



COLLOQUE PLASTICITÉ

Marseille - Jardin du Pharo

2024

Mardi 02/04/2024 au Jeudi 03/04/2024

Bienvenue au Colloque Plasticité 2024

Le colloque Plasticité est depuis plus de 50 ans le rendez-vous annuel de la communauté nationale des chercheurs s'intéressant aux processus physiques gouvernant la déformation plastique des matériaux. Les études présentées concernent tous types de matériaux : les matériaux métalliques (aciers, superalliages, alliages légers, alliages à haute entropie, ...), les matériaux céramiques, semi-conducteurs, et verres, mais aussi les nouveaux matériaux (composites, matériaux granulaires, matériaux nano-structurés, polymères, mousses, éco-matériaux, ...). Ce domaine de recherche s'étend également sur de multiples échelles : de l'échelle nanométrique, avec l'étude des mécanismes élémentaires de plasticité, à l'échelle macroscopique, avec les lois de comportement mécanique des matériaux. Ces thématiques sont couvertes aussi bien par des approches expérimentales que numériques.

Les objectifs du colloque sont évidemment de contribuer au partage et à la discussion des concepts et résultats récents autour de la plasticité. C'est pour la communauté des chercheurs s'intéressant à la plasticité une occasion régulière de se rencontrer pour favoriser l'échange d'idées et l'émergence de thématiques innovantes.

Cette année le colloque Plasticité est hébergé en plein cœur de Marseille, dans un endroit d'exception : le jardin du Pharo. Vous pourrez ainsi apprécier la proximité avec la Méditerranée entre les différentes sessions de ce colloque. Au cours de cette édition, nous aurons également le privilège d'écouter Hosni Idrissi (IMAP, UCLouvain), Lev Truskinovsky (ESPCI, PSL), Pierre Hirel (UMET, Univ. Lille) et Guillaume Kermouche (LGF, Mines St-Etienne) en tant qu'orateurs invités.

L'ensemble du comité d'organisation vous souhaite la bienvenue dans la cité Phocéenne ainsi qu'un excellent colloque Plasticité 2024 !

Nous remercions également l'ensemble de nos sponsors, dont vous trouverez le détail en fin de ce livret, d'avoir contribué à la réalisation de cet événement.

A vos crayons !

Le comité d'organisation

Jonathan Amodeo (IM2NP, AMU)
Solène Dassonneville (IM2NP, AMU)
Stéphane Labat (IM2NP, AMU)
Adrien Pivano (LM2C, CEA)
Thomas Swinburne (CINaM, AMU)
Michael Texier (IM2NP, AMU)

Informations utiles

Déroulement du colloque :

Les différentes présentations ont lieu dans l'amphithéâtre Gastaut au Jardin du Pharo (à 20 mn à pied du métro Vieux Port, aussi accessible par le bus 82).

Le cocktail poster (le mardi 2 Avril à 18h30-20h30), le déjeuner du 3 Avril et les diverses pauses "café" ont lieu dans la salle des Voûtes (à la sortie de l'amphi Gastaut, prendre l'escalier qui descend sur votre droite). Le déjeuner "à emporter" du jeudi 4 Avril sera aussi à retirer dans la salle des Voûtes.

4

Visite de la reconstitution de la grotte Cosquer :

Le mercredi 3 avril, à 15h30, nous vous proposons de visiter la reconstitution de la **grotte Cosquer**, cette célèbre grotte découverte par le plongeur Henri Cosquer dans les profondeurs de la Méditerranée. A bord de modules d'exploration, laissez vous imprégner dans l'atmosphère de ce haut lieu de l'art pariétal et rupestre, dont l'originalité se traduit par la figuration d'animaux marins (pingouins, phoques...), témoignage de l'histoire climatique de la Méditerranée. Après un long travail de reconstitution, chaque détail de la grotte d'origine a pu être retranscrit : immersion garantie. Vos tickets, prépayés, vous seront remis sur place, juste avant la visite.

Accès : La grotte Cosquer se situe à 37 mn à pied du jardin du Pharo, ou en 15 mn par bus via le bus 83, arrêt Mucem St Jean (le terminus) ou le bus 82, direction Euromed Arenc, arrêt Mucem St Jean. Autre option: prendre le ferry boat qui traverse le vieux port de place des huiles à la mairie (50 centimes, CB non accepté).

Le dîner de Gala :



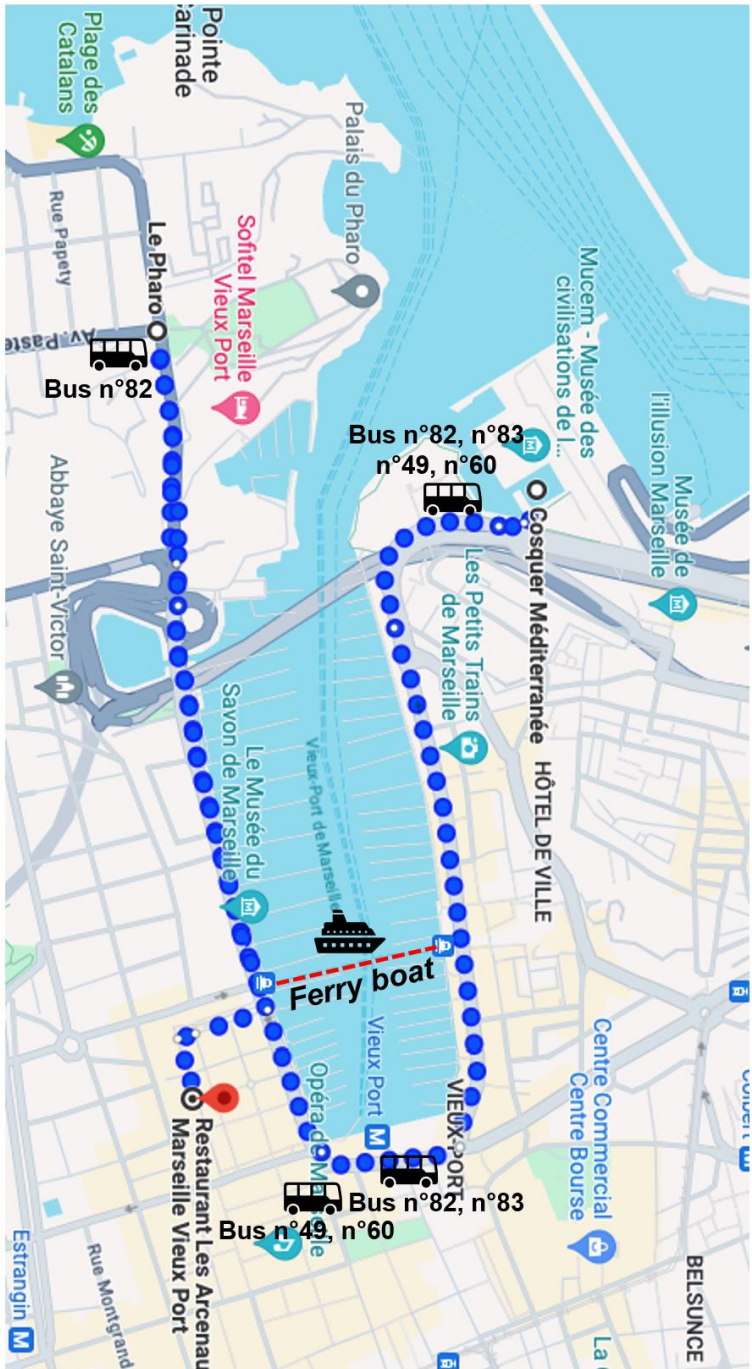
Le traditionnel repas de gala se déroulera aux **Arcenaux**, le mercredi 3 avril à 19h. Ce lieu, chargé d'histoire, est situé en plein cœur de Marseille, à deux pas du Vieux Port. Originellement dédiés aux marchandises du port de commerce après avoir abrité la chiourme des galères de l'arsenal, les Arcenaux sont désormais le produit d'une fusion entre une bibliothèque et une cave, devenu restaurant. Ainsi vous pourrez déguster votre repas dans ce restaurant peu commun, au milieu de livres anciens et de bouteilles de vin.

Accès : Le restaurant se situe au 25 Cr Honoré d'Estienne d'Orves, 13001 Marseille, à 25 mn à pied de la reconstitution de la grotte Cosquer et à 20 mn à pied du jardin du Pharo.

Depuis la reconstitution de la grotte Cosquer, il est également possible de prendre le bus 83 direction métro du Prado et de s'arrêter à l'arrêt Métro Vieux Port (compter 12 mn au total, dont 5 mn de marche), ou bien les bus 49, direction Vauban, ou 60, direction Notre Dame de la garde, arrêt Vieux Port Ballard (mêmes durées). Depuis le jardin du Pharo, le restaurant est accessible via le bus 83, direction Mucem, arrêt Place aux Huiles (9mn dont 5 mn de marche).

Autre option: prendre le ferry boat qui traverse le vieux port de place des huiles à la mairie (50 centimes, CB non accepté).

Les Arcenaux sont situés à 5 mn à pied de l'arrêt de Métro Vieux Port, sur la ligne 1.



Programme du mardi 02/04

13:00 - 13:45 *Accueil des participants (Amphi Gastaut)*

13:45 - 14:00 *Ouverture du colloque Plasticité 2024 (Amphi Gastaut) - Comité d'organisation*

14:00 - 14:30 Stress-induced amorphization and grain boundary sliding in olivine - Hosni Idrissi (invité)

14:30 - 14:50 A finite deformation thermomechanical model of field dislocations - Gabriel Lima-Chaves

14:50 - 15:10 Analyse de spectres RX simulés l'aide de modèles atomistiques de défauts d'irradiation dans l' α -Zr - Melvyn Larranaga

15:10 - 15:30 Effet de la composition chimique sur le comportement en traction à 650°C dans des superalliages base nickel - Florence Pettinari-Sturmel

15:30 - 15:50 Capacité de la dynamique moléculaire à prendre en compte l'asymétrie traction/compression dans les systèmes Ni₃Al/Ni observée dans les superalliages base nickel - Céline Gérard

16:00 - 16:30 *Pause café (Salle des Voûtes)*

16:30 - 16:50 Comportement thermo-élastique de la martensite Fe-C, une étude théorique - Philippe Maugis

16:50 - 17:10 Etude atomistique du glissement des dislocations vis dans le tungstène en présence d'hydrogène - Thomas Leveau

17:10 - 17:30 Influence de tungstène et de carbone sur les mécanismes de déformation à chaud d'alliages TiAl - Jean-Philippe Monchoux

17:30 - 17:50 Crystal viscoplastic model of UO₂ at high temperature: hardening recovery induced by dislocation climbing - Salomon El Bez

17:50 - 18:10 Développement d'un modèle de durcissement d'irradiation, basé sur des simulations numériques multi-échelles, appliqué au zirconium - Pascal Noirot

18:10 - 18:30 Etude de la localisation de la déformation et de la réorientation cristalline sous faible déformation plastique par microscopie confocale à balayage laser, EBSD-HR et DCT-6D - Damien Texier

18:30 - 20:30 *Session poster + cocktail (Salle des Voûtes)*

Programme du mercredi 03/04

08:30 - 09:00 Plasticité de la perovskite SrTiO₃ : dislocations neutres ou chargées, glissiles ou sessiles - Pierre Hirel (invité)

09:00 - 09:20 Étude de l'interaction entre l'hydrogène et les dislocations vis dans Fer-alpha par des simulations multi-échelles - Margot Lucas

09:20 - 09:40 Glass/crystalline ZrCu/Fe nanolaminates with tunable mechanical and electrical properties - Marco Ezequiel

09:40 - 10:00 Modélisation continue des dislocations dans les alliages concentrés - Pierre-Antoine Geslin

10:00 - 10:20 Structure de coeur et mobilité de la dislocation vis dans UO₂ - Jules-Elémir Suchorski

10:20 - 10:50 Pause café (Salle des Voûtes)

10:50 - 11:10 Prise en compte des bandes de glissement dans la simulation numérique du comportement mécanique de polycristaux durcis - Lionel Gelebart

11:10 - 11:30 Study of dislocation avalanches in Cu by means of Dislocation Dynamics simulations and experiments - Missipsa Aissaoui

11:30 - 11:50 Compréhension du lien entre maclage et transformation martensitique sous contrainte dans un alliage de titane beta-métastable - Nicolas Jobit

11:50 - 12:10 Zirconia's Bizarre Adventure: TRIPping with a Messy Twist - Gaël Huynh

12:10 - 14:00 Déjeuner (Salle des Voûtes)

14:00 - 14:30 Mesoscopic discrete-continuum approach to crystal plasticity - Lev Truskinovsky (invité)

14:30 - 14:50 Modélisations micromécaniques et simulations atomistiques de la ségrégation des atomes de soluté aux joints de grains - Joë Petrazoller

14:50 - 15:10 Influence de l'irradiation et de la déformation sur la transmission du glissement aux joints de grains dans les aciers austénitiques - Thomas-Xavier Masset

15:10 - 15:30 Une approche variationnelle non linéaire des fissures et des dislocations - Godefroy Engrand

15:30 - 19:00 Visite grotte Cosquer

19:00 - 23:00 Banquet

Programme du jeudi 04/04

08:30 - 09:00 Mesure du comportement viscoplastique des matériaux à l'échelle du micron - Guillaume Kermouche (invité)

09:00 - 09:20 Intégration de la plasticité intermittente indépendante du temps en mécanique des milieux continus - Mathias Lamari

09:20 - 09:40 Modélisation des interactions entre défauts étendus dans des matériaux métalliques en conditions extrêmes - Antoine Ruffini

09:40 - 10:00 On the origin of plasticity at twist basal grain boundaries in Ti-Al alloy - Djafar Iabbaden

10:00 - 10:20 Striction dans un anneau métallique en expansion dynamique : analyse à l'échelle de la microstructure - Jean-Lin Dequiedt

10:20 - 10:50 *Pause café (Salle des Voûtes)*

10:50 - 11:10 Irreversible evolution of dislocation pile-ups during cyclic micro-cantilever bending - Szilvia Kalacska

11:10 - 11:30 Mise en évidence par tomographie électronique en transmission des dislocations du mécanisme de montée mixte dans le quartz dé-formé dans des conditions naturelles - Alexandre Mussi

11:30 - 11:50 Screw Dislocations and Crack-Tip Plasticity in Tungsten: an Atomistic Study - Erik Bitzek

11:50 - 12:10 Nanoengineering high-performance metallic thin films with large and tunable yield strength and ductility - Matteo Ghidelli

12:10 - 12:30 *Discours de clôture (Amphi Gastaut) - Comité d'organisation*

12:30 - 14:00 *Déjeuner à emporter*

RÉSUMÉS DES PRÉSENTATIONS ORALES

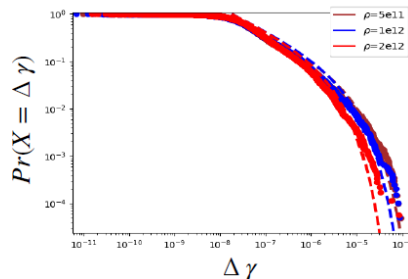
Study of dislocation avalanches in Cu by means of Dislocation Dynamics simulations and experiments

M. Aissaoui, C. Kahloun, S. Queyreau, U.O. Salman

Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux (CNRS UPR 3407).
Université Sorbonne Paris Nord, 93430 Villetaneuse, France

missipsa.aissaoui@lsmc.cnrs.fr

Plastic -irreversible- deformation in crystalline materials is controlled by the motion and interactions of linear defects that are the dislocations. At the macroscale, the deformation curves are continuous, but at small scale, deformation curves exhibit serrations. Plastic slip occurs intermittently through plastic bursts -or avalanches- and their intensity is typically distributed according to a power law. This critical behavior has been highlighted by Acoustic Emission (AE) and Atomic Force Microscopic (AFM) measurements performed on polycrystalline metals [1] or on ice [2], or from simulations of dislocation dynamics [3], many aspects are still poorly understood. In this PhD work, we associate original experiments (AE and AFM on Cu polycrystals) to mesoscale simulations to seek, in particular, the connection between the temporal signature of avalanches and plastic localization [3]. This talk will mostly focus on DDD (Discrete Dislocation Dynamics) simulations capturing the physical origin of plastic avalanches. The DDD technique is one of the rare technique capable of simulating the evolution of dislocation patterns in connection to the resulting flow stress. We first proposed a sensitive study on some key simulation parameters in order to acquire large amounts of avalanche data and reliably identify the plastic events statistics. We then propose a comprehensive study over various deformation conditions ranging from different loading directions, dislocation density and strain rate. From the very large number of plastic events we propose a careful analysis of the avalanche statistics. We recover a power exponent in the range 1.4-1.6 in agreement with experiments, and strongly impacted by dislocation density and strain rate, in particular. We discuss the link between the avalanche distribution cut-off and the simulations conditions. These simulation results will help in interpreting the experimental observations.



Complementary Cumulative Distribution Function of strain burst ($\Delta \gamma$) for deformation of [001] oriented single crystal in pure Cu for three different initial dislocation densities ($m = -2$). Dashed lines correspond to a power law fit with cut-off.

- [1] C. Kahloun, G. Monnet, S. Queyreau, L.T. Le, P. Franciosi, International Journal of Plasticity 84, (2016), 277-298,
- [2] Jérôme Weiss, Thiebaud Richeton, François Louchet, Frantisek Chmelik, Patrick Dobron, Denis Entemeyer, Physical review B 76, (2007), 224100
- [3] B. Devincere, et al, Science 320, 1745 (2008)

Screw Dislocations and Crack-Tip Plasticity in Tungsten: an Atomistic Study

Erik Bitzek, Benedikt Eggle-Sievers

Computational Materials Design, Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, Allemagne

e.bitzek@mpie.de

12 Plasticity and fracture toughness of bcc metals at low and intermediate temperatures are significantly affected by the low mobility of screw dislocations. Therefore, the dislocation core structure and the Peierls stress of screw dislocations have been studied in-depth using density functional theory calculations and atomistic simulations. For computational reasons, these simulations have been mostly restricted to the study of individual, straight dislocations subjected to a homogeneous stress field. The situation is however drastically different in the case of crack tip plasticity, where multiple, highly curved dislocation segments interact in a complex stress field characterized by high levels and strong gradients of stress.

Here we present large-scale atomistic studies of screw dislocations near cracks on $\{110\}$ and $\{001\}$ planes subjected to different strain states. The atomistic simulations show the importance of cross-kink formation and cross slip as well as the formation of dislocation loops in the stress field of the crack. The results are discussed in detail in terms of resolved shear stresses and additional driving forces. Special attention is given to the influence of the interatomic potential on the dislocation processes.

Striction dans un anneau métallique en expansion dynamique : analyse à l'échelle de la microstructure

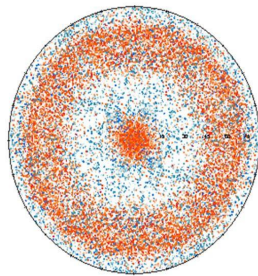
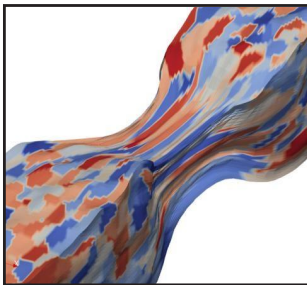
Jean-Lin Dequiedt^{1,2}

¹CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

²Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, F-91680 Bruyères-le-Chatel, France

jean-lin.dequiedt@cea.fr

La localisation de la déformation plastique sous forme de strictions dans un anneau métallique en expansion dynamique est mise en évidence expérimentalement au moyen de dispositifs de mise en vitesse par voie détonique, électromagnétique ou mécanique [1]. Si le phénomène s'analyse bien à l'échelle macroscopique comme une conséquence de l'instabilité de la réponse homogène de la structure, lorsque les strictions deviennent marquées, la déformation plastique s'organise à l'échelle de l'agrégat polycristallin constituant le matériau. Une simulation du processus sur une portion d'anneau en cuivre (FCC) a été réalisée à l'aide d'un code de plasticité cristalline reproduisant les grains du matériau. La déformation dans chaque grain est décrite au moyen d'un modèle de type Teodosiu intégrant les interactions entre systèmes de glissement dérivées de calculs de dynamique des dislocations [2]. Cette simulation fait apparaître la formation d'une striction principale dans laquelle les grains deviennent très allongés et le matériau devient texturé. Une analyse locale dans un grain de la zone de striction met en évidence une activité plastique complexe avec l'activation successive de systèmes de glissement différents du fait de la rotation du réseau cristallin et de l'écroutissage de la forêt qui affecte l'évolution des cissions critiques.



Striction et texture dans un anneau polycristallin

[1] Gant F., thèse de doctorat de l'ISAE-Supaéro, 2023

[2] Madec R., Kubin, L., 2017. Acta Mater., 126, 166-173.

Crystal viscoplastic model of UO₂ at high temperature: hardening recovery induced by dislocation climbing

Salomon EL BEZ¹, Bruno Michel¹, Mihai Garajeu²

¹CEA, DES, IRESNE, DEC, Cadarache, 13108 St Paul Lez Durance, France

²Laboratoire Mécanique et d'acoustique (LMA), CNRS, 13013 Marseille, France

salomon.elbez@cea.fr

14 Uranium dioxide (UO₂) is the most common fuel used in pressurized water reactors. The objective of the work is to make further progress in the understanding of the phenomena underlying the fuel creep for safety questions, and to develop a predictive multi-scale model. The modeling framework is a UO₂ crystal plasticity law devoted to thermally activated gliding for intermediates temperatures [1] and [2]. In this work, the constitutive equations of the crystal plasticity model are modified in order to add higher temperature mechanisms with dislocation interaction hardening and stored dislocation density recovery. In particular, a static dislocation density recovery rate is introduced as a function of the climbing velocity, itself computed with a point defect diffusion model. For this, an existing single dislocation climbing law [3] is improved in order to consider the case of two dislocation populations stored in different gliding systems and submitted to an external stress. Thanks to this new formulation, the mean climbing velocity can be assessed with a constitutive equation depending on the self-diffusion coefficient and ensuring the volume conservation associated to vacancy emission and absorption. The complete crystal plasticity model, for low and high temperatures, is obtained with a continuous description involving two inelastic strains, thermally activated plasticity and interaction/recovery creep, coupled with an assumption of addition of traveling times [4]. A first application of the new model has been performed to simulate compression tests on single crystals for a large range of temperature. These results compared to the experiments allow to obtain a validation of the model in situations where dislocation mobility is controlled by $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle\{100\}$ systems. The impact of the temperature and strain rate on the flow stress are also discussed.

This work is supported financially in the context of the PLEIADES platform code co-developed by the French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), Électricité de France (EDF) and Framatome.

- [1] L. Portelette, J. Amodeo, R. Madec, J. Soulacroix, T. Helfer, et B. Michel, « Crystal viscoplastic modeling of UO₂ single crystal », *Journal of Nuclear Materials*, vol. 510, p. 635-643, nov. 2018, doi: 10.1016/j.jnucmat.2018.06.035.
- [2] R. Madec, L. Portelette, B. Michel, et J. Amodeo, « Plastic anisotropy and composite slip: Application to uranium dioxide », *Acta Materialia*, vol. 255, p. 119016, août 2023, doi: 10.1016/j.actamat.2023.119016.
- [3] H. Yang, M. Huang, et Z. Li, « The influence of vacancies diffusion-induced dislocation climb on the creep and plasticity behaviors of nickel-based single crystal superalloy », *Computational Materials Science*, vol. 99, p. 348-360, mars 2015, doi: 10.1016/j.commatsci.2014.12.035.
- [4] G. Monnet, L. Vincent, et L. Gélébart, « Multiscale modeling of crystal plasticity in Reactor Pressure Vessel steels: Prediction of irradiation hardening », *Journal of Nuclear Materials*, vol. 514, p. 128-138, févr. 2019, doi: 10.1016/j.jnucmat.2018.11.028.

Approche variationnelle non linéaire des fissures et des dislocations

Godefroy Engrand¹, Antoine Ruffini¹, Yann Le Bouar¹, Alphonse Finel¹

¹ Université Paris-Saclay, ONERA, CNRS, Laboratoire d'Etude des Microstructures, 92320 Châtillon, France.

godefroy.engrand@onera.fr

Dans les matériaux cristallins, la fissuration est généralement couplée à une forte activité plastique. Une approche mésoscopique qui intègre l'ensemble des phénomènes en jeu doit donc rendre compte de la propagation des fissures et de leurs couplages avec la multiplication et le glissement des dislocations.

Fondamentalement, les fissures et les dislocations sont des défauts qui peuvent être décrits comme des discontinuités du champ de déplacement. Il doit donc être possible de construire un modèle qui n'utilise que le champ de déplacement comme variable locale. Ceci nécessite cependant d'identifier une fonctionnelle d'énergie élastique non linéaire invariante par rapport au groupe ponctuel du réseau de Bravais étudié, mais aussi par tous les cisaillements laissant le réseau invariant.

Dans cette présentation, nous montrerons comment construire un tel potentiel non linéaire infiniment dégénéré. Nous présenterons l'implémentation numérique de ce modèle et des résultats de simulations qui reproduisent la nucléation et la propagation de dislocations dans un système cristallin potentiellement fissuré.

Glass/crystalline ZrCu/Fe nanolaminates with tunable mechanical and electrical properties

Marco Ezequiel¹, Evgeniy Boltynjuk², Francesco Bignoli¹, Julia Ivanisenko², Damien Faurie¹, Philippe Djemia¹, Horst Hahn^{2,3}, Matteo Ghidelli¹

¹Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux (LSPM), CNRS, Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, 93430, France

²Institute of Nanotechnology, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, Eggenstein-Leopoldshafen, 76344, Germany

³University of Oklahoma, School of Sustainable Chemical, Biological and Materials Engineering, 201 Stephenson Pkwy., Norman, OK, 73019, United States

marco.ezequiel@lspm.cnrs.fr

16

Thin film metallic glasses (TFMGs) are an emerging class of materials that present outstanding mechanical properties, reaching yield strength up to ~ 3.5 GPa and homogenous plastic deformation (Ghidelli et al., 2017). Moreover, despite a higher electrical resistivity compared to their crystalline counterparts, TFMGs exhibit advantages such as no grain boundaries scattering, thermal stability, and good piezoresistance, facilitating their integration into the emerging domain of flexible electronics (Lee et al., 2020). However, key unresolved scientific issues are still present, such as understanding the effect of composition on mechanical/electrical behaviour and elucidating microscale deformation mechanisms necessary to develop new synthesis strategies aimed to boost both mechanical/electrical properties.

Here, we present a study on different physical vapour deposition strategies that aim to tune the composition, interface density, local segregations and the fraction of amorphous-ZrCu/crystalline-Fe phases while obtaining TFMG with varying structures: homogenous, nanolaminate or nanocolumnar.

Homogenous ZrCu_xFe_y with Fe content between 0 and 29 at% showed that Fe alloying slightly decreased the electrical resistivity while having a limited impact on the hardness and elastic modulus.

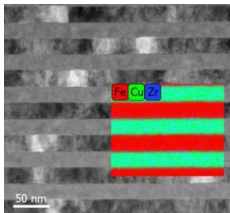


Figure 1 STEM HAADF and STEM-EDX of ZrCu/Fe multilayered TFMG with 20 nm bilayer period

Moreover, these films exhibited a strain of up to 3% before crack percolation during tensile tests on TFMG deposited on polymeric Kapton® substrates. In contrast, amorphous-ZrCu/crystalline-Fe nanolaminates with bilayer periods ranging from 10 to 40 nm (Figure 1) demonstrated a significant reduction in electrical resistivity, approaching values comparable to pure Fe. Additionally, tensile tests on samples deposited on Kapton® showed that the nanolaminates present a strain exceeding 14% before crack percolation. Overall, our findings highlight the impact of synthesis strategies to control the mechanical and electrical properties of glass/crystalline nanolaminates and increase their potential in the field of flexible electronics.

Ghidelli, M., Idrissi, H., Gravier, S., Blandin, J.-J., Raskin, J.-P., Schryvers, D., & Pardoën, T. (2017). *Acta Materialia*, 131, 246–259.

Lee, S., Kim, S. W., Ghidelli, M., An, H. S., Jang, J., Bassi, A. L., Lee, S. Y., & Park, J. U. (2020). *Nano Letters*, 20(7), 4872–4881.

Prise en compte des bandes de glissement dans la simulation numérique du comportement mécanique de polycristaux durcis

Gélébart Lionel¹, Protin Guillaume¹

¹Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherche en Matériaux et procédés Avancés, 91191, Gif-sur-Yvette, France

lionel.gelebart@cea.fr

Les matériaux durcis, par irradiation ou nano-précipitation, présentent une augmentation macroscopique de la limite d'élasticité ainsi que des bandes de glissement intense observées à l'échelle du grain [1]. A l'échelle d'un agrégat polycristallin, la plasticité cristalline conventionnelle ne permet pas de reproduire ce phénomène de bandes de glissement intense. Afin de favoriser cette localisation, les cisssions critiques sont ici définies par couches, de manière aléatoire selon un modèle de Weibull [2]. La figure 1, illustre l'intérêt de cette approche par une confrontation simulation / expérience sur un matériau Inconel 718 durci par nano-précipitation. De plus, cette approche permet de reproduire des effets de taille de grains et de microplasticité. Ces simulations 3D nécessitent une haute résolution spatiale, rendue possible par l'utilisation du code parallèle AMITEX_FFTP disponible sur (<https://amitexfftp.github.io/AMITEX/>).

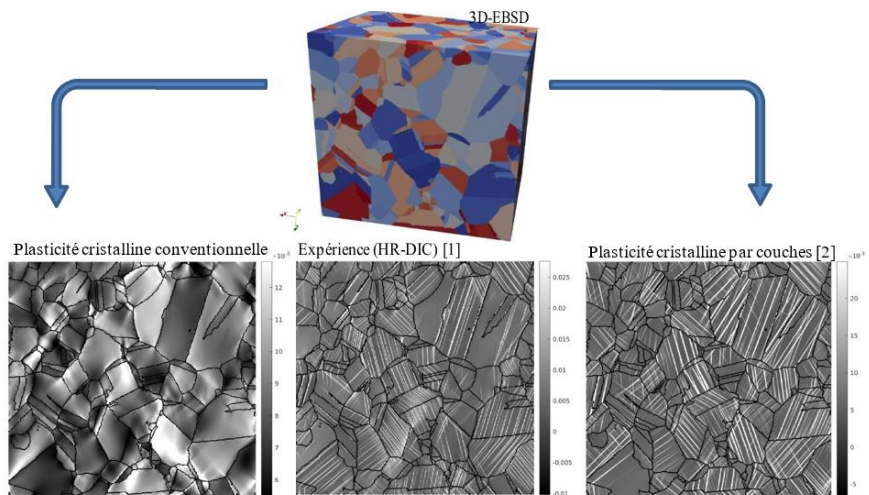


Figure 1 : Comparaison entre les champs de déformation, en surface, mesurés par HR-DIC [1] et simulés par différentes approches de la plasticité cristalline.

[1] Charpagne M.A. et al., Acta Materialia, 2021, 215, 117037

[2] Gélébart M., Comptes Rendus. Physique, Académie des sciences, Paris, 2021, 22, 313-330

Capacité de la dynamique moléculaire à prendre en compte l'asymétrie traction/compression dans les systèmes Ni₃Al/Ni observée dans les superalliages base nickel

Alla Ndiaye Dieng, Céline Gérard, Jonathan Cormier, Jean-Claude Grandidier
Institut Pprime (UPR 3346 CNRS – ISAE-ENSMA – Université de Poitiers), 1 Avenue Clément
Ader, BP 40109, Futuroscope Chasseneuil Cedex 86961, France

celine.gerard@ensma.fr

18

La microstructure des matériaux multiphasés nanostructurés permet des performances thermomécaniques particulièrement intéressantes. La dynamique moléculaire est ici utilisée pour mieux comprendre le lien entre microstructure et comportement à haute température de certains superalliages à base de nickel. Ainsi, le comportement mécanique du système Ni/Ni₃Al - γ/γ' a été étudié en réalisant des essais de traction et de compression à température ambiante et à haute température. Le système est d'abord relaxé thermiquement, conduisant à la formation de dislocations de misfit résultant de la différence entre les paramètres de réseau des phases. Un chargement mécanique est ensuite appliqué. Les évolutions du module élastique et de la limite d'élasticité en fonction de la température sont analysées. Les résultats obtenus indiquent une asymétrie traction/compression fonction de la direction du chargement, laquelle diminue avec l'augmentation de la température. Ce comportement est discuté en considérant la capacité des dislocations à glisser en fonction de la différence de propriétés entre phases selon la direction de chargement et l'évolution du décalage du réseau g/g' en fonction de la température.

Ability of molecular dynamics to take into account the tension/compression asymmetry in the Ni/Ni₃Al systems observed in nickel base superalloys, A. N. Dieng, C. Gerard, J. Cormier, J.C. Grandidier, J Nanopart Res (2023) 25:206

Modélisation continue des dislocations dans les alliages concentrés

Pierre-Antoine Geslin¹, Vincent Demery², Alberto Rosso³, David Rodney⁴

¹CNRS / INSA-Lyon / Univ. Lyon 1. Matesis, UMR 5510, 69621 Villeurbanne.

²ESPCI Paris / Univ. PSL. Gulliver, UMR 7083, 75005 Paris.

³CNRS / Univ. Paris Saclay. LPTMS, UMR 8626, 91405 Orsay.

⁴Univ. Lyon 1 / CNRS. ILM, UMR 5306, 69622 Villeurbanne

pierre-antoine.geslin@insa-lyon.fr

L'étude des alliages aléatoires présente un grand intérêt en métallurgie en raison du rôle du durcissement par solution solide dans de nombreux alliages industriels. De plus, ce mécanisme de durcissement est particulièrement mis à profit dans le développement récent des alliages à haute entropie [1].

Pour étudier le comportement des dislocations dans les alliages concentrés, notre travail s'articule autour de deux étapes. Nous avons d'abord développé un modèle élastique des alliages aléatoires dans lequel les atomes de différentes tailles sont modélisés comme des inclusions d'Eshelby. Notre modèle élastique peut être utilisé pour obtenir la variance des champs de contraintes mais aussi leurs corrélations spatiales qui présentent une forte anisotropie [2,3]. La deuxième étape consiste à étudier le comportement de dislocations dans un tel environnement de contraintes aléatoires mais corrélées [4]. Pour cela, nous utilisons les outils et les concepts développés pour l'étude de la transition de dépiégeage de lignes élastiques afin de caractériser (i) la rugosité de la ligne de dislocation en fonction de son caractère, (ii) la contrainte de dépiégeage en fonction de l'amplitude du bruit, (iii) l'influence d'un bruit thermique sur ces grandeurs. Ces résultats permettent notamment de discuter la validité des modèles statistiques de durcissement par solutions solides récemment proposés [5,6].

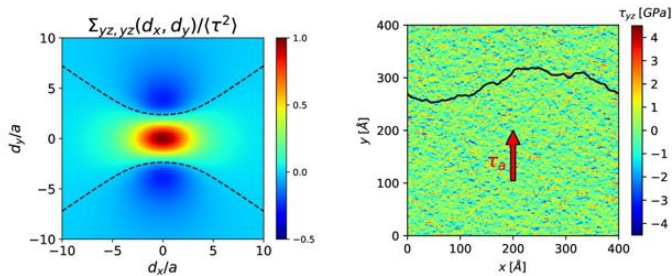


Figure 1. Gauche: corrélations de contrainte dans le plan de glissement de la dislocation. Droite: une dislocation coin évoluant dans un environnement de contrainte corrélés

- [1] Y. Zhang et al. Prog. Mater. Sci. 2014, p. 611–93.
- [2] P.-A. Geslin and D. Rodney. J. Mech. Phys. Sol. 153, 2021, 104479.
- [3] P.-A. Geslin, A. Rida, and D. Rodney. J. Mech. Phys. Sol. 153, 2021, 104480.
- [4] A. Rida et al. Phys. Rev. Mater. 6.3, 2022, 033605.

Nanoengineering high-performance metallic thin films with large and tunable yield strength and ductility

Francesco Bignoli^{1,3}, Andrea Brognara², Philippe Djemia¹, Andrea Li Bassi³,
Gerhard Dehm², Matteo Ghidelli^{1*}

¹Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, CNRS, Villeteuse, France.

²Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, Germany.

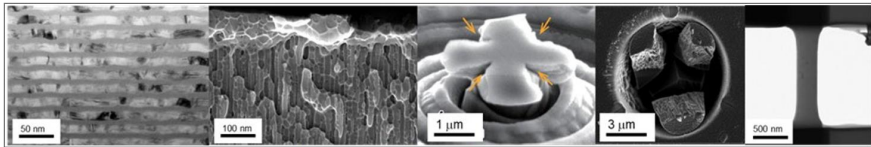
³Micro- and Nanostructured Materials Laboratory, Politecnico di Milano, Milan, Italy.

matteo.ghidelli@lspm.cnrs.fr

20

The current trend toward miniaturization in devices components requires the development of high-performance films with superior and tunable mechanical properties. Especially, mutually excluding structural properties such as high yield strength and ductility need to be combined, but also high substrate adhesion and large fatigue resistance. In order to trigger microstructure induced material properties, control of the atomic composition, average grain size and layer/film thickness must be optimized based on nanoengineering design concepts.

Here, I will present recent results for several class of advanced thin film materials including nanostructured metallic glasses (ZrCu, ZrCuAl)[1-3], high entropy alloys (Al/CoCuCrFeNi) and nanolaminates[4], highlighting how the control of microstructure affect the deformation mechanisms, enabling large/tunable mechanical properties. I will present the potential of Pulsed Laser Deposition (PLD) as a novel technique to synthesize nanostructured cluster-assembled films reaching ultimate yield strength (>4 GPa) and ductility (>15 %) for ZrCuAl/O films. Moreover, I will show how nanointerfaces in fully amorphous nanolaminates (nanolayers from 100 down to 5 nm) influences the deformation behavior suppressing the shear bands, while achieving a balance of large ductility (> 10%) and yield strength (>2.5 GPa). Overall, our results pave the way to the development of nanostructured thin films with boosted mechanical properties and wide application range.



Synthesis of nanostructured metallic films and micro- and nanoscale mechanical testing.

- [1] M. Ghidelli et al., Novel class of nanostructured metallic glass films with superior and tunable mechanical properties, *Acta Mater.* 213 (2021) 116955.
- [2] C. Poltronieri, A. Brognara, F. Bignoli, S. Evertz, P. Djemia, D. Faurie, F. Challali, C. Li, L. Belliard, G. Dehm, J.P. Best, M. Ghidelli, Mechanical properties and thermal stability of ZrCuAl_x thin film metallic glasses: Experiments and first-principle calculations, *Acta Mater.* 258 (2023) 119226.
- [3] A. Brognara, J.P. Best, P. Djemia, D. Faurie, G. Dehm, M. Ghidelli, Effect of composition and nanostructure on the mechanical properties and thermal stability of Zr100-xCux thin film metallic glasses, *Mater. Design* 219 (2022) 110752.
- [4] G. Wu, M. Ghidelli et al., Symbiotic crystal-glass alloys via dynamic chemical partitioning, *Mater. Today* 51 (2021) 6-14.

Plasticité de la perovskite SrTiO₃ : dislocations neutres ou chargées, glissiles ou sessiles

Pierre Hirel, Philippe Carrez, Patrick Cordier

Univ. Lille, CNRS, INRAE, Centrale Lille, UMR 8207 - UMET - Unité Matériaux et Transformations, F-59000 Lille, France

pierre.hirel@univ-lille.fr

Depuis la découverte de la ductilité du titanate de strontium SrTiO₃ en 2001 [1], il a été établi qu'elle est principalement associée à l'activité des dislocations dans les systèmes de glissement $\langle 110 \rangle \{110\}$. Cependant, de nombreuses questions demeurent sur la structure de cœur de ces dislocations à l'échelle atomique, sur leur charge électrique, et sur leur lien avec la transition ductile-fragile [6].

À l'aide de simulations à l'échelle atomique, nous montrons la richesse de propriétés des dislocations dans SrTiO₃. Les dislocations vis dominent la plasticité à basse température, avec une compétition entre mouvements successifs ou simultanés des partielles [6]. Les dislocations coin peuvent porter une charge électrique [4], ce qui influe grandement sur leur mobilité et leurs interactions avec les lacunes. À haute température, la perte de ductilité est sans doute due à un changement de structure de cœur, les segments coin se dissociant dans leur plan de montée [5]. Enfin, à l'aide d'expériences numériques de nano-indentation, nous cherchons à caractériser les dislocations qui se nucléent, et leurs interactions.

[1] D. Brunner et al., J. Am. Ceram. Soc. 84 (2001) 1161-1163.

[2] P. Hirel et al., Acta Mater. 58 (2010) 6072-6079.

[3] P. Hirel et al., Acta Mater. 60 (2012) 329-338.

[4] D. Marrocchelli et al., J. Amer. Chem. Soc. 137 (2015) 4735-4748.

[5] P. Hirel et al., Scripta Mater. 120 (2016) 67-70.

[6] S. Ritterbex et al., Philos. Mag. 98 (2018) 1397-1411. [7] A.J. Klomp et al., Acta Mater. 242 (2023) 118404.

Zirconia's Bizarre Adventure: TRIPping with a Messy Twist

Gaël Huynh, Jin-Yu Zhang, Tristan Albaret, David Rodney

Univ Lyon 1, ILM UMR CNRS 5306, Villeurbanne, F-69622, France

gael.huynh@univ-lyon1.fr

Similarly to steels, zirconia ceramics can exhibit transformation-induced plasticity (TRIP) due to a tetragonal (t) to monoclinic (m) phase transformation. This unique characteristic provides zirconia ceramics with a substantial plastic strain, reaching up to a remarkable 7% [1]. However, a comprehensive understanding of this effect remains elusive, impeding the development of ceramics exhibiting macroscale deformability exceeding 1%. Furthermore, the absence of interatomic potentials able to describe the polymorphism and phase transformations in ZrO₂ makes the fundamental understanding of the TRIP effect at the atomic scale challenging. In the present work, we introduce a neural network interatomic potential (NNP) [2] and employ it to investigate the orientation dependence of the TRIP effect in zirconia ceramics.

The NNP presented in this work was trained on *ab initio* data using the DeepMD-kit package [3]. Our model's predictions for various structural and dynamic properties demonstrated excellent agreement with *ab initio* calculations. Additionally, we calculated the predicted phase diagram, which yields satisfactory results for the region of interest in this work.

For a comprehensive review of the plastic behavior of the material, we used the developed model to simulate flat punch compression of initially tetragonal ZrO₂ ceramics. Deformation process, critical stress-strain states, phase transformations were investigated for both ZrO₂ and Ce-ZrO₂ for a large number of compression directions spanning the entire standard triangle.

Our simulations challenge the prevailing notion that the TRIP effect in zirconia is solely governed by the t-m transformation. Instead, we demonstrate that a complex interplay of competitive metastable phases, orthorhombic and monoclinic, plays a crucial role in dictating the material's deformation behavior. We use the phenomenological theory of martensitic transformation to analyze the competition between these phases. An interesting question, which remains to be explored, is why these phases have not been reported experimentally so far: an effect of size, temperature or strain rate, a lack of realism of the NNP or have these phases been overlooked experimentally in the past ?

[1] A. Lai, Z. Du, C. Schuh, *Science*, 341, 1505-1508 (2013)

[2] J. Zhang et al., *Journal of the European Ceramic Society*, preprint (2024)

[3] H. Wang et al., *Computer Physics Communications*, 228, 178 (2018)

On the origin of plasticity at twist basal grain boundaries in Ti-Al alloy

D. Iabbaden¹, S. Hémerly² and J. Guérolé¹

¹Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers, LEM3, Metz, France

²Institut Pprime, ISAE-ENSMA, Université de Poitiers, CNRS UPR 3346, France

djafar.iabbaden@univ-lorraine.fr

Ti and Ti-Al alloy materials are involved in several applications going from medical implants to aeronautics. Despite this applicative potential the plasticity of these materials remains not fully understood. In this context, understand and predict their performance, in particular under a severe external conditions is fundamental. Herein, basal twist grain boundaries (GB) within the coincident site lattice (CSL) theory and their impact on the plasticity of a Ti-10Al alloy are investigated. Atomistic simulations have been conducted using the LAMMPS software to deliver insights into the structural and mechanical behavior of these GB in pure Ti and basal CSL grain boundaries, namely $\Sigma 7$, $\Sigma 13$, $\Sigma 19$, $\Sigma 31$, $\Sigma 37$, $\Sigma 43$, $\Sigma 49$, $\Sigma 61$, $\Sigma 67$, $\Sigma 73$, $\Sigma 79$, $\Sigma 91$, $\Sigma 91c$, and $\Sigma 97$. In particular, the fracture strength of these GB is computed and discussed in the light of experimental results. A special care is taken to consider the effect of substitutional Al solute in Ti basal GB by using a hybrid molecular dynamics / Monte Carlo numerical approach.

Stress-induced amorphization and grain boundary sliding in olivine

Hosni IDRISSE

Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium,

hosni.idrissi@uclouvain.be

24

(Mg, Fe)₂SiO₄ olivine is the most volumetric abundant mineral phase in the upper mantle down to 410 depth and also the one which deforms the most and controls the rheology of the upper mantle. Deformation mechanisms in olivine have attracted considerable attention since several decades. One of the problems with this orthorhombic mineral is that there are not enough slip systems to produce a general deformation. The observation of a non-linear deformation regime depending on the grain size has led to the suggestion of the possibility of slip at the grain boundary [1], which has only recently been demonstrated microstructurally [2].

In this work we show that under high stresses, this grain boundary sliding can be due to the amorphization of the grain boundary and to the flow of this amorphous intergranular phase [3]. We show how nanomechanical testing in situ in the TEM on olivine bi-crystals and on amorphous olivine films allows to characterize this individual mechanism as well as the rheology of amorphous olivine. We finally propose that this mechanism of stress-induced amorphization is an important deformation mechanism in its own right under conditions of high stress [4].

[1] Hirth, G., & Kohlstedt, D. (1995) Experimental constraints on the dynamics of the partially molten upper mantle: 2. Deformation in the dislocation creep regime, *Journal of Geophysical Research*, 100, 15,441–449.

[2] Bollinger, C., Marquardt, K. & Ferreira, F. (2019) Intragranular plasticity vs. grain boundary sliding (GBS) in forsterite: microstructural evidence at high pressures (3.5–5.0 GPa). *American Mineralogist* 104, 220–231.

[3] V. Samae, P. Cordier, S. Demouchy, C. Bollinger, J. Gasc, S. Koizumi, A. Mussi, D. Schryvers & H. Idrissi. Stress-induced amorphization triggers deformation in the lithospheric mantle. *Nature*, 2021, 591, 82

[4] Idrissi, H., Carrez & P.Cordier, P. (2022) On amorphization as a deformation mechanism under high stresses. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*. 26(1), 100976

Compréhension du lien entre maclage et transformation martensitique sous contrainte dans un alliage de titane β -métastable

Nicolas Jobit^{1,2}, Philippe Castany¹, Fan Sun², Thierry Gloriant¹, Frédéric Prima²

¹Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, ISCR UMR 6226, 35000 Rennes, France

²PSL Research University, Chimie ParisTech-CNRS, Institut de Recherche de Chimie Paris, 75005 Paris France

nicolas.jobit@insa-rennes.fr

Les matériaux métalliques sont très répandus dans le domaine biomédical, notamment pour réaliser différents types d'implants et de prothèses. Cependant, la majorité des alliages utilisés actuellement, comme l'acier 316L ou la famille des alliages Cobalt-Chrome, contiennent de nombreux éléments présentant des problèmes de toxicité. En effet, le cobalt, le chrome ou encore l'aluminium ont été reconnus comme nocifs et/ou pouvant provoquer certaines maladies neurologiques comme la maladie d'Alzheimer. Il apparaît donc nécessaire de les remplacer par de nouveaux alliages, n'ayant pas d'impact sur la santé.

Au sein des candidats possibles, les alliages de titane se révèlent être une solution viable puisque cet élément est totalement biocompatible. Parmi eux, la catégorie des alliages β -métastable semble la plus adaptée. En effet, les éléments d'addition utilisés peuvent également être bio-compatibles, et les propriétés mécaniques de ces alliages sont très proches de celle de l'os. Ces deux caractéristiques permettent de réduire considérablement le taux de rejet des implants.

Toutefois, leur application concrète reste conditionnée par la compréhension fondamentale de leurs mécanismes de déformation, afin de les utiliser de manière optimale. En effet, ces alliages ont pour particularité de pouvoir se déformer via trois mécanismes de déformation : une transformation martensitique sous contrainte, pouvant générer un effet TRIP (Transformation Induced Plasticity), le maclage, conduisant à un effet TWIP (TWinning Induced Plasticity), ainsi que par le glissement de dislocations.

Dans ce but, un alliage binaire modèle Ti-27Nb (% at) a été élaboré. Cet alliage a l'avantage de combiner une transformation martensitique sous contrainte et une déformation par maclage, permettant une étude approfondie de ces deux mécanismes, ainsi que leurs liens et leurs interactions.

Des caractérisations mécaniques à température ambiante ont été effectuées pour déterminer les propriétés mécaniques de l'alliage. Elles ont été complétées par des analyses EBSD et au mi-croscopie électronique en transmission à différents taux de déformation pour connaître la séquence d'apparition et les évolutions des mécanismes tout au long de la déformation. L'accent sera particulièrement porté sur l'étude des liens entre transformation martensitique et maclage.

Irreversible evolution of dislocation pile-ups during cyclic micro-cantilever bending

Szilvia Kalácska¹, Dávid Ugi², Kolja Zoller³, Kolos Lukács², Zsolt Fogarassy⁴, István Groma², Katrin Schulz³, and Péter D. Ispánovity²

¹Mines Saint-Etienne, Univ Lyon, CNRS, UMR 5307 LGF, Centre SMS, Saint-Étienne, France

²ELTE Eötvös Loránd University, Department of Materials Physics, Budapest, Hungary

³Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Applied Materials (IAM), Karlsruhe, Germany

⁴Centre for Energy Research, Institute of Technical Physics and Materials Science, Budapest, Hungary

szilvia.kalacska@cnsr.fr

26

In metals geometrically necessary dislocations (GNDs) are generated primarily to accommodate strain gradients and they play a key role in the Bauschinger-effect, strain hardening, micron-scale size effects and fatigue. During bending large strain gradients naturally emerge which makes this deformation mode exceptionally suitable to study the evolution of GNDs. Here we present bi-directional bending experiment of a Cu single crystalline microcantilever with in situ characterization of the dislocation microstructure in terms of high-resolution electron backscatter diffraction (HR-EBSD). The experiments are complemented with dislocation density modelling to provide physical understanding of the collective dislocation phenomena. We find that dislocation pile-ups form around the neutral zone during initial bending, however, these do not dissolve upon reversed loading, rather they contribute to the development of a much more complex GND dominated microstructure. This irreversible process is analysed in detail in terms of the involved Burgers vectors and slip systems. We conclude that at this scale the most dominant role in the Bauschinger-effect and corresponding strain hardening is played by short-range dislocation interactions. The in-depth understanding of these phenomena will aid the design of microscopic metallic components with increased performance and reliability [1].

[1] D. Ugi et al., Irreversible evolution of dislocation pile-ups during cyclic microcantilever bending. *Materials & Design* 238 (2024)112682. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.112682

Mesure du comportement viscoplastique des matériaux à l'échelle du micron

Guillaume Kermouche¹, Bénédicte Adogou¹, Sergio Sao-Joao¹, Szilvia Kalacska¹, Gaylord Guillonnet²,
Gabrielle Tiphène², Jean-Luc Loubet², Marc Fivel³, Etienne Barthel⁴, Mathieu Bourguignon⁴, Gustavo
Rosales⁵

¹Mines Saint-Etienne, Laboratoire Georges Friedel, CNRS UMR 5307, 158 Saint-Etienne – France

²Univ Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, ENTPE, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des
Systèmes, UMR5513, 69130 Ecully, France

³SIMaP-GPM2, Univ Grenoble Alpes, UMR CNRS 5266

⁴ESPCI ParisTech, Sciences et Ingénierie de la matière Molle, CNRS UMR 7615, Paris - France

⁵Nippon Electric Glass, 7-1, Seiran 2-Chome, Otsu, Shiga 520-8639, Japan

kermouche@emse.fr

La prédiction de la durabilité des matériaux et des revêtements soumis à des sollicitations mécaniques de surface dépend étroitement de notre capacité à analyser leur comportement mécanique à l'échelle de quelques micromètres. Les techniques de nanoindentation ou de compression de micro-piliers se sont imposés depuis une vingtaine d'années comme les essais de référence dans ce domaine. Ils sont à la base de nombreuses découvertes sur les effets de taille, comme l'extraordinaire ductilité de matériaux fragiles aux petites échelles ou encore l'augmentation quasi-continue de la limite d'élasticité des métaux lorsque le volume sondé mécaniquement diminue. Les importants progrès réalisés ces dernières années en matière d'instrumentation et de visualisation, notamment grâce aux essais micromécaniques in situ dans des microscopes électroniques, ouvrent la voie vers de nouveaux défis « expérimentaux » en lien avec les conditions extrêmes, telles que les hautes températures, les hautes vitesses de déformation, les environnements agressifs, les effets d'irradiation, ...

Dans la première partie de cette présentation, nous nous focaliserons sur les développements récents permettant de sonder le comportement viscoplastique des matériaux à l'échelle du micron sur un spectre large de vitesse de déformation (10-8 - 104 /s). Ceci est aujourd'hui possible grâce aux développements de procédures d'essais très spécifiques [1] et en jouant sur la forme des micro-éprouvettes [2]. Nous illustrons ces méthodes en les appliquant à divers matériaux allant des amorphes (ex : verres d'oxyde) à des matériaux cristallins (ex cuivre pur).

Dans la seconde partie de cette présentation, nous mettrons en lumière l'impact de l'irradiation électronique sur la viscoplasticité des verres d'oxyde lors d'essais in-situ. A partir d'essais micromécaniques mêlant indentation / compression / relaxation, nous montrons que l'irradiation joue un rôle équivalent à la température sur la viscosité du matériau, avec à la clé une potentielle équivalence temps-irradiation similaire à la « bien connue » équivalence temps-température. Ce phénomène relativement méconnu peut conduire à des conclusions hâtives sur la nature hyper-ductile de certains matériaux [3].

[1] Baral, P., Kermouche, G., Guillonnet, G., Tiphène, G., Bergheau, J. M., Oliver, W. C., & Loubet, J. L. (2020). *Materials Science and Engineering: A*, 781, 139246

[2] Guillonnet, G., Sao Joao, S., Adogou, B., Breumier, S., & Kermouche, G. (2022). *JOM*, 74(6), 2231-2237.

[3] Kermouche, G., Guillonnet, G., Michler, J., Teisseire, J., & Barthel, E. (2016). *Acta Materialia*, 114, 146-153.

Intégration de la plasticité intermittente indépendante du temps en mécanique des milieux continus

M. Lamari, P. Kerfriden, V. Yastrebov, K. Ammar, S. Forest¹

Mines Paris PSL, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, Evry, France

mathias.lamari@minesparis.psl.eu

28

Le flux plastique est conventionnellement traité comme continu dans les codes éléments finis (EF), que ce soit en plasticité isotrope ou cristalline. Cette approche, dérivée de la mécanique des milieux continus, contredit la nature intermittente de la plasticité à l'échelle élémentaire. Lors de la compression de micropiliers, la courbe contrainte-déformation présente des saillies marquées, liées à l'activation abrupte d'un très petit nombre de plans de glissement [1]. L'émission acoustique sur des échantillons de taille centimétrique démontre également la nature organisée de l'écoulement plastique liée aux avalanches de dislocations [2].

La compréhension de la plasticité cristalline à l'échelle nanoscopique ouvre la voie à de nouvelles applications en ingénierie, telles que l'usinage à l'échelle nanométrique et la conception de nouveaux matériaux radicaux. Divers modèles dans la littérature démontrent également l'intermittence de la plasticité, tels que les modèles tensoriel mésoscopique [3], de dynamique moléculaire et de dynamique discrète des dislocations. Ces modèles reproduisent la nature corrélée des avalanches de dislocations.

Dans ce travail, nous proposons une nouvelle approche pour tenir compte de l'intermittence de la déformation plastique tout en restant dans le cadre de la mécanique des milieux continus. Nous introduisons une constante, le seuil plastique, noté Δp_{min} , correspondant à la déformation plastique portée par l'avalanche de dislocations minimale au sein du matériau. Le modèle incrémental est basé sur l'algorithme traditionnel prédicteur-correcteur pour calculer le comportement élastoplastique d'un matériau soumis à une déformation externe. Le modèle est présenté dans le cadre des petites déformations pour la plasticité de von Mises. L'incrément de déformation plastique Δp est calculé en utilisant des règles de normalité et n'est pris en compte que s'il est supérieur à Δp_{min} . Les simulations montrent que l'introduction du seuil plastique permet d'introduire une localisation spatiotemporelle dans l'écoulement plastique dans des scénarios de chargement complexes au sein d'un code EF. Le modèle est indépendant de la vitesse. Une extension du modèle en plasticité cristalline sera discutée.

[1] P. Zhang, O. U. Salman, J.Y. Zhang, G. Liu, J. Weiss, L. Truskinovsky, J. Sun, Taming intermittent plasticity at small scales, *Acta Materialia*, vol. 128, p.351-p.364, 2017.

[2] J. Weiss, T. Richeton, F. Louchet, F. Chmelik, P. Dobron, D. Entemeyer, M. Lebyodkin, T. Lebedkina, C. Fressengeas, R. J. McDonald, Evidence for universal intermittent crystal plasticity from acoustic emission and high-resolution extensometry experiments, *Physical Review B*, vol. 76, p.224110-1-p.224110-8, 2007.

[3] R. Baggio, O.U. Salman, L. Truskinovsky, Inelastic rotations and pseudoturbulent plastic avalanches in crystals, *Physical Review E*, vol. 107, p.005000-1-p.005000-19, 2023.

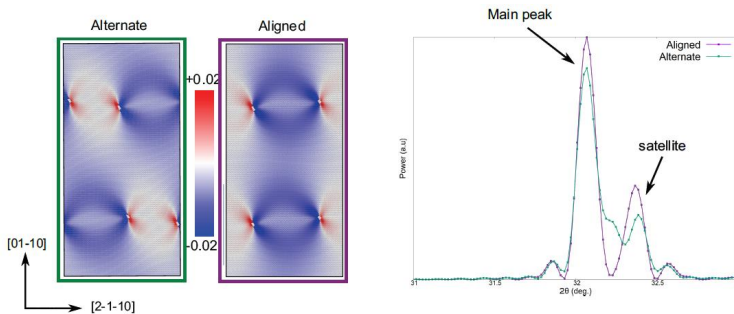
Analyse de spectres RX simulés à l'aide de modèles atomistiques de défauts d'irradiation dans l' α -Zr

M.Larranaga, C.P.Race , P.Frankel

University of Manchester, Henry Royce Institute, UK

larranagamelvyn@gmail.com

Les gaines de combustible dans les réacteurs à fission nucléaire sont des pièces de coeur que l'on trouve le plus souvent sous la forme d'un assemblage de barres creuses entourant le combustible (généralement des pastilles d'UO₂). Principalement en raison de sa faible section efficace d'interaction avec les neutrons thermiques, le zirconium allié est généralement choisi comme composant principal des barres combustibles. Cependant, l'exposition à une irradiation neutronique peut conduire à une déformation macroscopique de la gaine se traduisant par exemple par une croissance dans sa direction transversale. Cette évolution dimensionnelle est associée à un élargissement et plus généralement à un changement de forme des pics du spectre des rayons X du matériau de gaine. A l'échelle microscopique on observe l'apparition d'une population de boucles de dislocation dont les caractéristiques (type, taille, densité, arrangement) dépendent, entre autres, de la dose d'irradiation et de la température. L'analyse de la forme des pics dans le spectre RX de ces matériaux irradiés permet parfois une quantification indirecte de la distribution des dislocations sur de larges volumes en comparaison de ceux accessibles à des techniques d'imagerie directe comme la MET (typiquement 3 à 4 fois supérieures) [1]. Bien qu'il soit désormais commun d'utiliser ces deux techniques en synergie, l'interprétation des résultats n'est pas toujours triviale. Afin d'aiguiller au mieux les analyses on peut tirer parti de la possibilité de simuler les spectres RX produits à partir de modèles atomistiques de matériaux irradiés. L'introduction des dislocations de façon ad hoc permet une étude précise de l'influence de différents défauts sur la forme des spectres. Des modèles 3D et 2D d' α -Zr pur contenant diverses populations de dislocations de type $\langle a \rangle$ (prismatiques) sont considérés ici et des analyses des spectres résultants sont proposés aux moyens d'observations directes et / ou via leur représentation en série de Fourier. L'influence des corrélations spatiales et de la taille des boucles (ou dipôles) de dislocations sont discutés et, lorsque possible, certaines méthodes standard d'analyse sont testées à la lumière de ce que l'on sait sur nos modèles.



Vue en cross section d'une carte de déformation élastique d'un réseau périodique de boucles $\langle a \rangle$ (gauche) et spectres 01-10 correspondants (droite)

[1] Tamas Ungar et al., Characterizing dislocation loops in irradiated polycrystalline Zr alloys by X-ray line profile analysis of powder diffraction patterns with satellites, J. Appl. Cryst. (2021). 54, 803–821.

Étude atomistique du glissement des dislocations vis dans le tungstène en présence d'hydrogène

Thomas LEVEAU, Lisa VENTELON, Mihai-Cosmin MARINICA, Emmanuel CLOUET

CEA-SACLAY DES/ISAS/DRMP/S2CM/SRMP

thomas.levreau@cea.fr

Les observations expérimentales en microscopie électronique à transmission dans le fer cubique cent-tré en présence d'hydrogène montrent une accélération du glissement des dislocations vis $12\langle 111 \rangle$ à basse température [1][2]. De plus, de récentes études *ab initio* des dislocations vis dans le fer et dans le tungstène en présence d'hydrogène mettent en évidence une forte attraction de l'hydrogène dans le coeur des dislocations conduisant à une reconstruction du coeur vers une configuration difficile avec trois atomes d'hydrogène ségrégués au coeur de la dislocation par vecteur de Burgers [3][4].

Notre étude a pour but de mieux comprendre les mécanismes expliquant la mobilité accrue des dislocations en présence d'hydrogène, en intégrant les résultats de nos précédentes études *ab initio*. Cette étude atomistique se compose (i) de nouveaux calculs *ab initio* pour déterminer la hauteur de la barrière permettant le glissement d'une dislocation saturée en hydrogène dans le tungstène et (ii) de la construction d'un potentiel interatomique de type machine learning (ML) basé sur celui du tungstène pur [5]. Ce potentiel ML permet d'effectuer des simulations de dynamique moléculaire pour déterminer la vitesse de glissement des dislocations avec et sans hydrogène à différentes contraintes et pour différentes températures.

L'étude *ab initio* nous a permis de déterminer plusieurs chemins de migration de la dislocation décorée de ses trois atomes d'hydrogène d'une vallée de Peierls à la suivante, sans pour autant identifier un chemin préférentiel. Les différents chemins mènent à des barrières du même ordre de grandeur, dont l'énergie maximale est similaire à celle de l'enthalpie de formation d'un double décrochement dans le tungstène pur [6]. Ces calculs *ab initio* seuls ne permettent donc pas de comprendre pourquoi l'hydrogène facilite le glissement des dislocations vis à basse température, d'où la nécessité de développer un potentiel empirique pour pouvoir réaliser des simulations de dynamique moléculaire. L'ensemble des calculs *ab initio* ont été utilisés pour construire un potentiel ML tungstène-hydrogène représentant correctement les propriétés des dislocations avec et sans hydrogène dans le tungstène ainsi que les propriétés de l'hydrogène dans le tungstène sans présence de défaut. Le glissement de la dislocation, avec et sans hydrogène, est ensuite étudié par dynamique moléculaire.

[1] T. Tabata, H. K. Birnbaum, Scr. Metall. 17 947950 (1983).

[2] L. Huang, D. Chen, D. Xie, S. Li, Y. Zhang, T. Zhu, D. Raabe, E. Ma, J. Li, Z. Shan, Nat. Mater. 22, 710 (2023).

[3] P.P.O Borges, E. Clouet, L. Ventelon, Acta Mater. 234, 118048 (2022).

[4] Y.H. Li, H-B. Zhou, F. Gao, G. Lu, G-H. Lu, F. Liu, Acta Mater. 226, 117622 (2022).

[5] A. Goryaeva, J. Dérès, C. Lapointe, P. Grigorev, T. Swinburne, J. Kermodé, L. Ventelon, J. Baima, M.-C. Marinica, Phys. Rev. Mater. 5, 103803 (2021).

[6] E. Clouet, B. Bienvenu, L. Dezerald, D. Rodney, C. R. Phys. 22, 83 (2021)

A finite deformation thermomechanical model of field dislocations

Gabriel D. Lima-Chaves¹, Manas V. Upadhyay¹, Amit Acharya²

¹Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS), CNRS UMR 7649, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Route de Saclay, 91120 Palaiseau, France

²Department of Civil and Environmental Engineering, and Center for Nonlinear Analysis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, United States

gabriel-dante.lima-chaves@polytechnique.edu

In this work, we introduce a continuum framework for modelling the fully coupled thermomechanics of dislocations in a geometrically non-linear setting. With respect to the isothermal field dislocation mechanics theory, the novelty is in (i) the development of a kinematic relationship for the evolution of a general defect capturing dislocations and incompatibility in thermal strains, as well as in (ii) the consideration of thermal strain effects due to a transient heterogeneous temperature field on the stress state.

The motivation to develop this model arises from the need for a continuum framework that can study the evolution of line-type defects under any thermomechanical processing. The small deformation theory [1] and its finite element implementation [2] allowed for an initial comprehension of the temperature evolution due to dislocation activity. The necessity for the generalization to the geometrically non-linear case became clear when dealing with dislocations moving at large velocities (close to the material shear wave velocity) or under rapidly evolving thermomechanical boundary conditions.

A key point of the model is that it does not require the use of a multiplicative decomposition of the deformation gradient, which cannot be uniquely specified. Instead, as shown for the mechanical theory in [3], based on the conservation of the Burgers vector, we arrive at the classical additive decomposition of the velocity gradient into elastic, plastic and thermal components.

In this talk, the kinematical aspects of the large deformation dislocation thermomechanical model and the governing equations arising from conservation laws will be presented. The thermodynamical considerations will also be shown, alongside the resulting constitutive relations.

[1] UPADHYAY, Manas V. On the thermo-mechanical theory of field dislocations in transient heterogeneous temperature fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, vol. 145, p. 104150.

[2] LIMA-CHAVES, Gabriel D., UPADHYAY, Manas V. Finite element implementation of the thermal field dislocation mechanics model: study of temperature evolution due to dislocation activity. 2023 (hal-04228912).

[3] ACHARYA, A., and ZHANG, X. From dislocation motion to an additive velocity gradient decomposition, and some simple models of dislocation dynamics, *Chinese Annals of Mathematics*, 2015, 36B(5), 645-658.

Étude de l'interaction entre l'hydrogène et les dislocations vis dans Fer-a par des simulations multi-échelles

Margot Lucas¹, Marie Landeiro Dos Reis¹, Sylvain Queyreau², Xavier Feugas¹

¹LaSIE UMR - 7356 CNRS - Université de La Rochelle

²LSPM UPR - 3407 CNRS - Université Sorbonne Paris Nord

margot.lucas@univ-lr.fr

L'hydrogène peut induire un endommagement dans de nombreux matériaux et conduire ainsi à leur fragilisation. Malgré une faible solubilité dans le fer-a, l'hydrogène s'absorbe facilement et diffuse aisément à travers le réseau cristallin [1-3]. Son interaction avec les autres défauts a des conséquences à l'échelle macroscopique (modifications des microstructures et propriétés mécaniques, fragilisation par l'hydrogène...). Dans nos travaux, nous nous sommes focalisés uniquement sur l'interaction entre l'hydrogène et les dislocations vis. L'effet de l'hydrogène sur la mobilité des dislocations reste mal compris et dépend de nombreux facteurs, tels que la vitesse de déformation, la température, l'état de contrainte ou encore la mobilité du soluté. Ils engendrent des effets antagonistes. D'une part, un durcissement par le piégeage d'hydrogènes dans le cœur qui va ralentir le glissement de la dislocation [4-6]. Et d'autre part, un adoucissement du fer-a qui réduit potentiellement la densité électronique locale favorisant la nucléation des doubles décrochements en abaissant l'enthalpie de formation associée [7,8].

À l'aide d'une approche classique de la Dynamique Moléculaire basée sur un potentiel NNIP (en accord avec la DFT) [9], nous avons étudié la ségrégation et diffusion du soluté au voisinage de la dislocation puis la mobilité de la dislocation vis en présence du soluté. Pour cela, nous avons évalué le paysage énergétique de l'interaction entre l'hydrogène et le cœur de la dislocation en fonction de sa concentration et des différents sites qui lui sont offerts. Le cœur, impacté par la présence du soluté à courte portée, se reconstruit localement. Cependant, cette interaction est limitée aux premiers voisins et devient négligeable à partir d'une certaine distance. Afin de caractériser les processus de diffusion au voisinage du cœur, nous avons calculé les barrières de migrations [10] entre les différents sites possibles. Nous avons ensuite examiné la mobilité des dislocations avec différents niveaux de contraintes. Pour cela, nous avons caractérisé, en amont, l'impact de l'hydrogène sur le processus de formation de paires de décrochements. L'ensemble de ces résultats de simulations constituent une base de données de référence pour nos futures simulations de Monte Carlo Cinétique dans lesquelles la dynamique d'une dislocation en présence d'une population d'atomes d'hydrogène sera modélisée. Ils seront également confrontés à la théorie de l'élasticité anisotrope, qui permettra de dessiner les contours de son domaine de validité et d'ouvrir la voie à des approches de type DDD.

[1] P. Ferrin, et al. 606.7-8(2012) : 679-689.

[2] D. E. Jiang, et al. 70.6 (2004) : 064102.

[3] K.Kiuchi et al. 1986.29-52.

[4] V. Gaspard, Thèse de Doctorat 2014.

[5] X. Feugas, et al. 2019. 199-222.

[6] D. N. Blaschke, et al. 144(2021) : 103030.

[7] M. Itakura, et al. 61.18 (2013) : 6857-6867.

[8] M. Wen, et al. 51.6(2003): 1767-1773.

[9] Meng, Fan-Shun, et al. 5.11(2021):113606.

[10] G. Henkelman, et al. 113(22):9901-9904, 2000.

Influence de l'irradiation et de la déformation sur la transmission du glissement aux joints de grains dans les aciers austénitiques

Thomas-Xavier Masset, Jérémy Hure, Benoît Tanguy

Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Étude des Matériaux Irradiés, Gif-sur-Yvette, 91191, France

thomas-xavier.masset@cea.fr

La corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation (IASCC) affecte les structures internes des réacteurs à eau pressurisée, pouvant entraîner la rupture intergranulaire de certains composants en acier inoxydable austénitique [1]. Après irradiation, il a été observé que la discontinuité du glissement aux joints de grains est fortement corrélée à la fissuration intergranulaire [2], ce qui peut s'expliquer par la singularité des contraintes à l'intersection entre bande de glissement et joint de grains. Plus le niveau d'irradiation augmente, moins de bandes de glissement sont observées pour un même niveau de déformation, ce qui donne lieu à des contraintes locales plus élevées. Pour modéliser la sensibilité à l'amorçage de la fissuration intergranulaire, il est donc crucial d'obtenir un critère fiable qui puisse prédire la discontinuité du glissement aux joints de grains dans les aciers inoxydables austénitiques, et qui dépende à la fois de la déformation et du niveau d'irradiation. Cependant, aucun critère de ce type n'est actuellement disponible dans la littérature. Dans cette étude, des expériences de traction in-situ MEB sur un échantillon non irradié et deux échantillons en 304L irradiés aux protons ont été menées séquentiellement pour deux incréments de déformation plastique (2,5 % et 5 %). Les zones d'intérêt ont été cartographiées par EBSD avant déformation, suivie d'images au microscope électronique à balayage des mêmes zones après chaque incrément de déformation. La transmission du glissement est évaluée pour tous les joints de grains en fonction des orientations cristallographiques des grains adjacents. Le système de glissement activé dans chaque grain est évalué à l'aide du critère de Schmid, en supposant des conditions de contrainte uniaxiale ou en utilisant des simulations FFT reposant sur la microstructure réelle. À l'état irradié, les données expérimentales obtenues sont cohérentes avec les critères proposés dans la littérature pour les matériaux CFC. Enfin, nous discutons des effets de l'irradiation et du niveau de déformation.

[1] P Scott. "A review of irradiation assisted stress corrosion cracking". In: Journal of nuclear materials 211.2 (1994), pp. 101–122.

[2] Z Jiao and GS Was. "Impact of localized deformation on IASCC in austenitic stainless steels". In: Journal of Nuclear Materials 408.3 (2011), pp. 246–256.

Comportement thermo-élastique de la martensite Fe-C – Une étude théorique

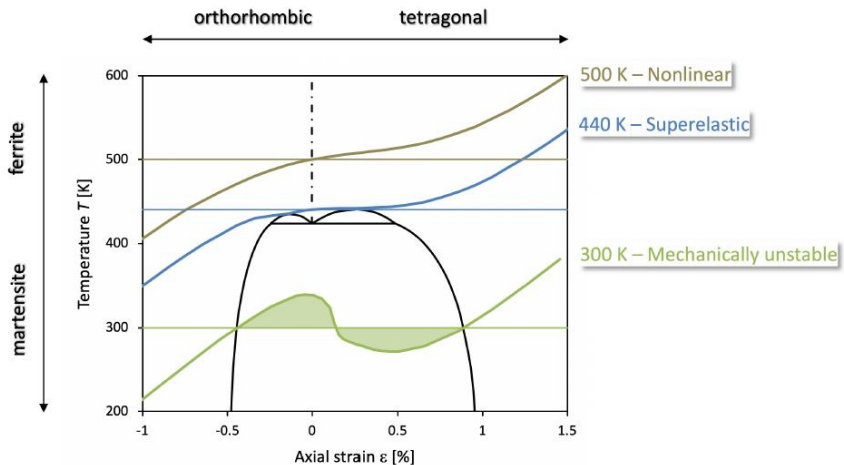
Philippe Maugis

Aix Marseille Univ, CNRS, IM2NP, Marseille, France

philippe.maugis@im2np.fr

34

Les solutions solides Fe-C, Fe-N, Nb-O, Ta-O ou W-C sont constituées d'un réseau centré contenant les interstitiels C, N ou O dans les sites octaédriques. Parmi ces systèmes, le fer sursaturé en carbone présente un intérêt industriel majeur. À basse température, on le trouve sous forme de ferrite (bcc-Fe) ou de martensite (bct-Fe et bco-Fe). Sur la base d'un modèle élastochimique en champ moyen de l'interaction interstitiels-déformation, nous avons étudié numériquement la stabilité thermodynamique des trois formes cristallines possibles. Sous une contrainte appliquée, une transition phase ferrite-martensite ou un changement de variant orientational de la martensite peut se produire. En fonction de la température, ces transitions s'accompagnent d'un comportement élastique non linéaire, de super-élasticité ou d'instabilités mécaniques. À cet égard, un cristal de martensite sursaturé en carbone se comporte mécaniquement comme un alliage à mémoire de forme.



Influence de tungstène et de carbone sur les mécanismes de déformation à chaud d'alliages TiAl

Benjamin Galy¹, Muriel Hantcherli¹, Alain Couret¹, Guy Molénat¹, Michael Musi², Petra Spoerk-Erdely², Helmut Clemens², Jean-Philippe Monchoux¹

¹CEMES, Université de Toulouse, CNRS, 29 rue Jeanne Marvig, BP 94347, 31055 Toulouse, France

²Department of Materials Science, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Austria

monchoux@cemes.fr

Nous présenterons l'influence de l'addition de tungstène et de carbone sur la déformation d'alliages TiAl à 800°C, qui se produit par glissement et par montée des dislocations. Nous nous appuierons notamment sur des observations par la technique émergente de tomographie électronique [1-10], qui permet d'identifier aisément ces mécanismes (la Fig. 1 montre un exemple dans le cas du glissement). Ces observations seront également discutées à la lumière de résultats récents de sonde atomique tomographique, montrant la ségrégation du carbone et du tungstène dans le cœur des dislocations.

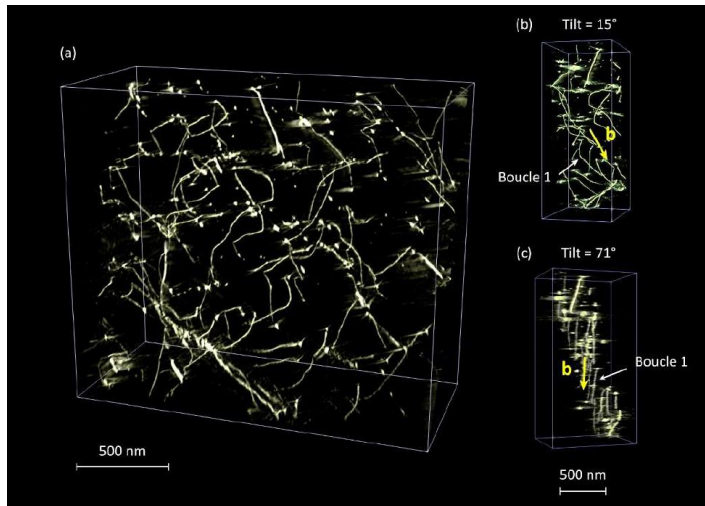


Fig. 1. Visualisation en 3D par tomographie électronique de boucles de dislocations dans un alliage Ti50.5Al47W2C0.2B0.3 déformé à 800°C. (a) Vue générale. (b-c) Détails, la rotation du volume de 71° permettant de déterminer que les dislocations se déplacent par glissement (vecteur de Burger b , en jaune, contenu dans le plan des boucles, comme par exemple la boucle 1).

- [1] J. S. Barnard et al. Science 2006.
- [2] M. Tanakal et al. Scripta Materialia 2008.
- [3] G.S. Liu et al. J. Mater. Res 2011.
- [4] A. Mussi et al. Phys. Chem. Minerals 2014.
- [5] A. Mussi et al. Comptes Rendus Physique 2021.
- [6] A. Mussi et al. Acta Materialia 2021.
- [7] Z. Feng et al. COSSM 2020.
- [8] O. Altingövdé et al. Ultramicros-

Mise en évidence par tomographie électronique en transmission des dislocations du mécanisme de montée mixte dans le quartz déformé dans des conditions naturelles

Timmo WEIDNER¹, Alexandre MUSSI¹, Olivier CASTELNAU², Andreas KRONENBERG³, Richard LAW⁴, Patrick CORDIER^{1,5}

¹Univ. Lille, CNRS, INRAE, Centrale Lille, UMR 8207 - UMET – Unité Matériaux et Transformations, F-59000 Lille, France

²Laboratoire PIMM, Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, CNAM, 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

³Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University, College Station, TX, USA

⁴Department of Geosciences, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA

⁵Institut Universitaire de France, 1 rue Descartes, F-75005 Paris, France

alexandre.mussi@univ-lille.fr

D'après le critère de von Mises, un polycristal peut être déformé, sans endommagement, par le mécanisme de glissement de dislocations uniquement, s'il y a au moins cinq systèmes de glissement indépendants. Or le quartz, de structure trigonale, est limité en diversité de systèmes de glissement. En effet, à température croissante, le quartz se déforme par glissement basal, puis par glissement rhomboédrique de dislocations $\langle a \rangle$, puis prismatique de dislocations $\langle a \rangle$ et enfin prismatique de dislocations $\langle c \rangle$. Dans ces conditions, le critère de von Mises n'est pas respecté. Pour expliquer la déformation plastique de polycristaux de quartz sans endommagement, Ball & White ont proposé l'intervention du glissement de dislocations $\langle c+a \rangle$ et du mécanisme de montée [1]. Dans cette étude, afin de vérifier ces hypothèses, les microstructures de dislocations de deux échantillons de quartz, déformés dans des conditions naturelles, ont été analysées par tomographie électronique des dislocations. Afin de réduire les dommages d'irradiation (le quartz est un matériau sensible au faisceau d'électrons), des acquisitions tomographiques à faible nombre d'images projetées ont été réalisées en suivant la méthodologie de nos précédentes études. La tomographie a permis de caractériser des dislocations de géométrie 3D et de déterminer précisément les plans d'habitat des différents segments qui constituent ces dislocations. Les deux échantillons présentent des microstructures équivalentes malgré des sollicitations thermomécaniques distinctes. Les systèmes de glissement habituels des déformations à haute température ont été retrouvés mais également du glissement prismatique et pyramidal de dislocations $\langle c+a \rangle$. Des mécanismes de montée pure et de montée mixte ont également été identifiés pour des dislocations $\langle a \rangle$ mais aussi $\langle c+a \rangle$.

[1] Ball, A., White, S., On the deformation of quartzite, *Physics and Chemistry of Minerals*, 3, 163-172, 1978.

Développement d'un modèle de durcissement d'irradiation, basé sur des simulations numériques multi-échelles, appliqué au zirconium

Noirot Pascal^{1,2}, Dupuy Laurent¹, Momprou Frédéric², Onimus Fabien¹

¹Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherche en Matériaux et procédés Avancés, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

²CEMES, et Université de Toulouse, 29 rue Jeanne Marvig - 31055 Toulouse Cedex 4, France

pascal.noirotd@cea.fr

Les gaines des crayons combustibles des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP), fabriquées en alliages de zirconium, constituent la première barrière de confinement de la matière radioactive. Il est donc essentiel de garantir l'intégrité mécanique de celles-ci dans toutes les conditions de fonctionnement. En réacteur, la gaine est exposée à une température de 350° C, à la corrosion et à l'irradiation neutronique. L'irradiation entraîne la formation de nombreuses boucles de dislocations qui bloquent le glissement des dislocations et induisent un durcissement du matériau. Suite à leur utilisation en réacteur, les gaines sont transportées afin d'être entreposées ou retraitées. Lors du transport, le crayon combustible n'étant plus refroidi par l'eau du réacteur, la température de la gaine augmente jusqu'à 450° C conduisant à une évolution du diamètre et de la densité des boucles, conduisant à leur progressive disparition. Afin de disposer d'un modèle de durcissement qui prenne en compte l'évolution de la taille et de la densité des boucles, des simulations numériques multi-échelles, couplant dynamique moléculaire (DM) et dynamique des dislocations (DD) ont été réalisées. Une configuration d'interaction dislocation-boucle particulièrement durcissante a été sélectionnée [1] et des simulations de dynamique moléculaire pour différentes taille et densité boucles (taille de boîte) ont été menées afin de pouvoir prédire le durcissement élémentaire en fonction de ces deux paramètres. Ensuite, un modèle de dynamique des dislocations, préalablement paramétré sur les simulations de dynamique moléculaire [2], a été utilisé. Celui-ci a permis d'effectuer des simulations plus réalistes à l'échelle du grain, impliquant un grand nombre de boucles. Un modèle analytique de durcissement d'irradiation a finalement été proposé sur la base de l'ensemble de ces simulations numériques. En parallèle à ce travail, des observations in-situ en microscopie électronique en transmission ont été réalisées sur des échantillons irradiés aux ions après recuit. Celles-ci ont permis de visualiser les interactions entre dislocation et boucle dans le zirconium.

[1] Onimus, F., Dupuy, L., Gaumé, M., Kassem, W. & Momprou, F. Deformation Mechanisms of Zirconium Alloys after Irradiation Studied by Dislocation Dynamics Simulations and In Situ Straining Experiments in TEM. in Zirconium in the Nuclear Industry: 19th International Symposium 319–342 (ASTM International, 2021). doi:10.1520/STP162220190036.

[2] To be published: Dupuy, L. M., Kassem, W., Clouet, E. & Onimus, F. Atomistically informed dislocation dynamics simulations: Application to dislocation-loop interactions in zirconium.

Modélisations micromécaniques et simulations atomistiques de la ségrégation des atomes de soluté aux joints de grains

J. Petrazoller, T. Richeton, J. Guenole, S. Berbenni

Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers, LEM3, F-57000 Metz, France

joe.petrazoller@univ-lorraine.fr

38

Le mécanisme de ségrégation des atomes de solutés aux joints de grains affecte les propriétés mécaniques des métaux, en particulier leur résistance intergranulaire ou leur capacité à recristalliser. Un atome de soluté peut être représenté par une distribution de forces ponctuelles équivalente aux forces imposées aux atomes entourant le défaut. Le moment d'ordre 1 de cette distribution de forces, appelé dipôle élastique, permet de calculer les champs élastiques longue-distance dus à un atome de soluté. Dans cette thèse, le dipôle élastique permanent (qui peut être relié à une déformation libre de contrainte) et le tenseur de polarisabilité diaélastique (qui est relié au changement de constantes élastiques de l'alliage) ont été évalués par simulations atomistiques pour un atome d'Ag dans une matrice de Cu selon la méthode décrite dans [1]. L'énergie d'interaction entre le dipôle élastique et les champs de contraintes de différents joints de grains de flexion symétriques a ensuite été calculée. Les champs de contraintes des joints de grains ont été évalués de différentes manières : à partir des contraintes de Viriel issues de simulations de statique moléculaire ou à partir de murs de dislocations coins, soit en élasticité anisotrope hétérogène suivant le formalisme de Stroh [2] soit en élasticité isotrope [3]. Également, l'énergie de ségrégation d'un atome de soluté vers un joint de grain a été évaluée par une série de simulations de statique moléculaire. Les comparaisons entre cette énergie de ségrégation et les différentes énergies d'interaction mettent en évidence l'importance de prendre en compte l'anisotropie élastique pour capter les différences entre joints de grains (voir Figure 1). Ces résultats servent enfin à remonter les échelles pour étendre un modèle de ségrégation de type White et Coghlan [4] à l'élasticité anisotrope et prédire la concentration de solutés aux joints de grains.

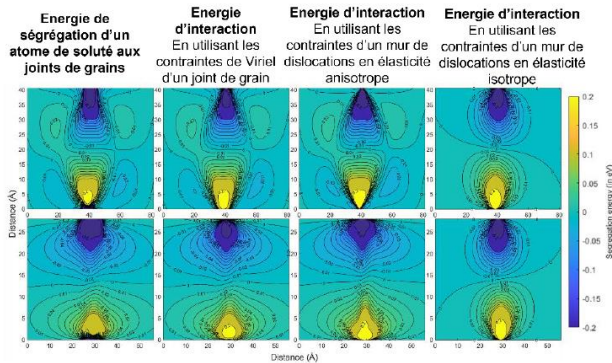


Figure 1 : Energie de ségrégation d'un atome d'Ag dans le Cu par statique moléculaire pour deux joints de grain de flexion symétriques : (100) [001] 5° (en haut) et (110) [001] 5° (en bas). Comparaisons avec les énergies d'interaction entre le dipôle élastique représentant le soluté et les champs de contraintes des joints de grains calculés de différentes manières

- [1] Clouet, E.; Varvenne, C., *Comput. Mater. Sci.* 2018, 147
- [2] Richeton, T.; Chen X.; Berbenni S., *Philosophical Magazine* 2020, 100
- [3] Hirth J.P.; Lothe J., *Theory of dislocations*, 1982
- [4] White, C. L.; Coghlan, W. A., *Metall. Trans. A* 1977, 8

Effet de la composition chimique sur le comportement en traction à 650°C de superalliages base nickel

Benoît Mansoz^{1,2}, Pierre Caron³, Jonathan Cormier², Florence Pettinari-Sturmel¹

¹CEMES-CNRS, Université de Toulouse, 29 rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse, France

²Institut PPrime, ISAE-ENSMA, 1 Av. Clément Ader, 86360 Chasseneuil-du-Poitou, France

³Expert scientifique

florence.pettinari@cemes.fr

La hausse de la température de fonctionnement des turbomachines a nécessité le développement de nouvelles générations de superalliages monocristallins plus résistants à hautes températures. En 40 ans, leur composition chimique a évolué pour incorporer de plus en plus d'éléments réfractaires (Re et Ru). Cependant, cette amélioration des propriétés mécaniques à hautes températures des superalliages s'est accompagnée d'une baisse de la limite d'élasticité à basse températures ($T < 700$ °C). Ce travail consiste à étudier le comportement en traction à 650 °C des superalliages base-Ni monocristallins. Pour cela, 18 superalliages monocristallins, issus des différentes générations, ont été testés en traction à 650 °C/5.10-4 s-1 à l'institut Pprime. Cette étude a permis d'acquérir une riche base de données et a mis en valeur des écarts importants de limite d'élasticité (jusqu'à 300 MPa) entre les alliages de première génération et des alliages plus avancés. Un écrouissage particulièrement important a aussi été observé dans l'alliage TMS-238 (6ième génération). Des essais interrompus à 0,5% et 1% de déformation plastique ont aussi été réalisés afin de caractériser les micromécanismes de déformation par microscopie électronique en transmission au CEMES. Les mécanismes de déformation ont aussi été étudiés via des essais de traction MET in situ à 650°C.

Ces analyses ont montré que dans la plupart des alliages, la déformation plastique se concentre dans des bandes de glissement et est portée par des paires de dislocations parfaites (cf. figure). À 650 °C, le principal paramètre influençant la limite d'élasticité apparaît être le passage de l'interface γ/γ' qui peut être quantifié par l'énergie de paroi d'antiphase. Cette énergie de faute a été estimée à l'aide de modèles calculatoires et mesurée expérimentalement. Il en ressort que les alliages avec les meilleures limites d'élasticité sont aussi ceux avec les plus hautes énergies de paroi d'antiphase et sont ceux avec les concentrations les plus élevées en Ta et Ti.

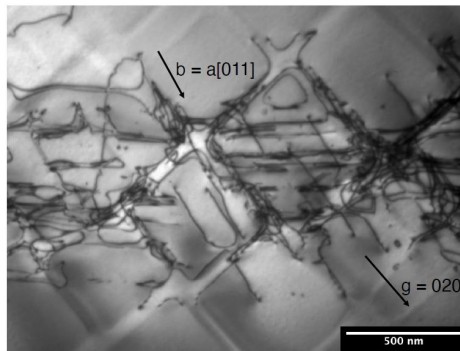


Figure : Observation post mortem au MET d'une bande de déformation dans le superalliage TROPEA après essai de traction jusqu'à $\epsilon_p = 0,5\%$.

Étude du déplacement saccadé des dislocations vis dans le fer- α

Laurent Proville et Anshuman Choudhury

Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux, SRMP, 91191, Gif-sur-Yvette, France

laurent.proville@cea.fr

40

Les observations réalisées par Daniel Caillard [1] ont mis en évidence un mode de glissement saccadé et erratique des dislocations vis dans un monocristal de fer pur de symétrie cubique centrée. Depuis son observation expérimentale ce mode de glissement, aussi nommé glissement jerky remet en question le processus standard de glissement, appelé processus de Peierls en référence aux premiers travaux sur ce sujet [2]. L'origine du glissement jerky a pu être déterminée récemment grâce à des simulations atomiques de dynamique moléculaire [3]. Lors du glissement de Peierls standard une paire de décrochement se forme par activation thermique sur la dislocation (à droite de la figure 1). La propagation des deux décrochements ainsi produits le long de la dislocation permet à cette dernière de progresser dans le plan de glissement. Les décrochements, aussi appelés « kinks », correspondent à l'échelle atomique à un basculement des atomes situés au coeur de la dislocation, allant ainsi d'une position devenue instable sous l'effet de la contrainte à une position stable. Pendant quelques pico-secondes ces atomes vibrent donc d'une façon plus intense que le reste du cristal et ce surplus d'agitation se traduit par un échauffement local qui favorise la nouvelle formation de double décrochement. La répétition de ce phénomène a été observé directement dans les simulations, comme on peut le voir à gauche de la figure 1. Les profils bleus montrent jusqu'à trois doubles décrochements supplémentaires. Lorsque les décrochements de différentes tailles atteignent les extrémités de la dislocation le glissement s'interrompt. Les simulations ont permis de montrer des sauts de plusieurs distances interatomiques en accord avec les observations expérimentales [1]. Un modèle statistique a été développé afin de pouvoir prédire le nombre de sauts observés en fonction de leurs longueurs λ . La comparaison entre les calculs et les mesures réalisées expérimentalement [1] montre un bon accord.

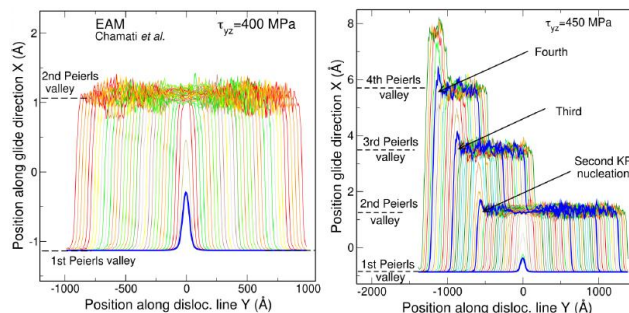


Fig. 1 : Evolution du profil d'une dislocation modélisée par dynamique moléculaire au cours du processus de Peierls standard (à gauche) et au cours du processus de germination secondaire à partir des décrochements (kinks) le long de la ligne de dislocation (à droite).

- [1] D. Caillard, Acta Mater. 58, 3504 (2010).
- [2] R. Peierls, Proc. Phys. Soc. (London) 52, 34 (1940).
- [3] L. Proville and A. Choudhury, Nature Materials 23, 47 (2024).

Modélisation des interactions entre défauts étendus dans des matériaux métalliques en conditions extrêmes

A. Ruffini¹, B. Dabas^{1,2}, A. Finel¹, Y. Le Bouar¹, T. Jourdan²

¹Université Paris-Saclay, ONERA, CNRS, Laboratoire d'étude des microstructures, 92322, Châtillon, France.

²Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux, SRMP, 91191, Gif-sur-Yvette, France.

antoine.ruffini@onera.fr

Les métaux placés en conditions extrêmes (fortes contraintes, températures élevées, flux important de radiations, etc.) présentent généralement des défauts étendus tels que des dislocations et des cavités dont les interactions dictent la réponse macroscopique du matériau. Cependant, en raison de leurs aspects multi-physiques, ces phénomènes sont difficiles à caractériser, que ce soit par des simulations numériques ou par des approches expérimentales. Du point de vue numérique, il est notamment nécessaire de disposer de méthodes permettant de décrire le couplage entre les objets physiques d'intérêt, sur des échelles de temps adaptés à la diffusion des défauts ponctuels.

Dans ce travail, nous proposons un modèle de champs de phase qui couple la diffusion de lacunes, la montée de dislocations et l'évolution de cavités [1]. Ce modèle prend naturellement en compte les interactions élastiques entre les objets et garantit par des contraintes variationnelles que la matière est conservée lors de l'échange des lacunes par diffusion [2].

Dans une première partie, nous présenterons le modèle et fournirons quelques détails sur son implémentation numérique qui inclut un solveur amélioré pour l'équation contrôlant l'évolution du champ de lacunes. Nous montrerons que l'utilisation de ce solveur augmente considérablement l'échelle de temps de diffusion accessible. Dans une deuxième partie, nous validerons le modèle de champs de phase en comparant les résultats numériques de systèmes élémentaires avec des résultats analytiques connus. Dans une troisième partie, nous présenterons les résultats de simulations 2D de dislocations en montée interagissant avec un ensemble de cavités, mettant en évidence un rôle significatif des interactions élastiques sur l'évolution microstructurale des matériaux irradiés.

[1] B. Dabas. Thèse Sorbonne Université, 2022.

[2] P. A. Geslin, B. Appolaire, A. Finel. Applied Physics Letters, 2014, 104(1), 011903.

Structure de cœur et mobilité de la dislocation vis dans UO₂

J. Suchorski¹, A. Pivano¹, J. Amodeo²

¹CEA, DES, IRESNE, DEC, Cadarache, F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France

²Aix-Marseille Université, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, F-13397 Marseille, France

jules-elemir.suchorski@cea.fr

42

La déformation plastique des monocristaux d'UO₂ est caractérisée par des dislocations dans les systèmes de glissement $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle \{001\}$, $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle \{110\}$ et $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle \{111\}$. Récemment, des calculs de dynamique moléculaire ont permis d'obtenir une loi de mobilité pour la dislocation coin $\langle 110 \rangle \{001\}$, qui est le caractère limitant la déformation dans le mode avec la contrainte critique la plus faible [1]. Cependant, la dislocation vis joue un rôle majeur pour les deux autres modes de glissement ainsi que dans le durcissement induit par les boucles d'irradiation via la formation de tours d'hélice [2]. Il a aussi été montré qu'un glissement dévié actif de la dislocation vis pouvait expliquer l'anisotropie plastique observée dans UO₂ monocristallin [3]. Afin d'étudier la plasticité des monocristaux d'UO₂ et le durcissement induit par l'irradiation, il est donc important d'avoir une meilleure compréhension des propriétés de la dislocation vis dans ce matériau.

Dans cette étude, nous utilisons la statique et la dynamique moléculaire avec potentiel empirique pour étudier la structure de cœur et la mobilité de la dislocation vis dans UO₂. L'impact de la température et de la contrainte sur les mécanismes de glissement est examiné entre 1400 et 2200 K. Nous mettons en évidence l'activation du glissement dévié dans cette gamme de température et un lien est fait avec l'évolution en température de la structure de cœur de la dislocation.

[1] Borde et al. "Atomic scale modeling of edge dislocations in UO₂: Core properties and mobility". In: Journal of Nuclear Materials 574 (2023).

[2] Borde et al. "Interaction between $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle \{001\}$ dislocations and $\{110\}$ prismatic loops in uranium dioxide: Implications for strain-hardening under irradiation". In: International Journal of Plasticity 168 (2023).

[3] Madec et al. "Plastic anisotropy and composite slip: Application to uranium dioxide". In: Acta Materialia 255 (2023).

Etude de la localisation de la déformation et de la réorientation cristalline sous faible déformation plastique par microscopie con-focale à balayage laser, EBSD-HR et DCT-6D

Damien Texier¹, Malo Jullien¹, Ali Rouwane¹, Jean-Charles Passieux¹, Henry Proudhon², Wolfgang Ludwig³, Pedro Damas Resende⁴

¹Institut Clément Ader (ICA) - UMR CNRS 5312, 81013 Albi Cedex 09, France

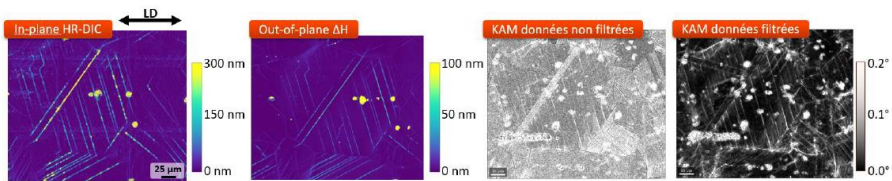
²Centre des Matériaux (CdM) - UMR7633CNRS, Evry, France

³MATEIS - UMR CNRS 5510, Villeurbanne, France

⁴European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), Grenoble, France

damien.texier@mines-albi.fr

Les techniques de corrélation d'images numériques à haute résolution (HR-DIC) sont bien établies pour mesurer la localisation de la déformation au niveau sub-granulaire dans les matériaux polycristallins. La HR-DIC a généralement été réalisée sous microscopie électronique à balayage (MEB) afin de gagner en résolution spatiale et en répétabilité des micrographies. Cependant, la HR-DIC sous MEB ne renseigne que sur le champ cinématique dans le plan à la surface des échantillons déformés. Cette technique est particulièrement appropriée lorsque le mouvement hors plan lié à la localisation tridimensionnelle des déformations peut être évaluée à partir d'une autre source de caractérisation, c'est-à-dire les événements de glissement simple planaire localisé sous forme de bandes de glissement. La localisation de déformation non cristallographique, comme le glissement aux joints de grains, nécessite le développement de techniques de mesure tridimensionnelle. La microscopie confocale à balayage laser (LSCM) utilisant une source monochromatique proche de l'UV fournit des micrographies moins résolues dans le plan mais des informations topographiques d'une grande précision (< 10 nm en hauteur). Une formulation 3D du problème HR-DIC a donc été mise en œuvre pour évaluer la localisation de la déformation en plein champ en 3D dans un superalliage à base de Ni à température ambiante. La figure ci-dessous montre la localisation de la déformation dans le plan et hors plan obtenue par HR-DIC. L'accès à la topographie de l'échantillon déformé a également permis l'étude de la réorientation cristalline entre les bandes de glissement du fait de la déformation. Ces réorientations de réseau cristallin ont également été confrontées à des mesures EBSD haute résolution et de DCT 6D afin de sonder le caractère graduel et discret de ces réorientations cristallines en surface et dans le volume. La représentation de la réorientation locale de la réorientation de réseau est illustrée par la représentation KAM sur les données brutes et filtrée à l'aide de régularisations locale sur les quaternions.



Mesoscopic discrete-continuum approach to crystal plasticity

Lev Truskinovsky

PMMH, CNRS-UMR 7636, PSL-ESPCI, 10 Rue Vauquelin, Paris 75005, France.

lev.truskinovsky@espci.fr

44

We discuss a novel mesoscopic tensorial model (MTM) of crystal plasticity which allows one to capture in a geometrically precise way the role of crystallographically-specific lattice invariant shears. It represents a crystal as a collection of deforming elastic elements whose nonlinear elastic response is governed by globally periodic continuum potential defined in the space of metric tensors. The ensuing Landau-type model with infinite number of equivalent energy wells effectively views a plastically deformed crystal as a mixture of equivalent “phases”. Plastic yield is interpreted as an escape from the reference energy well, and plastic “mechanisms” are linked to low-barrier valleys of the energy landscape. Rate-independent dissipation emerges due to the well-switching events describing elementary plastic slips. Despite being effectively discrete, the MTM is formulated in terms of macroscopically measurable continuum quantities (stress and strain). It can handle both long and short range interactions, including the ones involved in the dislocation nucleation and in the interaction of dislocations with various obstacles, without introducing ad-hoc relations. A unique feature of the MTM is that it allows one to track the deformation history of individual elastic elements. Using this capability of MTM, we were able to trace how microtwin laminates can self-organize to appear macroscopically as pseudorigid rotations. The dissipative, dislocation-mediated nature of such self-organization suggests that at least some of the macroscale textures have their origin in collective motion of dislocations. Joint work with U. Salman and R. Baggio.

LISTE DES
PRÉSENTATIONS
PAR AFFICHE

Dynamique des bandes de PLC dans un alliage de laiton

Thierry Auger, Camila Itza Hittner, Raphaël Cwiling, Jean-Baptiste Marion, Zehoua Hamouche, Halim Haddadi

Microstructurally short fatigue crack growth in polycrystalline materials

Marie Bouyx, Vincent Chiaruttini, Aurélien Vattré, Vincent Bonnan¹, Julien Réthoré, Antoine Blanche

Atomic-scale modeling of diffusion in concentrated alloys

Pamela Camilos, Thomas Schuler, Maylise Nastar

Stress and strain in free standing nanoalloys

Pamela Camilos, Céline Varvenne, Christine Mottet

Effet des éléments d'alliage et de la température sur les mécanismes de déformation des alliages de titane β métastable

Nicolas Jobit, Philippe Castany, Fan Sun, Joël Douin, Florence Pettinari-Sturmel, Frédéric Prima, Thierry Gloriant

Solid-state diffusion mechanisms in uranium dioxide in relation to high temperature mechanical properties

A. Dumas, J. Lechelle, T. Helfer, G. Antou, A. Socie, X. Iltis, M. Cologna, F. Le Hello, P. Garcia

Modélisation de la propagation d'une fissure courte en matériau ductile par couplage entre champ de phase et dynamique des dislocations

Luis Eon, Riccardo Gatti, Alphonse Finel, Benoît Appolaire

Atomistic simulations of {112} and {110} incoherent twin boundaries in gold

Alisha George, Pierre Godard, Sandrine Brochard

Comportement mécanique des nanoparticules : impact du champ de force utilisé en dynamique moléculaire pour la modélisation de la compression des nanoparticules

Alla Ndiaye Dieng, Louise Grau, Céline Gérard, Jean-Claude Grandidier

Couplage tomographie électronique en transmission des dislocations et dynamique des dislocations : application à l'olivine

Timmo Weidner, Karine Gouriet, Laurent Dupuy, Alexandre Mussi, Patrick Cordier

Hybrid QM/ML the study of the unpinning of a screw dislocation from a carbon atom in tungsten

Petr Grigorev, Thomas D. Swinburne, Lisa Ventelon, Emmanuel Clouet, Mihai-Cosmin Marinica

Modélisation atomique de dislocations dans la perovskite KTaO_3

Pierre Hirel, Franck Junior Kakdeu Yewou, Philippe Carrez, Patrick Cordier

Pyrough : a new tool to model rough samples in atomistic and finite element simulations

Hugo Itenev, Thomas W. Cornelius, Olivier Thomas, Jonathan Amodeo

Atomistic-to-Continuum Crossover for Crystal Defects Descriptions and Grain Boundary Excess Energy

Houssam Kharouji, Lucile Dezerald, Pierre Hirel, Philippe Carrez, Patrick Cordier, Vincent Taupin, Julien Guérolé

Optimisation de l'alliage Ti-6Al-4V obtenu par fabrication additive utilisant la déposition directe de fil pour des applications aéronautiques critiques

Elise LABRUYERE, Florence Pettinari-Sturmel, Joël Douin, Claude Archambeau, Philippe Emile

Anisotropie plastique et glissement composé : application au dioxyde d'uranium

Ronan MADEC, Luc Portelette, Bruno Michel, Jonathan Amodeo

Étude ab initio de l'interaction dislocation vis - oxygène dans le chrome

O.K. NDIATHIE, E. Clouet

Etude par MET des sous-joints de grains induits par sollicitation mécanique à 1550°C dans UO₂

C. Onofri, D. Caillard, M. Legros, J. Fouet, C. Sabathier, H. Palancher, D. Drouan, J.P. Monchoux

High-speed mobility law of straight flat-core dislocations in anisotropic continuum: theoretical approach

Yves-Patrick PELLEGRINI

Stabilité et propriétés mécaniques de nanoparticules de tungstène

Laurent Pizzagalli, Sandrine Brochard, Julien Durinck, Julien Godet

Etude de la déformation plastique dans des nano-objets : relation entre contrainte appliquée et contraintes locales en fonction de la taille et de la forme

Laurent Pizzagalli, Matteo Erbi, Riccardo Gatti, Jonathan Amodeo, Hakim Amara, Julien Godet, Julien Durinck, Sandrine Brochard

Compressing and forecasting atomic material simulations with descriptors

TD Swinburne

Insights on the capabilities and improvement ability of classical many-body potentials: Application to hcp Zr

Alessandra Del Mastro, Jean Baccou, Guy Tréglia, Fabienne Ribeiro, Céline Varvenne

Fluage en punch test du Ti-6Al-4V issu de fabrication additive : comportement et évolution de microstructure

Mathieu Lalé, Petr Dymáček, Bernard Viguier

Characterization of basal twist grain boundaries in HCP materials using atomistic simulations and 3D Nye dislocation density tensor

Y. F. Woguem, D. Iabbaden, H. Kharouji, V. Taupin and J. Guérolé

Shape-memory ceramics: Machine learning potential for Zr_{1-x}Ce_xO₂ with experimental-level accuracy

Jin-Yu Zhang, Gaël Huynh, Tristant Albaret, Fu-Zhi Dai, David Rodney

Sponsors



EDEN Instruments est une société high-tech, spécialisée dans la commercialisation et le suivi technique d'équipements et accessoires pour le secteur de la microscopie électronique MEB/FIB et MET. Les solutions de nano caractérisation proposées par EDEN Instruments comprennent des équipements pour l'étude des échantillons en micro-analyse MEB EDS, la microscopie électronique MET/MEB In-Operando, la microscopie corrélative (CLEM), la cathodoluminescence, les essais électriques/mécaniques (EBIC-EBAC, indentation, traction, flexion, compression), pour du nano-positionnement/manipulation à l'échelle micro et nano ainsi que des équipements innovants destinés à la préparation des échantillons.

48



Le CEA est un acteur majeur de la recherche française au service de l'économie et des citoyens. S'appuyant sur une recherche fondamentale d'excellence, il apporte des réponses concrètes à leurs besoins dans quatre grands domaines : 1) les énergies décarbonées (nucléaire et renouvelables), 2) le numérique, 3) les technologies pour la médecine du futur et 4) la défense et la sécurité.



Plus grande université francophone pluridisciplinaire, Aix-Marseille Université (AMU) accueille 80 000 étudiants et près de 8 000 personnels sur 5 grands campus aux standards internationaux. Propriétaire de 90% de son patrimoine, l'université est présente sur 9 villes, dans 4 départements de la Région Sud. Sa Fondation universitaire A*Midex, qui porte l'IDEX pérennisée, contribue au développement d'un pôle interdisciplinaire d'enseignement supérieur et de recherche de rang mondial. Dite « université de recherche intensive » elle abrite 122 structures de recherche en lien avec les grands organismes de recherche nationaux.



AMOSAN petrochemicals engineering est une multi-nationale localisée à Bouillargues dans le Gard, spécialisée dans la recherche, la fabrication et la vente de produits chimiques et spécialités lubrifiantes/anti-frictions (huiles, graisses, additifs, liquides de refroidissement, etc.). Les secteurs d'activités d'AMOSAN vont du marché spécialisé de l'automobile au milieu industriel en général en passant par les collectivités ou les sociétés de travaux publics.



La Société Française de Métallurgie et de Matériaux, SF2M, créée en janvier 1945, est une association scientifique à but non lucratif, d'intérêt général. Elle réunit environ 1000 membres individuels (du monde industriel et académique) et 15 partenaires (groupes industriels ou fédérations). C'est un lieu de rencontre, de formation, et d'échanges, un moteur pour la diffusion des informations et des innovations, et un point de convergence dans un réseau national et international dans le domaine des matériaux, de leur fabrication, et de leur utilisation.



Le réseau National de la Métallurgie (RNM), composante de la Société Française de Métallurgie et Matériaux (SF2M), a été conçu sur la base des propositions d'un rapport adressé au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche en 2014. Grâce à des actions ciblées, il rassemble et structure la communauté académique et industrielle dans le domaine de la métallurgie (jeunes diplômés, ingénieurs et chercheurs), selon les priorités définies ci-après.

Le comité d'organisation du colloque Plasticité 2024 remercie l'ensemble des sponsors d'avoir contribué à la réalisation de ces journées!

Nous remercions également la cost action CA21121 Mechanics of Matter at the Nano-Scale (MecaNano) d'avoir fourni les crayons et calepins pour ces journées. Pour en savoir plus sur le réseau européen MecaNano, et ce qu'il peut vous apporter, n'hésitez pas à prendre en photo le QR code ci-dessous ou à visiter le site mecanano.com :



