

ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DU FORMAGE INCREMENTAL POUR LES PIECES DE PETITES DIMENSIONS

Steeve Dejardin, Sébastien Thibaud & Jean-Claude Gelin

Institut FEMTO-ST - ENSMM
Laboratoire de Mécanique Appliquée
24 rue de l'Épitauphe, 25000 Besançon
steeve.dejardin@ens2m.fr

Résumé :

Le formage incrémental a été présenté au cours de précédentes études comme un procédé prometteur pour la production de pièces métalliques à l'aide d'un outil de forme simple piloté par une machine à commandes numériques. En regard à ses nombreux avantages, un tel procédé a été introduit comme étant une alternative aux procédés d'emboutissage classiquement utilisés afin de réduire les coûts de production de pièces de petites séries ou de prototypes. Dans cet article, une application du formage incrémental est présentée, s'appuyant sur la flexibilité du procédé liée à la disparition du couple poinçon/matrice. Bien que le procédé reste à optimiser, des premiers résultats concernant la fabrication de pièces de petites dimensions ont été obtenus. Parallèlement à cette étude expérimentale, une analyse numérique EF a été menée dans le but d'étudier différents paramètres du procédé.

Abstract :

Incremental Sheet Forming processes have been demonstrated in recent studies as a very promising technology to manufacture sheet metal parts by the CNC controlled movement of a simple generative tool. In glance with its various advantages, such process has been introduced as an alternative to reduce costs resulting from stamping technology when small batches or prototypes have to be manufactured. In this paper, an application is carried out accounting flexibility of the process linked to the fact that the punches or dies are avoided. Although the process still needs a further optimization, preliminary results have been obtained through experimental tests to manufacture micro parts. At the same time, a FEM analysis has been carried out in order to get the characteristics of the formed parts.

Mots-clefs :

Formage Incrémental ; étude numérique et expérimentale ; microcomposants

1 Introduction

Au cours des dernières années, le formage incrémental a été développé et présenté comme un procédé stratégique dans la fabrication de pièces métalliques par mise en forme. En effet, en raison des faibles coûts de production, l'utilisation de cette technique semble intéressante pour la production de pièces de petites séries ou la fabrication de prototypes (Park *et al.* (2003)). Le principe de base réside dans la suppression du couple poinçon/matrice classiquement utilisé dans les procédés de mise en forme et dans l'utilisation d'un outil de formage de forme simple dont le chemin est contrôlé par une machine CN. En dépit d'une certaine lenteur du procédé, le formage incrémental semble être une réponse efficace au désir de flexibilité accru se développant dans le secteur de la mise en forme ainsi qu'une puissante alternative à la production de pièces ne pouvant être réalisées par des procédés conventionnels, comme dans le cas de pièces à usage unique utilisées dans le domaine médicale (Ambrogio *et al.* (2005)). Dans

le même temps que la compréhension du procédé se développe, plusieurs études ont été menées dans le but de justifier la grande formabilité des matériaux qui caractérise le formage incrémental en comparaison aux opérations d'emboutissage classiques (Iseki (2000) – Shim *et al.* (2001)). Basé sur l'intérêt de déformations locales imposées par un simple outil hémisphérique, cet article présente une application du procédé de formage incrémental dans la production de pièces métalliques de petites dimensions.

Par ailleurs, il est nécessaire de souligner les efforts à produire afin de rendre le procédé industrialisable. En effet, le mécanisme du procédé étant principalement caractérisé par un mode de déformation par extension sans apport de matière, s'ajoutant au fait qu'il n'y ait pas de matrice de contre forme, un amincissement non négligeable de la paroi ainsi qu'un manque de précision géométrique dans les pièces produites limitent son insertion sur le marché industriel.

Aussi il est important d'étudier davantage le procédé au travers d'investigations expérimentales et numériques. C'est pourquoi cet article résume les travaux de développement d'un pilote expérimental menés au sein de notre laboratoire dans le but de démontrer l'intérêt du formage incrémental dans la production de pièces de petites dimensions. Cette étude est également basée sur une analyse EF du procédé permettant de prédire l'évolution de l'épaisseur du flan ainsi que la répartition des contraintes et déformations au cours du procédé.

2 Etude expérimentale

Dans un premier temps, une série de tests a été menée dans le but d'étudier la faisabilité de pièces de petites dimensions par formage incrémental. Ces essais ont été réalisés sur un centre d'usinage à commandes numériques. Le flan en CuNiP, de 30mm de côté et de 0.24mm d'épaisseur, est maintenu en position par un serre flan circulaire (cf. Figure 1).

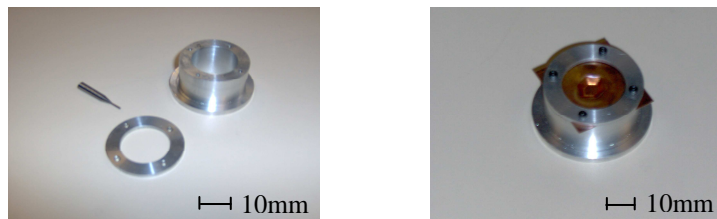


FIG. 1 – Equipement expérimental utilisé pour le formage incrémental

Un outil de forme simple avec une tête hémisphérique de diamètre 1mm, adapté sur l'axe vertical du centre d'usinage, est utilisé comme outil de formage. Le chemin d'outil décrit un mouvement dans le plan horizontal (déplacement de la table de la CN dans le plan X-Y) associé à un mouvement du poinçon selon l'axe vertical de la machine. Comme il a été démontré dans de précédentes investigations (Filice *et al.* (2000)), au cours du procédé, le flan subit principalement une déformation par élongation due à l'action localisée du poinçon.

Comme l'ont montré Ambrogio *et al.* (2004) au cours de leurs études, le comportement du matériau formé est fonction des conditions géométriques et de la stratégie de formage employée. Particulièrement, la précision géométrique de la pièce formée est influencée par la profondeur de passe verticale de l'outil. En effet, les conditions d'élongation augmentant avec l'incrément vertical, plus celui-ci est important, moins l'état de surface est acceptable. A partir de ces observations, les paramètres du procédé utilisés au cours des différents essais ont été définis et sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Principaux paramètres du procédé

Paramètres	Valeur
Diamètre d'outil	1mm
Incrément vertical	0.01mm
Vitesse d'avance	300m/min
Vitesse de rotation	250tr/min

La Figure 2 montrent quelques pièces réalisées par formage incrémental.

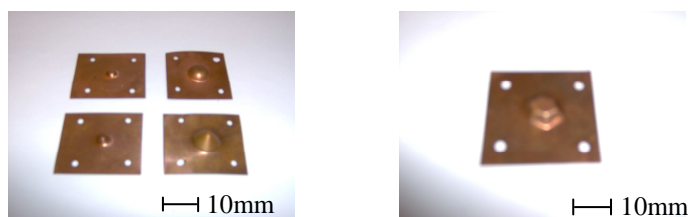


FIG. 2 – Exemple de pièces réalisées au cours de l'expérimentation

3 Analyse numérique

Dans le but de mener une étude numérique du procédé, un modèle Eléments Finis a été implémenté sur le code de calcul LS-Dyna®. Le formage incrémental étant un procédé à déformation progressive du flan, caractérisé par de grands déplacements et des déformations localisées, le choix d'un schéma explicite a été retenu d'où le recours au code de calcul EF LS-Dyna® comme logiciel de simulation.

Selon les essais expérimentaux, la forme choisie pour mener l'étude numérique est une pyramide à base hexagonale de 3mm de profondeur. La paroi fait un angle de 80° avec l'horizontal. Les principales dimensions sont résumées Figure 3.

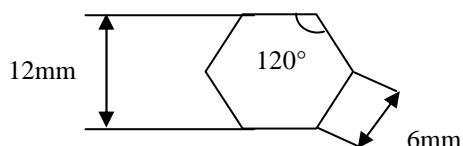


FIG. 3 – Géométrie de la pièce étudiée

En raison du chemin d'outil, une analyse complète en trois dimensions est recommandée. C'est pourquoi des éléments coques à 4 nœuds avec 6 degrés de liberté à chaque nœud et 5 points d'intégration dans l'épaisseur ont été utilisés. Par ailleurs, un maillage adaptatif a été mis en place dans le but de réduire la dimension des éléments lorsque ces derniers subissent une distorsion trop importante. Le nombre croissant de nœuds en contact avec la surface de l'outil permet ainsi une modélisation plus juste des déformations progressives de la tôle.

La figure 4 montre le maillage de la pièce étudiée en cours de simulation.

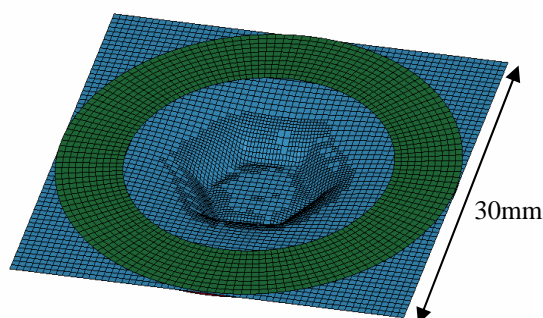


FIG. 4 – Maillage du flan correspondant à un déplacement vertical de l'outil de formage de 2mm

Le maillage initial du flan est constitué de 900 éléments. Le comportement plastique de la tôle est modélisé à l'aide d'une loi d'écroutissage de type Swift.

$$\bar{\sigma} = k \cdot (\varepsilon_p + \bar{\varepsilon})^n \quad (1)$$

L'outil est considéré comme un corps rigide et les conditions aux limites associées sont déterminées par le chemin pris au cours du procédé.

En fin de simulation, le profil numérique a été déterminé et comparé au profil théorique déterminé par CAO et au profil expérimental mesuré à l'aide d'un appareillage 3D de mesure optique InfiniteFocus® (cf. Figure 5). Le profil est pris sur la surface extérieure de la pièce.

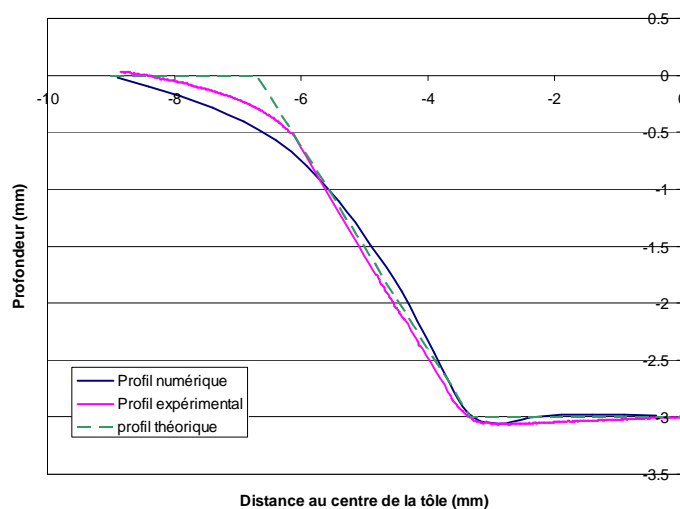


FIG. 5 – Comparaison des profils théorique, numérique et expérimental.

L'effort sous serre flan est modélisé grâce à la carte `load_rigid_body` disponible sous Ls-Dyna®. L'intensité de l'effort, appliqué au centre de gravité du corps rigide serre flan, est égale à un pourcentage de la limite élastique. Différents tests ont été menés dans le but d'étudier l'influence de la pression sur la pièce mise en forme. En particulier, l'analyse numérique est focalisée sur la répartition de l'épaisseur ainsi que sur la précision géométrique de la pièce. Les résultats numériques démontrent qu'une pression de 0.5MPa (environ 2% de la limite élastique) est suffisante pour maintenir la tôle en position (Ambrogio *et al.* (2005)). Les premiers résultats

de la figure 6 montrent que l'effort sous serre flan ne semble pas avoir de réelle influence sur les problèmes de précision géométrique rencontrés au cours du procédé. D'autre part, la figure 7 présente une augmentation de l'amincissement du flan en fonction de l'effort croissant appliquée par le serre flan.

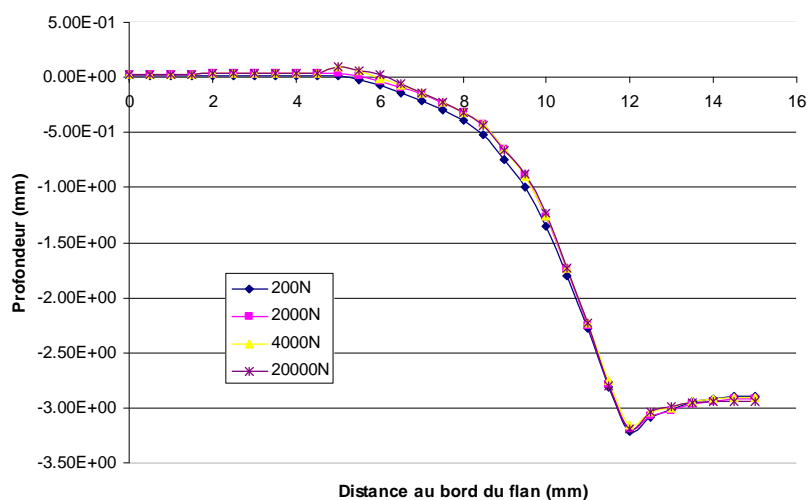


FIG. 6 – Comparaison de profils de pièces obtenues pour différents efforts sous serre flan (F=200N i.e. P=0.5MPa et F=20000N i.e. P=50MPa)

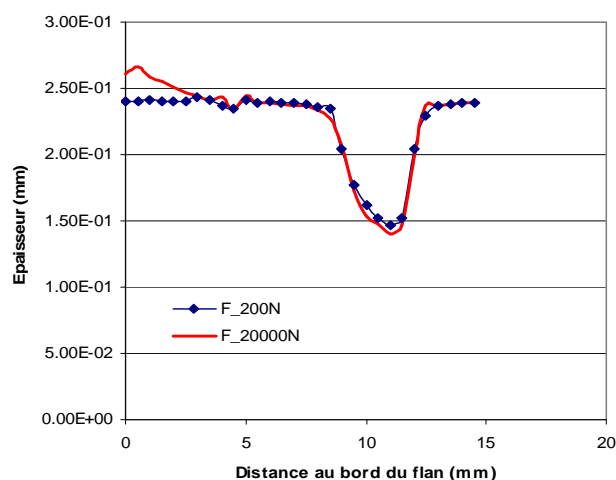


FIG. 7 – Comparaison des épaisseurs de pièces obtenues par formage incrémental avec des efforts sous serre flan différents (F=200N i.e. P=0.5MPa et F=20000N i.e. P=50MPa)

4 Conclusions

Les travaux relatés ci-dessus ont démontré la possibilité de réaliser des pièces de petites dimensions par formage incrémental. Les résultats exposés dans le présent article montrent qu'un tel procédé de mise en forme permet la réalisation de formes complexes à partir de tôles de faibles épaisseurs tout en évitant le risque d'apparition de fissures classiquement obtenues

lors de la mise en forme de tôle par procédés conventionnels. Dans ce papier est également étudiée l'influence sur la précision géométrique et les variations d'épaisseurs de certains paramètres comme l'effort exercé par le serre flan. De plus, il a été démontré que l'utilisation d'un code commercial de calcul explicite permettait une modélisation efficace du procédé afin de prédire notamment la déformée de la pièce ainsi que ses variations d'épaisseurs. D'autres développements concernant la possibilité de mesurer l'épaisseur du flan en ligne afin de contrôler le procédé sont actuellement en cours.

5 Remerciements

Ces travaux ont été menés avec le soutien financier du projet SCULPTOR issu d'un contrat européen STREP (projet no. NMP2-CT-2005-014026).

Références

- Park, J.J., Kim, Y.H. 2003 Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique, *Journal of Materials Processing Technology* 140, 447-453
- Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., Muzzupappa, M. 2005 Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing, *Journal of materials Processing Technology* 162-163, 156-162
- Iseki, H. 2000 An experimental and theoretical study on a forming limit curve in incremental forming of sheet metal using spherical roller, *Proc. of Metal Forming*, 557-562.
- Shim, M.-S., Park, J.J. 2001 The formability of Aluminum sheet in incremental forming, *Journal of materials Processing Technology* 113, 654-658
- Filice, L., Fratini, L., Micari, F. 2000 Analysis of Material Formability in Incremental Forming, *Proc. of Metal Forming*, 557-562
- Ambrogio, G. , Costanino, I., De Napoli, L. , Filice, L. , Fratini, L., Muzzupappa, M. 2004 Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation, *Journal of materials Processing Technology* 153-154, pp. 501-507
- Ambrogio, G., Filice, L., Gagliardi, F., Micari, F. 2005 Sheet Incremental Forming: A new process configuration allowing a sheet material controlled flow under the blank-holder, ICTP