HAL open science

Modélisation de l'endommagement pour la simulation d'assemblages par déformation

Sébastien Fayolle, Katia Mocellin, Pierre-Olivier Bouchard

To cite this version:

Sébastien Fayolle, Katia Mocellin, Pierre-Olivier Bouchard. Modélisation de l'endommagement pour la simulation d'assemblages par déformation. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01490642

HAL Id: hal-01490642

https://hal.science/hal-01490642

Submitted on 15 Mar 2017

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.

Public Domain

Modélisation de l'endommagement pour la simulation d'assemblages par déformation

Application au rivetage auto-poinçonneur

Sébastien Fayolle* — Katia Mocellin* — Pierre-Olivier Bouchard*

* *CEMEF, Ecole des Mines de Paris*
CNRS/UMR 7635
1 rue Claude Daunesse,BP207, 06904 Sophia-Antipolis cedex
sebastien.fayolle@ensmp.fr

RÉSUMÉ. *Dans cet article la pose de rivet auto-poinçonneur a été simulée. La précision des résultats dépend directement du choix de comportement ainsi que de la précision des paramètres matériaux. Nous avons choisi d'utiliser un modèle de type élasto-plastique endommageable. L'endommagement ductile est pris en compte au travers du modèle de Lemaitre. Les paramètres matériaux, i.e. lois d'écrouissage et d'endommagement, sont identifiés en utilisant une méthode d'analyse inverse. La pose du rivet est modélisée sur le logiciel éléments finis Forge2005® en configuration 2D axisymétrique. Les simulations sont comparées à l'expérience, sur les coupes géométriques et les courbes force-déplacement. Elles montrent une bonne corrélation. De plus, l'importance de la prise en compte de l'endommagement dans ces simulations est prouvée.*

ABSTRACT. *This paper deals with the numerical modelling of the self-piercing riveting process. The accuracy of the simulations depends directly on the choice of the mechanical behaviour model as well as the accuracy of materials parameters. We have chosen a damaged elasto-plastic model. The ductile damage is taking into account through the Lemaitre damage model. The sheets and rivet material parameters, i.e. hardening and damage laws, have been identified using an inverse method. The joining process was simulated using the 2D axisymmetric version of the finite element software Forge2005. Simulations were compared to experiments on geometrical cuts and comparison of load-displacement curves, and shown good agreements. It is also shown that the use of damage in the numerical modelling of self-piercing riveting is essential.*

MOTS-CLÉS : *Assemblage par déformation, endommagement, éléments finis*

KEYWORDS: *Joining by deformation, damage, finite element*

1. Introduction

Le rivetage auto-poinçonneur est un procédé réalisé à froid qui se décompose en quatre étapes : (a) le serre-flan vient bloquer les tôles à assembler contre la bouterolle. (b) Le rivet semi-creux poussé par un poinçon vient transpercer la(les) tôle(s) supérieure(s). (c) Le rivet s'évase dans la tôle inférieure en fonction de la forme de la bouterolle. (d) Le serre-flan libère les tôles et l'assemblage subit un déchargement élastique. La tenue mécanique du point d'assemblage obtenu dépend de nombreux paramètres : les géométries de la bouterolle et du rivet, la force du serre-flan, le choix des matériaux, …

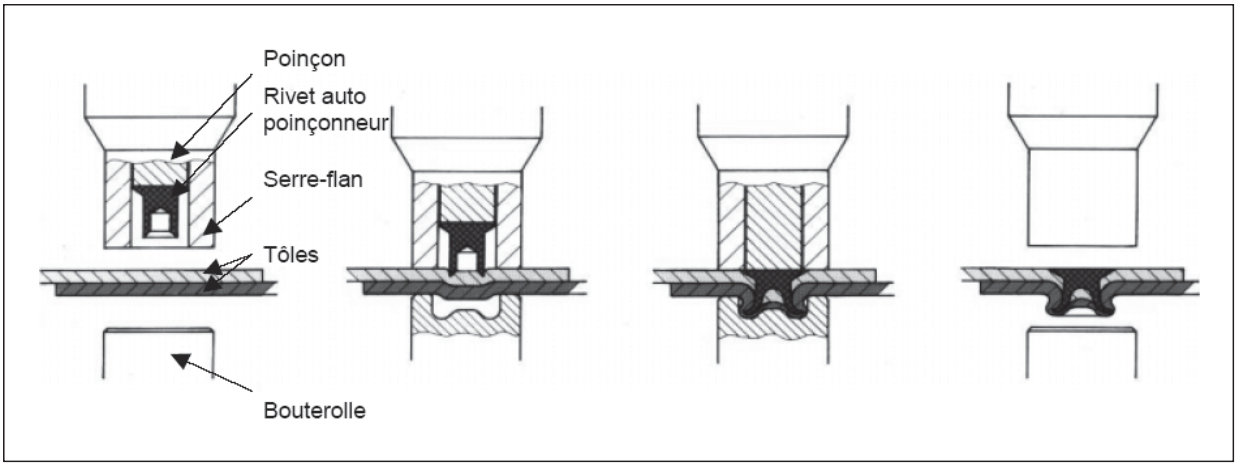

Figure 1. *Les différentes étapes de la pose du rivetage auto-poinçonneur*

Le rivetage auto-poinçonneur a d'abord fait l'objet d'études expérimentales pour caractériser l'influence des paramètres du procédé de pose sur la tenue mécanique de l'assemblage (Fu *et al.,* 2001). Récemment des études numériques ont débuté (Porcaro *et al.,* 2006 ; Abe *et al.,* 2006). L'originalité de notre approche est la prise en compte de l'endommagement dans le comportement des tôles et du rivet (Bouchard *et al.,* 2006).

Dans cet article, on détaillera le modèle de comportement utilisé pour représenter les tôles et le rivet. Puis nous aborderons son implémentation dans un code élément finis. L'identification des paramètres matériaux est présentée. Pour finir, des résultats de simulations de pose de rivet sont comparés à l'expérience.

2. Modèle d'endommagement et gestion de la rupture

Dans le modèle d'endommagement isotrope décrit dans (Lemaitre, 1996), l'état d'endommagement est représenté par une variable interne D . Cette variable est un scalaire dont la valeur varie entre 0 (pour le matériau sain) et 1 (pour la rupture). En pratique une valeur d'endommagement critique $D_c < 1$ est utilisée pour décrire le moment où la fissuration apparaît. Le modèle de Lemaitre est basé sur le concept de

variable effective. Nous pouvons définir le tenseur déviatorique des contraintes effectives $\tilde{\mathbf{s}}$ et le critère de plasticité de von Mises correspondant par :

$$\tilde{\mathbf{s}} = \frac{\mathbf{s}}{(1-D)} \quad \text{et} \quad f(\tilde{\mathbf{s}}, \bar{\varepsilon}) = \mathrm{J}_2(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}) - \sigma_0(\bar{\varepsilon}) \leq 0 \qquad [1]$$

$\mathbf{s}$ est le déviateur des contraintes $\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma} - 1/3\,\mathrm{tr}(\boldsymbol{\sigma})\mathbf{1}$. $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ est le tenseur des contraintes effectives $\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma}/(1-D)$, $\mathrm{J}_2(\tilde{\boldsymbol{\sigma}})$ est la contrainte effective équivalente, $\mathrm{J}_2(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}) = \sqrt{3/2\,\tilde{\mathbf{s}} : \tilde{\mathbf{s}}}$ et $\bar{\varepsilon}$ est la déformation plastique équivalente. $\sigma_0(\bar{\varepsilon})$ est une fonction additionnant la fonction écrouissage isotrope $R(\bar{\varepsilon})$ et la contrainte de limite élastique σ_y^0. Les lois d'évolutions des variables internes sont données par :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathbf{p}} = \frac{\dot{\lambda}}{(1-D)} \frac{3}{2} \frac{\tilde{\mathbf{s}}}{\mathrm{J}_2(\tilde{\boldsymbol{\sigma}})} \quad \text{et} \quad \dot{D} = \frac{\dot{\lambda}}{(1-D)} \left(\frac{Y}{S_0} \right)^b \qquad [2]$$

où $\dot{\lambda}$ est le multiplicateur plastique et b et S_0 sont des paramètres de la loi d'endommagement. A ces deux paramètres, il faut ajouter $\bar{\varepsilon}_d$ qui est la valeur de déformation équivalente à partir de laquelle l'endommagement s'amorce. Y est la force thermodynamique associée à la variable d'endommagement définie par :

$$Y = \frac{\mathrm{J}_2(\tilde{\boldsymbol{\sigma}})^2}{2E} \left(\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\tilde{p}}{\mathrm{J}_2(\tilde{\boldsymbol{\sigma}})} \right)^2 \right) = \frac{\tilde{\mathbf{s}} : \tilde{\mathbf{s}}}{4\mu} + \frac{\tilde{p}^2}{2\kappa} \qquad [3]$$

où E est le module d'Young et ν le coefficient de Poisson. $\tilde{p}$ est la pression hydrostatique équivalente, $\tilde{p} = -1/3\,\mathrm{tr}(\tilde{\boldsymbol{\sigma}})$.

Ce modèle d'endommagement a été implémenté dans le logiciel éléments finis Forge2005®. Pour intégrer numériquement les équations développées, nous avons utilisé le schéma d'Euler implicite et un algorithme de prédicteur élastique/correcteur plastique couramment utilisé en calcul de plasticité (Doghri, 1995). Quand l'algorithme d'intégration local a convergé, un module tangent consistant discret est calculé afin d'assurer la convergence quadratique du schéma d'intégration du calcul mécanique global (Simo *et al.,* 1985).

Pour modéliser la fissuration de la tôle supérieure, nous avons utilisé la méthode de « kill-element » qui consiste à venir enlever du maillage et du calcul mécanique les éléments ayant atteint la valeur critique d'endommagement (Bouchard *et al.,* 2006).

3. Identifications des paramètres matériaux

L'identification des paramètres matériaux, i.e. lois d'écrouissage isotrope et d'endommagement, est réalisée en utilisant une méthode d'analyse inverse. L'algorithme utilisé est basé sur les méthodes à stratégies d'évolution avec méta modèles.

Les données expérimentales ont été obtenues pour les tôles grâce à des essais de tractions et d'indentations. Pour caractériser les rivets, des essais d'évasements et d'écrasements (Porcaro *et al.*, 2006) ont été réalisés.

Devant le grand nombre de paramètres à déterminer, l'identification a été effectuée en deux étapes. Dans un premier temps, c'est la loi d'écrouissage qui est déterminée sur la première partie de la courbe, i.e. avant apparition de l'effet de l'endommagement. Puis c'est la loi d'endommagement qui est identifiée sur la fin de la courbe (Figure 2).

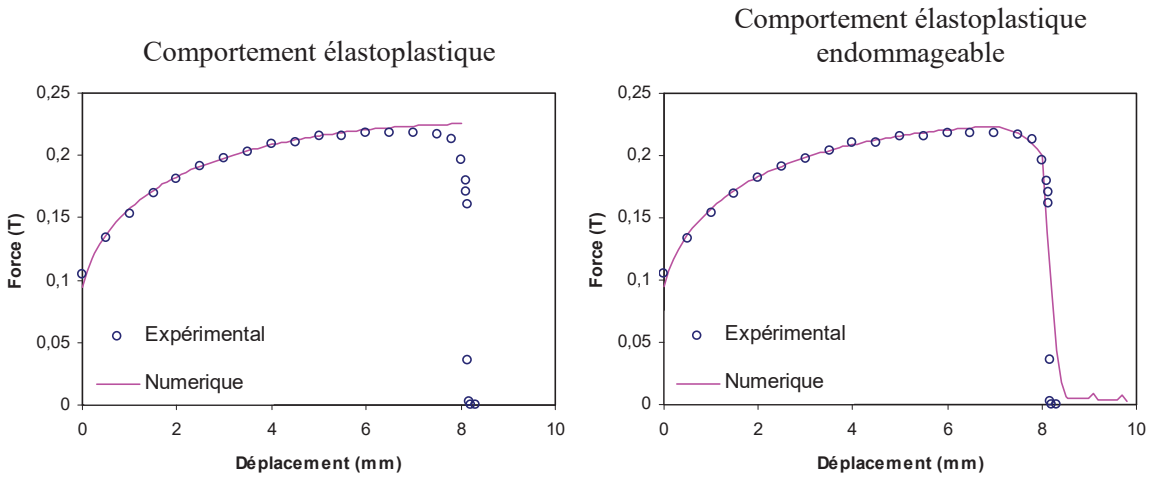

Figure 2. *Identification en deux temps sur un essai de traction : AA5754-O*

4. Modélisation et validation de la pose du rivet

La modélisation de la pose du rivet est réalisée sous Forge2005® avec une configuration 2D axisymétrique (Figure3a). Le poinçon descend à une vitesse de 20mm/s et le serre-flan applique un effort de 594 N. Le contact entre les différents éléments de l'assemblage est pris en compte avec un contact de coulomb. La configuration de test est la suivante : tôle supérieure de 1mm en alliage d'aluminium 5754-O, tôle inférieure 2mm en Acier XSG. La bouterolle et le rivet sont fournis par Böllhoff et sont référencés DZ0902000 et C 5x5.

Les résultats des simulations sont comparés avec l'expérience sur les courbes force-déplacement (Figure3b) et sur des coupes géométriques (Figure4a).

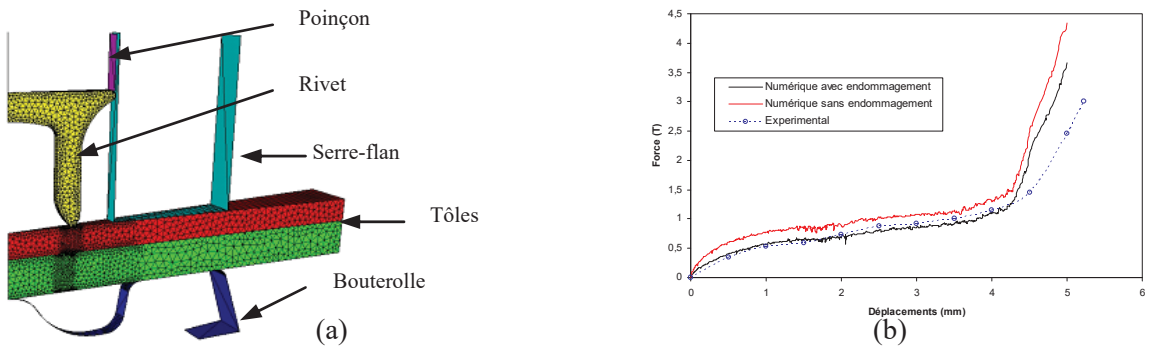

Figure 3. *Configuration 2D initiale et courbes force-déplacement*

Sur la Figure3b, on peut voir les résultats obtenus avec et sans prise en compte de l'endommagement. On observe que l'endommagement adoucit le comportement des tôles et donc diminue l'effort nécessaire à la pose du rivet. En fin de pose, une différence non négligeable d'environ 0,5 tonne existe entre les deux simulations. La prise en compte du couplage comportement-endommagement permet de mieux se rapprocher des résultats expérimentaux.

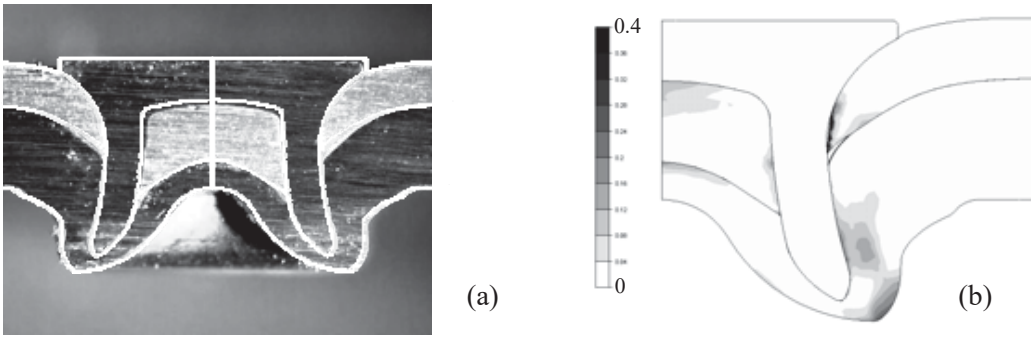

Figure 4. *Géométries numérique et expérimentale, carte d'endommagement*

La Figure 4a représente la superposition des contours de la simulation numérique à une coupe du point d'assemblage obtenu expérimentalement. Une bonne corrélation est observée. La Figure4b représente la répartition de l'endommagement de Lemaitre dans l'assemblage final. Nous pouvons constater que cet endommagement est loin d'être négligeable, surtout dans la tôle inférieure, et jouera un rôle important dans la tenue mécanique de l'assemblage.

5. Conclusions

Le modèle d'endommagement ductile de Lemaitre est présenté ainsi que son implémentation dans le logiciel éléments finis Forge2005®. Après identification des paramètres matériaux via une méthode d'analyse inverse, des simulations 2D axisymétriques de pose de rivet sont effectuées. Nous avons pu voir que la prise en compte de l'endommagement dans la modélisation du rivetage auto-poinçonneur est importante pour une meilleure corrélation avec l'expérience.

Le modèle développé peut s'étendre à d'autres types d'assemblages par déformation plastique (clinchage, rivet clinché, …) ainsi qu'à la modélisation de leur tenue mécanique (figure5). Pour cela, les résultats issus de la simulation de rivetage sont utilisés pour mieux modéliser la résistance du point d'assemblage.

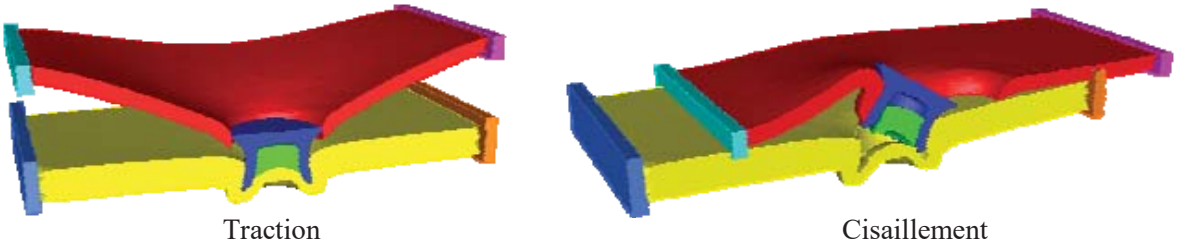

Figure 5. *Simulations de la tenue mécanique du point riveté*

Remerciements

Nous tenons à remercier le CETIM, P.S.A. et Böllhoff pour nous avoir fourni des données expérimentales et un support financier.

6. Bibliographie

Abe Y., Kato T., Mori K., Joinability of aluminium alloy and mild steel sheets by self piercing rivet, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, 2006, p. 417-421.

Bouchard P.O., Fayolle S., Mocellin K., 3D numerical modeling of mechanical joining processes – From Joining down to Structural Analysis, In *Proceedings of the Eight International Conference on Computational Structures technology*, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2006, p. 657-658.

Doghri I., Numerical implementation and analysis of a class of metal plasticity models coupled with ductile damage, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 38, 1995, p. 3403-3431.

Fu M., Mallick P.K., Effect of process variables on the static and fatigue properties of self-piercing riveted joints in aluminium alloy 5754, Paper n°2001-01-0825, 2001, SAE.

Lemaitre J., *A course on damage mechanics*, Springer-Verlag, 1996.

Porcaro R., Hanssen A.G., Langseth M., Aalberg A., Self-piercing riveting process: An experimental and numerical investigation, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, 2006, p. 10-20.

Simo J.C., Taylor R., Consistent tangent operators for rate independent elastoplasticity, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 48, n°1, 1985, p. 101-118