

# THÈSE

présentée et soutenue publiquement le **21 mars 2016**  
pour l'obtention du grade de

**Docteur de l'Université de Lorraine**

(Spécialité : Mécanique des matériaux)

par

**Komi Dodzi Badji SOHO**

---

## Simulation multi-échelle des procédés de fabrication basée sur la plasticité cristalline

---

### Composition du jury

|                   |  |              |
|-------------------|--|--------------|
| Salima BOUVIER    | Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, (ROBERVAL)  | Rapporteur   |
| Lionel FOURMENT   | Chargé de recherche CNRS à l'École des Mines de Paris, (CEMEF)   | Rapporteur   |
| Julien YVONNET    | Professeur à l'Université Paris-Est, (MSME)  | Examinateur  |
| Hamid ZAHROUNI    | Professeur à l'Université de Lorraine, Metz, (LEM3)  | Directeur    |
| Farid ABED-MERAIM | Professeur à l'ENSAM, Arts et Métiers ParisTech, Metz, (LEM3)  | Co-directeur |
| Xavier LEMOINE    | Professeur associé à l'ENSAM, Arts et Métiers ParisTech, Metz, (LEM3)<br>Docteur /Ingénieur, ArcelorMittal, Maizières-Lès-Metz | Encadrant    |
| Lászlo TÓTH       | Professeur à l'Université de Lorraine, Metz, (LEM3, Labex-DAMAS)   | Invité       |

---

Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux — UMR CNRS 7239  
Pôle M4 : Matière, Matériaux, Métallurgie, Mécanique

# Résumé

Dans cette thèse, deux méthodes de couplage sont proposées pour la simulation multi-échelle des procédés de mise en forme. Dans la première partie, une procédure simplifiée (couplage indirect) est adoptée pour coupler les codes éléments finis (*Abaqus*<sup>®</sup> et *LAM3*<sup>®</sup>) au modèle polycristallin avec un schéma de transition autocohérente basée sur le comportement élastoplastique du monocristal écrit dans le formalisme des grandes déformations. Cette procédure simplifiée consiste à lier le modèle polycristallin avec l'analyse EF par l'extraction de l'histoire de l'incrément de déformation et de contrainte macroscopique, obtenue à partir d'une simulation EF préliminaire avec une loi phénoménologique, et à l'utiliser comme trajet de chargement dans le modèle polycristallin. Cette méthode est appliquée pour la simulation multi-échelle du procédé de skin-pass. Le suivi du trajet de chargement extrait dans la demi-épaisseur de la tôle a permis de prédire l'évolution des grandeurs physiques associées au modèle de plasticité en particulier la texture cristallographique et morphologique, l'écroûissage et l'énergie stockée. Dans la seconde partie de cette thèse, un modèle polycristallin élastoplastique du type autocohérent en petites déformations est couplé au code EF *Abaqus*<sup>®</sup> via la routine utilisateur UMAT. Ce couplage (dit couplage direct) consiste à utiliser la théorie de la plasticité cristalline comme loi de comportement à chaque point d'intégration du maillage EF. Le polycristal est représenté par un ensemble de  $N$  monocristaux. Chaque fois que le code EF a besoin d'information sur le comportement mécanique aux points d'intégration de chaque EF, le modèle polycristallin est appelé. Pour valider ce couplage développé, nous avons effectué des cas tests de simulation de trajets rhéologiques. Les résultats issus de ce couplage ont été validés avec des modèles de référence. À la différence des modèles phénoménologiques, ce couplage permet non seulement d'avoir des informations sur le comportement macroscopique de la structure mais aussi d'obtenir des informations sur l'état de la microstructure du matériau.

**Mots – clés :** Couplage, Plasticité cristalline, Homogénéisation autocohérente, Eléments finis, Elastoplasticité, Procédés de mise en forme des tôles, Umat, Texture cristallographique, Texture morphologique, Energie stockée

# Abstract

In this thesis, two coupling methods are proposed for the multiscale simulation of forming processes. In the first part, a simplified procedure (indirect coupling) is adopted to couple the finite element codes (*Abaqus*<sup>®</sup> and *LAM3*<sup>®</sup>) with a polycrystalline self-consistent model based on the large strain elastoplastic behavior of single crystals. This simplified procedure consists in linking the polycrystalline model with the FE analysis by extracting the history of the increment of macroscopic strain and stress, obtained from a preliminary FE simulation with a phenomenological law, and then using it as loading path prescribed to the polycrystalline model. This method is applied to multiscale simulation of skin-pass processes. By following on the loading path extracted at the half-thickness of the sheet, we can predict the evolution of some physical parameters associated with the plasticity model, in particular the crystallographic and morphological texture, hardening and stored energy. In the second part on this thesis, a small strain version of the elastoplastic polycrystalline self-consistent model is coupled to the *Abaqus*<sup>®</sup> FE code via the user material subroutine UMAT. This coupling (called direct coupling) consists in using crystal plasticity theory as constitutive law at each integration point of the FE mesh. The polycrystal is represented by a set of N single crystals. Each time the FE code needs information on the mechanical behavior at the integration points considered, the full polycrystalline constitutive model is called. In order to validate this coupling, simulations of simple mechanical tests have been conducted. The results of this coupling have been validated through comparison with reference models. Unlike phenomenological models, this coupling provides not only information on the overall macroscopic response of the structure, but also important information related to its microstructure.

**Keywords** : Coupling, Crystal plasticity, Self-consistent homogenization, Finite elements, Elasto-plasticity, Sheet metal forming processes, Umat, Crystallographic texture, Morphological texture, Stored energy