



HAL
open science

Apport du maillage adaptatif pour la simulation de procéde?s de mise en forme. Application au procéde? de clinchage

Abdallah Sahyoun, Alain Rassineux, Jean-Marc Roelandt, Carl Labergere

► **To cite this version:**

Abdallah Sahyoun, Alain Rassineux, Jean-Marc Roelandt, Carl Labergere. Apport du maillage adaptatif pour la simulation de procéde?s de mise en forme. Application au procéde? de clinchage. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592944

HAL Id: hal-00592944

<https://hal.science/hal-00592944>

Submitted on 3 May 2011

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.

Apport du maillage adaptatif à la modélisation du procédé de clinchage

A.Sahyoun¹, A.Rassineux¹, J.-M.Roëlandt¹, C.Labergère², K.Saanouni²

¹laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne, France, {abdallah.sahyoun,alain.rassineux}@utc.fr

²ICD/LASMIS, FRE CNRS 2848 Université de Technologie de Troyes, France, {carl.labergere,saanouni}@utt.fr

Résumé — Ce travail concerne l'étude numérique du procédé d'assemblage par clinchage et en particulier l'utilisation, dans ce contexte, de procédures de remaillage adaptatif associées à des indicateurs d'erreur et des procédures de transfert de champs construits par approximation diffuse. Celles-ci s'insèrent dans une boucle de calcul faisant appel à des simulations numériques de mise en forme utilisant une approche dynamique explicite. Notre approche numérique est validée par comparaison avec des mesures expérimentales.

Mots clefs — Clinchage, Remaillage, Indicateur d'erreur, Approximation Diffuse

1 Introduction

Le clinchage est une technique d'assemblage mécanique agissant par déformation et fluage à froid de tôles déformées entre un poinçon et une matrice. Cette technique ne nécessite pas d'apport de matière et permet d'assembler des matériaux de natures différentes non ou difficilement soudables avec des coûts compétitifs par rapport aux techniques d'assemblage traditionnelles. Elle a des inconvénients, dont la principale est une moindre résistance mécanique des points clinchés par rapport aux points soudés.

Ce travail traite du clinchage à matrice de forme TOX (cylindrique à parois fixes), très répandu dans l'industrie. Lors du procédé, le métal remplit la gorge placée au fond de la matrice et favorise la formation de l'ancrage radial d'une part et la création d'une liaison entre les tôles d'autre part (FIG 2 et 3).

L'objectif de ces travaux est de montrer l'apport du maillage adaptatif pour la simulation de ce procédé fortement non linéaire en termes de précision du résultat obtenu, de coûts de calcul et de robustesse de la méthode employée. Les procédures numériques développées permettent également une mise en donnée simple (géométrie, chargement, conditions aux limites ...) de l'analyse des points clinchés cylindriques.

Ces travaux s'inscrivent dans la continuité des travaux de Hamel [1] utilisant une approche Statique/Explicite et un modèle 2D axisymétrique. Le but de cette étude est d'améliorer le modèle utilisé par Hamel ou de le rendre plus robuste en utilisant une approche Dynamique/Explicite et des procédures de remaillage évoluées. Nous validons la démarche mise au point sur la simulation de l'assemblage par clinchage de deux tôles ou de trois tôles avec des outils TOX.

La précision de l'évaluation de la géométrie finale du point, en fonction de la variation de la géométrie des outils utilisés a été vérifiée. Ce point est particulièrement important, puisque dans un certain nombre de cas, la géométrie finale du point permet d'orienter le choix des outils à utiliser pour l'optimisation des efforts de résistance mécanique. Plusieurs types de défauts principaux, pénalisant la tenue peuvent ainsi être identifiés, comme la non formation de l'ancrage du point, l'extrusion du métal ou l'amincissement trop important d'une des tôles, pouvant mener à la rupture de l'assemblage.

2 Modélisation numérique du clinchage

La simulation numérique du procédé de clinchage implique de grandes déformations non élastiques entraînant des distorsions d'éléments, des changements des conditions aux limites (contact), ce qui

induit des remaillages fréquents [1,2,3].

Nous présentons les grandes lignes de la méthodologie d'analyse adaptative qui combine adaptation de maillage 2D et adaptation de séquence de charge. Le remaillage adaptatif fait appel à un mailleur 2D « DIAMESH-2D » développé à l'UTC par A. Rassineux [4] qui adapte la taille des éléments au cours du chargement en fonction d'indicateurs d'erreur portant sur le rayon de courbure des surfaces de contact et sur les champs thermomécaniques dans la pièce et qui s'appuie sur une bibliothèque d'éléments 2D (triangles et quadrangles bilinéaires et quadratiques).

Le processus numérique est piloté par 4 tailles d'éléments correspondant à 4 zones : comportement linéaire, un premier seuil de plasticité (10%), un seuil plus critique (80%) et une taille pour l'endommagement si nécessaire mais non utilisée ici.

Les différentes étapes de la procédure de maillage adaptatif sont les suivantes :

1. On construit un maillage initial prenant en compte la proximité des outils et leur courbure pour préparer le contact.
2. On lance le solveur ABAQUS/EXPLICIT pour résoudre le problème thermomécanique sur la première séquence de charge.
3. On récupère la solution EF (déplacement, température et champs mécaniques) à la fin de la séquence de charge sur le maillage déformé.
4. La séquence de charge est adaptée suivant un critère lié à la qualité géométrique des éléments.
5. On utilise différents indicateurs d'erreur (géométrique et physique) basés sur la courbure des outils et ou les valeurs propres du Hessien de la température, de la vitesse de la déformation viscoplastique et de l'endommagement pour obtenir la nouvelle carte de taille des éléments.
6. Un nouveau maillage est créé.
7. On transfère les champs aux points de Gauss par approximation diffuse. L'étape de reconstruction d'un champ local est rigoureusement identique à la construction de l'étape 5 mais avec une base d'approximation qui peut se réduire à une base linéaire. L'approximation diffuse apporte une grande souplesse dans cette étape et permet d'introduire des contraintes lors du transfert comme le respect de l'équilibre.

2.1 Procédure de remaillage

Le remaillage fait appel à un mailleur 2D adaptatif basé sur une génération nodale par une méthode de quadtree adaptée au type d'élément et sur une méthode d'avancée de front. Dans un premier temps, le contour de la pièce à remailler est adapté puis un maillage de l'intérieur de la structure est créé. Le mailleur est piloté par la carte de taille issue des indicateurs d'erreur sur la courbure des outils et sur le gradient des champs physiques. Ces données sont fournies au mailleur sous forme de points d'informations pondérés par la consigne de taille à respecter. Dans un premier temps, un maillage mixte triangles-quadrangles est créé à une taille deux fois supérieure à la consigne. Les éléments sont ensuite subdivisés fin d'obtenir un maillage exclusivement en quadrangles. Des procédures de remaillage locales ont été développées afin d'optimiser la forme finale des quadrangles [4].

2.2 Indicateur d'erreur

2.2.1 Estimateur d'erreur suivant la courbure des outils

Dans un premier temps, afin d'améliorer la détection et le traitement du contact, il convient d'adapter le maillage suivant la courbure des outils. La frontière des outils est représentée par des segments et le calcul de la courbure en chaque point du contour se fait en faisant passer un cercle par 3 points consécutifs. La taille de maille correspondant à une courbure maximale est fixée par l'utilisateur et dépend de l'erreur de corde. La consigne de taille est traduite sous forme d'un ensemble de points calculé une fois pour toute et mise à jour avec le déplacement des outils. ;

2.2.2 Indicateur d'erreur suivant la déformation plastique cumulée

Le processus est contrôlé par 3 tailles d'éléments données par l'utilisateur correspondant à divers seuils de la déformation plastique cumulée [4]. Du comportement linéaire, la taille Δ diminue ensuite linéairement jusqu'à une valeur de plasticité seuil P_{\max} fixée par l'utilisateur et correspondant à une valeur significative.

La taille est donnée ainsi par

$$\Delta = \frac{\Delta x_{\max}^p - \Delta x_{\max}}{P_{\max}} p - \Delta x_{\max} \quad (1)$$

Δx_{\max} , la taille maximale d'élément correspondant à une plasticité nulle

Δx_{\max}^p , la taille au premier seuil de plasticité P_{\max}

Pour $P > P_{\max}$, la taille de l'élément décroît exponentiellement suivant

$$\Delta x^p = (\Delta x_{\min}^p - \Delta x_{\max}^p)(1 - \exp(-\omega(p - P_{\max}))) + \Delta x_{\max}^p \quad (2)$$

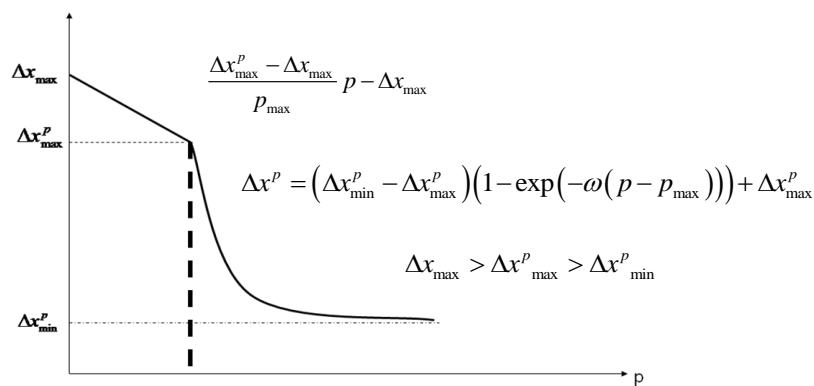


FIG. 1 –Variation de la taille d'élément suivant la déformation plastique cumulée

2.2.3 Indicateur d'erreur suivant le Hessian de la déformation plastique cumulée

L'approximation diffuse nous permet de créer en chaque point une approximation quadratique locale des grandeurs et ainsi d'obtenir leurs dérivées sous la forme d'une surface $z = G(x, y)$

$$G(x, y) = \langle 1, x, y, x^2, xy, y^2 \rangle \{a\} \quad (3)$$

Où $\{a\}$ désigne un vecteur de 6 composantes à déterminer.

A partir de ce modèle local, il est possible de déterminer les valeurs propres du Hessian de la grandeur considérée et de construire un indicateur d'erreur sur la courbure de la surface.

La déformation plastique peut s'écrire sous la forme.

$$\varepsilon_p = f(x, y) = \langle 1, x, y, \frac{x^2}{y^2}, xy, \frac{y^2}{2} \rangle \{a\} = \langle p \rangle \{a\} \quad (4)$$

L'approximation diffuse est obtenue ensuite en minimisant le critère suivant

$$J_\alpha(X) = \sum_{i=1}^n w(\{X_i\} - \{X\}) (\langle p(\{X_i\} - \{X\}) \rangle \{a\} - \varepsilon^i) \quad (5)$$

Où $\{X_i\}$ désignent les coordonnées des points d'intégration

ε^i , la déformation plastique cumulée aux points $\{X_i\}$

w , les fonctions poids

P , la base polynomiale quadratique, ainsi

$$\langle \alpha \rangle = \langle \varepsilon^i \frac{\partial \varepsilon^i}{\partial x} \frac{\partial \varepsilon^i}{\partial y} \frac{\partial^2 \varepsilon^i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varepsilon^i}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \varepsilon^i}{\partial y^2} \rangle \quad (6)$$

Le Hessien est donné par:

$$H_u(X) = \left[\frac{\partial^2 \varepsilon^i}{\partial^2 x^2} \quad \frac{\partial^2 \varepsilon^i}{\partial x \partial y}; \frac{\partial^2 \varepsilon^i}{\partial x \partial y} \quad \frac{\partial^2 \varepsilon^i}{\partial^2 y^2} \right] \quad (7)$$

$$\frac{2}{9} h^2 M \geq \| p - \tilde{S}_p \|_\infty = \varepsilon_{error} \Rightarrow h \leq \sqrt{\frac{9 \varepsilon_{error}}{2 M}} \quad (8)$$

où M est la plus grande valeur propre de H , h est la taille de l'élément déterminée à partir de ε_{error} donnée par l'utilisateur.

3 Validation numérique et conclusion :

L'outil numérique mis au point permet de simuler des points formés à l'aide des technologies TOX à matrice de forme. Il s'agit d'assembler simplement deux puis trois tôles. Afin de valider la démarche numérique employée pour simuler le procédé de clinchage dans toute sa diversité, nous présentons une validation des résultats à partir de confrontation avec l'expérience. Les exemples fournis illustrent les performances de la boucle adaptative.

3.1 Mise en forme d'un point TOX

La démarche employée est validée suivant les critères suivants : la géométrie finale du point, l'évolution de l'effort de mise en forme et l'évaluation des variables internes (contraintes, déformations...). On compare les mesures expérimentales obtenues au Centre de Recherches d'ARCELOR (site de Montataire) avec les calculs réalisés à l'aide du logiciel ABAQUS basé sur une approche en dynamique explicite

3.1.1 Données du problème

1. Géométrie initiale

Le poinçon a un diamètre de 5.2 mm et une matrice de 8 mm de diamètre avec une profondeur de 1.6 mm, les deux tôles sont d'épaisseur 1.5 mm chacune.

2. Géométrie finale

La géométrie finale du point clinché est réalisée avec un déplacement du poinçon de 3.85 mm (FIG 2), les paramètres géométriques importants du point sont l'épaisseur minimum sur la tôle supérieure notée A_s et une mesure de l'ancrage notée C (FIG 3).

3. Matériau

Les tôles sont en acier doux avec un comportement isotrope écrouissable, les paramètres mécaniques sont : $E=210000$ Mpa, $\nu=0.3$. La limite élastique est $\sigma_y=175$ Mpa. La loi d'écrouissage est décrite par la loi de Swift où désigne la déformation plastique cumulée.

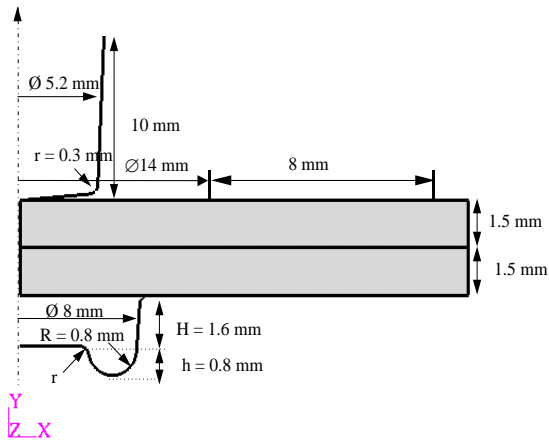


FIG. 2 –Géométrie initiale du point clinché

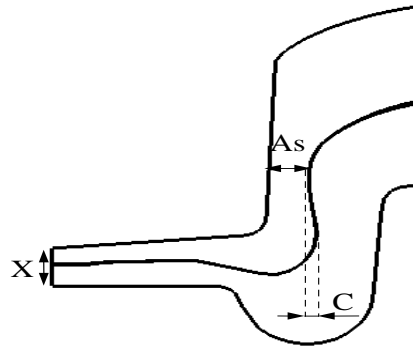


FIG. 3 –Géométrie finale du point clinché TOX

4. Modélisation

La modélisation du clinchage est réalisée avec des éléments axisymétriques grâce à la symétrie axiale du problème. Trois outils rigides sont utilisés lors du procédé : la matrice et le serre-flan qui sont fixes et le poinçon qui se déplace. Afin d'éviter les effets de bord due à l'avalement de métal, les tôles utilisées ont un diamètre de 30 mm chacune. Les bords extérieurs des tôles sont laissés libres. L'influence du serre-flan est prise en compte en imposant sur ce contacteur une force correspondant à une légère indentation obtenue expérimentalement. Au cours de la simulation, lorsque le remaillage est employé, la géométrie du problème est re-discrétisée quinze fois à intervalles de déplacement du poinçon équivalents

3.1.2 Résultats

Le calcul est effectué avec des éléments $Q4$ à intégration réduite. La FIG 4 présente les déformations plastique cumulées $\bar{\epsilon}_p$ sans remaillage afin de démontrer le bien fondé de ce dernier. D'une part, les distorsions géométriques significatives entravent la convergence et d'autre part, l'ancrage C et l'épaisseur minimum A_s sont sous évalués par rapport à l'expérience.

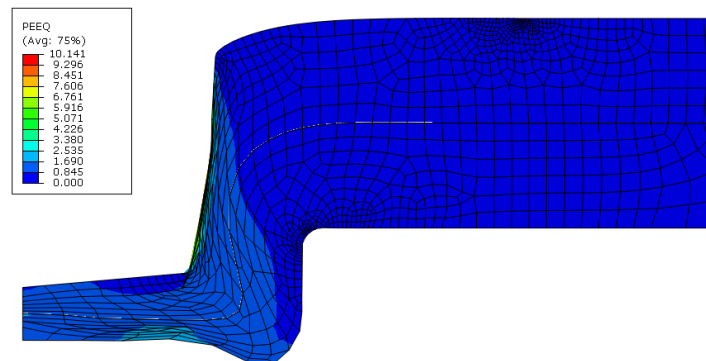


FIG. 4 –Déformations plastiques cumulées (sans remaillage)

Les déformations plastiques cumulées obtenues avec remaillage sont données en FIG 5. Le calcul est réalisé avec des éléments $Q4$ à intégration réduite. La FIG 6 [1] présente une comparaison entre les cas expérimental et numérique et illustre la bonne formation du point clinché. Les côtes géométriques obtenues expérimentalement sont $A_s = 0.40$ mm et $C = 0.15$ mm. Les résultats numériques $A_s = 0.37$ mm et $C = 0.17$ mm sont proches de l'expérience.

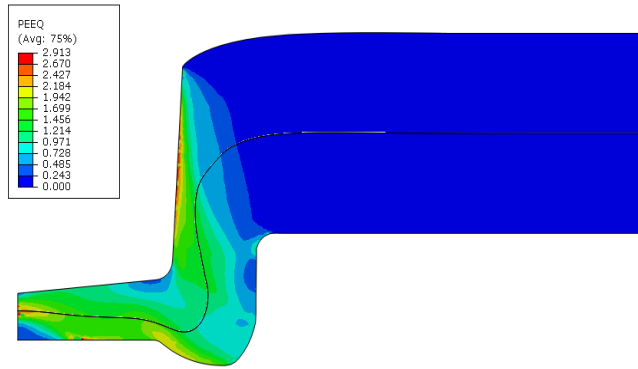


FIG. 5 –Déformations plastiques cumulées (avec remaillage)

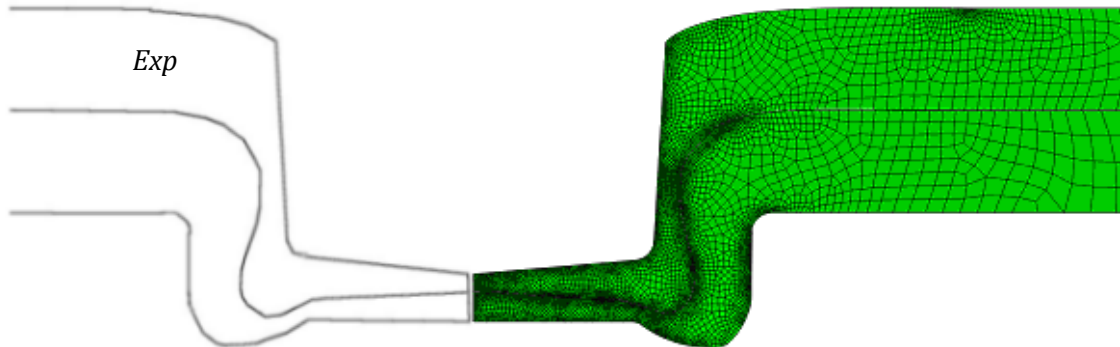


FIG. 6 – Comparaison de la déformée numérique/expérience sans frottement entre les tôles

L'influence du frottement sur la géométrie finale n'est pas négligeable. L'épaisseur axiale finale est plus importante lorsque le frottement est introduit entre les surfaces en contact. Le même exemple, proposé avec un coefficient de frottement de 0.1 entre les tôles, donne une épaisseur minimale A_s de 0.39 mm plus proche de l'expérience (FIG 7).

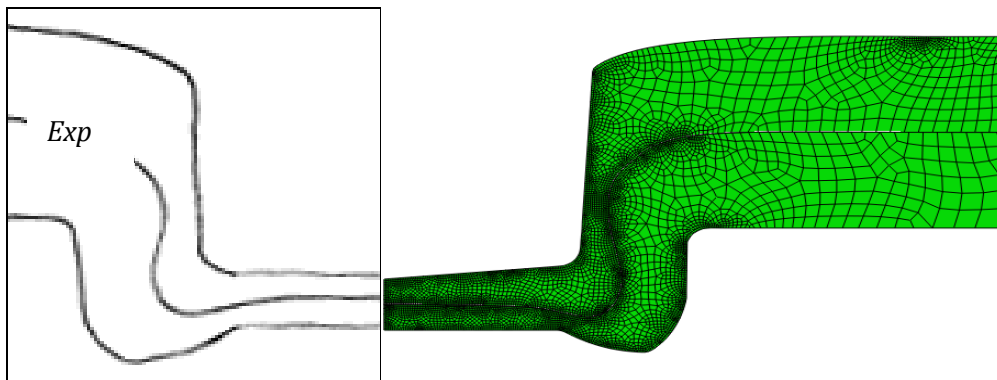


FIG. 7 –Comparaison de la déformée numérique/expérience avec frottement entre les tôles

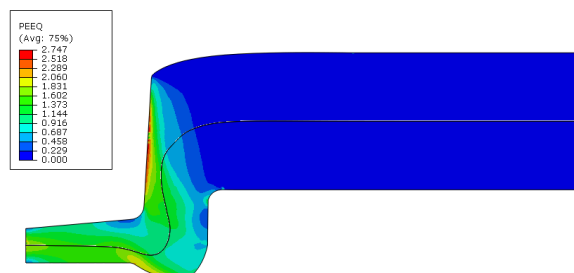


FIG. 8 –Déformations plastiques avec frottement entre les tôles (=0.1)

L'exemple ci-dessous traite le cas du clinchage de trois tôles. Les matériaux sont les mêmes, l'épaisseur de chaque tôle étant de 1 mm. La géométrie du point calculée est très proche de la géométrie expérimentale. Une comparaison des côtes du point d'ancrage est donnée ci dessous :

TAB. 1 – Comparaison des côtes du point d'ancrage

	As (mm)	C (mm)
Expérience	0.25	0.12
Numérique	0.24	0.1244

De légères différences apparaissent numériquement sous la forme de décohésions entre tôles au niveau de la gorge de la matrice. Ces décollements n'apparaissent pas expérimentalement. Les temps de calcul dans tous les cas effectués n'excèdent pas 70 minutes avec un processeur Intel Core Duo à 2.13GHz

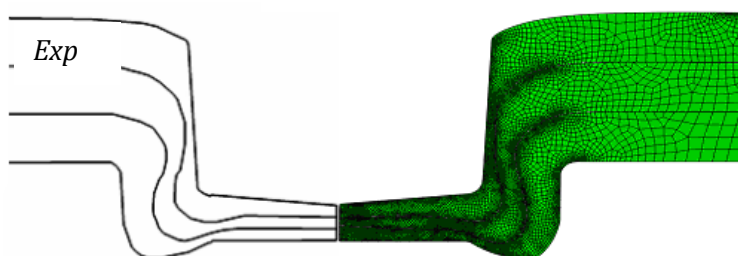


FIG. 9 –Comparaison entre numérique et l'expérimental pour l'assemblage des trois tôles

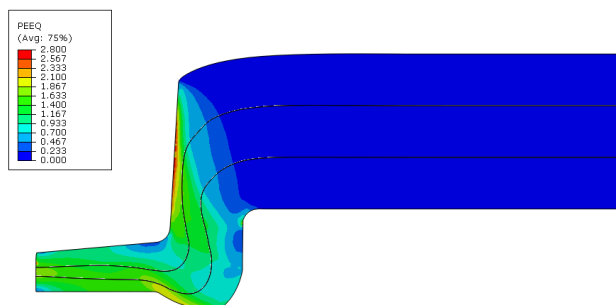


FIG. 10 –Déformation plastique cumulée

3.2 Conclusion

Ces travaux menés dans le cadre du clinchage axisymétrique ont démontré l'efficacité et la précision de la boucle de calcul adaptatif alliant remaillage, indicateurs d'erreur et transfert de champs. La mise en forme de points clinchés dépend d'un nombre important de paramètres qui influent principalement sur l'effort de mise en forme, sur la géométrie finale du point (loi de comportement, coefficient de frottement) et sur la précision des résultats. Les résultats numériques proposés sont en très bonne corrélation avec l'expérience.

Les travaux futurs concernent la mise au point d'une boucle adaptative dans un contexte tridimensionnel : formation du point clinché, tenue à l'arrachement et à la fatigue.

Références

[1] V. Hamel, J.M. Roelandt, J.N. Gacel, F. Schmit. *Finite element modeling of clinch forming with automatic remeshing*, Computers and Structures, page185-page200, 2000.

[2] J-L. Chenot, M. Bellet. *The ALE method for the numerical simulation of material forming process*, Proc, Fifth Inter. Conf. Num. Meth. Indus. Form. Process, Numiform'95. New York, USA: ITHACA, page 39-page 48, 1995

[3] T. Coupez. *Automatic remeshing in three-dimensional moving mesh finite element analysis of industrial forming*, Proc. Fifth Int. Conf. Num. Meth. Indus. Form. Process, Numiform'95. New York, USA: ITHACA, page 407-page 412, 1995.

[4] A. Rassineux, K. Saanouni, C. Labergère. *2D/3D adaptative remeshing procedures dedicated to metal forming processes with damage*, IV European Conference on Computational Mechanics: Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, ECCM 2010, Paris, France, May 16-21, 2010