

# Approche couplée matériau/structure machine : application au formage incrémental

J. Belchior, D. Guines, L. Leotoing, P. Maurine, E. Ragneau

Université Européenne de Bretagne  
INSA-LGCGM  
20 avenue des Buttes de Coësmes  
35043 RENNES Cedex, France

## Résumé :

*Le formage incrémental est un procédé innovant permettant de fabriquer des pièces de géométrie complexe avec un outillage simple. Il consiste à déformer localement une tôle avec un outil non coupant de type poinçon hémisphérique. Dans le but de valider le choix d'une machine, il est important d'estimer le niveau d'effort nécessaire au formage de la tôle. Cette étape peut être réalisée à l'aide de l'outil de simulation numérique. Les niveaux de déformation adaptés à ce procédé sont bien supérieurs à ceux présents en emboutissage. Au vu des niveaux de déformations atteints, il semble évident que le choix de la loi d'écrouissage joue un rôle important sur le niveau d'effort estimé. Dans cet article, la simulation numérique du formage incrémental d'un cône tronqué est proposée. Cette simulation est basée sur une modélisation éléments finis du comportement élastoplastique de la tôle formée. Deux lois de comportement sont implémentées et leur influence sur l'effort ainsi que sur la géométrie finale de la pièce est évaluée.*

## Abstract :

*The incremental sheet forming is an innovative process which allow the production of complex parts with simple tools. It consists to deform locally a sheet with a non cutting hemispherical punch tool. To validate the use of a machine it is important to evaluate the required effort level to deform the sheet. This step can be done with a numerical simulation tool. This process involves higher levels of deformation than traditional stamping. Due to the high level of deformation reached, it seems to be obvious that the choice of the hardening law plays an essential role in the estimation of the effort level. In this paper the numerical simulation of the incremental forming of a truncated cone is proposed. This simulation is based on a finite element modeling of the elastoplastic behaviour of the forming sheet. Two hardening laws are implemented and their influences on forming efforts evaluation and final geometry are evaluated.*

**Mots clefs :** formage incrémental, simulation, loi d'écrouissage

## 1 Introduction

Le formage incrémental (Incremental Sheet Forming : ISF) permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe avec un outillage simple.

Le principe de ce procédé est de venir déformer localement et successivement une tôle en pilotant la position d'un outil, le plus souvent de type hémisphérique, jusqu'à obtenir la forme désirée. On distingue deux types d'ISF selon [7] :

- le formage “négatif” ou “un point”
- le formage “positif” ou “multi-point”

Le formage négatif consiste à former la pièce sans utilisation de matrice. Le formage positif, quant à lui, utilise soit une matrice, qui peut être en résine, soit un support partiel, ou encore un contre-outil (figure 1).

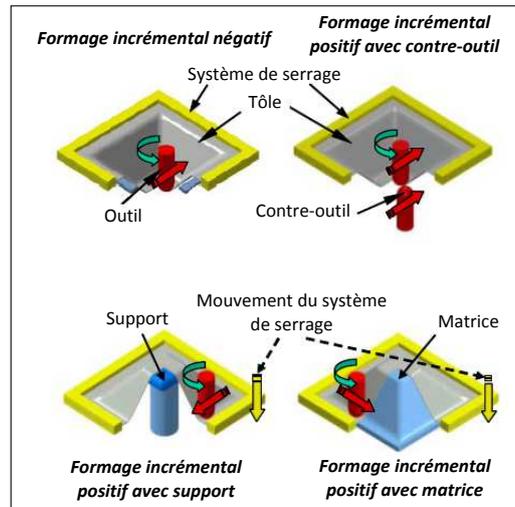


FIGURE 1 – Différentes familles d'ISF [7]

Du fait de sa simplicité de mise en oeuvre (pas d'outil tournant, outillage simple...), l'ISF apporte une grande flexibilité et permet de réduire les coûts de développement et de fabrication des outillages spécifiques, donc onéreux, tel qu'en emboutissage où une matrice est conçue pour chaque lot de pièce. Cependant, les temps de production en ISF sont assez longs, ce qui explique que ce type de procédé est encore peu utilisé dans le domaine industriel où il est réservé à des applications de prototypage ou à des productions de petites séries. Il fait néanmoins l'objet de nombreuses investigations dans le domaine de la recherche depuis une vingtaine d'année. La diminution des temps de cycle passe par une augmentation des vitesses de formage ce qui nécessite d'accroître la dynamique des machines. Pour cela, différents types de structures de machines ont été utilisés ou peuvent être envisagés : structures de type machine-outils [8], robots sériel [9], ou parallèle [2]... Quelque soit le type de structure envisagé, la forme finale de la pièce est conditionnée, entre autre, par la maîtrise des phénomènes de retour élastique de la pièce formée et des déformations élastiques de la structure. Le niveau de ces dernières, directement lié au dimensionnement de la machine, requiert une estimation la plus précise possible du niveau d'effort à développer lors de l'opération de formage. L'effort requis dépend de nombreux paramètres : caractéristiques mécaniques du matériau, épaisseur de la tôle, profondeur de passe, conditions de bridage, de frottement...[4]. L'évaluation du niveau d'effort, en vue d'un dimensionnement machine, peut être obtenue par simulation numérique de l'opération de formage, à condition toutefois de s'assurer du caractère prédictif des modèles implémentés dans l'outil de simulation (modèle élasto-viscoplastique pour le comportement du matériau, modèle élasto-dynamique pour le comportement de la machine, modèle de frottement, ...). Sur le plan bibliographique, peu d'études ont été menées en vue d'un dimensionnement optimal de machine. On peut toutefois citer les travaux de l'université de Cambridge [1] où une machine à structure cartésienne dédiée à l'ISF a été conçue. Afin de dimensionner les différents axes de la machine, un modèle analytique permettant d'approximer l'effort maximal en fonction du matériau et de l'outil a été proposé.

Comme le montrent [10],[6], la déformation très localisée de la tôle en ISF conduit à des niveaux de déformations bien supérieurs à ceux rencontrés en emboutissage. Classiquement, des niveaux supérieurs à 70%, voir jusqu'à 120%, peuvent être atteints pour des alliages d'aluminium. Ces niveaux élevés de déformation peuvent s'expliquer par la présence de contraintes de cisaillement comme le précise [5]. Dans ces travaux, le modèle de Marciniak et Kuczynski utilisé pour tracer les courbes limite de formage (CLF), a été modifié pour prendre en compte le cisaillement transverse. L'application de ce modèle

sur une tôle d'aluminium a permis d'observer une augmentation significative de la déformation limite en déformation plane.

Comme évoqué précédemment, un outil numérique de simulation prédictif et fiable, de type modélisation éléments finis (EF), peut permettre d'estimer les efforts de formage. Pour une configuration de formage donnée (géométrie de pièce, stratégie de formage, condition de bridage et de frottement), le comportement élasto-plastique et plus précisément la loi d'érouissage du matériau est l'élément prépondérant qui définira le niveau d'effort simulé. Néanmoins, les lois d'érouissage sont classiquement identifiées à partir d'essais de traction jusqu'à des niveaux de déformation relativement faibles (environ 20%). La pertinence du niveau d'effort simulé, pour les déformations importantes rencontrées en ISF (de l'ordre de 3 à 4 fois la plage de déformation sur laquelle la loi d'érouissage a été caractérisée), n'est donc pas évident.

Dans cette étude, nous présentons la simulation numérique d'une opération de formage incrémental d'un cône tronqué à partir d'une tôle dont le comportement est représentatif d'un alliage d'aluminium AA5086. Cette simulation est basée sur une modélisation éléments finis intégrant une loi de comportement élasto-plastique. Deux formulations mathématiques différentes de la loi d'érouissage, identifiées sur la même base expérimentale, ont été implémentées dans le logiciel de simulation. L'impact de cette formulation sur l'effort à développer par la machine, le niveau de déformation, voir la géométrie de pièce, est ensuite évalué.

## 2 Modèle numérique

### 2.1 Paramètres de la simulation

Nous avons choisi de simuler le formage négatif d'un cône tronqué, pièce qui est le plus souvent mentionnée dans la littérature sur l'ISF ([7],[4],[8],[1],[6]). La trajectoire de formage choisie est une trajectoire circulaire en spirale avec une profondeur de formage de 3.5 mm/tr. Dans un premier temps, le contact poinçon-tôle est considéré sans frottement. La figure 2 résume les différents paramètres de simulation choisis. Le logiciel Abaqus© a été utilisé dans le cadre de cette étude. La résolution du problème spatial prend en compte l'hypothèse des grandes déformations. Un schéma d'intégration dynamique explicite, considérant la gestion du comportement quasi-statique a été choisi.

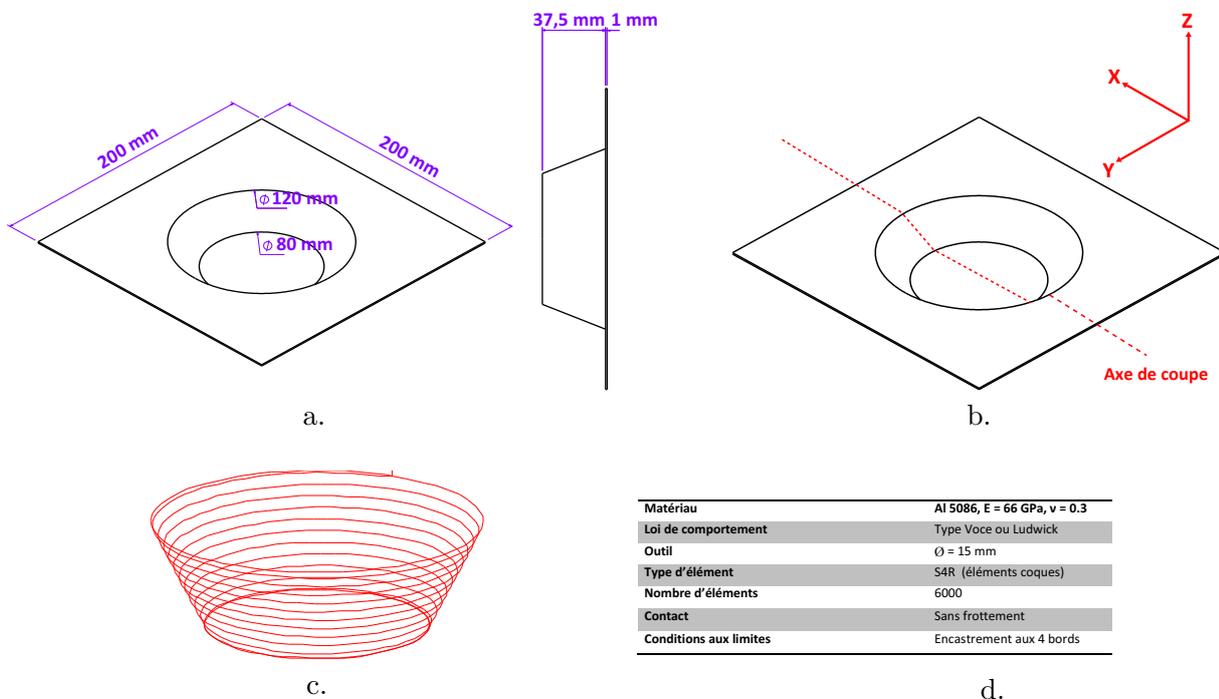


FIGURE 2 – Paramètres de la simulation : a. Pièce à former - b. Axe de coupe et repère choisis pour le traitement des résultats - c. Trajectoire en spirale - d. Tableau des paramètres de simulation

## 2.2 Comportement du matériau

Un modèle élasto-plastique isotrope associé à un critère de plasticité de Von-Mises a été retenu pour décrire le comportement du matériau. Des travaux antérieurs ont en effet montré que ce matériau présentait une faible anisotropie. En ce qui concerne la loi d'écroissage, deux formulations mathématiques différentes, identifiées sur la même base expérimentale, ont été implémentées dans le logiciel de simulation. La première est la loi de Ludwick, formulation fréquemment retenue dans les différents travaux traitant de la simulation du procédé ISF. La seconde loi d'écroissage testée est une loi de type Voce, loi souvent utilisée [3] pour modéliser la saturation de l'écroissage ou l'adoucissement du matériau en fonction de la température. Les formulations de ces deux lois d'écroissage sont rappelées ci-dessous.

Loi de Ludwick :

$$\bar{\sigma} = \sigma_e + K_1 \cdot \bar{\varepsilon}_p^n \quad (1)$$

avec  $\sigma_e = 125,88$  MPa,  $K_1 = 447,08$  MPa,  $n = 0,413$ . Où  $\bar{\sigma}$  est la contrainte équivalente,  $\sigma_e$  la limite élastique,  $\bar{\varepsilon}_p$  la déformation plastique équivalente.

Loi de Voce :

$$\bar{\sigma} = \sigma_e + K_2 \cdot \sqrt{1 - e^{(-B \cdot \bar{\varepsilon}_p)}} \quad (2)$$

avec  $\sigma_e = 130,2$  MPa,  $K_2 = 330,37$  MPa  $B = 3,94$ .

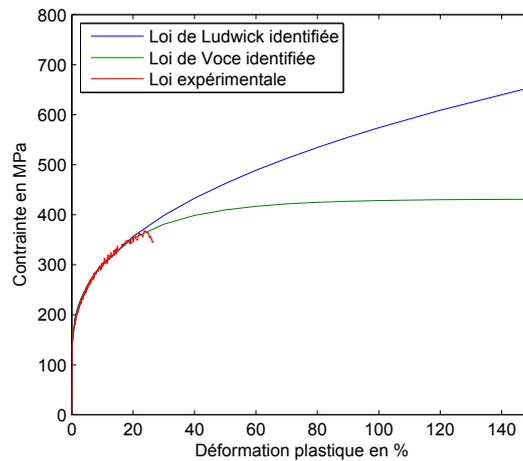


FIGURE 3 – Comparaison des lois d'écroissage implémentées dans le modèle éléments finis

Les constantes données ci-dessus ont été déterminées, pour les deux lois, sur la même base expérimentale, i.e. à partir de la courbe expérimentale contrainte/déformation d'un essai de traction uniaxial d'une éprouvette à section constante réalisée dans la direction de laminage. Cette courbe est présentée figure 3. Le tracé de ces deux lois d'écroissage (figure 3) montre que la loi de Voce tend effectivement à saturer pour des déformations de l'ordre de 60%, au contraire de la loi de Ludwick qui présente un caractère rigidifiant avec l'accroissement de la déformation. Dans la partie suivante, nous évaluons l'influence de ces formulations sur l'effort estimé en bout d'outil et sur la géométrie de la pièce.

## 3 Résultats

La figure 4.a présente les niveaux de déformation atteints selon l'axe de coupe (figure 2.b). Le niveau de déformation totale atteint localement des valeurs de l'ordre de 80 %. La figure 4.c, quant à elle, montre l'évolution des efforts axiaux et radiaux en bout d'outil selon le système d'axe défini sur la figure 2.b en fonction du temps de simulation.

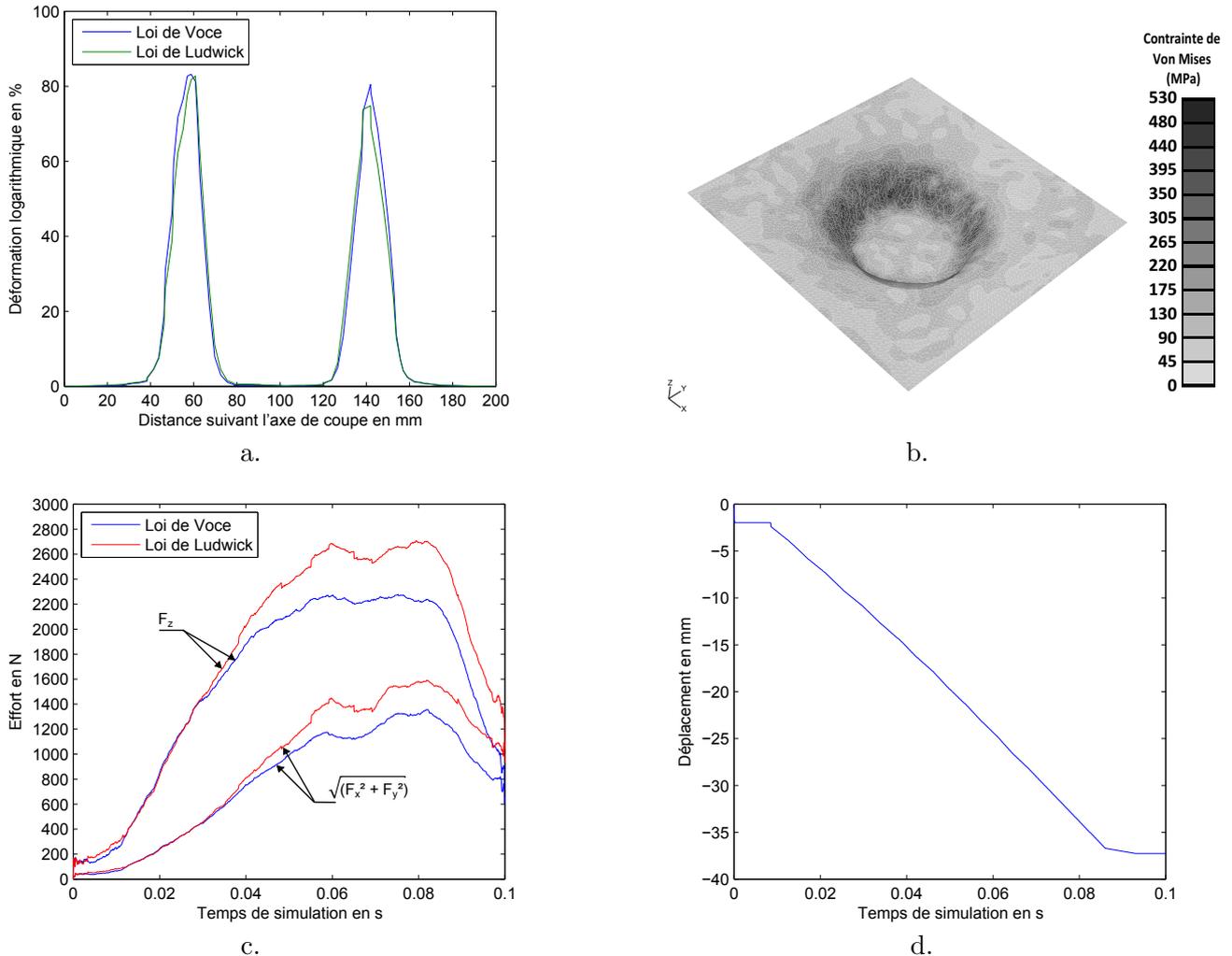


FIGURE 4 – Résultats : a. Déformation logarithmique suivant l'axe de coupe - b. Contrainte de Von Mises à la fin du formage - c. Efforts estimés en fonction de la loi d'écroissage - d. Trajectoire de l'outil suivant l'axe z

On note clairement l'effet de la loi d'écroissage sur les courbes d'effort calculées. L'écart maximal entre les deux courbes d'effort axial est d'environ 500 N, ce qui représente une augmentation d'environ 20 % de la valeur maximale de l'effort. On constate aussi, qu'indépendamment de la loi d'écroissage choisie, les courbes passent toutes par un palier qui est le niveau maximal de l'effort atteint, ce qui est conforme aux données expérimentales rapportées dans [4]. La chute de l'effort en fin de simulation s'explique par le fait que la fin de la trajectoire consiste à réaliser un cercle de niveau constant suivant z (figure 4.d). La figure 5 montre une comparaison du profil de l'embouti obtenu pour les deux lois de comportement testées. Ces profils sont présentés, selon l'axe de coupe, avant débridage de la tôle. Comme attendu, on peut en conclure que le choix de la loi d'écroissage n'influe pas sur la géométrie finale simulée de la pièce.

## 4 Conclusion et perspectives

Dans ce travail, la simulation numérique du formage incrémental d'un cône tronqué a été présentée. Compte-tenu du niveau de déformation très élevé atteint dans ce type de procédé, la description de l'écroissage du matériau a une influence non négligeable sur le niveau d'effort estimé par la simulation numérique et influera nécessairement sur la réponse élastique de la machine. À l'inverse, la loi de comportement ne modifie pas la géométrie finale de la pièce. L'amélioration de la prédiction des modèles numériques passe donc par une identification des paramètres du comportement élasto-

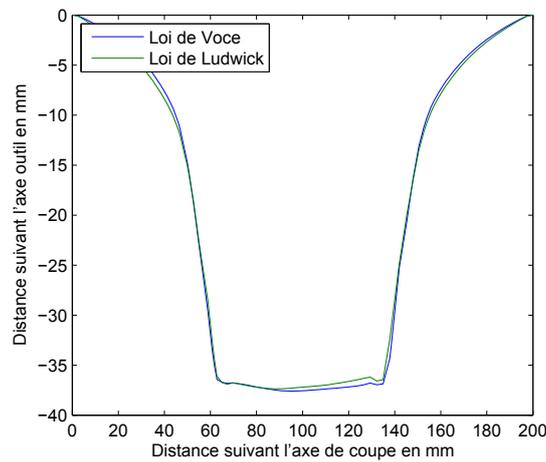


FIGURE 5 – Comparaison de la géométrie finale estimée en fonction des lois de comportement implémentées dans le modèle éléments finis

plastique du matériau formé. Pour cela, une base de données expérimentales issues d'un essai à définir, permettant d'atteindre des niveaux de déformation plus élevés que ceux rencontrés lors d'un essai de traction monoaxial, est nécessaire. À cette fin, une identification, basée sur une procédure inverse de la loi d'érouissage, est envisagée à partir d'un test mettant en oeuvre une trajectoire de formage incrémental. Ainsi, pour une machine donnée, différentes stratégies de formage, intégrant notamment le comportement statique et dynamique de la machine, pourront être étudiées afin de réaliser des pièces dont les exigences dimensionnelles répondent à une problématique industrielle.

## Références

- [1] Allwood, J., Houghton, N., Jackson, K. 2005 The design of an incremental sheet forming machine *Advanced Materials Research* Vol. 6-8 pp. 471-478
- [2] Allegari, M., Gabrielli, A., Palpacelli, M-C., Principi, M. 2008 Incremental Forming of Sheet Metal by Means of Parallel Kinematics Machines *Journal of manufacturing science and engineering* Vol. 130 pp. 471-478
- [3] Diot, S., Guines, D., Gavrus, A., Ragneau, E. 2006 Forming Process of a 5083 Aluminium Alloy. Constitutive Model Covering a Large Range of Temperature *International Journal of Forming Processes* Vol. 9 pp. 167-188
- [4] Duflou, J., Tunckol, Y., Szekeres, A., Vanherck, P. 2007 Experimental study on force measurements for single point incremental forming *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 1889 pp. 65-72
- [5] Eyckens, P., Van Bael, A., Van Hoote, P. 2008 An extended Marciniak-Kuczynski forming limit model to assess the influence of through-thickness shear on formability *Numisheet 2008* pp. 193-198
- [6] Filice, L., Fratini, L., Micari, F. 2002 Analysis of material formability in incremental forming *CIRP annals-Manufacturing technology*
- [7] Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., Allwood, J. 2006 Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal *Annals of CIRP* Vol. 54/2/2005 pp. 130-157
- [8] Petek, A., Kuzman, K., Kopac, J. 2009 Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming *Archives of Materials science and Engineering* Vol. 35 pp. 107-116
- [9] Schäfer, T., Schraft, R. 2004 Incremental sheet metal forming by industrial robots using a hammering tool *Assises Européennes de Prototypage Rapide*
- [10] Shim, M., Park, J. 2001 The formability of aluminium sheet in incremental forming *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 113 pp. 654-658