Université de Strasbourg

ÉCOLE DOCTORALE

Résumé de thèseMohammad MIANROODI

Détermination expérimentale et numérique des CLF par utilisation de tests biaxiaux et Nakajima : application industrielle à l'emboutissage pour les métaux CFC et CC

Introduction

Les opérations de mise en forme par déformation plastique sont très répandues dans l'industrie métallurgique. Ces opérations sont limitées par l'apparition de défauts tels que la striction diffuse ou localisée. Les Courbes Limites Formage (**CLF**) restent très populaires et encore largement utilisées pour définir la formabilité des tôles métalliques. Cette thèse porte donc sur la détermination expérimentale et numérique des CLF. Les matériaux utilisés dans ce travail sont l'alliage d'aluminium Al6061 (CFC) et l'acier doux St14 (CC). Un modèle de type Marciniak and Kuczynski (1967) est utilisé pour obtenir les CLF à la fois expérimentalement et numériquement en utilisant deux types de tests :

- **Détermination numérique des CLF en utilisant un test biaxial**

La première approche est basée sur la simulation EF d'un test biaxial où la tôle comporte un défaut initial, une réduction d'épaisseur de type Marciniak and Kuczynski (M-K), voir figure 1.

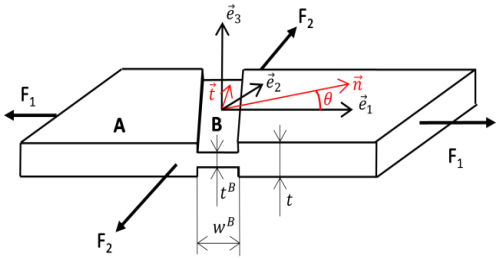
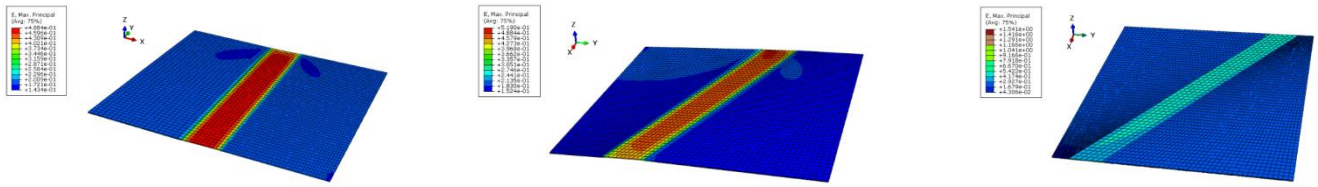


Figure 1. Modèle multizone de Marciniak and Kuczynski

Durant le chargement, une localisation de la déformation va se produire dans la bande d'épaisseur réduite (Zone B). Dans le modèle M-K, le paramètre $f_0 = t^B/t$ traduit cette réduction d'épaisseur entre la zone A (zone saine) et la zone B (zone défectueuse). Des simulations EF sont réalisées sur des tôles de 180x180 mm avec une épaisseur de 1 mm en concordance avec les essais expérimentaux. Ces tôles présentent un défaut de type réduction d'épaisseur. Les tôles sont sollicitées en traction biaxiale avec 11 valeurs pour le rapport $\alpha = F_2/F_1$ (entre 0 et 1) (voir figure 1). Une étude paramétrique portant sur l'influence du rapport des épaisseurs f_0 (0.90, 0.95 and 0.99) ainsi que de la valeur de l'orientation de l'angle θ (0°, 20°, 40°) de la bande défectueuse sur les CLF est réalisée, voir figure 2.



a) b) c)

Figure 2. Déformation principale maxi pour l'acier doux St14 (α=0.5), (a) θ = 0°, (b) θ =20°, (c) θ =40°

Une analyse de la valeur des déformations dans la zone A et la zone B permet l'obtention des CLF en utilisant un critère basé sur les déformations dans l'épaisseur selon le critère $S_{MK} = \epsilon_{33}^A/\epsilon_{33}^B$ (Evangelista et al. 2002). Lorsque S_{MK} atteint une valeur prédéfinie, les simulations sont stoppées et les déformations extraites permettent la construction des CLF, voir figure 3.

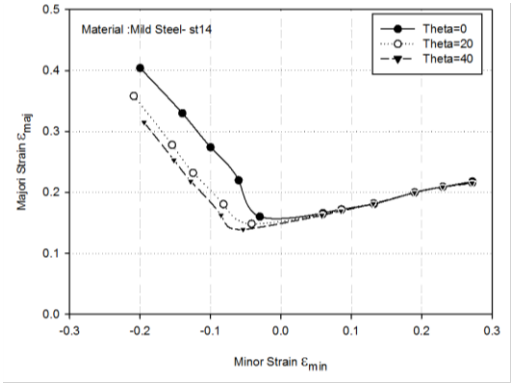


Figure 3. CLF prédites par EF, essai de traction biaxial pour l'acier doux St14

- **<u>Détermination numérique des CLF en utilisant l'essai Nakajima</u>**

La seconde approche utilisée pour déterminer les CLF est basée sur la modélisation EF de l'essai Nakajima, voir Figure 4. Dans cet essai, plusieurs bandes de largeur différentes sont utilisées pour reproduire plusieurs trajets de déformation afin d'obtenir une CLF complète, voir figure 5. L'option de type M-K « damage factor » disponible sous Abaqus est utilisée pour la construction des CLF.

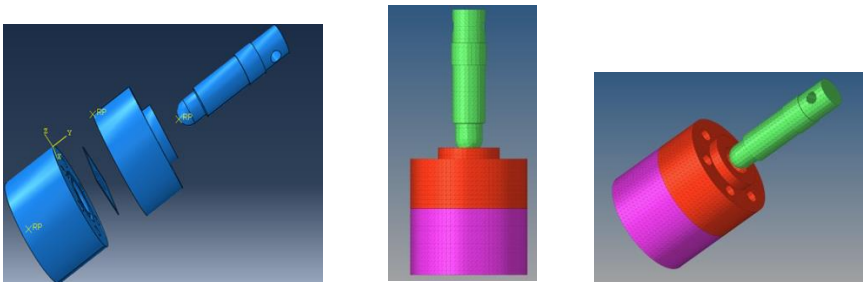


Figure 4. Modèle EF de l'essai Nakajima

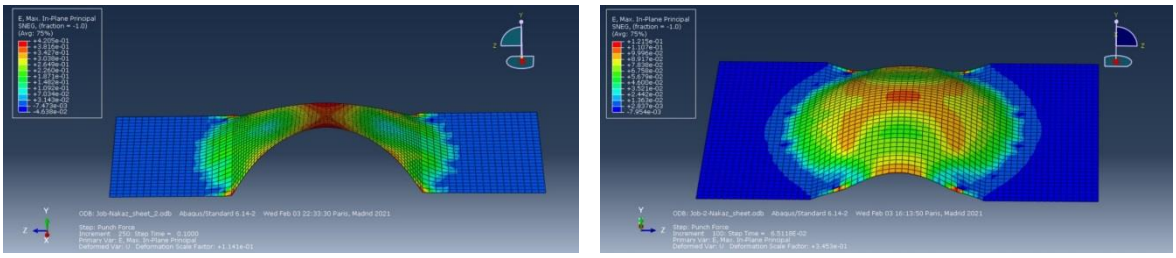


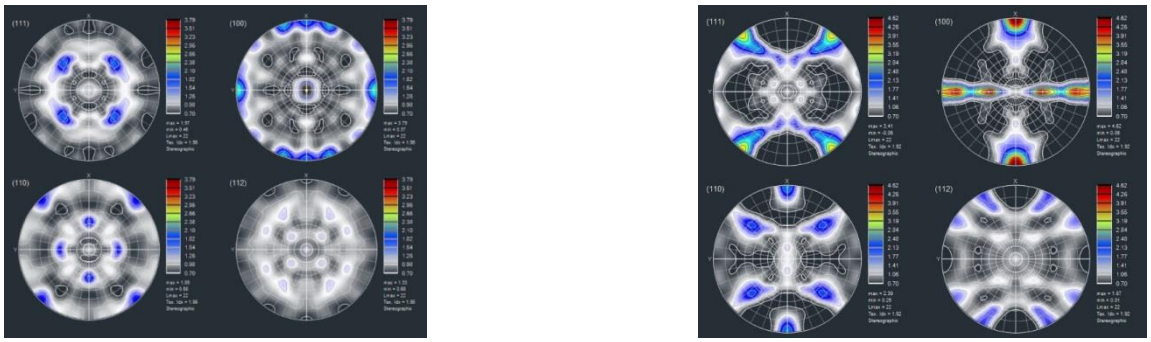
Figure 5. Distribution de la déformation, essai Nakajima, acier doux St14

Nous montrons que la formabilité de l'acier doux est supérieure à la formabilité de l'alliage d'aluminium, ce qui est en accord avec la littérature (Motamedi et al., 2017). Les CLF obtenues permettent ensuite l'étude d'une application industrielle très répandue : l'emboutissage des tôles minces.

- **<u>CPFEM simulation de l'essai biaxial avec un défaut initial de type M-K</u>**

Puisque une déformation plastique induit une modification de la microstructure des métaux, dans cette thèse, une analyse de l'évolution des textures cristallographiques est réalisée pour les tests biaxiaux avec un défaut initial de type M-K. Un modèle de type CPFEM est implémenté dans le code Abaqus. Il utilise le modèle de plasticité des cristaux de Taylor. Le but est d'améliorer les prédictions des CLF.

Les textures prédites sont analysées en considérant différents trajets de déformation, deux structures cristallographiques (CFC et CC). Les simulations montrent que les textures prédites dépendent à la fois du trajet de déformations, de la structure cristallographique ainsi que de la localisation dans la tôle (zone saine vs zone défectueuse). Pour l'acier doux, la figure 6 représente les textures prédites pour l'acier doux St14.



a) **b)**

Figure 6. Pole figures pour l'essai biaxial, $\alpha = F_2/F_1 = 0.9$, (a) Zone A, (b) Zone B, acier doux St14

- **<u>Partie expérimentale et validation</u>**

Afin de valider le travail numérique, une partie expérimentale a été réalisée durant ce travail de thèse. Tous les essais ont été réalisés en Iran, soit dans l'entreprise partenaire, CANHOOD ou bien à l'université des Sciences et Technologie d'Iran (University of Science and Technology).

Les essais expérimentaux réalisés sont des essais de traction uniaxiale, des essais biaxiaux (acier doux St14) ainsi que des essais Nakajima (acier doux St14 et alliage d'aluminium Al6106). Une méthode de corrélation d'images numérique est utilisée pour la mesure des déformations. La figure ci-dessous, représente les points expérimentaux pour deux valeurs de taille de défaut initiales. Les textures expérimentales sont mesurées à l'aide la méthode de diffraction aux rayons X pour plusieurs trajets de déformations.

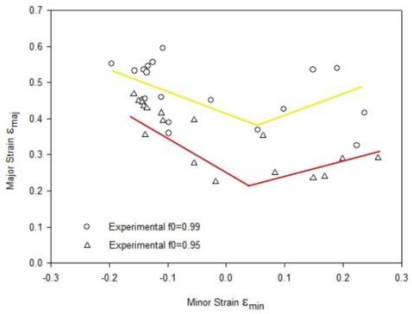


Figure7. CLF expérimentale pour l'acier doux St14 et pour un essai biaxial

La figure 8 représente les différents emboutis obtenus lors des essais Nakajima et la CLF obtenue correspondante pour l'alliage d'aluminium Al6061.

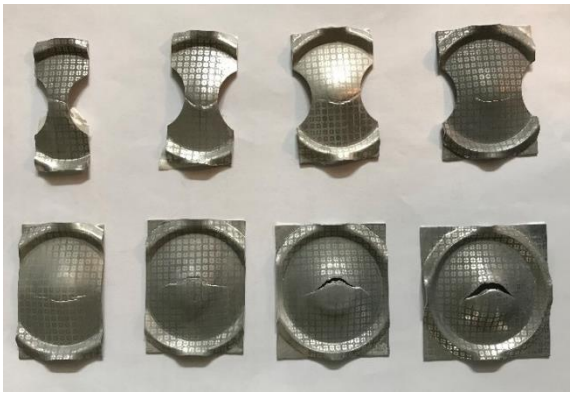


Figure 8a. Essai Nakajima, emboutis pour l'Al6061

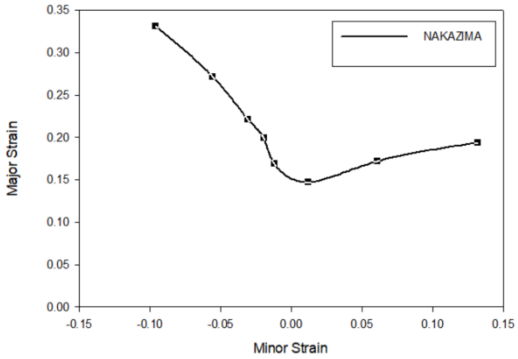


Figure 8b. Essai Nakajima, CLF pour l'Al606

Finalement, les résultats expérimentaux sont en accord avec les résultats numériques et la littérature pour les deux matériaux étudiés.

- **<u>Liste des travaux</u>**

[Journal] Mianroodi, Mohammad, Altmeyer, Guillaume, Touchal, Siham
Experimental and numerical FEM-based determinations of forming limit diagrams of St14 mild steel based on Marciniak-Kuczynski model, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, Vol. 13, pp. 5818-5831, 2019, DOI : 10.15282/jmes.13.4.2019.08.0464

[Conférence] Mianroodi, Mohammad, Touchal, Siham, Altmeyer, Guillaume
Comparison of Forming Limit Diagrams for FCC and BCC materials using Taylor and Marciniak-Kuczynski models
International conference with proceedings ICSET 2019
International conference on science, engineering & Technonolgy, Toronto, Canada, février 2019

[Conférence] Altmeyer, Guillaume, Touchal, Siham, Mianroodi, Mohammad
Coupling of micromechanical phi-model and plastic instability Marciniak-Kuczynski model for Forming Limit Diagrams predictions
3rd International conference on computational plasticity, Barcelona, septembre 2017

[Conférence] Mianroodi, Mohammad, Touchal, Siham, Altmeyer, Guillaume
Numerical Prediction of Forming Limit Diagrams using Marciniak-Kuczynski instabilities criteria and texture evaluation of roll forming process
International congress of interdisciplinary studies in science and engineering, juillet 2017

[Conférence] Touchal, Siham, Mianroodi, Mohammad, Altmeyer, Guillaume, Ahzi, Said
Prediction of Forming Limit Diagrams using the phi-model and the Marciniak-Kuczynski model
First International Conference and Workshop on Mechanical Engineering Research
Research Trends in Mechanical Engineering 2016, RTME 2016, University of Aveiro, Portugal, 11-13 July 2016

[Poster] Numerical simulation of sheet metal forming processes for polycrystalline materials with M-K approach, Journée de la mécanique, France, 2017.

[Poster] Micromechanical modeling of polycrystalline materials Application to sheet metal forming processes, Journée doctorale MSII, France, 2016.