

Partenaires académiques



Partenaires industriels



Simulation en champ complet de la recristallisation dynamique par une approche level-set

Romain Boulais-Sinou,⁽¹⁾ Daniel Pino Muñoz,⁽¹⁾ Marc Bernacki,⁽¹⁾

*Contact : romain.boulais-sinou@mines-paristech.fr

1) MINES ParisTech, PSL - Research University, CEMEF – Centre for material forming, CNRS UMR7635, CS 10207 rue Claude Daunesse 06904 Sophia Antipolis, France

Abstract

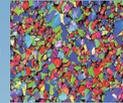
La prédiction et le contrôle de la microstructure est un des enjeux de l'industrie métallurgique. Lors des opérations de mise en forme la microstructure peut évoluer par l'activation de phénomènes tels la recristallisation dynamique (DRX), la restauration... La méthode Level-Set [1] présentée est une approche à champ complet permettant une description locale de la microstructure. Nos simulations de DRX tiennent compte de grands locaux (texture, densité de dislocation, courbure des interfaces). Les cas d'application présentés portent sur la déformation à chaud d'un acier monophasé (304L).

Introduction



Propriétés mécaniques :

- Domaine d'élasticité
- Résistance à l'effort
- Apparition de fissures
- Résistance à la chaleur



Microstructure :

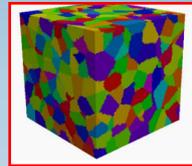
- Taille de grain moyenne
- Energie stockée
- Phases actives
- Texture



Mise en forme :

- Température
- Contrainte
- Vitesse de déformation

Simulation en champ complet sur des VER 3D



Avantages de la méthode Level-Set :

- Représentation implicite de la microstructure
- Capable de gérer les événements topologiques complexes (apparition ou disparition de grains)
- Robuste pour les calculs en grandes déformations

Motivations:

- Contrôler et prédire l'évolution de la microstructure lors des opérations de mise en forme
- Créer des matériaux plus robustes et plus fiables à moindre coût
- In fine, gain de temps et d'argent pour la production et l'entretien des matériaux

Objectifs pour la simulation numérique de la DRX :

- Prédiction des densités de dislocations SSD et GND
- Germination dynamique à partir d'un critère qui tient compte des prédictions locales
- Déplacement des joints de grains à partir des gradients d'énergie locaux et de la courbure locale

Modèle

Lois de plasticité cristalline

Loi de durcissement: $\sigma = \sigma_0 + M\psi\mu b\sqrt{\rho}$

Loi de Schmidt: $\tau^{\alpha} = T_{\alpha} \sigma$

Vitesse de glissement: $\dot{\gamma}_{\alpha} = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau^{\alpha}}{\tau_c^{\alpha}} \right)^{1/m} \text{sign}(\tau^{\alpha})$

Prédiction des densités de dislocations:

$$\dot{\rho} = \rho_{SSD} + \rho_{GND}$$

$$\dot{\rho}_{GND\alpha} = \frac{1}{b_{\alpha}} \nabla \times (\dot{\gamma}_{\alpha} n_{\alpha} F_p)$$

$$\dot{\rho}_{SSD} = \left(\frac{K_1}{M} - \frac{K_2}{M} \rho_{total} \right) V_p$$

$$V_p = \sum_{\alpha} \dot{\gamma}_{\alpha}$$

Formalisme Level-Set

Distance signed:

$$\varphi(x,t) = \begin{cases} d(x, \Gamma(t)) & \text{si } x \in \Omega \\ -d(x, \Gamma(t)) & \text{si } x \notin \Omega \end{cases}$$

avec $\Gamma(t)$ contour de Ω :
 $\Gamma(t) = \{x / \varphi(x,t) = 0\}$.

Equation de transport:

$$\frac{\partial \varphi(x,t)}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \varphi(x,t) = 0$$

Vitesse d'advection:

$$\vec{V} = V \cdot \vec{n} = V \cdot \frac{\nabla \varphi(x,t)}{|\nabla \varphi(x,t)|} = \vec{V}_{GG} + \vec{V}_{\Delta E}$$

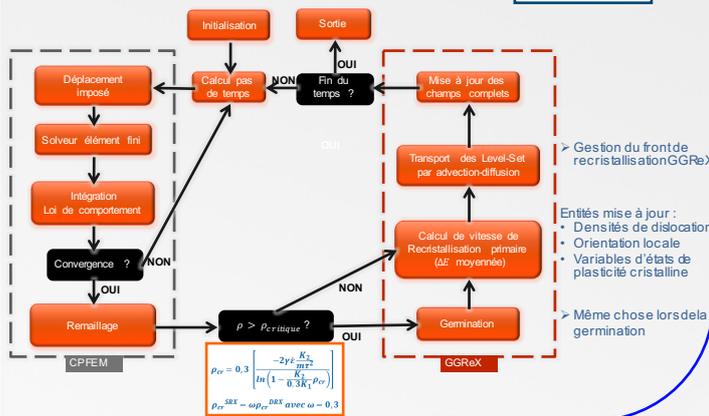
Croissance de Grain (GG):

$$\vec{V}_{GG} = -M \gamma \Delta \varphi_i \nabla \varphi_i$$

Recristallisation (ReX):

$$\vec{V}_{\Delta E} = M (E_j - E_i) \vec{n}_i$$

Algorithme de couplage CPFEM et GGRex



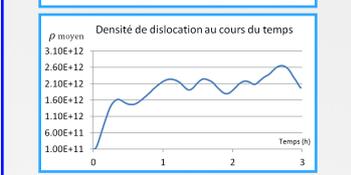
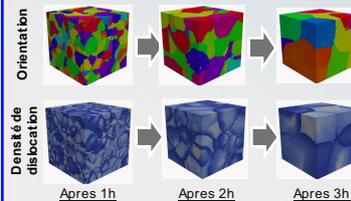
Premiers Résultats

Cas test Channel Die :

- o VER cubique de dimensions $1mm \times 1mm \times 1mm$.
- o La microstructure déformée est générée par un algorithme de type Voronoi pour respecter une taille de grain moyenne initiale d'un rayon de $83 \mu m$.
- o La structure est immergée sur le maillage élément fini isotrope et remallée périodiquement au cours du calcul (toutes 5% de déformation).
- o Déplacement imposé des faces Z et X pour respecter une vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ constante.
- o 18 fonctions level-set contenues [4] sont utilisées pour décrire 423 grains
- o Données matérielles correspondant à l'acier 304L.

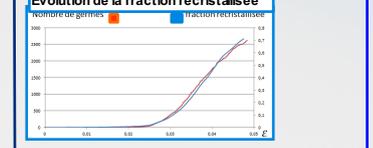
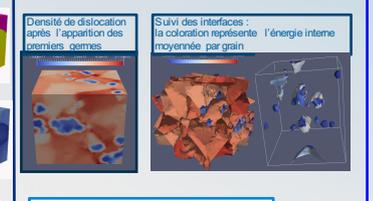
Sans germination

Dans cette section la vitesse de déformation est choisie suffisamment faible pour ne pas activer la germination de nouveaux grains



Avec germination

Dans cette section la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ est égale à $0,01s^{-1}$. Dans ces conditions le seuil de germination ρ_{crit} est fixé à $5,7e^{13}m^{-2}$



Conclusion & Perspectives

- Ces premiers cas sont un premier pas vers la simulation de la DRX en champ complet dans un cadre unifié. Il est indispensable d'améliorer le couplage entre le modèle de plasticité cristalline CPFEM et le modèle de recristallisation GGRex.
- La validation du modèle de DRX passera par la comparaison avec des données sur acier 304L. D'abord vis-à-vis de la prédiction sur la cinétique de recristallisation, ensuite par l'étude d'effets d'adoucissement liés à l'apparition et la croissance des germes. Enfin nous pourrions étudier l'influence des conditions thermomécaniques telles que la température et la vitesse de déformation.
- Tous les développements liés à ce travail de recherche sont destinés à être implémentés dans le logiciel DIGIMU® à des fins industrielles [5].

Remerciements

Les auteurs remercient ArcelorMittal Industrieel, Areva, Ascometal, Aubert&Duval, le CEA et Safran pour le financement de ce travail de recherche

[1] M. Bernacki and al. Finite element model of primary recrystallization in polycrystalline aggregates using a level set framework, *Modelling and Simul. Mater. Sci. Eng.* 17, 064006 (2009)
 [2] A. L. C. Fabiano, Modelling of crystal plasticity and grain boundary motion of 304L steel at the mesoscopic scale, PhD thesis, Mines-ParisTech (2012)
 [3] K. Huang, Towards the modelling of recrystallization phenomena in multi-pass conditions: application to 304L steel, PhD thesis, Mines-ParisTech (2011)

[4] B. Scholtes, R. Boulais-Sinou, A. Settefrati, D. Pino Muñoz, I. Poitault, A. Montouchet, N. Bozzolo, and M. Bernacki, 3D level set modeling of static recrystallization considering stored energy fields, *Computational Materials Science*, In press
 [5] B. Scholtes, M. Shakoor, N. Bozzolo, P.-O. Bouchard, A. Settefrati, and M. Bernacki, Advances in level-set modeling of recrystallization at the polycrystal scale -development of the digi-μ software, *Key Engineering Materials*, 651-653, 617-623 (2015).