques : Application à la simulation éléments finis d'opérations industrielles d'emboutissage, thèse de doctorat, Université de Savoie, 2006.
- Moussy F., « Interactions modèles-expériences dans l'industrie nécessité et limites », *J. Phys. IV*, vol. 12, EDP Sciences, Les Ulis, 2002, Pr11 3-11.
- Tabourot L., Vacher P., Coudert T., Toussaint F., Arrieux R., « Numerical determination of strain localisation during finite element simulation of deep drawing operations », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, Issue 2, 2005, p. 152-158.
- Vacher P., Dumoulin S., Morestin F., Mguil-Touchal S., « Bidimensional strain measurement using digital images », *Proc. Instr. Mech. Eng.*, vol. 213, 1999, p. 811-817.
- Vacher P., Apport des techniques de corrélation d'images en mécanique : analyse de déformation et numérisations 3D, HDR, Université de Savoie, 2003.