

# Proposition de post-doc en collaboration ENSAM-UTT

**Titre :** Développement d'une stratégie numérique hybride multi-échelles/phénoménologique pour modéliser le comportement des matériaux métalliques lors des opérations de mise en forme.

**Cadre :** projet financé par l'IRT M2P

**Durée :** 12 mois minimum (pouvant aller jusqu'à 14 mois selon le candidat)

**Salaire :** 2600 € brut/mois

## Encadrement :

- ENSAM (centre de Metz) :
  - Mohamed BEN BETTAIEB ([Mohamed.BenBettaieb@ensam.eu](mailto:Mohamed.BenBettaieb@ensam.eu))
  - Farid ABED-MERAIM ([Farid.AbedMeraim@ensam.eu](mailto:Farid.AbedMeraim@ensam.eu))
- UTT :
  - Houssem BADREDDINE ([houssem.badreddine@utt.fr](mailto:houssem.badreddine@utt.fr))
  - Carl LABERGERE ([carl.labergere@utt.fr](mailto:carl.labergere@utt.fr))
  - Khemais SAANOUNI ([khemais.saanouni@utt.fr](mailto:khemais.saanouni@utt.fr))

## Présentation détaillée du projet post-doctoral :

La maîtrise des procédés de fabrication, dans le but d'obtenir des pièces et composants métalliques légers et ayant des propriétés mécaniques optimales (résistance, ductilité, microstructure...), est un défi majeur à relever par les chercheurs. La parfaite maîtrise de ces procédés ne peut être atteinte sans l'aide d'une méthodologie numérique robuste de formage virtuel. Cette stratégie numérique, généralement basée sur la méthode des éléments finis, nécessite l'utilisation à la fois de modèles de comportement avancés et de méthodes numériques performantes pour implanter ces modèles mécaniques dans un code de calcul éléments finis. Ces modèles de comportement sont généralement basés sur deux types d'approches : les approches mono-échelles (phénoménologiques et macroscopiques) et les approches multi-échelles ou de passage Micro-Macro (localisation-homogénéisation). Pour des raisons liées surtout au coût en temps de calcul CPU, la grande majorité des modèles éléments finis classiques utilise seulement l'approche phénoménologique macroscopique. Le projet que nous proposons vise à développer une stratégie numérique hybride qui permet de

modéliser le comportement mécanique de la pièce à déformer avec les deux types d'approches dans la même simulation, combinant ainsi les avantages des deux approches. En effet, cette méthodologie hybride permet de modéliser, d'une manière précise, l'évolution des variables microscopiques dans les zones critiques de la pièce dites 'd'intérêt' (à forts gradients mécaniques ...). Pour les autres zones, où l'évolution des variables mécaniques est modérée, l'approche phénoménologique macroscopique sera adoptée pour modéliser le comportement. Une fois implantée dans un code de calcul par éléments finis, cette stratégie hybride sera utilisée pour modéliser et simuler les opérations de mise en forme avec plus de pouvoir prédictif et d'efficacité. Compte-tenu de ces avantages, la stratégie numérique développée sera utilisée comme outil d'optimisation des opérations de mise en forme et d'aide à la conception de nouveaux matériaux ayant des propriétés d'usage optimales.

## **Verrous scientifiques visés par le projet et positionnement par rapport à l'état de l'art :**

La modélisation fiable et robuste de la mise en forme des produits métalliques a mobilisé depuis plusieurs décennies de nombreux chercheurs et industriels. Du fait de la complexité du comportement mécanique des matériaux étudiés et de l'importance de l'impact des phénomènes microstructuraux sur leur mise en forme, cette modélisation comporte encore quelques verrous scientifiques majeurs qui doivent être levés par les communautés scientifique et industrielle. Le projet actuel vise à lever quelques-uns de ces verrous en lien avec cette modélisation :

- V1.** Mettre en place une stratégie numérique qui permet de modéliser finement, et avec des temps de calcul réduits, le comportement mécanique des matériaux métalliques lors des opérations de mise en forme. Cette stratégie doit allier les avantages des approches multi-échelles (prise en compte explicite de la microstructure et son évolution, finesse et précision de la description des mécanismes physiques, lien explicite entre le comportement macroscopique et les phénomènes agissant à des échelles microscopiques) à ceux des approches phénoménologiques macroscopiques (simplicité de la mise en œuvre numérique, réduction de temps de calcul). Puisque les modélisations classiques existantes n'utilisent que l'une de ces approches dans une même simulation et non pas la combinaison des deux approches (voir Refs. [1]-[4] pour les approches multi-échelles et Refs. [5]-[9] pour les approches phénoménologiques), la stratégie hybride originale proposée constituera une avancée numérique et technique majeure. L'une des difficultés fondamentales à surmonter est d'assurer la compatibilité et la continuité des deux approches dans les zones de jonction. Une fois mise en place, cette stratégie hybride sera capable d'optimiser les ressources et moyens de calcul tout en préservant la richesse ainsi que la finesse de la description physique des phénomènes étudiés.

- V2.** Développer une modélisation multi-échelles pour déterminer le comportement d'un agrégat polycristallin (VER) à partir de celui des monocristaux constitutifs en utilisant l'approche auto-cohérente à champs moyens ([10], [12]). Le modèle de comportement de chaque monocristal sera formulé dans le cadre des grandes déformations élastoplastiques, où le critère de Schmid sera utilisé pour décrire l'écoulement plastique. Un modèle d'écrouissage microscopique pertinent qui permet de prendre en compte la création, le stockage et l'annihilation des dislocations sera pris en compte dans cette modélisation ([12]-[13]). L'initiation et l'évolution de l'endommagement ductile à l'échelle microscopique (échelle des grains et des systèmes de glissement cristallographiques) seront prises en compte en introduisant une variable d'endommagement tensorielle ([14]-[18]). L'originalité de cette approche, par rapport aux travaux publiés dans la littérature, réside dans l'introduction de l'endommagement à différentes échelles et dans la prise en compte de l'interaction entre cet endommagement et les autres phénomènes microstructuraux (évolution de la texture cristallographique et des densités de dislocations).
- V3.** Définir une méthodologie permettant de construire un modèle constitutif phénoménologique avancé capable de décrire le comportement macroscopique du matériau étudié (évolution de la forme (distorsion) et de la position de la surface de charge, évolution de l'endommagement ductile) à partir de la modélisation multi-échelles développée précédemment. Cette méthodologie inclura également la procédure à suivre pour l'identification des paramètres mécaniques associés aux équations du modèle macroscopique. Elle constituera une alternative fiable et peu coûteuse aux essais expérimentaux classiquement utilisés pour identifier les modèles de comportement phénoménologiques ([5], [17], [18]). Néanmoins, cela nécessitera la mise en place d'une base de données expérimentale s'appuyant sur des mesures micromécaniques de champs et d'évolution de texture avec des essais in situ. Ceci permettra, avec l'aide d'une procédure d'identification adéquate, de calibrer les paramètres du modèle micro.
- V4.** Développer des schémas et algorithmes numériques fiables et robustes pour résoudre les différentes équations formulées (les équations constitutives à l'échelle du monocristal, les équations relatives au modèle auto-cohérent, les procédures d'identification, puis la résolution globale des équations d'équilibre...). Ce point représente un verrou numérique majeur à lever, compte tenu de la complexité de cette formulation multi-échelles. Contrairement aux autres approches auto-cohérentes ([2], [3]), qui sont communément formulées dans le cadre des petites déformations élastoviscoplastiques, l'approche proposée ici est basée sur une formulation en grandes déformations élastoplastiques.

## Conditions de réalisation du projet de post-doc :

Le post-doc se déroulera en grande majorité sur le site de l'ENSAM de Metz. Quelques déplacements entre les sites de l'ENSAM et de l'Université de technologies de Troyes seront programmés sur l'année de post-doc.

Les deux équipes ENSAM/LEM3 et UTT/LASMIS développent depuis plusieurs années des modèles de comportement aux échelles Macro et Micro-Macro. Dans le cadre de ce projet, le futur post-doc bénéficiera alors de ces développements antérieurs pour rapidement progresser et aboutir à une méthodologie numérique couplant des modèles Macro et Micro-Macro.

L'ensemble des développements seront intégrés dans le logiciel éléments finis ABAQUS® à partir de routines utilisateurs codées en langage Fortran.

## Références bibliographiques :

- [1] Feyel F., Chaboche J-L., 2000, *FE2 multiscale approach for modelling the elastoviscoplastic behaviour of long fibre SiC/Ti composite materials*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 183, pp. 309–330.
- [2] Segurado J., Lebensohn R.A., LLorca J., Tomé C.N., 2012, *Multiscale modeling of plasticity based on embedding the viscoplastic self-consistent formulation in implicit finite elements*, *International Journal of Plasticity*, 28, pp. 124–140.
- [3] Knezevic M., McCabe R.J., Lebensohn R.A., Tomé C.N., Liu C., Lovato M.L., Mihaila B., 2013, *Integration of self-consistent polycrystal plasticity with dislocation density based hardening laws within an implicit finite element framework: Application to low-symmetry metals*, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 61, pp. 2034–2046.
- [4] Akpama H.K., Ben Bettaieb M., Abed-Meraim F., 2017, *Prediction of plastic instability in sheet metals during forming processes using the loss of ellipticity approach*, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14, pp. 1816–1836.
- [5] Kraska M., Doig M., Tikhomirov D., Raabe D., Roters F., 2009, *Virtual material testing for stamping simulations based on polycrystal plasticity*, *Computational Materials Science*, 46, pp. 383–392.
- [6] Barlat F., Ha J., Gracio J.J., Lee M.G., Rauch E.F., Vincze G., 2013, *Extension of homogeneous anisotropic hardening model to cross-loading with latent effects*, *International Journal of Plasticity*, 46, pp. 130–42.
- [7] Behrouzi A., Soyarslan C., Klusemann B., Bargmann S., 2014, *Inherent and induced anisotropic finite viscoplasticity with applications to the forming of DC06 sheets*, *International Journal of Mechanical Sciences*, 89, pp. 101–111.

- [8] Zhang K., Badreddine H., Saanouni K., 2018, *Thermomechanical modeling of distortional hardening fully coupled with ductile damage under non-proportional loading paths*, *International Journal of Solids and Structures*, pp. 1–14.
- [9] Saanouni K., ‘*Damage Mechanics in metal forming. Advanced modeling and numerical simulation*’, ISTE/Wiley, London 2012, ISBN: 978-1-84821-3487.
- [10] Panicaud B., Saanouni K., Baczmanski A., François M., Cauvin L., Le Joncour L., 2011, *Theoretical modelling of ductile damage in duplex stainless steels - comparison between two micro-mechanical elasto-plastic approaches*, *Computational Materials Science*, 50, pp. 1908–1916.
- [11] Panicaud B., Le Joncour L., Hfaiedh N., Saanouni K., *Micromechanical polycrystalline damage-plasticity modeling for metal forming processes. Chapter 28 of the Section VI “Damage Mechanics in Metal Forming” of Volume 2 in G. Voyiadjis (Editor) “Handbook of Damage Mechanics: Nano to Macro Scale for Materials and Structures”*. Springer, New York (2015), pages 816 - 875 of Volume 2, ISBN : 978-1-4614-5588-2
- [12] Viatkina E.M., Brekelmans W.A.M., Geers M.G.D., 2007, *Modelling the evolution of dislocation structures upon stress reversal*, *International Journal of Solids and Structures*, 44, pp. 6030–6054.
- [13] Franz G., Abed-Meraim F., Berveiller M., 2013, *Strain localization analysis for single crystals and polycrystals: Towards microstructure-ductility linkage*, *International Journal of Plasticity*, 48, pp. 1–33.
- [14] Rajhi W., Saanouni K., Sidhom H., 2014, *Anisotropic ductile damage effects on anisotropic plastic flow: Modeling, numerical simulation and experimental validation*. *International Journal of Damage Mechanics*, 23, pp. 1211–1256.
- [15] Badreddine H., Saanouni K., 2015, *Advanced Anisotropic Damage Model Fully Coupled with Anisotropic Plasticity*. *Applied Mechanics and Materials*, 784, pp. 153–161.
- [16] Badreddine H., Saanouni K., Nguyen TD., 2015, *Damage anisotropy and its effect on the plastic anisotropy evolution under finite strains*. *International Journal of Solids and Structures*, 63, pp. 11–31.
- [17] Badreddine H., Labergère C., Saanouni K., 2016. *Ductile damage prediction in sheet and bulk metal forming*. *Comptes Rendus Mécanique*, 344, pp. 296–318
- [18] Badreddine H., Saanouni K., 2017, *On the full coupling of plastic anisotropy and anisotropic ductile damage under finite strains*. *International Journal of Damage Mechanics*. 26, pp. 1080–1123.
- [19] Habraken A-M., Duchêne L., 2004, *Anisotropic elasto-plastic finite element analysis using a stress–strain interpolation method based on a polycrystalline model*, *International Journal of Plasticity*, 20, pp. 1525–1560.
- [20] He W.J., Zhang S.H., Prakash A., Helm D., 2014, *A hierarchical multi-scale model for hexagonal materials taking into account texture evolution during forming simulation*, *Computational Materials Science*, 82, pp. 464–475.