

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Modélisation multi-échelles du comportement mécanique des colonies lamellaires dans les alliages métalliques de Titane**

Référence : **MAS-DMAS-2026-08**

(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse : Septembre 2026**

**Date limite de candidature : Avril 2026**

### Mots clés

Plasticité Cristalline, Plasticité à Gradient, Homogénéisation, Simulation Numérique, Solveurs FFT

### Profil et compétences recherchées

Formation : école d'ingénieur ou universitaire Master 2

Compétences recherchées : mécanique des solides, mécanique des matériaux, simulation numérique, programmation.

Des connaissances sur le comportement mécanique des matériaux métalliques seront appréciées.

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les alliages de titane quasi- $\alpha$  (Ti-6242s, Ti-6Al-4V) et les alliages à base intermétallique Ti-Al ( $\gamma$ -TiAl) présentent d'excellentes propriétés mécaniques spécifiques, qui en font des matériaux privilégiés pour l'industrie aéronautique. Ils se distinguent notamment par leur excellente tenue mécanique jusqu'à des températures de l'ordre de 600-750°C, une propriété intimement liée à leur microstructure. Celle-ci est complexe, ordonnée, hiérarchisée, et comporte notamment des colonies lamellaires dont le comportement mécanique, constitue un défi majeur de modélisation.

Les colonies lamellaires sont des unités microstructurales analogues à des grains, qui constituent jusqu'à 60-80% de la microstructure des alliages biphasés. Elles sont composées d'une alternance de lamelles fines (submicroniques) de deux phases cristallines différentes coexistantes : la phase  $\alpha$  (hexagonale compacte) et la phase  $\beta$  (cubique centrée) pour les alliages quasi- $\alpha$ , ou les phases  $\gamma$  (tétraogonale ordonnée) et  $\alpha_2$  (hexagonale) pour les alliages intermétalliques Ti-Al. Leur comportement mécanique complexe est régi par les fortes incompatibilités plastiques qui se développent aux interfaces hétérophases entre lamelles lors de la déformation [1]. Ces incompatibilités sont dues aux différences de structures cristallines et des relations d'orientation spécifiques entre les lamelles, qui modifient la hiérarchie des systèmes de glissement actifs et l'anisotropie plastique du matériau à l'échelle de la colonie. La compréhension et la modélisation de ces incompatibilités à l'échelle des interfaces entre lamelles sont essentielles pour prédire le comportement macroscopique de ces alliages. Par ailleurs, du fait de la finesse et la complexité de ces structures lamellaires, leur représentation explicite dans une simulation micromécanique est associée à un coût numérique important. En conséquence, les méthodes d'homogénéisation sont indispensables pour les modéliser au sein d'un calcul polycristallin [1,2]. L'introduction des incompatibilités de déformation dans ce cadre demeure un verrou scientifique important.

Pour lever ce verrou, le sujet de cette thèse place la prise en compte des incompatibilités plastiques au cœur d'une démarche de modélisation multi-échelles, afin d'améliorer la modélisation du comportement mécanique des colonies lamellaires. L'enjeu est de développer une méthodologie capable d'établir un chaînage cohérent entre (i) les mécanismes de déformation à l'échelle cristalline (activation des systèmes de glissement, accumulation de dislocations aux interfaces), (ii) le comportement effectif de la colonie, puis (iii) celui du polycristal.

Ces travaux, menés en collaboration avec l'ONERA (Département Matériaux et Structures) et l'Institut Jean Le Rond d'Alembert (Sorbonne Université), consisteront en trois tâches :

- **La simulation en champs complets de colonies lamellaires représentatives**, à l'aide d'un modèle de plasticité cristalline fondée sur le tenseur de Nye, caractérisant les gradients de déformation plastique. Cette approche, déjà implémentée dans le solveur spectral massivement parallèle AMITEX\_FFTP [3,4], sera à adapter aux colonies lamellaires. Elle permettra d'étudier numériquement les incompatibilités plastiques aux interfaces entre lamelles. L'objectif est de quantifier numériquement les incompatibilités aux interfaces et leur impact sur la distribution des contraintes/déformations et sur la réponse macroscopique de la colonie.
- **Le développement et l'implémentation d'un modèle homogénéisé enrichi des colonies lamellaires**, fondé sur un enrichissement de la théorie des matériaux stratifiés pour y intégrer explicitement l'effet des incompatibilités plastiques. Ce modèle introduira des variables internes d'incompatibilité définies à partir des états mécaniques de chaque phase constituante, selon une méthodologie analogue à des travaux précédents [5]. La contribution à l'énergie du matériau homogène sera quantifiée rigoureusement à partir des simulations en champs complets.
- **L'application au cas des alliages de titane biphasés**, en simulant le comportement de polycristaux combinant des nodules de phase  $\alpha$  et des colonies lamellaires homogénéisées. L'identification et la validation s'appuieront sur des caractérisations micromécaniques (corrélation d'images en essais in situ au MEB).

Cette thèse permettra d'acquérir des compétences avancées en plasticité cristalline, homogénéisation non-linéaire et simulation numérique HPC par méthodes spectrales (FFT), ainsi qu'une expertise sur le comportement des matériaux lamellaires cristallins. Ces acquis seront valorisables tant dans la recherche académique que dans des secteurs industriels variés, notamment ceux de l'aéronautique et de l'énergétique.

- [1] P. Serrano, Modélisation multi-échelles du comportement mécanique des alliages TiAl pour la prévision de leur tenue en fatigue, Thèse de doctorat, Toulouse 3, 2020. <https://theses.fr/2020TOU30272> (accessed October 14, 2025).
- [2] S.M. Kazim, K. Prasad, P. Chakraborty, Crystal plasticity based homogenized model for lamellar colonies of near- $\alpha$  and  $\alpha + \beta$  titanium alloys, Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 31 (2023) 065008. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ace2dc>.
- [3] A. Marano, L. Gélébart, S. Forest, FFT-based simulations of slip and kink bands formation in 3D polycrystals: Influence of strain gradient crystal plasticity, J. Mech. Phys. Solids 149 (2021) 104295. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104295>.
- [4] M. Zecevic, R.A. Lebensohn, L. Capolungo, Non-local large-strain FFT-based formulation and its application to interface-dominated plasticity of nano-metallic laminates, J. Mech. Phys. Solids 173 (2023) 105187. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.105187>.
- [5] A. Vattré, B. Fedelich, On the relationship between anisotropic yield strength and internal stresses in single crystal superalloys, Mech. Mater. 43 (2011) 930–951. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.07.007>.

### Collaborations envisagées

La thèse se déroulera en collaboration avec l'Institut Jean-Le-Rond-d'Alembert – Sorbonne Université

#### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Aldo MARANO Tél. : +33 (0)1 46 73 46 09

Email : [aldo.marano@onera.fr](mailto:aldo.marano@onera.fr)

#### Directeur de thèse

Nom : Rénauld BRENNER

Laboratoire : Institut Jean-Le-Rond d'Alembert

Tél. : +33 (0)1 44 27 87 06

Email : [renald.brenner@sorbonne-universite.fr](mailto:renald.brenner@sorbonne-universite.fr)

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>