

# Caractérisation du comportement anisotrope de tôles d'aluminium

Y. Chastel<sup>1</sup>, V. Nalewajk<sup>2</sup>, R. Forestier<sup>3</sup> et E. Massoni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEMEF, Ecole des Mines de Paris – BP 207, 06904 Sophia Antipolis Cedex, [yvan.chastel@ensmp.fr](mailto:yvan.chastel@ensmp.fr)

<sup>2</sup> PSA Peugeot Citroën, Direction des Métiers Organiques du Véhicule  
45 rue Jean Pierre Timbaud, 78307 Poissy Cedex, [vincent.nalewajk@mpsa.com](mailto:vincent.nalewajk@mpsa.com)

<sup>3</sup> ASCOMETAL CREAS BP 70045 57301 Hagondange Cedex, [r.forestier@ascometal.lucchini.com](mailto:r.forestier@ascometal.lucchini.com)

**Résumé** : Deux méthodes de caractérisation du comportement anisotrope de tôles sont comparées. Les coefficients de Lankford de tôles en alliage d'aluminium-magnésium sont tout d'abord déterminés via des essais de traction à température ambiante. Un système de reconnaissance automatique de motifs aléatoires est utilisé pour analyser ces essais en termes de comportement mécanique et pour identifier les coefficients d'anisotropie. En parallèle, des essais d'emboutissage de type Nakazima ont été réalisés, puis analysés à l'aide d'un module d'analyse inverse. Ce modèle s'appuie sur une méthode d'optimisation automatique couplée à un logiciel éléments finis tridimensionnel. Le comportement anisotrope des tôles d'aluminium est modélisé en utilisant un critère de Hill. Les mesures de champs de déformation obtenues avec le système de corrélation d'images sont utilisées pour identifier les paramètres du critère de Hill. Les coefficients de Lankford ainsi déterminés sont comparés à ceux issus des essais de traction.

**Mots-clé** : Alliages d'aluminium, Anisotropie, Méthode inverse

## 1. Introduction

Les tôles en alliages d'aluminium présentent aujourd'hui un grand intérêt car elles permettent de réduire le poids des carrosseries des véhicules. Mais elles s'avèrent difficiles à mettre en forme à froid et présentent de plus un comportement anisotrope marqué qu'il faut maîtriser ou du moins anticiper [1]. En effet, les coefficients de Lankford pour ces tôles sont souvent inférieurs à 1 et des ruptures précoces sont observées.

Une méthode s'appuyant sur des images obtenues avec une caméra rapide et sur un logiciel de corrélation d'images a été mise au point pour déterminer ces coefficients de Lankford à partir d'essais de traction.

En parallèle, une procédure a été développée sur la base d'essais d'emboutissage de type Nakazima pour identifier le comportement mécanique anisotrope des tôles. Le schéma de résolution est en fait une méthode inverse associée à un problème d'identification de paramètres.

Les méthodes inverses sont aujourd'hui utilisées pour de multiples problèmes de caractérisation des matériaux. Par exemple, Gavrus et al. [2] ont développé un modèle inverse couplé au logiciel éléments finis Forge2<sup>®</sup> pour obtenir les coefficients de lois de comportement à partir d'essais de torsion. Mahnken et Stein [3] ont utilisé des essais de traction hétérogène dans le même but, en utilisant comme données d'entrée pour l'analyse inverse, des

mesures de champ de déformation fournies par un système de corrélation d'images.

Dans notre étude, une approche similaire a été retenue et appliquée à l'analyse d'essais Nakazima. Dans ces essais, l'écoulement du métal est complexe et tridimensionnel, et la méthode d'optimisation développée a donc été couplée au logiciel éléments finis tridimensionnel Forge3<sup>®</sup>. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparés en termes de coefficients de Lankford.

## 2. Essais de traction

Des échantillons ont été prélevés dans une tôle d'alliage d'aluminium 5754 O de 1 mm d'épaisseur. La traction est appliquée à froid de façon à maintenir une vitesse de déformation moyenne de  $8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Le montage utilisé a été développé initialement pour la caractérisation à chaud de matériaux polymères [4,5]. Une caméra rapide est installée pour prendre des images synchronisées avec les mesures d'effort tout au long de l'essai. Le champ de déformation est obtenu à l'aide d'un système de corrélation d'images automatique [6], puis analysé pour déterminer les déformations principales dans le plan tangent à l'échantillon de tôle,  $\varepsilon_I$  et  $\varepsilon_{II}$ . Ces enregistrements permettent d'obtenir la loi de comportement, et les coefficients de Lankford à partir du rapport de la déformation transverse sur la déformation dans l'épaisseur :

$$r_\alpha = \varepsilon_{II} / \varepsilon_{III} \quad (1)$$

en fonction de l'angle  $\alpha$  entre la direction de laminage de la tôle et la direction longitudinale de l'échantillon prélevé.

Le coefficient de Lankford est généralement mesuré pour une éprouvette découpée dans la direction de laminage ( $r_0$ ), pour une éprouvette découpée dans la direction transverse ( $r_{90}$ ), ainsi que pour une éprouvette découpée à  $45^\circ$  par rapport à la direction de laminage ( $r_{45}$ ). Nous obtenons une variation significative en fonction de l'angle de prélèvement (voir Tableau 2).

### 3. Essais d'emboutissage Nakazima

#### 3.1 Description des essais

L'essai Nakazima est un essai d'emboutissage de tôle utilisé classiquement pour déterminer des courbes limites de formage. Il s'agit d'emboutir une tôle avec un poinçon hémisphérique. Suivant la forme de l'éprouvette emboutie, on peut se trouver soit dans la zone de rétreint, soit dans la zone d'expansion. Ainsi, cet essai permet d'étudier l'influence du chemin de déformation sur la formabilité d'une tôle (Fig. 1).

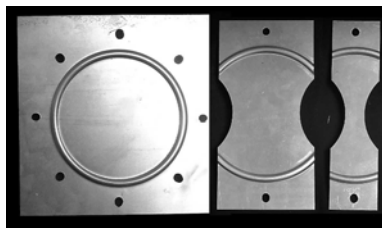


Fig. 1. Exemples de géométries d'échantillons de tôles pour des essais Nakazima

Plutôt que d'utiliser l'essai Nakazima de manière classique, nous l'avons étudié comme un essai rhéologique. En effet, la mesure de l'effort au cours du temps fournit une information sur la contrainte d'écoulement. De plus, l'utilisation du système de corrélation d'images Aramis permet de recomposer le champ de déformation à la fin de l'essai. Cette dernière mesure fournit une information sur l'anisotropie du matériau. Contrairement à l'essai de traction, avec lequel il présente un certain nombre de similitudes, cet essai induit un écoulement de matière hétérogène.

#### 3.2 Méthode inverse et loi de comportement

Dans les applications d'analyse d'essais mécaniques, l'observable utilisée est typiquement une mesure d'effort ou une mesure de couple. La méthode inverse que nous avons développée est suffisamment générale pour permettre d'utiliser d'autres types d'observables, tels que les mesures de champs de déformation effectuées à l'aide du système de

corrélation d'images lors d'essais mécaniques de type Nakazima.

Expérimentalement, nous avons constaté qu'il n'y avait pas d'influence de la direction dans laquelle l'éprouvette a été découpée sur la mesure de l'effort, ce qui confirme que l'effort n'est pas sensible aux paramètres du critère d'anisotropie dans le plan de la tôle.

Afin d'analyser l'essai Nakazima, on peut utiliser un code de calcul 3D tel que Forge3<sup>®</sup> (Fig. 2). Pour se faire, une loi puissance a été utilisée pour modéliser le comportement du matériau :

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= K\bar{\varepsilon}^n \\ \lambda &= (K, n) \end{aligned} \quad (2)$$

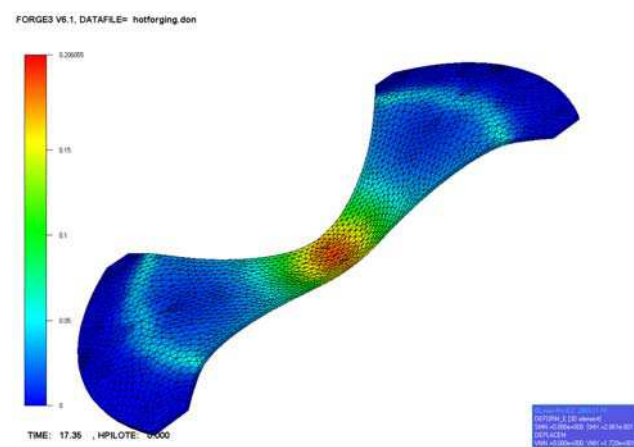


Fig. 2. Simulation d'un essai Nakazima avec Forge3<sup>®</sup>

La première étape de l'analyse de l'essai Nakazima consistant à déterminer les paramètres de la contrainte d'écoulement indépendamment des paramètres du critère d'anisotropie, nous avons effectué les premières simulations en utilisant un critère de von Mises.

Après 7 itérations de l'algorithme de Gauss-Newton, une valeur de la fonction coût de 1,1 % est obtenue. Cette valeur correspond à une très bonne correspondance entre l'effort expérimental et l'effort simulé après recalage (Fig. 3). Les valeurs identifiées sont :  $K = 250$  MPa,  $n = 0,31$ .

L'analyse de stabilité par rapport à une perturbation sur les données expérimentales en termes de l'effort d'emboutissage  $F$  montre que les valeurs de ces paramètres sont relativement bien déterminées :

$$\left| \frac{dK}{K} \right| \leq 5.7 \frac{\|\Delta F\|}{\|F\|} \quad \left| \frac{dn}{n} \right| \leq 6.5 \frac{\|\Delta F\|}{\|F\|} \quad (3)$$

Le fait que la mesure de l'effort n'est pas sensible aux paramètres du critère d'anisotropie est l'hypothèse de base de cette première analyse. Il est donc important de vérifier a posteriori la validité de cette hypothèse.

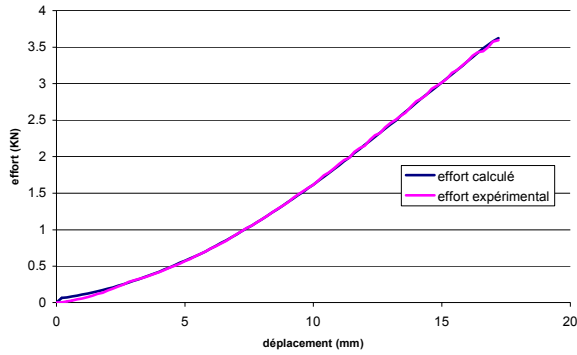


Fig. 3. Comparaison entre l'effort calculé avec Forge3© après recalage avec l'effort expérimental

Pour ce faire, après avoir identifié les paramètres de la loi de comportement, nous avons effectué une analyse de sensibilité de l'effort par rapport aux paramètres du critère de Hill 1948 [7] :

$$\bar{\sigma} = \left[ F_H (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G_H (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H_H (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L_H \sigma_{23}^2 + 2M_H \sigma_{13}^2 + 2N_H \sigma_{12}^2 \right] \quad (4)$$

pour  $F_H = G_H = H_H = 0,5$  (matériau isotrope). Afin de déterminer si l'influence de ces paramètres est négligeable par rapport à l'influence de  $K$  et de  $n$ , nous avons comparé les sensibilités homogénéisées :

$$\left( \frac{dF}{d\lambda} \right)_{\text{hom og}} = \lambda \frac{dF}{d\lambda} \quad (5)$$

La Figure 4 montre bien que les paramètres du critère de Hill ont une influence négligeable sur l'effort. Nous pouvons donc bien découpler l'identification des paramètres de la contrainte d'écoulement et l'identification des paramètres d'un critère d'anisotropie tel que celui de Hill.

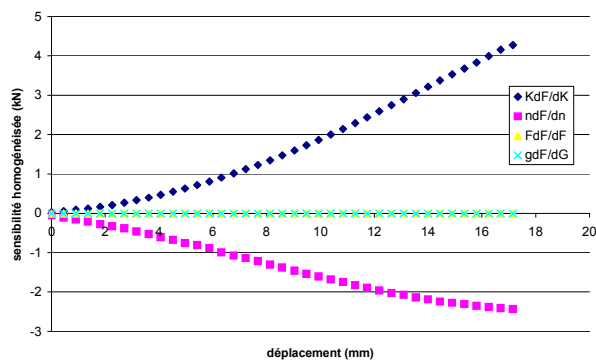


Fig. 4. Sensibilités homogénéisées de l'effort par rapport aux paramètres du critère de Hill et par rapport aux paramètres de la contrainte d'écoulement

### 3.3 Identification des paramètres du critère de Hill

Une fois les paramètres de la contrainte d'écoulement identifiés, nous avons voulu identifier les paramètres du critère de plasticité de Hill. Pour

ce faire, nous disposons des déformations principales déterminées à l'aide du logiciel Aramis. Afin d'identifier les paramètres du critère de Hill anisotrope, il est nécessaire de trouver une grandeur qui soit sensible à ces paramètres. Les coefficients du critère de Hill peuvent s'écrire grâce à des relations avec les coefficients de Lankford  $r_0$ ,  $r_{45}$  et  $r_{90}$  :

$$G_H = \frac{1}{1+r_0}, \quad H_H = \frac{r_0}{1+r_0}, \quad F_H = \frac{r_0}{r_0(1+r_0)},$$

$$N_H = \frac{2(F_H + G_H)r_{45} + F_H + G_H}{2} \quad (6)$$

Nous avons raisonné par analogie avec l'essai de traction, et nous avons pris comme observable le rapport de deux des valeurs propres du tenseur des déformations de Green-Lagrange dans le cas de l'essai Nakazima :

$$r_n = \frac{\epsilon_{II}}{\epsilon_{III}} \quad (7)$$

Enfin, comme pour l'essai de traction, nous avons utilisé trois éprouvettes, découpées à  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et à  $90^\circ$  par rapport à la direction de laminage. Le champ de déformation n'étant pas homogène, il faut définir le point où l'on mesure ce rapport. Une analyse de sensibilité préliminaire est donc effectuée et la dérivée de  $r_n$  par rapport aux paramètres du critère de Hill est calculée sur toute l'éprouvette. Nous avons constaté la présence de deux maxima de sensibilité par rapport à  $F_H$  et  $G_H$  sur l'axe central : un au centre et l'autre à environ 15 mm du centre (Fig. 5 par exemple pour  $F_H$ ).

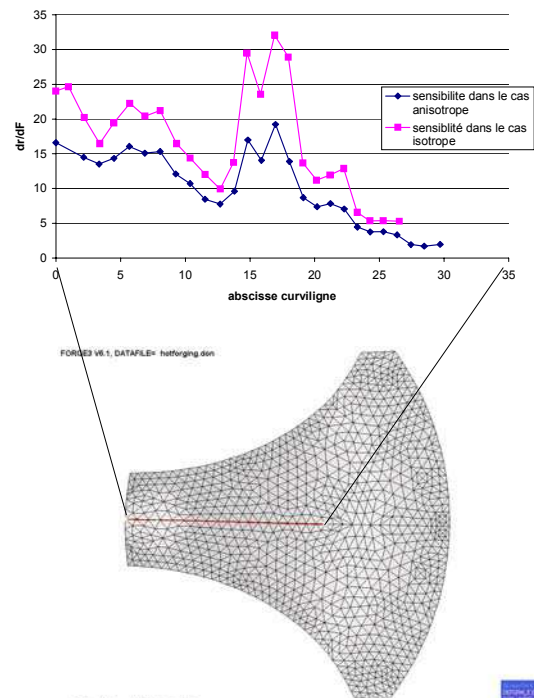
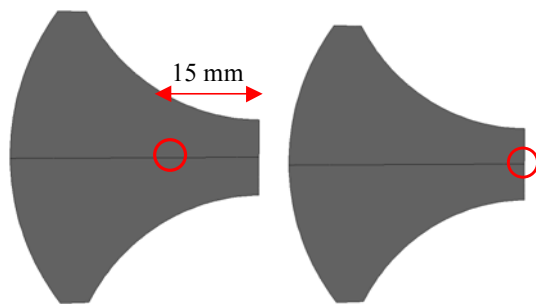


Fig. 5. Analyse de sensibilité de  $r_n$  par rapport à  $F_H$  sur les éprouvettes à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$

La position de ces points est la même que celles que soient les valeurs des paramètres du critère de Hill que nous avons testées. De même, nous avons détecté un maximum de sensibilité par rapport au paramètre  $L_H$  au centre de l'éprouvette à 45°. Le maximum d'information sur  $F_H$  et  $G_H$  est plutôt contenu dans les essais à 0 et à 90°, alors que l'information sur  $L_H$  est plutôt contenue dans l'essai à 45°.

Nous avons effectué l'analyse inverse en utilisant des mesures de  $r_n$  situées en des points pour lesquels la sensibilité par rapport aux paramètres présente un maximum local (Fig. 6). L'analyse converge en 5 itérations et fournit le jeu de paramètres donné dans le Tableau 1. Les coefficients de Lankford mesurés à partir d'essais de traction et les coefficients obtenus à partir de cette analyse inverse sont en très bon accord (Tableau 2).



éprouvettes à 0° et à 90°    éprouvette à 45°

Fig. 6. Points de mesure utilisés pour l'analyse inverse

	Valeurs initiales	Valeurs identifiées
$F_H$	0,5	0,86
$G_H$	0,5	0,53
	1,5	1,54
$\phi_{\text{final}}$		$5 \cdot 10^{-2} \%$

Tableau 1. Résultat de l'identification des paramètres du critère de Hill

	Traction	Nakazima
$r_0$	0,82	0,88
$r_{45}$	0,70	0,66
$r_{90}$	0,58	0,54

Tableau 2. Coefficients de Lankford obtenus par les deux approches

## 4. Conclusion

Les méthodes inverses ouvrent la voie à l'exploitation d'essais non classiques, dans lesquels l'écoulement de matière est très hétérogène. Et pour peu qu'on puisse les analyser en détail, ces essais peuvent s'avérer très riches en information de par la diversité des chemins de déformation subis par la matière. Mais il est très important de quantifier l'influence de variations de conditions opératoires sur le résultat de l'analyse inverse. Un module d'analyse de sensibilité semi-analytique nous a permis de détecter les paramètres expérimentaux critiques pour l'identification de paramètres mécaniques de tôles en alliage d'aluminium. Il a aussi été utilisé comme un outil aidant à la conception optimale d'expériences de type Nakazima. Sans ce type d'approche, la détermination d'une position acceptable voire optimale des points de mesure du champ de déformation serait presque inenvisageable.

## 4. Références

- [1] Nalewajk, V., Chastel, Y., Nauzin, J.P., Warm deep drawing of aluminium: Identification of process parameters, Proc. of the 6th ESAFORM conference on Materials Forming, April 28-30, 2003, Salerno, Italy, 367-370.
- [2] Gavrus, A., Massoni, E., Chenot, J.L., An inverse analysis using a finite element model for identification of rheological parameters. *J. Mat. Proc. Techn.*, 60, 447-454 (1996).
- [3] Mahnken, R., Stein, E., A unified approach for parameter identification of inelastic material models in the frame of the finite element method. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 136, 225-258 (1996).
- [4] Erner, A., Billon, N., Application de la corrélation d'images à l'étude du comportement à moyenne vitesse d'un polystyrène aux alentours de sa transition vitreuse. Actes du colloque DEPOS 18 sur la déformation plastique des polymères solides, Saint-Prix, France, 2003.
- [5] Temimi, N., Billon, N., Plasticité et incompressibilité des polymères solides - Etude à basses et moyennes vitesses. 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice, CD-ROM (2003).
- [6] www.gom.com
- [7] Hill, R. A theory of the yielding and of plastic flow of anisotropic metals, *Proc. Roy. Soc., Serie A*, 193, 281-397 (1948).