

# THÈSE EN COTUTELLE

pour l'obtention des grades de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE**  
**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LA SARRE**

Spécialité : Mécanique et Matériaux  
présentée par :

**Idriss Tiba**

---

## Effets des interfaces cristallines sur les champs mécaniques en plasticité cristalline et conséquences sur le glissement dans des micro-pilliers bi-cristallins

---

Thèse soutenue publiquement le 14 Octobre 2015 à Metz devant le jury composé de :

<i>Véronique Favier</i>	<i>Professeur, Arts et Métiers, PIMM, Paris, France</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Stefan Diebels</i>	<i>Professeur, Université de la Sarre, LTM, Saarbrücken, Allemagne</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Karsten Durst</i>	<i>Professeur, Université de Darmstadt, PhM, Darmstadt, Allemagne</i>	<i>Examineur</i>
<i>Alain Jacques</i>	<i>Directeur de Recherche CNRS, IJL Nancy, France</i>	<i>Examineur</i>
<i>Christian Motz</i>	<i>Professeur, Université de la Sarre</i>	<i>Examineur</i>
<i>Thiebaud Richeton</i>	<i>Chargé de Recherche CNRS, LEM3, Metz, France</i>	<i>Co-Directeur de thèse</i>
<i>Stéphane Berbenni</i>	<i>Directeur de Recherche CNRS, LEM3, Metz, France</i>	<i>Directeur de thèse (France)</i>
<i>Horst Vehoff</i>	<i>Professeur, Université de la Sarre, MWW, Saarbrücken, Allemagne</i>	<i>Directeur de thèse (Allemagne)</i>

*LEM3 : Laboratoire d'étude des microstructures et de mécanique des matériaux*  
*Université de Lorraine - Pôle M4 : matière, matériaux, métallurgie, mécanique*  
*MWW : Experimentelle Methodik der Werkstoffwissenschaften*  
*Universität des Saarlandes*

# Résumé

Dans le but de parvenir à comprendre le rôle des joints de grains sur la déformation des polycristaux, il est nécessaire d'étudier finement le comportement des bi-cristaux. Dans cette étude, une approche expérimentale innovante basée sur la fabrication et l'étude du comportement mécanique et de la plasticité cristalline de micro-pilliers bi-cristallins est combinée à une approche de modélisation micromécanique. Cette approche théorique est basée sur la théorie continue des dislocations ou théorie "FDM" (pour "Field Dislocation Mechanics" en anglais) dans laquelle les dislocations stockées au joint de grains sont décrites par une distribution continue de dislocations interfaciales. Ce modèle fournit des expressions analytiques explicites des champs de contraintes et de rotations du réseau dans le cas d'un bi-cristal infini avec un joint de grains plan. Les contributions des différentes sources d'incompatibilité qui se développent dans les deux grains du bi-cristal sont mises en évidence en raison des anisotropies élastique et plastique liées aux différentes orientations cristallines présentes de part et d'autre du joint de grains. Des calculs éléments finis ont permis de valider l'approche dans une zone proche du joint de grains et distante des surfaces libres du micro-pillier. Les prédictions de l'approche de modélisation sont confrontées aux résultats d'une analyse expérimentale basée sur des essais de compression menés à température ambiante sur des micro-pilliers bi-cristallins de Ni fabriqués au FIB (pour "Focused Ion Beam" en anglais) sous forme de cylindres de diamètre  $10\ \mu\text{m}$  et de facteur de forme 2. D'abord, l'étude s'est concentrée sur les prédictions des cisssions résolues sur tous les systèmes de glissement du bi-cristal en utilisant le modèle continu. Les effets des fractions volumiques de cristaux et de l'inclinaison du joint de grains ont également été pris en compte dans l'analyse. Les prédictions du modèle développé dans cette thèse sont en accord avec les systèmes de glissement actifs identifiés. Concernant l'entrée en plasticité et les systèmes de glissement associés dans chaque composante du bi-cristal, le modèle développé est plus pertinent que la loi de Schmid. Les essais de compression sont suivis par des mesures microstructurales effectuées par EBSD, pour quantifier les rotations du réseau dans chaque grain au cours de la déformation. Celles-ci ont été également calculées et discutées à l'aide du modèle micromécanique développé dans cette thèse.

# Abstract

In order to better understand the role of grain boundaries in polycrystals deformation, the study of the mechanical behavior of bicrystals becomes necessary. In this study, an innovative experimental approach based on the fabrication of bicrystalline micropillars is investigated with a micromechanical analysis of crystal plasticity behavior. The theoretical approach is based on the static Field Dislocation Mechanics (FDM) theory in which the dislocations stored in the grain boundary are described by a continuous distribution of interfacial dislocations. This model provides explicit analytical expressions of the stress and lattice rotation fields in the case of an infinite bicrystal with planar boundary. The contribution of the different incompatibility sources which may develop in both crystal components are emphasized due to elastic and plastic anisotropies related to the different crystal orientations. Finite element simulations were also performed to validate this approach in a zone close to the grain boundary and far from the micropillar free surfaces. The predicted results of the modelling approach are compared with experimental results based on compression tests conducted at room temperature on Ni bicrystalline micropillars. The micropillars are machined on a Focused Ion Beam (FIB) with  $10\ \mu\text{m}$  in diameter and an aspect ratio of 2. First, the study is focused on the prediction of the resolved shear stresses on the possible slip systems in the bicrystal using the continuum model. The crystal volume fraction and the grain boundary inclination angle effects were also taken into account in the analysis. The predictions of the continuum-based approach developed in this thesis are in full agreement with the experimentally identified active slip systems. Concerning the onset of plasticity and the associated slip systems in each bicrystal component, the developed model is more relevant than the Schmid law. The compression tests are followed by microstructural EBSD measurements to quantify lattice rotations in each grain during the deformation which were also computed using the micromechanical model developed in the present thesis.