



**HAL**  
open science

## Comparaison numérique entre le formage superplastique et le procédé de formage incrémental

Camille Robert, Arnaud Delamézière, Philippe Dalsanto, Jean-Louis Batoz

### ► To cite this version:

Camille Robert, Arnaud Delamézière, Philippe Dalsanto, Jean-Louis Batoz. Comparaison numérique entre le formage superplastique et le procédé de formage incrémental. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01421810

**HAL Id: hal-01421810**

**<https://hal.science/hal-01421810v1>**

Submitted on 22 Dec 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Comparaison numérique entre le formage superplastique et le procédé de formage incrémental

C. Robert<sup>1,2</sup>, A. Delamézière<sup>1</sup>, P. Dal Santo<sup>2</sup>, J.-L. Batoz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LEMTA – Université de Nancy – ERMeP  
GIP-InSIC, 27 rue d’Hellieule, 88100 Saint-Dié-des-Vosges  
camille.robert@insic.fr, arnaud.delameziere@insic.fr

<sup>2</sup> Arts et Métiers ParisTech - LAMPA  
2 bd du ronceray, BP 93525, 49035 Angers Cedex 1  
philippe.dalsanto@ensam.eu

<sup>3</sup> UTC - GSU  
Centre Pierre Guillaumat 2, BP 60319, rue du docteur Schweitzer, 60203 Compiègne Cedex  
batoz@utc.fr

---

**Résumé** – Cet article présente des protocoles de simulation numérique associés aux procédés de formage incrémental et de superplasticité. Les résultats sont comparés pour la simulation de la mise en forme d’un embouti profond avec un faible angle de dépouille. Le temps de formage en superplasticité est élevé mais permet un amincissement de l’épaisseur peu important et assez homogène. Le formage incrémental, sans utiliser de matrice, permet d’obtenir une bonne qualité dimensionnelle de la géométrie pour un temps de formage réduit. L’objectif général des travaux est de pouvoir réussir la simulation de l’enchaînement de ces procédés.

**Mots clés** – Formage superplastique, formage incrémental, loi de pression, qualité géométrique

---

## 1 Introduction

Dans le domaine des transports, les enjeux environnementaux imposent une diminution sensible de la masse des véhicules. Du fait de l’intégration des fonctions, ces structures gagnent en complexité et il s’avère nécessaire d’adapter leurs procédés de mise en forme afin de répondre à l’ensemble de ces contraintes.

Parmi ces procédés, le formage superplastique permet la mise en forme à chaud de pièces complexes à des niveaux de déformation importants (environ de 200% pour des pièces industrielles). Pour mettre en œuvre ce procédé, la tôle, chauffée à une température d’environ la moitié de la température de fusion, est déformée par la pression d’un gaz neutre, introduit dans une enceinte fermée. L’évolution de cette pression est contrôlée de manière à ce que la mise en forme s’effectue dans le domaine superplastique qui est associé à une plage de vitesse de déformation spécifique à chaque famille de matériau. La pression ainsi contrôlée applique le flanc déformé sur une matrice pour obtenir la géométrie souhaitée. Le temps de formage est de ce fait relativement important (plusieurs heures pour des pièces de grandes dimensions). La prédiction de la loi d’évolution de la pression de formage par simulation numérique permet d’optimiser la mise en forme et de réduire le temps de cycle. Par contre cette prédiction est à l’heure actuelle assez délicate à mettre en œuvre pour des pièces industrielles de formes complexes.

Le procédé de formage incrémental est un procédé assez récent, dont le principe est de déformer localement une tôle à l'aide d'un outil à bout hémisphérique de faible diamètre par rapport aux dimensions de la tôle. L'intérêt de ce procédé est de garantir la forme de la pièce, uniquement par la gestion des trajectoires de l'outil. Il est cependant possible d'améliorer la qualité de la pièce finale en utilisant une matrice de conformation. Les forces appliquées par l'outil sont assez faibles (environ 300N), ce qui réduit le coût global des outillages. De plus, ce procédé permet des niveaux de déformations plus élevés que ceux observés en emboutissage. La qualité des pièces obtenues dépend fortement des différentes stratégies de trajectoires dont la prédiction s'effectue par simulation numérique. Comme pour la superplasticité, les temps de cycles sont relativement élevés, ce qui limite l'utilisation du procédé à la réalisation de prototypes ou de pièces en petites séries.

Cet article présente les protocoles de simulation numérique associés à chacun de ces procédés et compare les résultats obtenus pour la simulation de la mise en forme d'un embouti profond comportant un faible angle de dépouille.

## 2 Protocoles de simulation numérique

### 2.1 Formage superplastique

Le domaine superplastique se situe dans une certaine plage de vitesse de déformation et la taille des grains doit être faible (de l'ordre de quelques micromètres). La vitesse de déformation optimale se situe au point où le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation est le plus élevé. Au-delà de cette vitesse, le risque de déchirement est important. La limite inférieure a une influence moins importante. Le temps de formage est cependant limité (quelques heures) pour éviter un grossissement trop important des grains.

Le procédé de formage superplastique consiste à bloquer la tôle entre une matrice et un serre flan. L'introduction d'un gaz neutre (en général de l'argon) permet de déformer la tôle qui va prendre la forme de la matrice. La pression est contrôlée de manière à ce que le matériau soit dans le domaine superplastique.

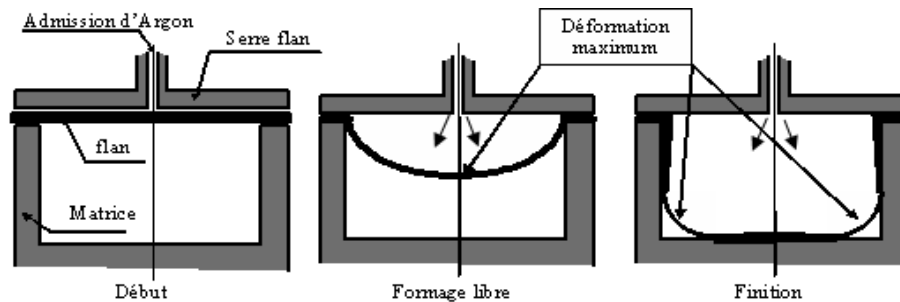


Figure 1. Principe du formage superplastique

L'objectif principal de la simulation numérique du formage superplastique consiste à déterminer la loi d'évolution de la pression qui permet de garantir une mise en forme dans le domaine superplastique. Dans la majeure partie des simulations, le domaine superplastique est caractérisé par une consigne en vitesse de déformation maximale. Le code de calcul ABAQUS dispose d'une procédure spécifique pour gérer la simulation du formage superplastique. Le modèle de comportement du matériau est décrit par une loi de fluage et la pression de formage est contrôlée en fonction de la vitesse de déformation maximale par un algorithme à bandes [1], cependant plusieurs auteurs [2,3] ont montré que ce pilotage n'est pas optimal.

Un algorithme de correction de la pression a été développé par Y. Aoura [3]. Cet algorithme est basé sur un asservissement de chargement contrôlé par le rapport entre la contrainte maximale et une contrainte de consigne (noté  $\chi_p$ ). La pression est corrigée avec un facteur qui

dépend de la plage de la contrainte. L'algorithme qui est détaillé sur le tableau 1 a été développé sous ABAQUS 6.1 et n'est appliqué que sur un seul élément, en l'occurrence le dernier élément entrant en contact avec la matrice. Le choix de cet élément nécessite des simulations préliminaires sur la base de lois de pressions prédéfinies où obtenues par l'algorithme standard.

Si	Alors
$\chi_p \leq 0.75$	$P_{t+\Delta t} = 1.5 P_t$
$0.75 < \chi_p \leq 0.83$	$P_{t+\Delta t} = 1.1 P_t$
$0.83 < \chi_p \leq 0.92$	$P_{t+\Delta t} = 1.08 P_t$
$0.92 < \chi_p \leq 0.98$	$P_{t+\Delta t} = 1.007 P_t$
$0.98 < \chi_p \leq 1.008$	$P_{t+\Delta t} = P_t$
$1.008 < \chi_p \leq 1.02$	$P_{t+\Delta t} = P_t / 1.007$
$1.02 < \chi_p \leq 1.08$	$P_{t+\Delta t} = P_t / 1.08$
$1.08 < \chi_p \leq 1.167$	$P_{t+\Delta t} = P_t / 1.1$
$1.167 < \chi_p$	$P_{t+\Delta t} = P_t / 1.5$

Tableau 1 – Correction par bandes [3]

Ce mode de pilotage en contrainte est bien adapté aux matériaux peu sensibles au phénomène d'érouissage (TA6V). Les travaux présentés s'intéressent à la mise en place d'une stratégie globale qui permet l'utilisation d'une gamme de matériaux plus étendue et qui ne nécessite plus de simulations préliminaires :

- l'algorithme développé par Y. AOURA a été repris en corrigeant la pression en fonction du rapport entre la vitesse de déformation maximale dans la pièce et la vitesse de déformation optimale (noté  $\chi_v$ ) ;
- la correction par paliers a été remplacée par une correction continue afin de lisser la loi de pression ;
- L'algorithme utilise l'ensemble des éléments pour déterminer la vitesse de déformation maximale, ce qui permet de garantir le domaine superplastique dans toute la pièce et en particulier dans les zones où apparaissent des singularités de formes.

La correction de la pression s'effectue ainsi sous la forme suivante :

$$P_{t+\Delta t} = \left( -5(\chi_v - 1)^3 - 0.5(\chi_v - 1) + 1 \right) P_t \quad (1)$$

Pour prendre en compte les spécificités de la presse superplastique, la montée en pression est limitée aux performances du compresseur. Dans cette étude :

$$\left| \frac{dP}{dt} \right|_{\max} = 1 / 300 \text{ MPa} / \text{s} \quad (2)$$

## 2.2 Formage incrémental

Le procédé de formage incrémental permet la mise en forme d'emboutis avec ou sans matrice. Dans les deux cas, l'outil va déformer localement la tôle. La forme finale et la qualité des pièces obtenues sont dépendantes du parcours d'outil choisi.

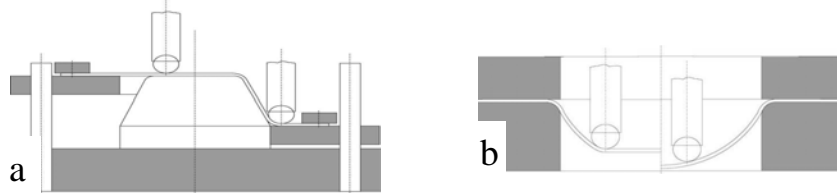


Figure 2. Principe du formage incrémental, avec (a) et sans (b) matrice [4]

Afin d'optimiser la préparation des modèles, une chaîne numérique spécifique a été développée. La conception des formes et les trajectoires d'outils sont générées dans l'environnement CFAO de CATIA. Un ensemble de scripts (Python et VBA) permet la lecture des fichiers APT et l'intégration des trajectoires dans le logiciel de simulation par éléments finis ABAQUS. Une fois les simulations validées, les fichiers APT peuvent être convertis en langage machine pour réaliser la mise en forme [5].

La problématique majeure de la simulation numérique du formage incrémental réside dans le fait que la forte non linéarité des modèles implique des temps CPU très élevés. La complexité des pièces peut également poser des problèmes de convergence lorsque des schémas de calcul implicites sont utilisés. Un schéma dynamique explicite est de ce fait privilégié, en prenant garde d'adapter la vitesse de l'outil, en fonction des effets dynamiques, afin d'optimiser le temps de calcul. Le critère énergétique suivant est utilisé pour contrôler ces effets :

$$\frac{dE_{cin}}{dE_{def}} < 5\% \quad (3)$$

Avec  $E_{cin}$  l'énergie cinétique et  $E_{def}$  l'énergie de déformation.

### 3 Résultats

Cette étude concerne l'analyse de l'influence du procédé sur la précision et la qualité de la pièce. La cas-test est un godet cylindrique dont les dimensions sont présentées figure 4 ci-dessous.

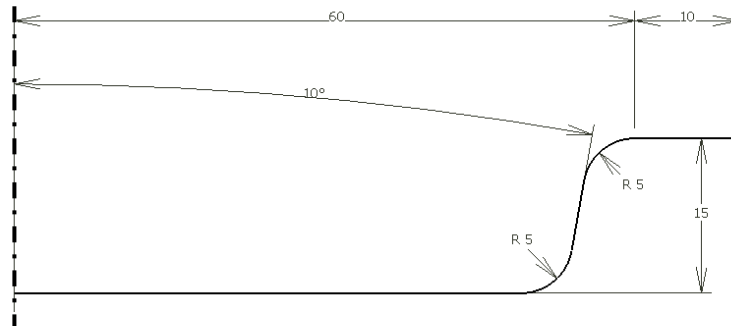


Figure 4 – profil de l'embouti axisymétrique

#### 3.1 Formage incrémental

La simulation numérique du cas-test est en premier lieu réalisée en formage incrémental. La trajectoire de l'outil est constituée de 5 cercles concentriques comme le montre la figure 5a. Le temps de formage, pour une vitesse de 0.005m/s est de l'ordre de 230 secondes.

Les éléments utilisés sont des coques à 3 nœuds et comprenant 5 points d'intégration dans l'épaisseur. Le modèle possède 24402 degrés de liberté. L'outil d'un diamètre de 10 mm est modélisé par une surface analytique rigide. La tôle a une dimension initiale de 140 x 140 mm et une épaisseur de 1 mm. Le matériau est un alliage d'aluminium dont le modèle de comportement élasto-plastique prend en compte un écrouissage isotrope et utilise la loi de Swift sous la forme:

$$\sigma = 150 \left( 0.013 + \bar{\epsilon}^{pl} \right)^{0.214} \text{ MPa} \quad (4)$$

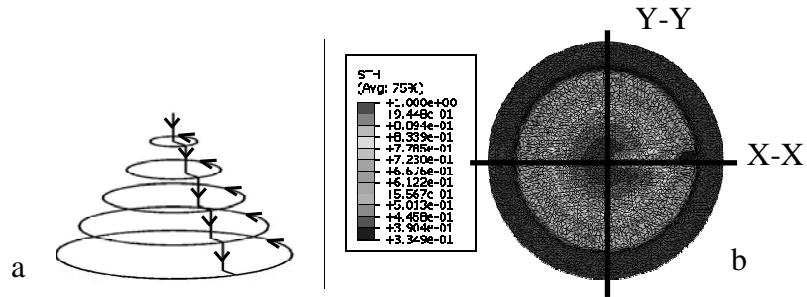


Figure 5 – Trajectoire de l'outil (a) et épaisseur finale (b)

La géométrie du flanc déformé est assez proche de la CAO d'origine sur les parties extérieures. Par contre, du fait de la trajectoire d'outil, le fond du godet s'écarte plus sensiblement de la géométrie initiale. Il est constaté que la position associée à la prise de pas vertical (dans le plan X-X) de l'outil influe sur la conformité de la géométrie comme le montre la coupe X-X.

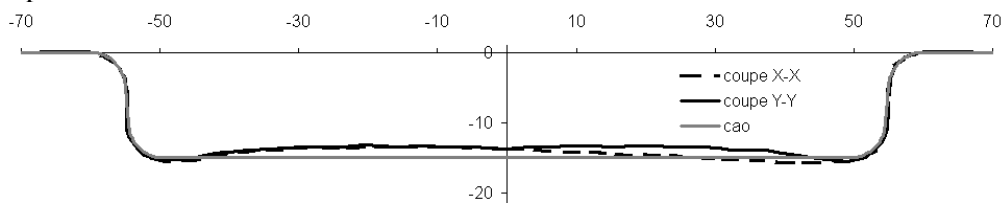


Figure 6 – Flanc déformé

L'épaisseur diminue considérablement, notamment dans les zones de prise de pas vertical et sur les zones de contact direct avec l'outil comme le montre la figure 7. Il est de ce fait recommandé d'augmenter le nombre de trajectoires circulaires afin de garantir, par superposition des zones de contact, une plus grande homogénéité de l'épaisseur du flanc.

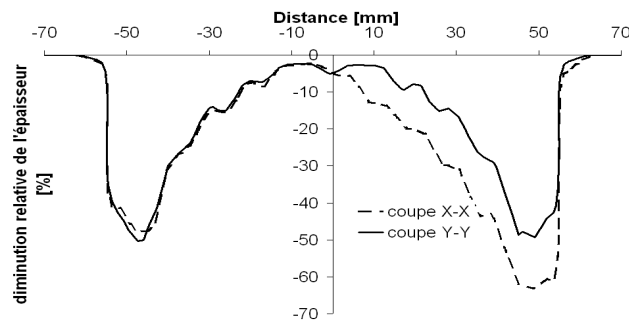


Figure 7 – Diminution relative de l'épaisseur finale

### 3.2 Formage superplastique

La simulation numérique de la mise en forme du godet par formage superplastique est ensuite réalisée. Les éléments utilisés sont des membranes axisymétriques à 2 nœuds. Le modèle comporte 567 degrés de libertés. La matrice est modélisée par une surface analytique rigide. La tôle a les mêmes dimensions que précédemment. Le matériau utilisé est également un alliage d'aluminium (7475) dont la loi de fluage s'écrit, pour une vitesse de déformation optimale de  $0.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , sous la forme :

$$\sigma = 510 \varepsilon^{0.1} \dot{\varepsilon}^{0.66} \text{ MPa} \quad (6)$$

Pour ce procédé, la diminution de l'épaisseur est moins importante et sa répartition est plus homogène que pour le formage incrémental. La forme obtenue est parfaitement conforme à la matrice axisymétrique. Cependant, le temps de formage est nettement plus élevé (environ 6000 secondes).

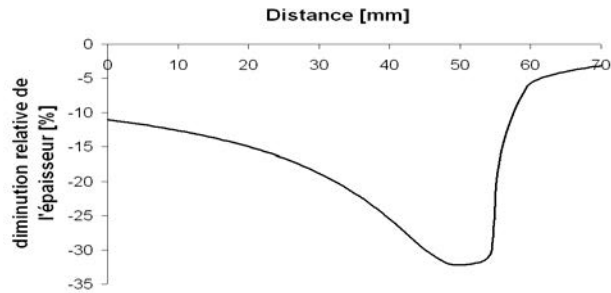


Figure 8 – Diminution relative de l'épaisseur finale

## 4 Conclusion et perspectives

Cette étude a montré l'influence des procédés et des stratégies de mise en forme sur la qualité des produits obtenus. Il est à noter que les différents protocoles de simulations numériques ont été validés expérimentalement et sont utilisés pour l'identification du comportement des matériaux sur la base d'essais bi-axiaux.

Dans le cas du formage incrémental, la géométrie finale n'est pas axisymétrique, et le passage de l'outil diminue localement l'épaisseur. De plus, la diminution relative de l'épaisseur maximale est d'environ 65%. La géométrie finale est de bonne qualité sur l'extérieur malgré l'absence de matrice. Dans le cadre de la mise en forme superplastique, le temps de formage est très élevé, mais la géométrie est de très bonne qualité avec une diminution relative de l'épaisseur faible (30%) et assez homogène.

En superplasticité, le temps de remplissage est tributaire de la complexité des formes et dans certains cas conduit à l'impossibilité de réaliser la pièce à cause du grossissement des grains. De plus, certaines géométries comportant de faibles rayons de raccord ou des contre-dépouilles ne sont pas réalisables. Le procédé de formage incrémental peut mettre en forme de telles géométries, cependant l'amincissement est localisé et devient important pour de grandes déformations. La suite des travaux portera sur l'enchaînement de ces deux procédés qui va nécessiter une étude préliminaire de l'évolution des comportements et des caractéristiques des matériaux tout au long du cycle de mise en forme. Le but est de réaliser une préforme en superplasticité, et d'effectuer la finition en formage incrémental. L'avantage est de réduire le temps de mise en forme, et de pouvoir réaliser des formes plus complexes permettant une intégration de fonctions plus marquée.

## Références

- [1] Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual, 2007.
- [2] D. Sorgente, L. Tricarido. A numerical-experimental approach to material characterization and process analysis in the Blow Forming process. 6th EuroSPF conference, 2008.
- [3] Y. Aoura. Contribution à la modélisation du comportement superplastique des alliages métalliques pour les procédés de mise en forme. Thèse de doctorat, ENSAM, Angers, France, 2004.
- [4] J. Kopac, Z. Kampus. Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool, Journal of Materials Processing technology, Vol. 162-163, 2005, pp. 622-628.
- [5] C. Robert, P. Dal Santo, A. Delamézière, A. Potiron, J.-L. Batoz. On some computational aspects for incremental sheet metal forming simulation, 11th ESAFORM conference, 2008, Int Mater Form ISSN 1960-6214, 4 pages.