

# Mise en forme des matériaux métalliques par déformation plastique : influence du comportement matériel

**Pierre-Yves Manach<sup>\*</sup>, Sandrine Thuillier, Hervé Laurent, Nicolas Le Maoût, Renaud Grèze**

*Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne LIMATB  
Université de Bretagne-Sud, Centre de recherche de Lorient  
Rue de Saint Maudé, BP 92119, 56321 Lorient Cedex*

*<sup>\*</sup> IUT de Lorient, Département Génie Thermique et Energie  
10 Rue Jean Zay, 56100 Lorient Cedex*

*Pierre-Yves.Manach@univ-ubs.fr*

**Sections de rattachement : 60  
Secteur : Secondaire**

**Résumé.** *Au travers d'études expérimentales et numériques de procédés de mise en forme par déformation plastique, cet article montre l'influence de la modélisation du comportement mécanique des matériaux sur la qualité des résultats obtenus lors de simulations numériques par éléments finis. L'intérêt de l'utilisation de dispositifs expérimentaux instrumentés permettant la comparaison entre expérience et simulation et donc la validation des modèles est aussi illustré.*

**Mots-clés.** *Mise en forme, emboutissage, retour élastique, sertissage.*

## 1. Introduction

La conception, la fabrication et la mise au point de pièces ou structures utilisant des matériaux métalliques pour l'industrie vivent actuellement une importante évolution. En effet, le marché, les nouvelles réglementations, la sécurité, les économies d'énergie et la prise en compte du développement durable conduisent dorénavant à une diminution globale du poids des structures et à l'utilisation de nouveaux matériaux métalliques de plus en plus résistants. Cette amélioration des propriétés mécaniques est souvent associée à des microstructures multiphasées et des changements de phase peuvent se produire au cours de la déformation.

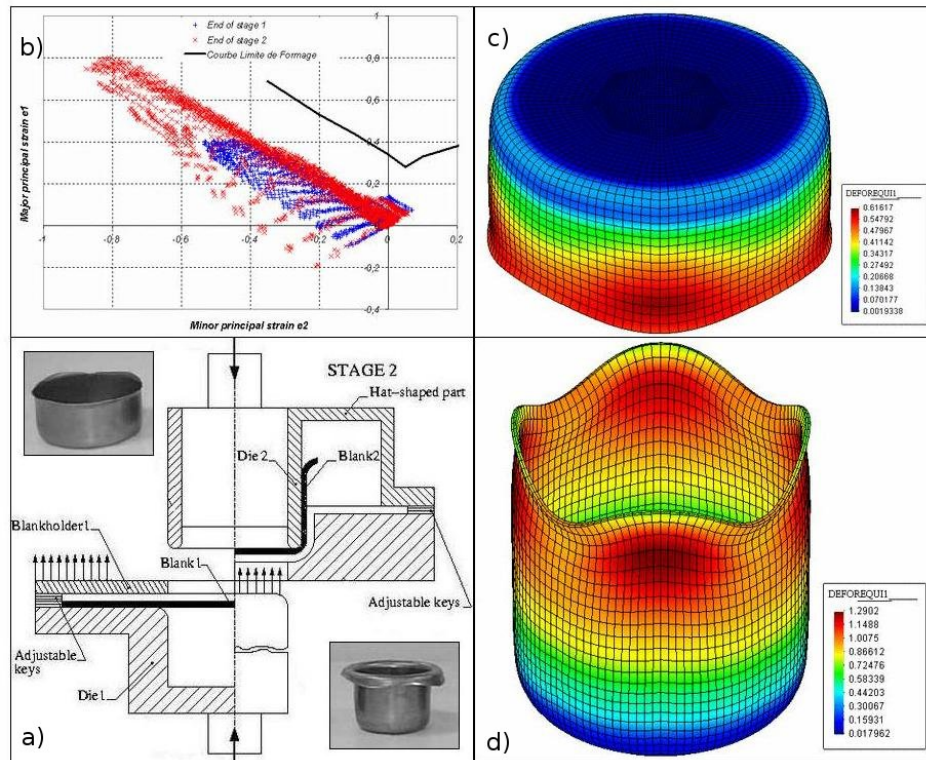
Cette étude concerne le développement d'outils de simulation numérique et expérimentale des procédés de mise en forme des tôles métalliques. En effet, la

prédiction numérique des procédés est devenue quasi-incontournable à l'échelle industrielle; les très nombreux travaux consacrés à l'amélioration des modèles du comportement mécanique des matériaux, des méthodes numériques et des outils de simulation conduisent aujourd'hui à une prédiction fiable mais perfectible du procédé. Les points à améliorer concernent plus particulièrement l'emboutissabilité des nouveaux matériaux, une meilleure prédiction des écarts de géométrie liés au retour élastique des pièces au cours du retrait des outils et la simulation numérique des opérations postérieures à la mise en forme comme le sertissage.

De façon à étudier expérimentalement et numériquement l'emboutissage des tôles métalliques, nos travaux ont été essentiellement consacrés à un procédé particulier de mise en forme par emboutissage de godets axisymétriques en deux étapes par retournement. L'intérêt de ce procédé est le développement d'une histoire complexe de déformation et l'originalité de ce travail réside dans l'utilisation et la caractérisation de plusieurs modèles plastique d'écrouissage, et de plusieurs types de matériaux. A partir des godets obtenus, cet essai permet aussi de caractériser le retour élastique de façon judicieuse en découpant des anneaux cylindriques dans le mur des godets puis en mesurant leur ouverture après découpe transversale. Enfin, une application de la simulation numérique d'opérations post-emboutissage est présentée sur un cas de sertissage, de façon à anticiper les ruptures ou les criques pouvant se produire au cours du procédé.

## 2. Mise en forme par emboutissage

Un dispositif expérimental d'emboutissage en deux étapes permettant de réaliser des godets axisymétriques a été développé pour simuler l'emboutissage par retournement, voir Fig.1.a. A partir d'un flan de diamètre initial 170 mm, un godet cylindrique de diamètre 100 mm est obtenu au cours de la première étape avec un poinçon creux puis cette pièce est emboutie une seconde fois, à l'aide d'un poinçon de diamètre 73 mm. On observe Fig.1.b que le mode de déformation prédominant dans ce procédé est la traction et que les caractéristiques géométriques permettent de rester bien en dessous de la courbe limite de formage (CLF). L'objectif est de mettre en évidence l'influence de la loi de comportement sur la réponse du matériau au cours des deux étapes. Les données expérimentales mesurées sont les courbes force-déplacement du poinçon et les distributions des épaisseurs dans le mur des godets, pour différentes orientations rapport à la direction de laminage (DL). Les essais d'emboutissage ont été réalisés sur une tôle d'acier doux de qualité emboutissage profond et d'épaisseur 0.98 mm. Parallèlement, des simulations numériques de ce test ont été effectuées avec un code éléments finis en considérant trois modèles d'écrouissage différents. Le premier est un modèle à écrouissage isotrope décrit par une loi de Swift et le second est à écrouissage mixte, isotrope et cinématique non linéaire. Enfin, le troisième modèle est le modèle d'écrouissage mixte de Teodosiu et Hu (Teodosiu *et al.*, 1997), dont les variables internes sont liées aux structures de dislocations. Sur ce type de matériau, on observe au cours



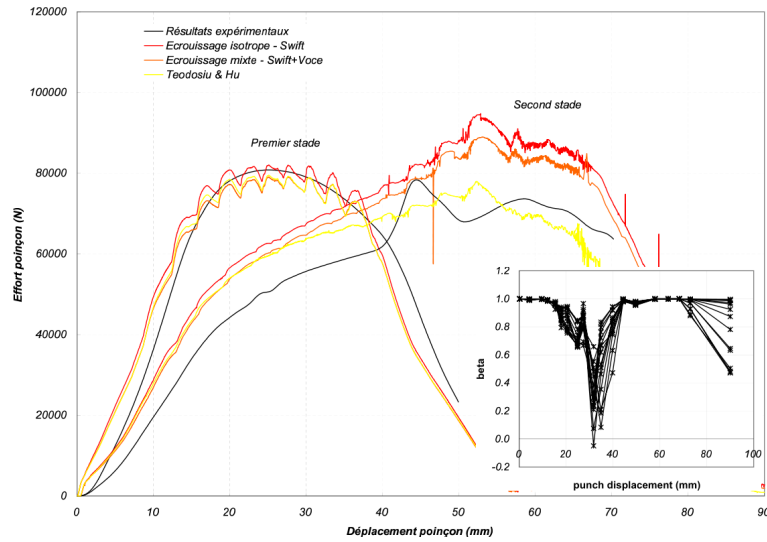
**Figure 1.** – Dispositif d'emboutissage par retournement.

d'un second trajet de chargement, tout d'abord une première phase d'écrouissage lors de la recharge, puis un adoucissement et enfin une reprise de l'écrouissage. Ce phénomène, de nature microstructurale, qui se manifeste sur la déformation en second trajet de chargement n'est pas pris en compte dans les deux premiers modèles.

Fig.2 présente l'évolution de la force sur le poinçon pendant la première et la deuxième étape obtenue respectivement expérimentalement et avec les trois modèles d'écrouissage définis précédemment. Fig.1.c et Fig.1.d montrent la répartition de la déformation plastique équivalente avec le modèle à écrouissage isotrope de Swift : elle atteint 40% au cours de la première étape et 80% au cours de la seconde. En raison des propriétés d'anisotropie du matériau, les godets présentent des cornes à 0° et à 90° par rapport à la DL.

Les simulations numériques montrent une bonne adéquation par rapport aux résultats expérimentaux au cours de la première étape. Par contre, au cours de la deuxième étape, on observe sur les courbes Fig.2 que l'influence de la loi de comportement est importante. En effet, les courbes obtenues numériquement surestiment la force, sauf pour le modèle de Teodosiu et Hu. Il s'avère donc dans

ce cas que la prise en compte de l'écouissage cinématique n'est pas suffisante pour décrire correctement le procédé. Ceci suggère l'occurrence de changements de chemin de déformation pendant le procédé de mise en forme. Par exemple, un point matériel initialement situé dans la partie externe du flan subira une compression circonférentielle et un étirement radial puis une flexion et une déflexion et éventuellement une traction plane dans le mur du godet.



**Figure 2.** – Courbes effort-déplacement du poinçon.

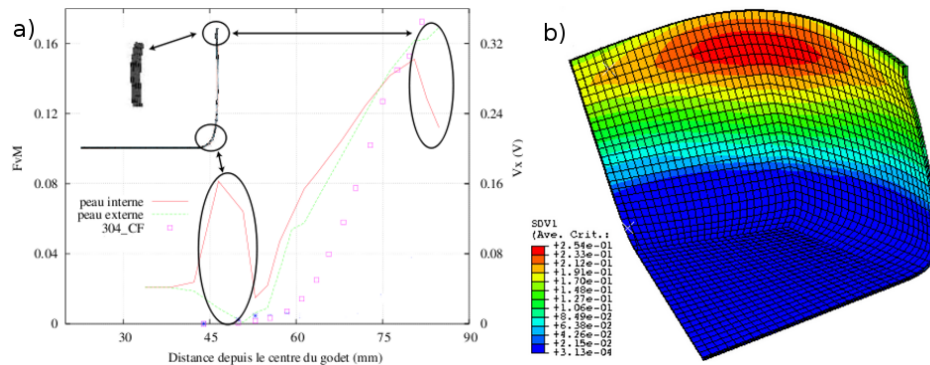
L'amplitude de ces changements de la direction du tenseur des vitesses de déformation peut être évaluée avec le paramètre  $\beta$  défini à partir du produit contracté de la variation du tenseur de déformation plastique entre deux états correspondant à deux valeurs du déplacement de poinçon (Rauch *et al.*, 1989).  $\beta$  varie continuellement de -1 (inversion de la contrainte) jusqu'à 1 (chargement continu) en passant par 0 (chargement orthogonal). On observe dans l'encadré de Fig.2 que des changements de trajets de déformation importants se produisent au cours de la deuxième étape. Des valeurs de l'ordre de 0.3 - 0.5 sont rencontrées au cours de la première étape, jusqu'à des valeurs proches de 0 dans la seconde. On remarque que les changements de trajets les plus importants ont lieu pour des déplacements de poinçon entre 20 et 40 mm au cours de la deuxième étape. Ceci est corrélé avec le changement de pente de la courbe obtenue avec le modèle de Teodosiu et Hu au cours de la deuxième étape.

Ce dispositif a aussi permis de caractériser l'emboutissabilité d'aciers inoxydables austénitiques métastables présentant au cours de leur déformation plastique une transformation martensitique induite. L'apparition de cette phase engendre des problèmes au niveau des procédés de mise en forme et notamment l'apparition de casses différées (Giraud 1990), comme celles présentées Fig.3.

En dépit de nombreuses études sur l'instabilité de l'austénite (Nagy *et al.*, 2003) des aciers inoxydables, l'incidence de cette transformation martensitique induite sur leur aptitude au formage à température ambiante demeure mal appréciée expérimentalement et donc par conséquent numériquement. Un modèle micromécanique à deux phases (austénite et martensite) permettant de prendre en compte l'évolution microstructurale du matériau a ainsi été développé et utilisé pour simuler l'emboutissage de godets cylindriques d'aciers inoxydables par éléments finis, Fig.4.b. On s'intéresse uniquement aux godets réalisés au cours de la première étape du dispositif d'emboutissage inverse.



**Figure 3.** – Casses différées sur godets.



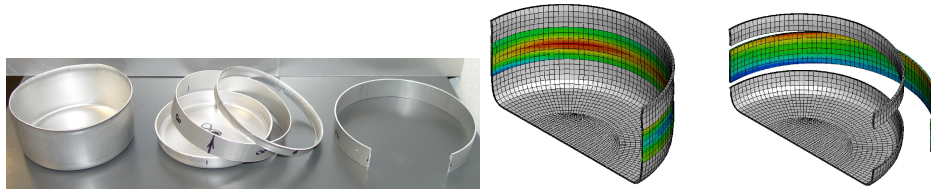
**Figure 4.** – Evolution de la fraction volumique de martensite en emboutissage.

Parallèlement, de façon à caractériser expérimentalement l'évolution de la transformation martensitique ainsi que la localisation de chaque phase dans les godets, des mesures de courants de Foucault ont été réalisées sur les godets emboutis pour estimer la fraction volumique des phases en présence. Fig.4.a présente la répartition de la fraction volumique de martensite dans le godet. L'axe de gauche est relatif à la répartition numérique sur les peaux intérieure et extérieure du godet alors que l'axe de droite est relatif au signal réel donné par le dispositif de courants de Foucault. Concernant les courbes numériques, on observe un gradient sur la répartition de la fraction volumique de martensite entre les peaux intérieure et extérieure. Un pic apparaît près du nez du poinçon sur la peau située en traction alors que sur la peau en compression, il n'apparaît pas de martensite produite. Ceci est dû à l'évolution de la fraction volumique de martensite qui n'est pas symétrique en traction et en compression. De même, en haut du mur du godet,

la peau extérieure est en compression et la peau intérieure est en traction, ce qui conduit à une grande différence sur la répartition de la fraction volumique de martensite dans cette région. Enfin, dans le mur du godet, le gradient entre les peaux intérieure et extérieure est relativement faible puisque toute cette région est dans un état de traction plane. Ces mesures présentent une évolution similaire à celle enregistrée par les courants de Foucault.

### 3. Retour élastique après emboutissage

Au cours du procédé d'emboutissage, lors du retrait des outils, la tôle métallique essaie de reprendre sa forme initiale à cause des contraintes résiduelles induites dans la pièce au cours de sa mise en forme. Ce phénomène, fonction des propriétés du matériau et de la configuration des outils, est le retour élastique. Pour le caractériser, (Demeri *et al.*, 2000) a mis au point un test, qui consiste à mesurer ces contraintes résiduelles en découpant un anneau dans le mur d'un godet embouti puis en l'ouvrant suivant un plan radial. Une étude similaire au test de Demeri est réalisée expérimentalement sur un alliage d'aluminium. Des simulations numériques de l'ensemble du procédé d'emboutissage et des différentes étapes de découpe sont réalisées par éléments finis. Plusieurs modèles de comportement sont testés, utilisant un écrouissage isotrope ou mixte et trois critères de plasticité : von Mises, Hill 48 et Barlat 91. L'objectif est de montrer leur influence sur la prédiction du retour élastique.



**Figure 5.** – Test de retour élastique des godets emboutis.

La découpe de l'anneau est réalisée par usinage, à 15 mm du fond du godet et à une hauteur de 20 mm (voir Fig.5). L'ouverture est réalisée dans la direction de laminage. Dans le tableau 1, on observe que les résultats obtenus pour l'ouverture de l'anneau sont fortement dépendant de la loi de comportement utilisée, les meilleurs résultats étant obtenus avec le critère de Hill et un écrouissage mixte.

Modèle	Exp	von Mises		Hill 48		Barlat 91	
Ecrouissage	-	EI	EM	EI	EM	EI	EM
Ouverture (mm)	64	74	85	49	61.5	85	95

TAB. 1 – Ouverture des godets pour les différents modèles utilisés.

#### 4. Sertissage

Lors des différentes opérations de mise en forme, les fortes déformations plastiques peuvent s'accompagner d'un endommagement : c'est notamment le cas en sertissage, qui est un procédé d'assemblage consistant à plier le bord d'une pièce d'aspect appelée la peau contre celui d'une autre, la doublure (Fig.6).

L'objectif de cette étude est de prédire l'endommagement de la carre (bord extérieur) du serti à l'aide d'un critère de sertissabilité, à l'image de la détection des ruptures en emboutissage grâce aux CLF. Actuellement, on utilise des règles métier empiriques pour déterminer les paramètres géométriques du procédé (hauteur de bord, rayon de tombage, etc.) compatible avec la ductilité du matériau. Il s'avère que les CLF, très utilisées dans la simulation de l'emboutissage, ne peuvent pas l'être en sertissage puisque l'état de déformation n'est jamais plan et que les trajets de déformation sont rarement linéaires. Pour mettre

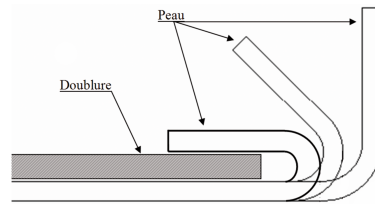


Figure 6. – Procédé de sertissage.

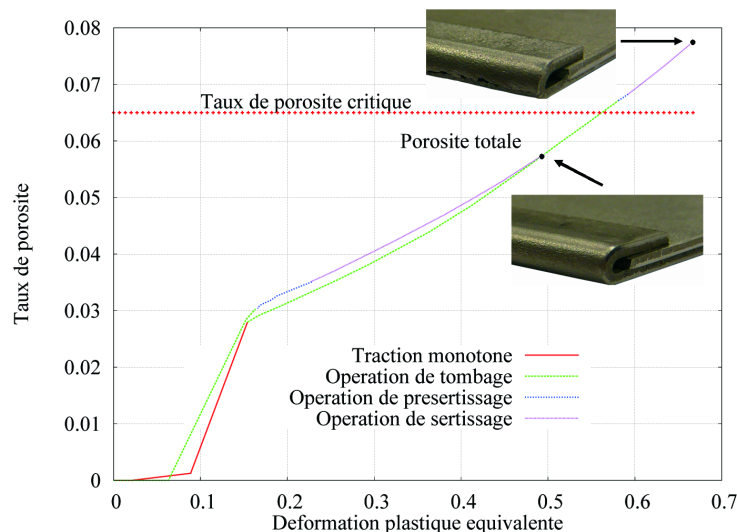


Figure 7. – Evolution du taux de porosité en sertissage.

en évidence le phénomène d'endommagement sur la carre en fonction des paramètres du procédé, on utilise le modèle de Gurson (Trillat *et al.*, 2003) modifié pour prendre en compte une surface de charge anisotrope. Ce modèle tient compte du comportement élastoviscoplastique et intègre l'évolution des porosités dans le

matériau. Il est appliqué sur un alliage d'aluminium de la série 6000, largement utilisé dans l'industrie automobile, et présentant un risque élevé de criques sur le bord du serti. Les étapes de tombage, de présertissage et de sertissage sont simulées avec les retours élastiques intermédiaires. Les étapes de tombage sont effectuées soit sur une éprouvette vierge, soit sur une éprouvette prédéformée en traction jusqu'à 16.5%. Fig.7 présente l'évolution des fractions volumiques de porosités pour l'éprouvette vierge et l'éprouvette prédéformée. Le taux de porosité critique correspond à la fraction volumique pour laquelle des éprouvettes de traction uniaxiale présentent une rupture. On remarque que l'évolution de la fraction volumique de la porosité est inférieure au taux de porosité pour l'éprouvette vierge. Pour l'éprouvette prédéformée, on observe cette fois un dépassement assez marqué de la fraction volumique critique. La simulation du sertissage confirme bien le phénomène d'endommagement que l'on observe expérimentalement.

## 5. Conclusion

Cet article présente quelques études sur la modélisation des procédés de mise en forme par déformation plastique. Des dispositifs expérimentaux originaux permettant de représenter les différentes étapes d'un procédé de mise en forme industriel (emboutissage, retour élastique et sertissage) ont été conçus et les résultats servent de référence pour les simulations numériques. On montre sur plusieurs exemples que la modélisation du comportement matériel est essentielle pour obtenir des simulations numériques prédictives en accord avec les résultats expérimentaux.

## Bibliographie

- Teodosiu, C. Hu, H.C., « Microstructure in the continuum modelling of plastic anisotropy », *19th Risø International Symposium on Materials Science : modelling of structure and mechanics from microstate to product*, Roskilde (Danemark), 1997, p.445-455.
- Rauch, E.F., Schmitt, J.H., « Dislocation substructures in mild steel deformed in simple shear », *Material Science and Engineering A*, vol.113, 1989, p.441-448.
- Giraud, H., Baroux, B., « Emboutissabilité des aciers inoxydables », *Les aciers inoxydables*, Editions de Physique, 1990, p.721-756.
- Nagy, E., Mertinger, V., Tranta, F., Solyum, J., « Deformation induced martensitic transformation in stainless steels », *Materials Science and Engineering A*, vol.378, 2003, p.308-313.
- Demeri, M.Y., Lou, M., Saran, M.J., « A benchmark test for springback simulation in sheet metal forming », *Society of Automotive Engineers*, 2000, p.176-182.
- Trillat, M., Pastor, J., « Analyse limite et modèle de Gurson : cas des cavités sphériques », *17ème Congrès Français de Mécanique*, Troyes, France, 2005.