

# Formage incrémental à chaud à l'aide de cartouches chauffantes pour la mise en forme de tôles en titane

B. SAIDI<sup>a</sup>, L. GIRAUD-MOREAU<sup>a</sup>, A. CHEROUAT<sup>a</sup>

a. Institut Charles Delaunay- Equipe LASMIS,  
Université de Technologie de Troyes, France

## Résumé :

*Le procédé de formage incrémental est un procédé de mise en forme très prometteur pour le domaine du bio-médical car il permet de réaliser des prothèses adaptées à chaque individu. Mais dans le cas de pièces en titane, les efforts de formage importants limitent fortement les géométries de pièces pouvant être mises en forme avec ce procédé. Plusieurs études ont déjà montré que le chauffage de la pièce au cours de ce procédé permet d'augmenter la formabilité des pièces. Cet article présente un nouveau dispositif de formage incrémental à chaud, basé sur l'utilisation de cartouches chauffantes. Les résultats d'une campagne d'essais expérimentaux à 450°C pour un cône tronqué en titane avec différents angles d'inclinaison sont étudiés. La simulation numérique de ce procédé à chaud est réalisée et les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux.*

**Mots clefs : formage incrémental, simulation numérique**

## 1 Introduction

Le formage incrémental (ISF) est un procédé de mise en forme de tôles minces aujourd'hui connu pour être particulièrement intéressant pour la petite série, la réalisation de pièces à usage unique ou le prototypage car il est plus flexible et plus économique que l'emboutissage. Ce procédé consiste à déformer localement la tôle par repoussage grâce au déplacement d'un outil de forme hémisphérique de petite taille dont la trajectoire peut être pilotée par une machine à commande numérique ou un robot. Ce procédé supprime le couple poinçon-matrice utilisé en emboutissage, ne nécessite pas d'outils spécifiques et est beaucoup moins couteux que l'emboutissage. Mais c'est un procédé lent en raison de la longue trajectoire de l'outil. Il est donc surtout adapté à la petite série, la réalisation de pièces à usage unique ou le prototypage.

Le domaine biomédical est un des domaines pour lequel ce procédé est très prometteur [1]. Il permet en effet de réaliser des prothèses uniques, adaptées à chaque individu. Les alliages de titane sont très utilisés dans le domaine médical or ce matériau est très difficile à former. Les efforts de formage nécessaires lors du formage incrémental de pièces en titane étant très importants, ils limitent les possibilités de géométrie de pièces. Une des solutions pour former des pièces en titane grâce à ce procédé est de réaliser l'essai à chaud.

Un nouveau dispositif de formage incrémental à chaud basé sur l'utilisation de cartouches chauffantes est proposé dans cet article. Une campagne d'essais expérimentaux à chaud avec des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V a été menée en considérant une pièce de référence de forme tronconique. Les résultats de la campagne expérimentale sont présentés, l'objectif étant de déterminer l'angle limite de formage. La modélisation de ce procédé à chaud a ensuite été réalisée sur Abaqus. Les résultats numériques sont comparés à ceux de la campagne expérimentale.

## 2 Dispositif expérimental de formage incrémental à chaud

Différentes méthodes existent déjà dans la littérature pour réaliser le formage incrémental à chaud. On peut les classer en trois grands groupes : les méthodes de chauffage total de la zone à former [2], de chauffage local dans la zone de contact poinçon-tôle (techniques laser, courant électrique...) [3] et les méthodes de chauffage combiné (bandes chauffantes et vitesse importante du poinçon) [4]. Les techniques de chauffage total sont souvent utilisées avec des matériaux ductiles comme l'alliage de cuivre ou les alliages d'aluminium. Récemment de nombreuses techniques de chauffage local basées sur la technique laser ont été développées mais l'industrialisation de cette solution demande des énergies importantes pour sa mise en œuvre.

On propose ici une nouvelle solution de chauffage totale basée sur l'utilisation de cartouches chauffantes implantées dans la matrice [5]. Le flan à déformer repose sur la matrice pour avoir une surface de contact lui permettant un chauffage par conduction tout au long de l'opération de formage. Le dispositif de formage incrémental à chaud est présenté sur la figure 1.

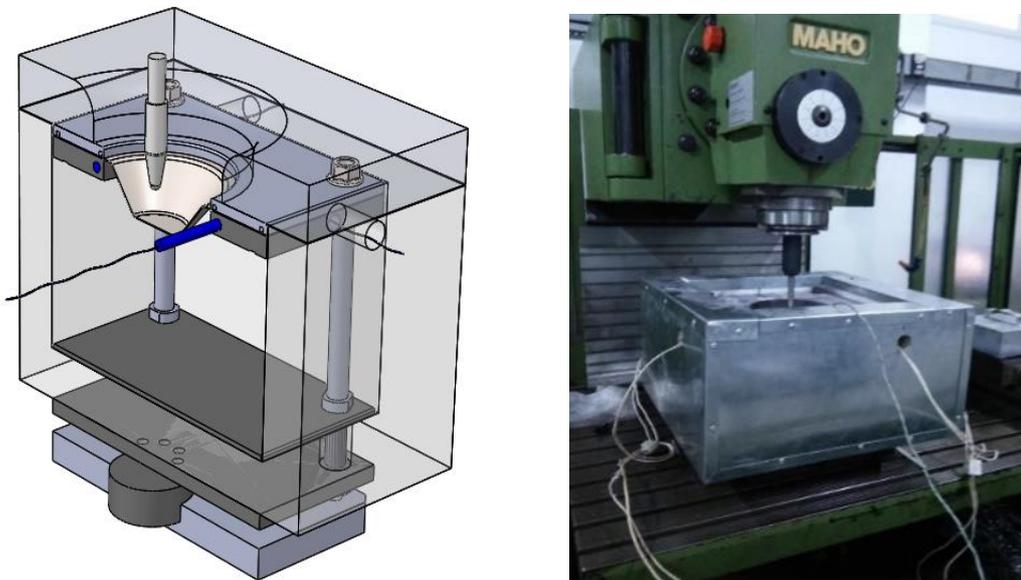


Figure 1 Dispositif de formage incrémental à chaud proposé

Un régulateur de température (PID) permet de réguler la température par l'alimentation des cartouches en courant électrique. Ce régulateur alimente les cartouches en courant, en fonction de la température mesurée par le thermocouple placé sur le flan. De cette manière on peut garantir une plage de température de travail pour une opération de formage incrémental à chaud à une température désirée. Afin d'isoler ce dispositif et garantir un maintien de la température pour des plages importantes de 400-500°C, des briques réfractaires ont été utilisées pour fabriquer une enceinte thermique couvrant l'ensemble du bloc supérieur. Cette solution permet d'assurer un chauffage uniforme du flan jusqu'à une température de 800°C. Le suivi et le contrôle en temps réel de la température et de l'effort de formage sont effectués grâce à un capteur d'effort multi-composants FN7325 et une caméra infrarouge de type IRISYS 4000.

### 3 Essais expérimentaux

Des essais de formage incrémental ont été réalisés sur une machine à commande numérique de type MAHO modèle MH 1000E en utilisant un poinçon hémisphériques de diamètre 5mm en acier X160CrMoV12 ayant subi un traitement thermique de trempe à 1030°C et refroidi à l'air. Les vitesses d'avance et de rotation de l'outil sont respectivement de 600 mm/mn et 40 rpm.

La campagne d'essais expérimentaux à chaud avec des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V a été menée en considérant une pièce de référence de forme tronconique (présentée sur la figure 2) ayant un diamètre  $D$  de 130 mm, une épaisseur  $t_i$  de 0.5 mm, une hauteur de 40 mm et un angle de formage  $\alpha$  variable.

Des premiers essais réalisés à température ambiante avec un angle  $\alpha$  de 30° ont montré que la rupture de la tôle apparaissait pour une profondeur de 9 mm et l'effort axial maximal de formage était alors de 2000N.

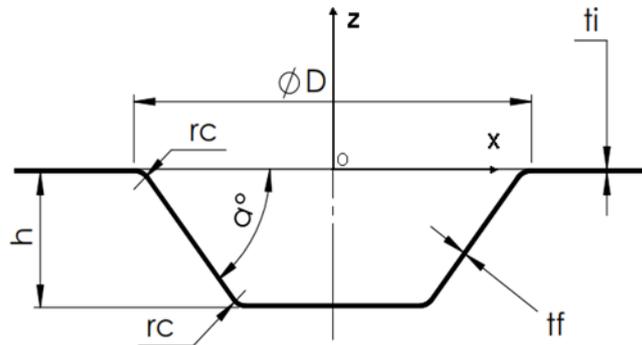


Figure 2 Pièce étudiée, cône tronqué

Des essais ont ensuite été réalisés à chaud avec le dispositif expérimental proposé à une température de 450°C. Pour un angle  $\alpha$  de 45°, une pièce saine sans brulure ni rupture et en conformité dimensionnelle avec le profil souhaité a été obtenue. L'effort axial maximal mesuré était de 900 N, ce qui est largement inférieur à la valeur mesurée à température ambiante pour un angle d'inclinaison de seulement 30°.

Des essais avec différents angles d'inclinaison de la pièce ont été effectués afin de définir l'angle limite de formage. Les premières fissures sont apparues pour un angle d'inclinaison de 57°C. La figure 3 présente les pièces formées pour un angle de 45° et de 57°.



Figure 3 .Pièces obtenues avec un angle d'inclinaison de 45° et 57°.

### 4 Simulation numérique du procédé à chaud

La simulation numérique du procédé de formage incrémental à chaud de tôles en titane a été réalisée avec Abaqus. Le modèle utilisé est un modèle dynamique explicite avec couplage thermomécanique.

Pour la loi de comportement de l'alliage de titane Ti-6Al-4V à chaud, le modèle de Johnson-Cook a été choisi :

$$\sigma_y = (A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)\right] \quad (1)$$

La valeur des paramètres est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1 Paramètres de la loi Johnson-Cook pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V

A [MPa]	B [MPa]	C	m	n	$\dot{\epsilon}_0 [s^{-1}]$	$T_m [^{\circ}C]$	$T_r [^{\circ}C]$
968	380	0,0197	0,577	0,421	1	1655	25

Le flan de dimension de 210 x 210 mm<sup>2</sup> est maillé avec des éléments finis de coque à 4 nœuds avec intégration réduite. Le poinçon est modélisé par une surface analytique rigide indéformable.

Concernant le serre-flan, un encastrement sur les bords du flan a été utilisé, le système de serrage expérimental couplé avec des vis ne permettant pas au flan de glisser sur ses bords.

La trajectoire de l'outil avait été générée avec le logiciel de CFAO Catia V5 pour la campagne expérimentale. La même trajectoire a été utilisée pour la simulation numérique.

Le frottement entre le poinçon et le flan a été défini par un modèle simple de Coulomb.

Les simulations ont été réalisées pour différentes valeurs de l'angle d'inclinaison du cône et les résultats numériques ont été comparés à ceux de la campagne expérimentale.

La figure 4 présente les formes expérimentales et numériques obtenues pour un angle d'inclinaison de la pièce de 45°.

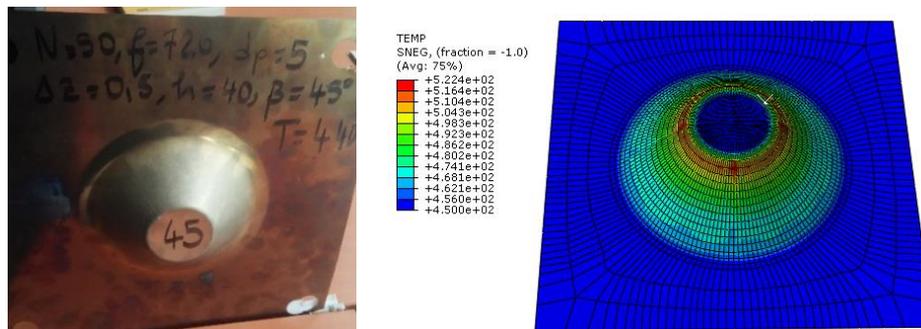


Figure 4: Comparaison de la pièce finale (45°)

Comme on peut voir sur la figure 5 présentant la distribution de l'épaisseur expérimentale et obtenue par le calcul E.F. le long d'un axe passant par le centre de la pièce, le modèle numérique permet de prédire correctement la réduction de l'épaisseur au cours du procédé de formage à chaud.

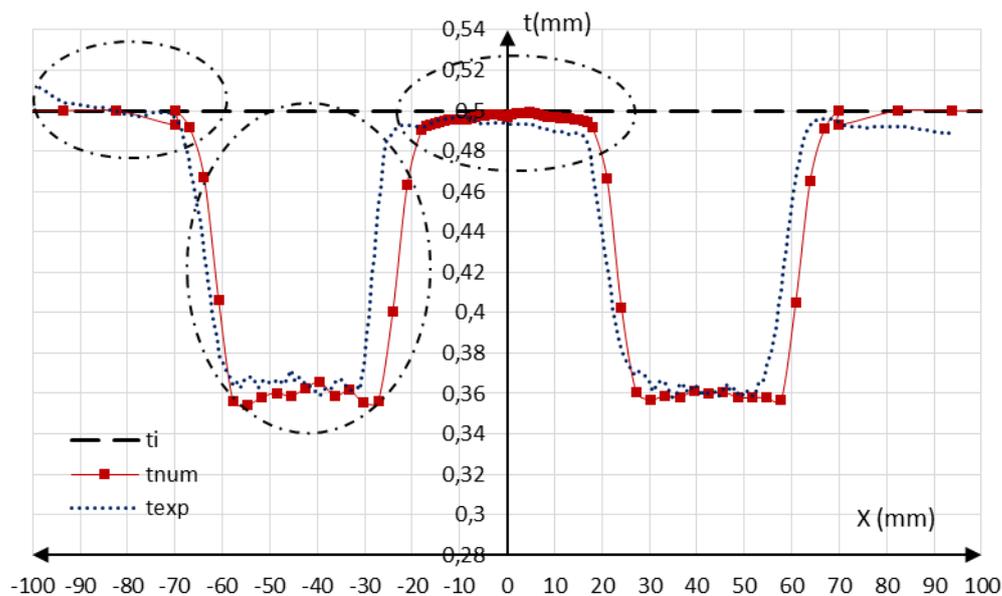


Figure 5 : Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique pour un angle de 45°

La figure 6 compare le profil expérimental au profil numérique pour la pièce ayant un angle d'inclinaison de 45°. Le profil théorique est aussi représenté sur cette figure. On peut observer que les profils numériques et expérimentaux sont très proches. Cependant le profil expérimental a été obtenu à l'aide d'une machine de mesure tridimensionnelle après le retrait de la pièce du système de fixation. Le retour élastique explique alors le petit écart avec le profil numérique.

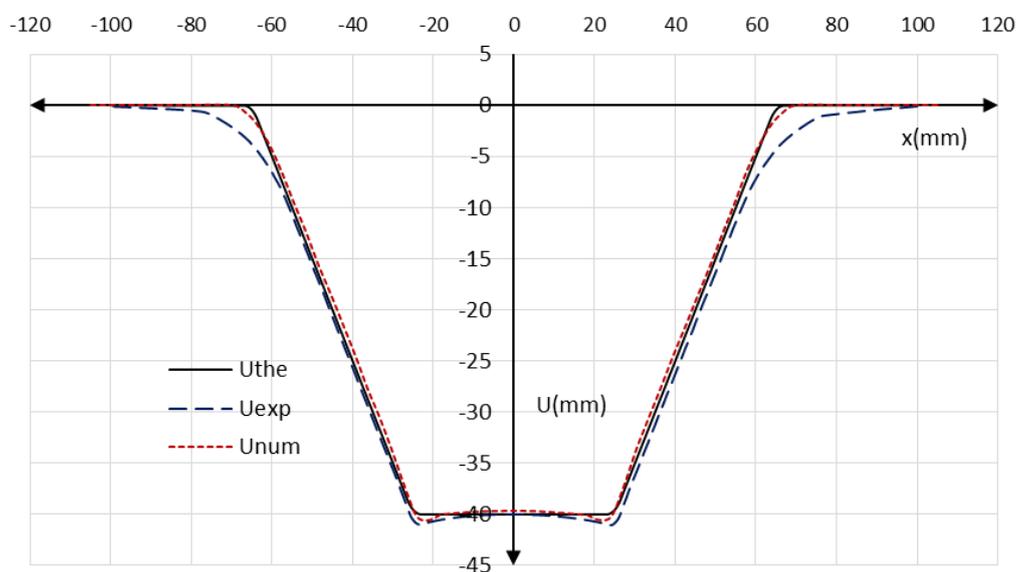


Figure 6 : Profils expérimental et numérique pour un angle de 45°

Concernant les efforts de formage, des résultats très similaires aux résultats expérimentaux ont aussi pu être obtenus à partir de la simulation numérique. Pour le même exemple de pièce ayant un angle de 45°, l'évolution de l'effort axial est représentée sur la figure 7.

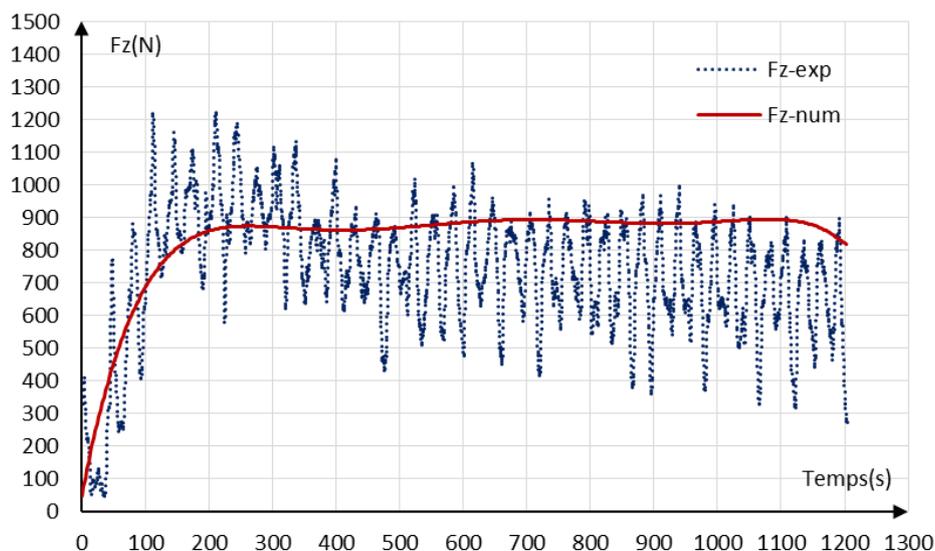


Figure 7 : Effort axial, comparaison des résultats numériques et expérimentaux

## 5 Conclusion

Un dispositif de formage incrémental à chaud basé sur l'utilisation de cartouches chauffantes a été présenté. Les essais expérimentaux avec une pièce de forme conique ont montré qu'il permet de diminuer fortement les efforts de formage et d'atteindre un angle de formage de 55°. La simulation de ce procédé à chaud a aussi été présentée.

La comparaison des résultats obtenus numériquement et expérimentalement effectuée à partir des mesures de la distribution de l'épaisseur, des profils de déplacements et de l'effort axial mis en jeu montre que le modèle Eléments Finis mis en place est capable de prédire correctement le comportement des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V mises en forme par le procédé du formage incrémental à chaud. En effet, les efforts prédits, le profil final de la pièce ainsi que la distribution des épaisseurs par la simulation sont relativement conformes à ceux obtenus expérimentalement.

## Références

- [1] G. Palumbo et M. Brandizzi, « Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed », *Mater. Des.*, vol. 40, p. 43-51, sept. 2012.
- [2] G. Ambrogio, L. Filice, et G. L. Manco, « Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31 », *CIRP Ann.*, vol. 57, n° 1, p. 257-260, 2008.
- [3] A. Göttmann et al., « Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts », *Prod. Eng.*, vol. 5, no 3, p. 263-271, juin 2011.
- [4] D. Xu, B. Lu, T. Cao, J. Chen, H. Long, et J. Cao, « A Comparative Study on Process Potentials for Frictional Stir- and Electric Hot-assisted Incremental Sheet Forming », *Procedia Eng.*, vol. 81, p. 2324-2329, 2014.
- [5] Saidi B., Giraud-Moreau L., Mhemed S., Cherouat A., Adragna P.A., Nasri R., Hot incremental forming of titanium human skull prosthesis by using cartridge heaters: a reverse engineering approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 101, issue 1-4, pp 873-880, 2019.