

Programme de cotutelles Université de Sfax-UTT

Sujet de thèse

Etude expérimentale et numérique multi-échelle du procédé de formage incrémental de pièces asymétriques en acier TRIP

Codirecteur UTT France: Laurence Giraud-Moreau

Codirecteur US Tunisie: Anas Bouguecha

- **Etat de l'art et contexte**

L'allègement des structures, la sécurité ainsi que les bonnes performances mécaniques des matériaux utilisés représentent les objectifs principaux de l'industrie. Du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques, les aciers TRIP (Transformation Induced Plasticity) trouvent leurs places dans divers domaines d'application comme, la fabrication des pièces automobiles et aéronautiques. Ces aciers présentent une ductilité élevée et une forte résistance. Cette propriété remarquable trouve son origine dans la transformation martensitique de l'austénite. Il est capable de subir une transformation de phase induite par déformation, ce qui contribue à sa bonne résistance [1, 2]. Grâce à ses propriétés mécaniques, l'acier TRIP permet de réduire le poids du véhicule grâce à une réduction d'épaisseur des plaques automobiles, et ainsi réduire la consommation de carburant et la pollution. Cet acier a également une forte capacité d'absorption d'énergie ce qui permet d'améliorer le niveau de sécurité des automobiles.

Le procédé le plus couramment utilisé pour mettre en forme des tôles est l'emboutissage. Mais un procédé plus récent, le formage incrémental, permet de mettre en forme des tôles sans réalisation d'outils spécifiques tout en permettant une grande flexibilité. Ce procédé consiste à déformer localement la tôle par repoussage grâce au déplacement du poinçon de forme hémisphérique de petite taille dont la trajectoire peut être pilotée par une machine à commande numérique ou un robot. Il est particulièrement intéressant pour le prototypage, la petite série, le remplacement de pièces. Ce procédé de formage incrémental, complémentaire au procédé d'emboutissage, ouvre de nouvelles perspectives pour le remplacement de pièces sans avoir à recourir à des outils coûteux. Plusieurs études ont été réalisées pour optimiser les paramètres de ce procédé et comprendre son mécanisme de déformation. Mais aucun travail n'a jusqu'ici été effectué sur la base de cet acier, pourtant très présent dans l'automobile.

L'équipe de l'UTT a déjà travaillé sur le formage incrémental à travers différents projets et encadrements de thèse. Deux cotutelles de thèse avec la Tunisie portant sur le formage incrémental de tôles en titane ont été effectuées (B. Saidi encadré de 2014-2018 par L. Giraud-Moreau, R. Nasri et A. Cherouat, et S. Frikha encadrée par L. Giraud-Moreau et A. Bouguecha, 2018-2021). Ces deux études étaient principalement numériques avec une partie expérimentale réalisée en collaboration avec la Tunisie [3-5]. Des travaux sont de plus en cours à l'UTT sur le formage incrémental robotisé à chaud des thermoplastiques renforcés : projet stratégique (2022-2024), thèse de Valentin Duarte Rocha démarré en oct 2022) [6].

Du côté de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), Université de Sfax (US), Bouguecha et al. [7-9] ont déjà travaillé sur la mise en forme des acier TRIP par emboutissage ainsi que par estampage. Ces travaux étaient principalement expérimentaux avec une partie numérique qui considère uniquement un écrouissage du matériau dû à la formation de la phase martensitique pendant la déformation plastique locale. Toutefois, une simulation multi-échelle avec considération des modifications microstructurales n'a pas été effectuée.

Ce sujet de thèse s'intéresse donc en particulier à la mise en forme par formage incrémental des pièces asymétriques en acier TRIP. Une approche multi échelle combinant les caractéristiques microstructurales de ce matériau avec les modèles macroscopiques sera utilisée. Elle servira à comprendre profondément les phénomènes de déformation à différentes échelles. Des essais expérimentaux et des simulations numériques multi échelles seront élaborés pour déterminer le comportement de ce matériau suite au procédé de formage incrémental. L'objectif principal est d'optimiser le procédé de formage pour améliorer les propriétés mécaniques des pièces formées tout en minimisant les défauts de fabrication.

- **Objectif de la thèse**

Ce projet de thèse porte sur la caractérisation des pièces asymétriques en acier TRIP fabriqué à l'aide du formage incrémental.

Dans un premier temps, une étude approfondie sur les propriétés mécaniques et microstructurales des aciers TRIP devra être développée pour comprendre les différentes phases de transformation induite suite à la déformation.

Ensuite, des essais expérimentaux seront élaborés pour évaluer l'influence des paramètres du procédé de formage incrémental sur les propriétés mécaniques des pièces asymétriques.

Un modèle numérique multi échelle sera développé pour simuler le procédé tout en intégrant les propriétés de l'acier TRIP. Les résultats de simulation numérique seront comparés et validés

à partir d'essais expérimentaux. Finalement, les propriétés mécaniques des pièces formées seront optimisées à l'aide du modèle numérique développé pour améliorer l'efficacité du formage incrémental des pièces asymétriques en acier TRIP.

- **Partage des travaux entre l'UTT et l'US**

- Université de Technologie de Troyes (UTT) :

Dans le cadre de cette thèse, l'équipe de l'UTT encadrera la partie numérique et des essais expérimentaux à l'échelle microscopique. L'équipe de l'UTT sera composée de Laurence Giraud Moreau, Abel Cherouat et Yessine Jedidi.

- Développement d'un modèle de simulation numérique multi échelle pour la mise en forme des pièces asymétriques en acier TRIP à partir du procédé de formage incrémental
- Rechercher la liaison entre les caractéristiques microstructurales des aciers TRIP et les propriétés mécaniques du modèle macroscopique
- Réalisation d'essais de traction in-situ MEB pour suivre l'évolution de la microstructure pendant un écoulement plastique.

- Université de Sfax :

Cette thèse de cotutelle sera réalisée avec l'équipe d'Anas Bouguecha, Khawla Essassi et Mohamed Haddar.

L'équipe de l'université de Sfax encadrera la partie expérimentale ainsi que celle portant sur le modèle de comportement du matériau (numérique et expérimentale).

- Essais expérimentaux réalisés par le formage incrémental
- Mise en place d'un banc d'essai expérimental pour la réalisation de la pièce asymétrique en acier TRIP par formage incrémental

- **Bibliographie**

- [1] Trzepieciński, Tomasz. "Forming processes of modern metallic materials." *Metals* 10.7 (2020): 970.
- [2] Kvačák, Tibor, Jana Bidulská, and Róbert Bidulský. "Overview of HSS steel grades development and study of reheating condition effects on austenite grain size changes." *Materials* 14.8 (2021): 1988.
- [3] Frikha, S.; Giraud-Moreau, L.; Bouguecha, A.; Haddar, M. Simulation-Based Process Design for Asymmetric Single-Point Incremental Forming of Individual Titanium Alloy Hip Cup Prosthesis. *Materials*, 15, 3442. <https://doi.org/10.3390/ma15103442>, 2022

- [4] Saidi, B.; Giraud Moreau, L.; Cherouat, A.; Nasri, R. Accuracy and Sheet Thinning Improvement of Deep Titanium Alloy Part with Warm Incremental Sheet-Forming Process. *J. Manuf. Mater. Process.*, 5, 122. <https://doi.org/10.3390/jmmp5040122>, 2021
- [5] Madugula, S.K.; Giraud-Moreau, L.; Adragna, P.-A.; Daniel, L. Infill Design Reinforcement of 3 Printed Parts Using Refinement Technique Adapted to Continuous Extrusion. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, 71. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030071>, 2021
- [6] Duarte Rocha Valentin, Giraud Moreau L., Cherouat A., Utilisation du formage incrémental robotisé à chaud sur polymère dans le cadre de la fabrication d'orthèses recyclables et biosourcées, Colloque National Aussois 2024, Simulation et instrumentation des procédés de fabrication, Poster, Janv 2024.
- [7] Behrens, B.-A., Bouguecha, A., Bonk, C., Chugreev, A.: "Numerical and experimental investigations of the anisotropic transformation strains during martensitic transformation in a low alloy Cr-Mo steel 42CrMo4", *Procedia Engineering*, 2017, 207, pp. 1815–1820
- [8] Behrens, B.-A., Voges-Schwieger, K., Bouguecha, A., Jocker, J., Schrödter, J.: "An innovative material inherent load sensor based on martensite formation", *Steel Research International*, 2012, SPL. ISSUE, pp. 1339–1342
- [9] Behrens, B.-A., Hübner, S., Bouguecha, A., Voges-Schwieger, K., Weilandt, K.: "Local strain hardening of metal components by means of martensite generation", *Advanced Materials Research*, 2010, 137, pp. 1–33