

**PROJET DE CREATION (1)
DEMANDE DE RENOUVELLEMENT (1)
DE GROUPEMENT DE RECHERCHE (GDR)
AU 1^{ER} JANVIER 2017**

Nom et prénom du demandeur : Montagnat Rentier Maurine

Intitulé du GDR : Recristallisation et croissance des grains
(90 caractères maximum)

Sigle du GDR : REX

Institut principal (2) : INSIS
Institut(s) secondaire(s) (2) : INSU

N° de section principale (2) : 9

N° de sections secondaires d'évaluation du Comité national de la recherche scientifique (2) : 18

Justification du rattachement à chacune des sections citées :

Le projet de GDR « Recristallisation et croissance des grains » rassemble les communautés « physique et mécanique des matériaux » et « sciences de la Terre ». Les mécanismes de recristallisation induisent des modifications de textures et de microstructures qui peuvent avoir un fort impact sur le comportement des métaux suite aux procédés de mise en forme ou en cours d'usage par exemple, sur la dynamique de l'écoulement des glaciers et des calottes polaires, mais aussi sur l'anisotropie des matériaux du manteau terrestre. Les outils utilisés pour caractériser et modéliser les mécanismes de recristallisation sont transversaux aux différentes communautés mais les problématiques varient. Le caractère fortement interdisciplinaire du projet, ainsi que les spécificités scientifiques des équipes concernées justifient donc le rattachement aux sections 9 et 18.

Adresse du GDR : Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement
UMR 5183
54 rue Molière, BP 96
38402 St Martin d'Hères cedex

Téléphone : 04 76 82 42 67 Télécopie : 04 76 82 42 01 E.Mail : montagnat@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

Date :
29/01/2016

Signature du demandeur :



Responsable(s) Du GDRDIRECTEUR:

Civilité	Mme
Nom et prénom	Montagnat Rentier Maurine
Code et adresse de son unité	UMR5183 LGGE 54 rue Molière BP 96 38402 St Martin d'Hères cedex
Courriel	montagnat@lgge.obs.ujf-grenoble.fr
Téléphone fixe et/ou mobile	04 76 82 42 67 / 06 23 37 81 16
Nationalité	Française
Organisme d'appartenance	CNRS
Grade	CR
Date de naissance	14 juin 1975

DIRECTEUR(S) – ADJOINT(S) :

Civilité	Mme
Nom et prénom	Tommasi Andrea
Code et adresse de son unité	UMR UMR 5243, Géosciences Montpellier, place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex05
Courriel	Andrea.Tommasi@gm.univ-montp2.fr
Téléphone fixe et/ou mobile	04 67 14 49 12
Nationalité	Italienne
Organisme d'appartenance	CNRS
Grade	DR
Date de naissance	22/10/1965

Civilité	Mme
Nom et prénom	Bozzolo Nathalie
Code et adresse de son unité	UMR 7635, CEMEF MINES ParisTech, 1, rue Claude Daunesse, 06904 Sophia Antipolis, cedex
Courriel	nathalie.bozzolo@mines-paristech.fr
Téléphone fixe et/ou mobile	04 93 67 89 45
Nationalité	Française
Organisme d'appartenance	Institut Mines-Télécom
Grade	Professeur
Date de naissance	14/04/1971



Civilité	Mr
Nom et prénom	Quey Romain
Code et adresse de son unité	UMR 5307 Lab. G. Friedel, CS62362 42023 ST ETIENNE Cedex 2
Courriel	quey@emse.fr
Téléphone fixe et/ou mobile	04 77 42 66 23
Nationalité	Française
Organisme d'appartenance	CNRS
Grade	CR
Date de naissance	08/09/1980

La mission du GDR est :

La recristallisation est un mécanisme qui modifie drastiquement les textures et microstructures des minéraux déformés dans le manteau terrestre, des métaux dans les conditions de mise en forme ou d'utilisation. Cette recristallisation peut être « subie » ou contrôlée comme un outil pour faire évoluer les propriétés des matériaux. Les acteurs du domaine se retrouvent dans des communautés variées, qui disposent de moyens très différents selon la finalité de leurs travaux sur le sujet (modélisation de l'écoulement des calottes polaires, mises en place de procédés industriels, etc.). Cependant, les mécanismes fondamentaux et les outils de modélisation et de caractérisation s'avèrent similaires dans les différents domaines concernés. Dès lors, il apparaît essentiel de créer un « lieu de rencontre » pour les scientifiques, académiques et industriels, dans lequel ils pourront échanger sur leurs problématiques, et profiter des compétences de chacun. Le GDR « Recristallisation », qui a vu le jour en 2010, a partiellement rempli ce rôle en initiant une fédération de la communauté nationale. L'objectif de la prolongation de ce GDR est de stabiliser cette communauté, en axant les centres d'intérêts sur quelques sujets phares qui ont émergés lors du précédent regroupement. Nous espérons ainsi apporter une certaine pérennité à cette communauté qui reste pour l'instant relativement disparate, mais qui a montré un réel intérêt dans cette mise en commun de compétences et de moyens. Le GDR s'appuiera sur l'école thématique « Recristallisation », dont la deuxième édition aura lieu en octobre ou novembre 2016, pour fédérer les jeunes chercheurs du domaine et leur donner une visibilité la plus large possible des outils et connaissances existantes dans le domaine.

Le GDR, qui fait suite au GDR3436 (2010-2014), rassemble plus de 14 équipes de recherche, et 5 partenaires industriels, dont la liste non exhaustive est donnée dans **le document complet de présentation du GDR** qui se trouve à la fin de ce document.



PROGRAMMES ET PRINCIPAUX OBJECTIFS PROPOSES POUR LA DURÉE DU GDR

Le GDR « Recristallisation et croissance des grains » s'appuiera sur une structuration en six groupes de travail (GT) portant sur des thématiques suivantes :

- GT1 « Caractérisation in situ »
- GT2 « Mécanismes fondamentaux »
- GT3 « Modélisation »
- GT4 « Recristallisation des aciers ODS »
- GT5 « Recristallisation en milieu industriel : quels besoins, quelles solutions? »
- GT6 « Textures de déformation et de recristallisation »

Ces six groupes de travail ont émergés « naturellement » des préoccupations des participants au précédent GDR Recristallisation (3436, 2010-2014), et sont donc fortement fédérateurs.

Chaque groupe de travail proposera un certain nombre d'activités telles que des journées d'échange autour de sujets précis, ou la mise en place d'expériences communes sur grand instrument. Ces journées seront ouvertes à tous.

Des journées de travail « inter-GT » seront organisées. On peut citer par exemple des journées communes entre les GT « processus fondamentaux » et « problématiques industrielles » pour répondre au besoin de connaissances des partenaires industriels. Ainsi que celles qui mettrons en lien les méthodes de caractérisation in situ et les outils de modélisation.

Enfin, une réunion plénière de 2 jours aura lieu chaque année pour faire le point des différents sujets abordés par chaque groupe de travail, et pour ouvrir des perspectives nouvelles sur chacun de ces groupes. Il sera alors possible de faire évoluer ces groupes en fonction de leurs activités.

Le programme proposé par chaque GT est détaillé dans le document de présentation du GDR associé à ce formulaire.

Un site WEB sera mis à jour régulièrement pour informer des différentes activités des GT, mais aussi des différentes manifestations scientifiques en lien avec le GDR.

L'école thématique « Recristallisation » tiendra sa deuxième édition fin 2016, et nous organiserons l'édition suivante en 2018.



Demande de création d'un GDR

Intitulé du Groupement de Recherche (GDR) : RECRISTALLISATION

Acronyme éventuel : REX

Période : 2017-2020 (4 ans)

Institut CNRS de rattachement :

Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS)

Autres instituts impliqués :

- Institut national des sciences de l'Univers (INSU)
- Institut de Chimie (INC)

Sections d'évaluation du Comité National :

9, 15, 18

Adresse du groupement :

LGGE, UMR5183, Université Grenoble Alpes
54 rue Molière, BP 96
38402 St Martin d'Hères cedex

Nom et prénom du directeur du GDR :

MONTAGNAT RENTIER Maurine

Adresse postale, téléphone et adresse électronique du directeur du GDR :

LGGE, UMR5183, Université Grenoble Alpes
54 rue Molière, BP 96
38402 St Martin d'Hères cedex

Téléphone : 04 76 82 42 67

E-mail : montagnat@lgge.obs.ujf-grenoble.fr



Liste des membres du bureau du GDR (avec leurs coordonnées) :

Maurine MONTAGNAT, directrice du GDR, INSIS, section 9
LGGE UMR 5183, montagnat@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

Andréa TOMMASI, co-directrice du GDR, INSU, section 18
Geosciences Montpellier UMR 5243, Andrea.Tommasi@gm.univ-montp2.fr

Nathalie Bozzolo, co-directrice du GDR, INSIS
CEMEF - MINES ParisTech, CNRS UMR 7635, nathalie.bozzolo@mines-paristech.fr

Romain QUEY, co-directeur du GDR, INSIS, section 9
Lab. Georges Friedel UMR 5307, romain.quey@mines-stetienne.fr

Organisation du GDR :

Le GDR sera dirigé par Maurine Montagnat (LGGE Grenoble), laquelle sera secondée par Andrea Tommasi (Géosciences Montpellier) et Romain Quey (Lab. Georges Friedel, Saint-Étienne). Ces trois personnes composent le bureau présenté ci-dessus. Elles sont complémentaires de par la nature de leurs matériaux d'intérêt (métaux, roches et glace) et par leurs appartenances à des instituts différents (INSIS et INSU).

Le GDR vise à fédérer la communauté scientifique française concernée par les mécanismes de recristallisation : leur étude, leur modélisation, et leur prise en compte dans des problématiques industrielles. Pour cela, nous avons mis en place une structuration sous la forme de « Groupes de Travail » (GTs) répondant à des questionnements-clés. Ces questionnements-clés ont émergé des travaux du précédent GDR « Recristallisation » 3436 (2010-2014) et seront portés par des personnes volontaires, dans le cadre des GTs. Chaque GT aura la liberté d'organiser ses actions selon la forme la plus adaptée à ses propres objectifs. Nous insisterons toutefois sur l'importance de transversalité entre GTs ; une partie des travaux des GTs sera donc orientée vers la construction de projets communs. Par exemple, les GTs « Caractérisation in situ » et « Recristallisation des aciers ODS » ont pour objectif commun d'obtenir du temps de faisceau partagé sur les grands instruments. Les GTs « Mécanismes fondamentaux » et « Recristallisation en milieu industriel : quels besoins, quelles solutions ? » interagiront également fortement pour faire le lien entre les études académiques et les problématiques rencontrées en milieu industriel.

Une réunion plénière réunira chaque année, sur 2 jours, l'ensemble des participants du GDR. À l'occasion de cette réunion, un retour sera effectué sur les avancées de chaque GT, et l'accent sera mis sur les échanges entre GTs et les sujets transversaux. Ces réunions annuelles permettront, en parallèle de l'activité propre à chacun des GTs, d'identifier de nouveaux projets ou axes d'étude. Par ailleurs, nous inviterons à chacune de ces réunions un ou plusieurs intervenants internationaux et/ou de disciplines connexes afin d'élargir les discussions aux recherches réalisées dans d'autres pays et/ou communautés.

Enfin, l'école thématique « Recristallisation », dont la première édition a eu lieu en septembre 2014 et la deuxième est programmée pour octobre ou novembre 2016, sera un événement important du GDR. Cette école a deux objectifs : former la prochaine génération de chercheurs et renforcer la notion d'appartenance à la communauté en présentant au mieux l'éventail des outils et techniques qui permettent de travailler dans le domaine de la recristallisation, y compris les derniers développements menés dans le cadre du GDR.

La communauté « Recristallisation » est fortement interdisciplinaire (géosciences / métallurgie, expérimentation / modélisation, fondamental / industriel) et souhaite faire de cette caractéristique un atout, mais elle doit pour cela se structurer pour permettre les interactions. C'est dans cet objectif que s'inscrit cette demande de création de GDR.

Demande de création d'un GDR (suite)

Intitulé du GDR : RECRISTALLISATION

1. État de l'art et contexte, motivation du renouvellement du GDR

L'état de l'art présenté ici s'inspire sensiblement de celui qui avait été présenté pour la création du précédent GDR « Recristallisation ». Des évolutions scientifiques, en particulier concernant les outils de caractérisation et de modélisation, sont en cours, et pour certaines au coeur de notre groupement. Elles seront explicitées par la suite.

Les phénomènes de recristallisation dans les matériaux cristallins ont une importance capitale, car ils dictent dans une large mesure les réorganisations microstructurales de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis aux chargements mécaniques et histoires thermiques inhérents à leurs conditions d'utilisation ou de transformation. Ces réorganisations microstructurales permettent généralement de modifier significativement les propriétés mécaniques du matériau, ce qui conduit le plus souvent à une ductilité plus élevée et à une contrainte d'écoulement plastique (ou de fluage) plus faible. La taille de grains obtenue est également un paramètre d'ordre 1 pour les propriétés de résistance en fatigue ou en fluage. La recristallisation influence de plus l'anisotropie mécanique du matériau par le biais des textures induites, qu'elles soient cristallographiques, morphologiques ou topologiques.

Les phénomènes de recristallisation sont intrinsèquement multi-échelles. Les principaux facteurs influant la recristallisation sont, à des échelles spatiales décroissantes : (a) la structure d'un objet macroscopique, qui peut subir des histoires thermomécaniques hétérogènes, (b) le type de microstructure que l'on peut considérer à l'intérieur d'un volume élémentaire représentatif, (c) les interactions entre grains, qui sont le siège de contraintes de longue portée à l'échelle granulaire, (d) les champs locaux de contrainte à l'intérieur des grains, reliés à la présence de structures de dislocations qui perturbent les champs de contrainte à l'échelle granulaire et induisent des forces thermodynamiques responsables du mouvement d'interfaces à travers la structure granulaire, (e) les énergies et mobilités des interfaces, qui contrôlent en partie leur cinétique, et (f) les précipités ou atomes en solution solide, qui interagissent avec les interfaces et modifient leur cinétique.

La recristallisation est un phénomène étudié de très longue date et les principaux phénomènes physiques sous-jacents ont été identifiés très tôt [HIM 63]. On sait en particulier que la structure de dislocations dans un matériau est responsable de forces motrices qui peuvent conduire à la germination de nouveaux grains [BEC 54]. La caractérisation et la modélisation de l'évolution des structures de dislocations lors de la déformation plastique restent néanmoins une problématique ouverte dans la communauté internationale. Il en résulte une très grande difficulté à prédire dans quelle mesure des structures de dislocations évoluant vers des sous-structures intragranulaires de plus en plus autonomes peuvent conduire à la germination (thermiquement activée) de nouveaux grains [HOL 03]. Ces mêmes structures représentent ensuite une force motrice pour la croissance des germes et la migration des joints de grains, et dictent donc la cinétique de cette croissance, tout comme les obstacles liés à la présence de précipités, de particules de seconde phase, etc. Les mobilités et les énergies des interfaces mobiles jouent également un rôle essentiel sur la cinétique. Elles dépendent des caractéristiques cristallographiques des interfaces, de la présence d'éléments en

solution solide, de la température, et même du champ de contraintes [HUM 04]. Les fortes hétérogénéités de déformation qui prennent place dans les polycristaux (et qui peuvent être mesurées par corrélation d'images numériques et modélisées par des approches à champs complets) sont fortement corrélées aux mécanismes de recristallisation et à leur cinétique, ce qui met en évidence leur caractère « local ».

Comme on le constate, les principaux défis à relever pour étudier et modéliser les mécanismes de recristallisation concernent (a) la caractérisation in situ de la germination et de la croissance des grains, qui sont 3D et dépendent à la fois des champs macroscopiques et des interactions « locales » (i.e., à l'échelle intra-granulaire), (b) le lien entre ces mécanismes, leurs effets sur les microstructures et textures, et les comportements macroscopiques en conditions d'usage ou de déformation naturelle (pour les minéraux et la glace), et (c) la prise en compte de ces mécanismes de manière physique dans des approches de modélisation à différents degrés de complexité et à différentes échelles de temps et d'espace.

Les échanges effectués dans le cadre du précédent GDR « Recristallisation » nous ont permis de constater que les outils de caractérisation et de modélisation adaptés à l'étude de ces phénomènes sont en plein essor. En effet, des outils de caractérisation « classiques » tels que l'EBSD (Electron Backscattering Diffraction) sont dorénavant capables (a) de se décliner en version « haute résolution angulaire » afin de caractériser de manière fiable les champs de dislocations et leurs hétérogénéités dans les polycristaux [WIL06 MAN15], (b) de proposer des analyses en 3D par le biais de coupes successives de la surface d'un échantillon par FIB (Focused Ion Beam) [FAN 14], ou encore (c) d'effectuer des analyses in situ grâce à des dispositifs de chauffage et/ou de déformation fonctionnant sous microscope électronique. Les outils de diffraction des rayons X permettent aussi, depuis quelques années, de caractériser en 3D des microstructures polycristallines par la méthode DCT (Diffraction Contrast Tomography) [LUD 09]. Enfin, les outils de traitement et d'analyse des méthodes mentionnées ci-dessus, même dans leurs versions plus « classiques », restent en perpétuelle évolution, ce qui profite fortement à une caractérisation précise des mécanismes de recristallisation. On peut citer, par exemple, l'utilisation de méthodes de reconstruction 3D en diffraction X synchrotron [BOR 10] ou la caractérisation des sous-structures de dislocations à partir du traitement de clichés EBSD [PAN 08].

Du point de vue de la modélisation, deux types d'approches coexistent. Les approches « à champ moyen » visent à reproduire un comportement macroscopique en prenant en compte les évolutions microstructurales tout en minimisant les coûts de calcul associés. Ces approches sont basées sur des concepts physiques de base pour décrire l'écroutissage, la restauration, la germination et la migration de joints de grains [JIA 07], mais comportent aussi souvent une part phénoménologique, « ad hoc », fortement dépendante du matériau (voir par exemple, pour l'olivine [SIG 15]). Toutefois, cette dernière décennie, des modèles avec des bases théoriques plus fermement établies ont aussi été développés [MON 09, BER 11a].

Les approches « à champ complet » ont vu leur essor grâce à l'accroissement des capacités de calcul [RES 09, QUE 11, MOU 98, LEB 01]. Ces approches permettent une représentation plus fidèle de la complexité des microstructures et de leur évolution au cours de la déformation. La modélisation des mécanismes de recristallisation en a fortement bénéficié, en particulier grâce à des représentations explicites de microstructures par l'utilisation de maillages de différents types, en 2D et 3D. On peut citer par exemple la méthode « level-set » [LOG 08, BER 11b, MIE 15], les extensions des méthodes dites de « front tracking » [BAR 08, PIA 10], ou encore les automates cellulaires [SOL 10, POP 15].

Malgré ces avancées, des questions-clés demeurent, tant sur le plan fondamental que concernant de nouveaux défis à l'interface avec l'industrie. On peut citer, par exemple, (a) les mécanismes élémentaires de germination à partir de structures déformées, (b) la prédiction des textures et

microstructures à partir d'un chemin thermomécanique donné, (c) le couplage avec la restauration, la détermination des énergies stockées dans les différentes composantes de texture, ainsi que l'impact de la recristallisation sur les textures, ou encore (d) l'impact des mécanismes de germination et croissance sur la redistribution des champs de contrainte locaux.

- [BAR 08] L.A. Barrales Mora, G. Gottstein, L.S. Shvindlerman (2008), Three-dimensional grain growth: Analytical approaches and computer simulations. *Acta Materialia*, 56, 5915.
- [BEC 54] P.A. Beck (1954), Annealing of cold-worked metals. *Adv. Phys.*, 3, 245.
- [BER 11a] P. Bernard and S. Bag and K. Huang and R.E. Logé (2011), A two-site mean field model of discontinuous dynamic recrystallization. *Materials Science and Engineering: A*. 528, 24, pp. 7357-7367.
- [BER 11b] M. Bernacki, R.E. Logé and T. Coupez (2011), Level set framework for the finite-element modelling of recrystallization and grain growth in polycrystalline materials. *Scripta Materialia*. 64. 6. pp 525-528.
- [BOR 10] V. Borthwick, S. Schmidt, S. Piazolo, C. Gundlach, A. Griera, P. Bons and M.W. Jessell (2010), The application of in-situ 3D X-ray Diffraction in annealing experiments: First interpretation of substructure development in deformed NaCl. *Proceedings of the 4th Joint International Conference of Recrystallization and Grain Growth*, Sheffield.
- [FAN 14] G.H. Fan, Y.B. Zhang, J.H. Driver and D. Juul Jensen (2014), Oriented growth during recrystallization revisited in three dimensions. *Scripta Materialia*. 72-73. pp 9-10.
- [HIM 63] L. Himmel (ed.) (1963), *Recovery and Recrystallization of Metals*. Interscience, New York.
- [HOL 03] E. A. Holm, M. A. Miodownik, A. D. Rollett (2003), On abnormal subgrain growth and the origin of recrystallization nuclei. *Acta Materialia*, 51, 2701.
- [HUM 04] J.F. Humphreys and M. Haterly (2004), *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Elsevier (2nd edition).
- [JIA 07] W.G. Jiang, G.C. Wang, S.Q. Lu and J.W. Li (2007), Prediction of microstructure evolution of Al-1% Mg alloy during hot forming and sequential heat treatment. *Journal of Materials Processing Technology*, 182, 274.
- [LEB 01] R.A. Lebensohn (2001). N-site modeling of a 3D viscoplastic polycrystal using Fast Fourier Transform. *Acta Materialia*, 49, 2723.
- [LOG 08] R.E. Logé, M. Bernacki, H. Resk, L. Delannay, H. Dignonnet, Y. Chastel, T. Coupez (2008), Linking plastic deformation to recrystallization in metals, using digital microstructures. *Philosophical Magazine*, 88, 3691.
- [LUD 09] W. Ludwig, A. King, P. Reischig, M. Herbig, E.M. Lauridsen, S. Schmidt, H. Proudhon, S. Forest, P. Cloetens, S. Rolland du Roscoat, J.Y. Buffière, T.J. Marrow and H.F. Poulsen (2009). New opportunities for 3D materials science of polycrystalline materials at the micrometre lengthscale by combined use of X-ray diffraction and X-ray imaging. *Mater. Sc. and Eng.: A*. 524. 1-2. pp 69-76.
- [MAN 15] H. Mansour, M.A. Crimp, N. Gey and N. Maloufi (2015). Accurate electron channeling contrast analysis of a low angle sub-grain boundary. *Scripta Mater*. 109. pp 76-79.
- [MIE 15] C. Mießen, M. Liesenjohann, L.A. Barrales-Mora, L.S. Shvindlerman and G. Gottstein (2015). An advanced level set approach to grain growth -Accounting for grain boundary anisotropy and finite triple junction mobility. *Acta Materialia*. 99. 39-48.
- [MON 09] F. Montheillet, O. Lurdos, G. Damamme (2009), A grain scale approach for modeling steady-state discontinuous dynamic recrystallization. *Acta Materialia*, 57, 1602.
- [MOU 98] H. Moulinec and P. Suquet (1998), A numerical method for computing the overall response of nonlinear composites with complex microstructure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 157, 1-2, 69-94.
- [PAN 08] W. Pantleon (2008). Resolving the geometrically necessary dislocation content by conventional electron backscattering diffraction. *Scripta Materialia*. 58, 11. 994-997.
- [PIA 10] S. Piazolo, M. W. Jessell, P. D. Bons, L. Evans and J. Becker (2010), Numerical simulations of microstructures using the Elle platform: A modern research and teaching tool. *Journal Geological Society of India*, 75, 110.
- [POP 15] E. Popova, Y. Staraselski, A. Brahme, R.K. Mishra and K. Inal (2015). Coupled crystal plasticity - Probabilistic cellular automata approach to model dynamic recrystallization in magnesium alloys. *International Journal of Plasticity*. 66. pp 85-102.
- [QUE 11] R. Quey, P.R. Dawson and F. Barbe (2011). Large-scale 3D random polycrystals for the finite element method: Generation, meshing and remeshing. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 200, 1729-1745.
- [RES 09] H. Resk, L. Delannay, M. Bernacki, T. Coupez and R. Logé (2009), Adaptive mesh refinement and automatic remeshing in crystal plasticity finite element simulations. *Modelling Simul. Mater. Sci Eng.*, 17, 075012.

- [SIG 15] J. Signorelli and A. Tommasi (2015). Modeling the effect of subgrain rotation recrystallization on the evolution of olivine crystal preferred orientations in simple shear. *Earth and Planetary Science Letters*. 430. pp 356-366.
- [SOL 10] D. Solas, J. Thébaud, C. Rey and T. Baudin (2010). Dynamic recrystallization modeling during hot forging of a nickel based superalloy. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publ. 638.
- [WIL 06] A.J. Wilkinson, G. Meaden and D. J. Dingley (2006). High-resolution elastic strain measurement from electron backscatter diffraction patterns: New levels of sensitivity. *J. Ultramicroscopy*. 106. 4-5. pp. 307-313.

1.2 Contexte international et motivation du GDR

Les équipes candidates à participer à ce GDR sont très actives dans des domaines variés en lien avec la recristallisation, impliquant de l'expérimental et/ou de la modélisation, et ce sur différents types de matériaux. Une synthèse de ces activités est fournie dans le tableau ci-dessous, lequel rassemble la plupart des équipes engagées dans ce projet de GDR.

Equipe ou partenaire	Matériaux	Modèles		Expériences		
		Semi-analytique ou champ moyen	Description fine de la microstructure	Essais mécaniques	Observations in situ	Autres
CEMEF	Inconel 718, Acier 304L, Tantale, Alliage Zr	Rex dynamique discontinue et postdynamique	FEM + level set	Torsion, compression	Platine chauffante dans le MEB + EBSD jusqu'à 1200°C	
LGF	Alliages Ti, aciers ferritiques et inox austénitiques, Ni-Nb, Al	Déformation plastique et hétérogénéités intragranulaire, Rex dynamique continue et discontinue	CPFEM (Neper/FEpX), déformation plastique	Torsion, compression		EBSD haute résolution angulaire. Analyse de profil de raie RX
LEM3	Métaux, glace	Auto-cohérent élasto-viscoplastique	Plasticité cristalline couplée mécanique des champs de dislocations (EF et FFT)			EBSD 3D ECCI TKD
MSSMat	Aciers, Superalliages Ni		CPFEM (couplage avec modèle Automate cellulaire d'ICMMO Orsay)	Compression à chaud		EBSD, EBSD 3D (MEB FIB), diffraction X, MET
LSPM	Aciers, Cu, Zr, Ti, Al, Mg	Auto-cohérent avec lois d'écroutissage spécifiques	Monte Carlo, Vertex, FFT		Platine chauffante sous MEB jusqu'à 700°C	RX haute résolution, énergies stockées
Geo-sciences Montpellier	Minéraux et roches	Auto-cohérent viscoplastique		Presses pour expériences de déformation à 300MPa et 500-1300°C	Platine chauffante sous MEB jusqu'à 1100°C	EBSD haute résolution équipé de platines cryogénique et chauffante
LGGE	glace	Auto-cohérent	Utilisation de la	A T<0°C sur	Champs de	EBSD,

		viscoplastique et élasto-viscoplastique	méthode FFT - CraFT	monocristaux et multicristaux	déformation par DIC, synchrotron structures de déformation et germination	caractérisation optique
MATEIS	Aciers ODS, alliages base Cobalt, alliage Ti	Modèle à base physique, recristallisation dynamique, croissance anormale	FEM+level set	Traction/compression/torsion /fatigue basse/hautes températures (gleeble)	Tomographie X +machine traction/torsion/fatigue in situ (MEB, tomo X))	EBSD machine d'essai in situ MET PTE
UMET Lille	Minéraux du manteau		Modélisation de dislocations (échelle atomique et dynamique dislocations)		Déformation à haute pression et haute température (synchrotron)	
ICMMO	Acier IF, NiW, FeCo, Invar, Cu, Al, ODS, Fe-3%Si, alliages de titane		Monte Carlo, Automates Cellulaires, VPSC	Traction	Platines chauffantes dans le MEB	EBSD, diffraction des rayons X (texture)
SIMAP	Aciers, Aluminium, Titane, Magnésium	Recristallisation anisotherme		Traction en température Nano-indentation	EBSD in-situ (chauffage & traction) Champ de déformation Précipitation par SAXS	TEM-ACOM (logiciel ASTAR)
LMS Ecole Polytechnique Palaiseau	Minéraux Roches Céramiques Alliages métalliques	Plasticité cristalline et glissement aux joints, Modélisation EF	Reconstruction microstructures réalistes/réelles	Compression uniaxiale (< 1500°C)	In situ MEB platine chauffante <1000°C Compression/traction in situ MEB <700°C EBSD Deformation in situ MCT Mesures de champs CIN	Caractérisation microstructures 3D coupes sériées
CEA Valduc	Tantale	Champ moyen recristallisation statique		Torsion et compression, basses/hautes vitesses		
CEA Saclay	Aciers ODS, SiC, alliages Zr et Al	Lien microstructure – propriétés mécaniques		Traction uniaxiale et sur anneaux, compression, pression interne		Microscopie optique, texture par RX et diffraction de neutrons
Constellium	Alliages Al	Modèle à base physique pour déterminer la fraction recristallisée, (équilibre épinglage Zener par dispersoïdes - force motrice	Modèles de simulation numérique des textures de déformation (code couplé à une approche par EF pour le calcul des chemins de	Compression plane, traction (à chaud et froid), fatigue		EBSD haute résolution, microscopie optique, MET (precipitation), Texture par RX

		des dislocations déformation plane à chaud)	déformation)			
INDUSTE EL, ArcelorMittal	Aciers au carbone et aciers inoxydables	Recristallisation statique, post- dynamique et dynamique	FEM + level set (modèles CEMEF)	compression et traction (Gleeble), laminage, forgeage,		EBSD, microscopie optique,
APERAM	Aciers inox	Recristallisation dynamique continue, recristallisation post-dynamique, grossissement de grains		Compression à chaud uniaxiale et bipoissonnement, laminage		EBSD, microscopie optique, DRX texture, MET
AREVA- NP	Zirconium	phénoménologique		Extrusion, laminage, traction		EBSD, MET

Aux équipes de recherche, s'ajoutent les partenaires industriels suivants : Constellium, Aubert&Duval, INDUSTRIEL (ArcelorMittal), Aperam, AREVA.

À partir de ce tableau, on peut noter comme faits remarquables :

- la variété des matériaux étudiés ;
- la complémentarité des modèles développés ou utilisés ;
- le développement croissant des observations in situ et des mesures EBSD ;
- la possibilité de travailler à la fois avec des experts des structures de déformation et de la recristallisation ;
- la très bonne représentativité des activités des équipes candidates par rapport à l'état de l'art mondial ;
- la présence des intervenants principaux du domaine en France ;
- l'engagement important des industriels.

Grâce au précédent GDR « Recristallisation », une structuration a vu le jour entre les actions de ces différentes équipes, en particulier sur les aspects génériques et transversaux. Des groupes de travail se sont mis en place, et une étude commune visant à comparer les différentes méthodes de mesure de densité de dislocations a offert des résultats intéressants (ils seront présentés lors d'une conférence internationale et sont en cours de publication). Un projet ANR blanc (DREAM) a aussi vu le jour ; il traite de la question fondamentale du lien entre hétérogénéités de déformation et mécanismes de recristallisation et fédère une structure inter-disciplinaire (roches / métaux / glace, expérimentation / modélisation).

La volonté de rapprocher encore études fondamentales et appliquées, et de stimuler la transversalité des approches est une motivation importante pour la demande de renouvellement de ce GDR. Ce GDR a aussi pour vocation d'interagir avec d'autres groupements de la communauté « Mécanique » et « Matériaux », parmi lesquels :

- les actions de l'association MECAMAT, dont la commission « Matériau numérique » (SF2M/MécaMat) animée par Marc Bernacki et Yann Monnerie, et le groupe de travail « Traitements thermomécaniques, Microstructure et Rhéologie » animé par David Piot.
- les actions de la SF2M, Société Française de Métallurgie et des Matériaux.

2. Organisation du GDR, groupes de travail et thèmes développés

Nous proposons une structuration du GDR Recristallisation basée sur 5 thèmes principaux, qui ont été identifiés à l'issue du précédent GDR comme nécessitant un fort besoin de regroupement et seront portés par des Groupes de Travail (GTs). Ces thèmes (et les GTs associés) assureront pour une part la continuité de la structuration déjà mise en place, et pour une autre part une ouverture vers de nouveaux aspects.

La gouvernance du GDR aura pour mission de proposer des actions communes à ces thèmes afin de favoriser les échanges transverses.

Enfin, l'école thématique « Recristallisation » qui a eu lieu en 2014 sera reconduite dans le cadre de ce nouveau GDR. Elle sera soutenue financièrement par le CNRS.

2.1 GT 1 « Caractérisation in situ »

Porteurs : András Borbely (Lab. Georges Friedel, Mines Saint-Étienne) et Christophe Le Bourlot (MATEIS, INSA Lyon)

L'objectif de ce GT est de réunir les chercheurs intéressés par le potentiel des caractérisations in situ qui apportent de nouvelles connaissances sur la cinétique de croissance des sous-grains et des grains dans les processus de restauration et recristallisation.

Les techniques in situ permettent d'obtenir des résultats déterministes sur l'évolution d'un système, ce qui est la clé pour la validation directe des différents modèles décrivant des phénomènes peu connus comme la restauration ou la recristallisation. Une collaboration étroite avec le GT3 « Modélisation » est prévue pour la mise en œuvre d'un essai facilitant la validation ou l'exclusion des différentes hypothèses utilisées dans les codes de simulation. Pour un meilleur contrôle des paramètres expérimentaux, ce travail sera effectué prioritairement sur des matériaux modèles, puis étendu au maximum vers des matériaux dits « industriels » pour assurer un large panel de champs d'applications.

Les paramètres microstructuraux accessibles dans un essais in situ peuvent être évidemment des paramètres globaux comme la texture, mais l'accent du GT serait mis plutôt sur l'évaluation des paramètres locaux, tels que la densité de dislocations géométriquement nécessaires (analysée par EBSD) ou la densité totale de dislocations (analysée par DRX pour chaque composante de texture, pour étudier l'influence de l'énergie stockée). Un autre paramètre local accessible via la Tomographie à Contraste de Diffraction (DCT) [REI_2013] est le volume des grains recristallisés, que l'on peut déterminer aujourd'hui avec une erreur inférieure à 10% [REN_2016].

Basé sur des collaborations antérieures et des résultats excellents obtenus sur la cinétique de restauration et de recristallisation des aciers ODS [BOU_2015, SAL_2015], nous proposons entre autre des actions communes avec le GT4 « Recristallisation des Aciers ODS », incluant des campagnes de mesures sur synchrotron.

Pour obtenir des résultats scientifiquement pertinents, un ultime objectif du GT est de familiariser ses membres avec les techniques de caractérisations tel que la diffraction, la tomographie en contraste de phase ou d'absorption, la DCT, ... et plus spécifiquement les techniques accessibles sur les synchrotrons SOLEIL et ESRF, avec, dans ce dernier cas, un accent mis sur les lignes CRG françaises. Ce GT a donc aussi un caractère formateur, principalement tourné vers les doctorants ou les nouveaux utilisateurs des techniques in situ.

[REN_2016] Renversade, L., Quey, R., Ludwig, W., Menasche, D., Maddali, S., Suter R.M. & Borbely, A. (2016) Comparison between diffraction contrast tomography and high-energy diffraction microscopy on a slightly deformed aluminium alloy, accepted for publication in IUCrJ, 3 (doi:10.1107/S2052252515019995).

[BOU_2015] Boulnat, X., Sallez, N., Dadé, M., Borbély A. et al. (2015) Influence of oxide volume fraction on abnormal growth of nanostructured ferritic steels during non-isothermal treatments: An in situ study, Acta Mater. 97, 124-130.

[SAL_2015] Sallez, N., Boulnat, X., Borbély, A. et al. (2015) In situ characterization of microstructural instabilities: Recovery, recrystallization and abnormal growth in nanoreinforced steel powder, Acta Mater. 87, 377-389.

Actions proposées :

1. Workshop (1 jour au démarrage du GDR) : faire un état de lieu sur (a) les techniques de caractérisation non destructives basées sur la diffraction RX (DCT, ...), l'EBSO ou la diffraction des neutrons (analyse de profil de raie (LPA)), et (b) les appareils et possibilités existants auprès des synchrotrons SOLEIL et ESRF (en mettant l'accent sur les lignes CRG française) et les microscopes SEM équipés avec une platine chauffante.
2. Atelier : Discussion et analyse des essais combinés EBSO – DRX. Sélection du matériau modèle et réalisation de mesures combinées pour une publication commune.
3. Atelier : Analyse et choix du matériau idéal pour les conditions existantes aux synchrotrons. Montage d'un projet synchrotron.
4. Atelier : Analyse des résultats et rédaction d'une publication. Analyse de faisabilité sur des matériaux industriels plus complexes.
5. Atelier : Mise en commun et présentation des résultats lors d'un colloque final, action commune avec les autres GTs (Modélisation, Mécanismes fondamentaux, ODS, ...).

2.2 GT 2 « Mécanismes fondamentaux »

Porteurs : Andréa Tommasi (Géosciences Montpellier, Univ. Montpellier), Thiebaud Richeton (LEM3, Univ. de Lorraine) et Maurine Montagnat (LGGE, Univ. Grenoble Alpes)

L'objectif de ce GT est la compréhension des processus de germination et de migration de joints de grains, et des paramètres qui les contrôlent. Les deux processus sont contrôlés par des gradients d'énergie élastique. Toutefois, une fois cette « vérité » énoncée, plusieurs questions se posent :

- À quelle échelle ont lieu les variations significatives ?
- Comment les caractériser : sur un volume fini ? par la norme du tenseur d'incompatibilité ? Quelles métriques doit-on (ou pouvons-nous) utiliser pour quantifier l'énergie élastique ? L'analyse EBSO à plusieurs échelles nous donne actuellement accès aux densités de dislocations (statistiques et/ou géométriquement nécessaires – les GNDs), est-ce suffisant ? Quels développements / nouvelles observations pourraient donner accès à une mesure plus précise de l'énergie élastique ?

Un premier objectif de ce GT sera de faire un bilan sur ces questionnements et les possibles voies de réponse.

Un deuxième objectif de ce GT sera l'étude des rôles des hétérogénéités de contrainte et des anisotropies élastique et viscoplastique sur la recrystallisation. En effet, plusieurs d'entre nous travaillent sur des matériaux à faible symétrie et très anisotropes (minéraux, glace, métaux hexagonaux), qui se caractérisent par une recrystallisation précoce (par exemple, pour la glace, la recrystallisation se développe dès 1% de déformation) et un rôle prépondérant de cette dernière sur la déformation. Le développement des expériences in situ et des techniques de suivi cinématique par corrélation d'images permettent actuellement d'établir des liens quantitatifs entre ces hétérogénéités, l'anisotropie et la recrystallisation.

L'association expérimentation – modélisation est fondamentale pour avancer sur la détermination des critères de germination les plus pertinents. De fait, des expériences apportent des contraintes sur le rôle de divers processus, comme le maillage et la formation de « kink bands » (ou sous-joints de

flexion), dans la germination. La modélisation à différentes échelles est, elle, un outil fondamental pour tester les différents critères, via la confrontation des prédictions des modèles aux observations. L'approche couplée expérimentation – modélisation ainsi qu'un travail sur une grande variété de matériaux apporteront de nouvelles contraintes sur les paramètres contrôlant la migration, tels que l'effet des caractéristiques des joints de grains sur leur mobilité (plan de joint, type (tilt, twist), désorientation, joints de grains particuliers ($\Sigma 7 <111>$,...)) et l'effet de l'anisotropie d'énergie de surface (matériaux à faible symétrie). Un troisième objectif de ce GT sera donc, en coordination avec le GT 1 « Mesures in situ » et le GT 3 « Modélisation », de faire un bilan sur les approches (expérimentales et de modélisation) qui existent actuellement (dans le cadre du GDR) pour étudier la recristallisation.

Enfin, deux questions qui émanent plus fortement de la communauté « Science de la Terre » concernent les changements de régime de recristallisation dynamique en fonction de la température et des taux de déformation et l'effet de la recristallisation dynamique et statique sur les textures (orientations cristallographiques). En effet, pour des déformations à température croissante ou à vitesse de déformation décroissante, on observe une germination dominante, une recristallisation continue, puis une migration dominante. Ces divers processus produisent des textures différentes, avec des conséquences pour le comportement mécanique des roches et de la glace. Ce volet sera mené en étroite collaboration avec le GT 6 « Textures de déformation / recristallisation ».

Actions proposées :

1. Workshop (1 jour au démarrage du GDR) : état des lieux.
2. Atelier: les différentes approches pour estimer l'énergie interne à partir de différents types de données.
3. Atelier : Migration de joints de grain : confrontation observations directes et modèles locaux.
4. Atelier : Description d'un joint de grain, comment calculer son énergie ?
5. Action commune avec le GT 3 « Modélisation » : test de critères de germination (à la fin du GDR).

2.3 GT 3 « Modélisation »

Porteurs : David Piot (Lab. Georges Friedel, Mines Saint-Étienne) et Marc Bernacki (CEMEF, Mines ParisTech)

Les phénomènes de recristallisation sont complexes, car ils reposent sur des mécanismes différents selon les modes (statique/dynamique, continu/discontinu, métadynamique, croissance de grain) et sont liés d'une part, aux évolutions rhéologiques et d'autre part, aux évolutions microstructurales que ce soit à l'échelle microscopique des dislocations, à l'échelle mésoscopique des grains ou macroscopique des objets d'étude comme une pièce industrielle ou une structure naturelle. La recristallisation engage ainsi l'écrouissage, les restaurations statique et dynamique, la germination des nouveaux grains et la migration des joints de grains qui fait intervenir les notions de mobilité, de force motrice, d'énergie d'interface, de traînage des solutés et d'ancrage par les précipités.

Les modèles développés ont pour but, non seulement, de prévoir les évolutions microstructurales induites par la recristallisation, par exemple dans le cadre de traitements thermomécaniques contrôlés avancés dans le GT 5 « Recristallisation en milieu industriel », mais aussi, de fournir un guide d'interprétation pour l'identification et la compréhension des mécanismes. Cette démarche rend décisive les interactions avec le GT 1 « Caractérisations in situ » et le GT 2 « Mécanismes fondamentaux ». La nature de la transition entre les modes discontinus et continus en recristallisation dynamique constitue un bon exemple de question ouverte à traiter.

Toutes les modélisations de la recristallisation ont vocation à se joindre au GT et y seront incitées. Néanmoins, nous pensons par souci d'efficacité, nous focaliser au départ sur la comparaison

d'approches disponibles, de type champs moyens ou champs complets, en particulier sur la base d'une thèse déjà engagée et partagée entre les laboratoires des 2 porteurs du GT.

Face à l'ampleur des développements, aussi bien passés que futurs, nécessaires à la modélisation de la recristallisation, il est illusoire de vouloir la circonscrire à un programme de GT prédéfini. Concrètement, nous proposons à tous les volontaires qui auront des activités autour de la modélisation de la recristallisation, en particulier dans le cadre de projets de recherche financés, des thèses, postdocs, etc. de partager autant que possible leurs méthodes, leurs difficultés et leurs résultats pour fonctionner en réseau. D'un point de vue opérationnel, il conviendra d'abord de recenser les projets de ce type, en cours ou en construction, parmi la communauté.

Par ailleurs, le lancement du GT prendra la forme d'un séminaire permettant de réunir la communauté pour présenter une synthèse des modélisations développées antérieurement pour d'une part, offrir un tour d'horizon actualisant l'état de l'art dans la continuité du workshop modélisation du GDR REX précédent, et d'autre part favoriser l'intégration des nouveaux acteurs, jeunes étudiants ou chercheurs confirmés rejoignant le GT du GDR.

La structure GDR favorisera et pourra (contribuer à) financer, en complément des programmes précités, des séjours croisés entre laboratoires visant à des comparaisons, voire le cas échéant à des co-développements, notamment en lien avec les activités des autres GTs du GDR, en particulier concernant l'innovation industrielle.

Actions proposées :

1. Workshop (1 jour au démarrage du GDR) : état des lieux, retour sur le workshop modélisation du GDR REX précédent, intégration des nouveaux actifs dans le domaine.
2. Recensement des projets engagés ou en construction sur la modélisation de la recristallisation et définition des actions collectives à y associer dans le cadre du GDR (séjours croisés...), notamment de nouvelles actions communes avec les autres GTs.
3. Atelier commun avec les GTs 1 et 2 : Migration des joints de grains, confrontation observations directes et modèles locaux.
4. Atelier : comparaison des approches en champs moyens et complets disponibles.
5. Action commune avec le GT 2 : test de critères de germination (à la fin du GDR).

2.4 GT 4 « Recristallisation des aciers ODS »

Porteurs : Damien Fabrègue (MATEIS, INSA Lyon) et Yann de Carlan (CEA Saclay)

Ce groupe de travail s'intéressera particulièrement au problème de la recristallisation des aciers renforcés par dispersion d'oxydes (Oxydes Dispersed Strengthened, ODS). En effet, dans le cas de ces aciers, de multiples phénomènes métallurgiques sont couplés lorsqu'un traitement de recristallisation est réalisé, ce qui rend la compréhension de la recristallisation très complexe. Or, ces aciers, de par les applications visées (essentiellement nucléaires), se doivent d'être anisotropes et donc la recristallisation est une étape quasi-obligatoire. Ceci, ajouté au fait que la France est un des pays les plus avancés dans la métallurgie de ces aciers (notamment grâce aux nombreuses études du CEA), fait qu'il paraît intéressant qu'un groupe de travail spécifiquement dédié à cette thématique soit constituée au sein du GDR.

Ainsi, ce groupe de travail se voudra être un espace de discussion scientifique et de partage de résultats permettant d'avancer dans la compréhension du couplage entre précipitation de nanooxydes et recristallisation. Il est aussi clair qu'il interagira avec les autres groupes de travail. Le lien avec le GT 1 « Caractérisation in situ » est direct, d'autant plus que certaines expériences (et publications) sur les ODS ont été réalisées entre plusieurs des participants de ces deux GTs [SAL 2015]. Le lien avec le GT 3 « Modélisation » et le GT 2 « Mécanismes fondamentaux » est lui aussi naturel puisque l'objectif final de la compréhension est la prédiction par le modèle. En plus

des discussions, nous envisageons de participer ensemble à des expériences sur des grands instruments qui nous permettront d'obtenir des données précieuses concernant la recristallisation des ODS. Pour cela, des projets seront déposés pour, par exemple, mener des expériences de diffraction in situ ou de DCT. Ici, l'objectif sera de mettre en application les différents concepts développés lors des discussions menées dans le cadre du GT. L'avantage de ces expériences est qu'elles permettent d'obtenir un grand nombre de données sur des temps très courts et donc avec potentiellement un grand nombre de partenaires présents. Ceci sera évidemment fait en collaboration étroite avec le GT 1, via le dépôt de projets en commun sur les grands instruments. Il est clair que le but final sera la publication d'au moins un article scientifique co-signé par les différents partenaires et qui permettra de mettre en évidence au niveau national et international le travail réalisé.

[SAL 2015] N. Sallez, X. Boulnat, A. Borbély, J.L. Béchade, D. Fabrègue, M. Perez, Y. de Carlan, L. Henet, C. Mocuta, D. Thiaudière, Y. Bréchet (2015), In situ characterization of microstructural instabilities: Recovery, recrystallization and abnormal growth in nanoreinforced steel powder, *Acta Materialia*, 87, pp. 377-389.

Actions proposées :

1. Workshop (1 jour au démarrage du GDR) : état des lieux.
2. Atelier: Mécanismes de recristallisation dans les ODS.
3. Atelier: Interaction recristallisation/précipitation.
4. Atelier : Apparition de la croissance anormale dans les ODS : observation, critère.
5. Action commune avec le GT « Caractérisation in situ » (à la fin du GDR) : observation in situ par diffraction des rayons X.
6. Action commune avec le GT « Modélisation » : modélisation à base physique de l'interaction précipitation/recristallisation (à la fin du GDR).
7. Action commune avec le GT « Recristallisation en milieu industriel : quels besoins, quelles solutions ? » : solutions possibles pour contrôler la recristallisation des ODS dans le procédé industriel (à la fin du GDR).

2.5 GT 5 « Recristallisation en milieu industriel : quels besoins, quelles solutions ? »

Porteurs : Carla Barbatti (Constellium)

L'objectif de ce GT est de réunir les industriels et les scientifiques intéressés par les problématiques relatives aux différents mécanismes de recristallisation intervenant lors des traitements thermomécaniques et thermiques qui interviennent lors des gammes de transformations classiquement rencontrées dans le domaine de la métallurgie. La stratégie proposée est de profiter des discussions et des avancées réalisées dans les autres GTs sur des questions fondamentales liées à la recristallisation et la restauration, ainsi que le développement des textures, qui sont normalement basées sur des études à l'échelle du laboratoire, et discuter des défis et problèmes liés à la transférabilité d'un ensemble de techniques expérimentales et de modèles à grande échelle.

À plus long terme, les objectifs principaux consistent en une meilleure compréhension :

- des phénomènes de recristallisation (soit dynamique continue/discontinue, statique, métadynamique) et restauration, ainsi que les facteurs qui favorisent l'un plutôt qu'un autre ;
- de l'interaction des phases secondaires et/ou solutés avec les joints de grains ;
- de l'effet de l'énergie de faute d'empilement pour différents alliages (aciers, Al, Zr) sur la recristallisation ;
- de l'effet des différents modes et conditions de déformation (à chaud et à froid) sur l'évolution de la recristallisation ;

- des différentes stratégies de modélisation de la recristallisation disponibles et de leur domaine d'applicabilité.

Et enfin, prévoir d'une façon qualitative l'évolution de la fraction recristallisée, la taille de grains et la texture de recristallisation.

Actions proposés :

1. Workshop (1 jour au démarrage du GDR) : faire un état de lieu sur les problématiques liées aux mécanismes fondamentaux lors des étapes-clés des traitements thermomécaniques, les techniques et méthodes utilisées à l'échelle de laboratoire pour simuler les étapes-clés dans des gammes de transformations génériques, et les modèles de recristallisation disponibles et leurs bases théoriques.
2. Atelier : Une journée pour discuter des questions d'interaction des solutés et des phases secondaires avec les joints de grains et de l'effet de la précipitation et/ou dissolution des précipités concomitante à recristallisation.
3. Atelier : Une journée pour discuter des bonnes pratiques permettant de simuler des phénomènes liés à recristallisation à l'échelle du laboratoire ainsi que des difficultés et enjeux lorsque l'on passe à grande échelle, ainsi que de la manière de mieux comprendre la contribution de chaque étape du procédé pour le développement de la microstructure et de la texture. Seront discutées également les méthodes adaptées à la détermination des paramètres microstructuraux, comme par exemple la fraction recristallisée, ou de la cinétique de recristallisation.
4. Atelier : Une journée consacrée à évaluer les différents modèles de recristallisation permettant de décrire quantitativement la croissance de grains, la cinétique de recristallisation, la texture de recristallisation, et envisager les stratégies pour les transposer à grande échelle.
5. Atelier : Présentation des conclusions des ateliers précédents et lancement des actions communes avec les autres GTs (« Caractérisation in situ », « Textures de déformation / recristallisation », « Modélisation » et « Mécanismes fondamentaux »).

2.6 GT 6 « Textures de déformation / recristallisation »

Porteurs : Romain Quey (Lab. Georges Friedel, Mines Saint-Étienne) et Brigitte Bacroix (LPSM, Univ. Paris 13)

Ce groupe de travail visera à améliorer la compréhension du développement des textures (ou « macrotextures ») et des microtextures (champs d'orientations et de désorientations, densité de GNDs, etc.) lors d'un traitement thermomécanique complet – couplées ou non – de déformation plastique et de recristallisation.

Concernant les macrotextures, certains procédés, tels que le laminage froid suivi d'un recuit dans les alliages d'aluminium et les aciers bas carbone, ont été largement étudiés, mais cela n'est pas le cas de procédés de déformation d'application plus récente, tels que les déformations sévères suivies ou non de traitements thermiques, les procédés de mise en forme complexes (floutournage, ...), la déformation à chaud, les alliages multiphasés, les procédés de déformation mettant en œuvre des changements de chemin de déformation, etc. (Certains procédés de déformation industriels, tels que le laminage à chaud, peuvent conduire à d'importants gradients de textures.)

Concernant les microtextures, le développement des désorientations à l'échelle intragranulaire est encore relativement mal compris (orientations et désorientations locales, GNDs), d'autant plus pour des traitements thermomécaniques complexes. Il est par ailleurs nécessaire d'identifier, dans une microstructure déformée, quels sont les facteurs favorables à la recristallisation (lien avec le GT 2 « Mécanismes fondamentaux »). En hyperdéformation, le développement de la microtexture conduit à une fragmentation des grains, cadre dans lequel il est nécessaire d'éclaircir et de quantifier le rôle de la recristallisation dynamique.

Un premier objectif consiste donc à relier (pour pouvoir prévoir) de façon de plus en plus quantitative et fiable, les évolutions de textures et microtextures observées à partir d'un état initial et d'un chemin thermomécanique donnés, ainsi que leur influence sur les propriétés finales. Cette étape implique d'une part un chainage des modèles plasticité / recristallisation (interaction avec le GT « Modélisation ») et d'autre part un dialogue étroit avec le GT « Mécanismes fondamentaux » afin d'inclure ceux-ci de la manière la plus précise possible (quid des critères de germination / croissance : énergie stockée, désorientations locales, ...). Un deuxième objectif, touchant davantage les applications de type géomatériaux, pour lesquelles les chemins thermomécaniques subis ne sont pas bien connus, consiste à pouvoir déduire de l'observation et de l'analyse quantitative des textures et microtextures finales les mécanismes mis en jeu pour les obtenir.

Actions proposées :

1. Workshop (1 jour au démarrage du GDR) : « état des lieux », bilan de l'action du GT dans le GDR « Recristallisation » précédent.
2. Atelier : une journée pédagogique sur la « mesure et analyse des textures cristallographiques » : principe et intérêt de l'analyse quantitative des textures et microtextures...
3. Atelier : interaction avec le GT 5 « Recristallisation en milieu industriel » pour le recensement de nouveaux cas qui posent question et problème.
4. Atelier « textures/microtextures, que nous disent-elles ? », action commune avec le GT 2 « Mécanismes fondamentaux », avec pour objectif l'analyse des textures/microtextures (finales) pour la compréhension de la déformation du matériau, ce qui est particulièrement pertinent pour les géomatériaux dont l'histoire n'est pas bien connue.
5. Atelier : une journée pour recenser les modèles existants permettant de prévoir des évolutions de textures et microtextures, du côté de la plasticité et du côté de la recristallisation ; ce qui peut être couplé ou non. Ce recensement devrait pouvoir déboucher, en partenariat avec le GT « modélisation », sur un benchmark mené sur des cas difficiles.

2.7 École thématique « Recristallisation »

Porteur : Maurine Montagnat (LGGE, Univ. Grenoble Alpes)

Une école thématique sera organisée en 2016 et une autre a pour vocation à être organisée à nouveau en 2018. Pour la première, un dossier a déjà été déposé auprès du CNRS, et un financement de 10 000 euros a été obtenu. L'école aura lieu en octobre ou novembre 2016. Elle rassemblera une trentaine de participants, autour d'un programme assez proche de la version 2014 qui avait rencontré un vrai succès.

L'objectif de cette école est de former la jeune génération (doctorants et post-doctorants) à une vision « globale » des mécanismes de recristallisation et aux outils d'analyse et de modélisation utilisés et développés dans la communauté française. Nous espérons que, par ce biais, un sentiment d'appartenance à une communauté Recristallisation puisse émerger, laquelle facilitera les interactions entre les acteurs du domaine. En particulier, nous insistons sur le fait qu'il est important qu'un jeune chercheur ait une vision la plus large possible de ce qui se fait dans cette communauté afin d'être à même d'adapter ses outils d'étude à son problème, au-delà du seul cercle de son équipe d'accueil.