

**Projet ANR-13-BS09-0001-01**

**DREAM**

Programme Blanc 2013

<b>A</b>	<b>IDENTIFICATION.....</b>	<b>2</b>
<b>B</b>	<b>RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC.....</b>	<b>2</b>
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics.....	2
B.2	Résumé consolidé public en français.....	3
B.3	Résumé consolidé public en anglais.....	3
<b>C</b>	<b>MÉMOIRE SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>3</b>
C.1	Résumé du mémoire.....	4
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art.....	4
C.3	Approche scientifique et technique.....	4
C.4	Résultats obtenus.....	4
C.5	Exploitation des résultats.....	4
C.6	Discussion.....	4
C.7	Conclusions.....	4
C.8	Références.....	4
<b>D</b>	<b>LISTE DES LIVRABLES.....</b>	<b>4</b>
<b>E</b>	<b>IMPACT DU PROJET.....</b>	<b>5</b>
E.1	Indicateurs d'impact.....	5
E.2	Liste des publications et communications.....	6
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	6
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires).....	7

*Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.*

*Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.*

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	DREAM
Titre du projet	Dynamic Recrystallization in Anisotropic Materials
Coordinateur du projet (société/organisme)	Maurine Montagnat Rentier IGE – UMR5001 (anciennement LGGE)
Période du projet (date de début – date de fin)	01/01/2014 – 31/12/2018
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mme Maurine Montagnat Rentier
Téléphone	0476824267
Adresse électronique	maurine.montagnat@univ-grenoble-alpes.fr
Date de rédaction	31/12/2018

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	Lab. Géosciences Montpellier – A. Tommasi Lab. LEM3 – T. Richeton Lab. CEMEF – M. Bernacki
---	--

## B RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC

### B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RÉSUMÉS CONSOLIDÉS PUBLICS

*Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.*

**Titre d'accroche du projet** (environ 80 caractères espaces compris)

*Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.*

*Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.*

**Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique** (150 caractères max espaces compris)

**Paragraphe 1 :** (environ 1200 caractères espaces compris)

*Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal*

**Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées** (150 caractères max espaces compris)

**Paragraphe 2 :** (environ 1200 caractères espaces compris)

*Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).*

**Résultats majeurs du projet** (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.

Préciser aussi toute autre retombée= partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

**Production scientifique et brevets depuis le début du projet** (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

**Illustration**

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

**Informations factuelles**

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

## **B.2 RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC EN FRANÇAIS**

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

**La recristallisation dynamique, un mécanisme complexe et hétérogène de la déformation des matériaux métalliques et naturels (glace, roche).**

**Hétérogénéités de déformation et recristallisation:**

La recristallisation dynamique est un mécanisme essentiel lors de la déformation à chaud des matériaux cristallins. Elle est fondamentale pour produire des plaques métalliques minces lors de la mise en forme par laminage à chaud. De même, les glaciers ne pourraient s'écouler, ni les chaînes de montagne se former sans ce mécanisme essentiel. Il s'agit d'une restructuration de la microstructure (taille et forme des grains, les cristaux) et de la texture (orientations cristallographiques) par germination de nouveaux grains et migration des joints de grains, qui a lieu au cours de la déformation. Cette « restructuration » a pour force motrice la réduction de l'énergie stockée sous forme de défauts linéaires, les dislocations. Les processus de germination et de croissance des grains restent toutefois mal compris dû à la difficulté de la caractérisation d'un facteur essentiel pour leur activation: les hétérogénéités de déformation locales. Le projet DREAM s'est donc attelé à analyser en détail les processus à l'origine de ces hétérogénéités, et leurs interactions avec les mécanismes de recristallisation en étudiant des matériaux fortement anisotropes, dans lesquels les hétérogénéités sont encore plus fortes et plus facilement « caractérisables »: la glace et le magnésium.

**Expérimentation, caractérisation in-situ et modélisation**

La force du projet DREAM a été de proposer des méthodes expérimentales et de caractérisation à haute résolution, associées à des outils de modélisation prenant en compte les mécanismes à petites échelles (transport de dislocations). La glace et le magnésium se

sont révélés d'excellents « analogues » des minéraux et des métaux, tout en permettant de travailler dans des configurations expérimentales optimales. En effet, la glace se déforme « à haute température » dans une chambre froide, et le magnésium recristallise dès 250°C . Nous avons mis à profit les outils de microscopie électronique disponibles à Géosciences Montpellier pour obtenir des cartes inégalées de microstructures déformées et recristallisées. L'association de ces observations à des mesures de champs de déformation par corrélation d'images, en cours d'essai nous a permis de mettre en évidence un lien entre hétérogénéités de déformation et mécanismes de recristallisation. Ces mêmes liens ont été modélisés par le biais d'une approche intégrant les champs de dislocations dans un modèle de plasticité cristalline afin de tester le rôle de ces derniers sur la réponse en déformation.

### **Résultats majeurs**

Les travaux sur la glace ont permis de (i) montrer le rôle de la recristallisation sur l'évolution des champs de déformation, (ii) proposer une description fine des mécanismes de recristallisation (en particulier la germination) et la nature des dislocations impliquées, révélant des mécanismes fondamentaux ignorés, (iii) valider une approche de modélisation novatrice basée sur la mécanique des champs de dislocations. Les travaux sur le magnésium, démarrés plus tardivement, permettent de faire le lien entre hétérogénéité de l'énergie stockée et mécanismes locaux de recristallisation statique.

### **Production scientifique**

Le projet a donné lieu à 11 articles publiés et 1 en préparation montrant:

- des observations in-situ de l'effet de la recristallisation sur le champ de déformation (Chauve et al 2015, Chauve et al 2017a);
- la coexistence et même la coopération entre différents mécanismes de recristallisation (bulging et formation de sous-grains) qui sont souvent « séparés » dans les approches théoriques et de modélisation (Montagnat et al 2015, Chauve et al 2016)
- le rôle de champs de dislocations complexes, non-attendus, dans la recristallisation (Chauve et al 2017b, Journaux et al In Press), qui ont été considérés dans l'effort de modélisation (Richeton et al 2017).
- le rôle des hétérogénéités de déformation sur la cinétique et les microstructures produites même lors du recuit (recristallisation statique, post-déformation) (Hidas et al 2017, Lopez-Sanchez et al In Prep).
- (Fressengeas, 2019), (Richeton 2017) et (Schlosser et al. 2017) montre des études périphériques utilisant des outils du projet.

Le projet DREAM est un projet de recherche fondamentale coordonné par M. Montagnat de l'IGE. Il associe les laboratoires Géosciences Montpellier (A. Tommasi), LEM3 (T. Richeton) et CEMEF (M. Bernacki). Le projet a commencé en janvier 2014 et a duré 48 mois, puis a été prolongé jusqu'à fin 2018. Il a bénéficié d'une aide ANR de 414 000 € pour un coût global de l'ordre de 2 230 000 €.

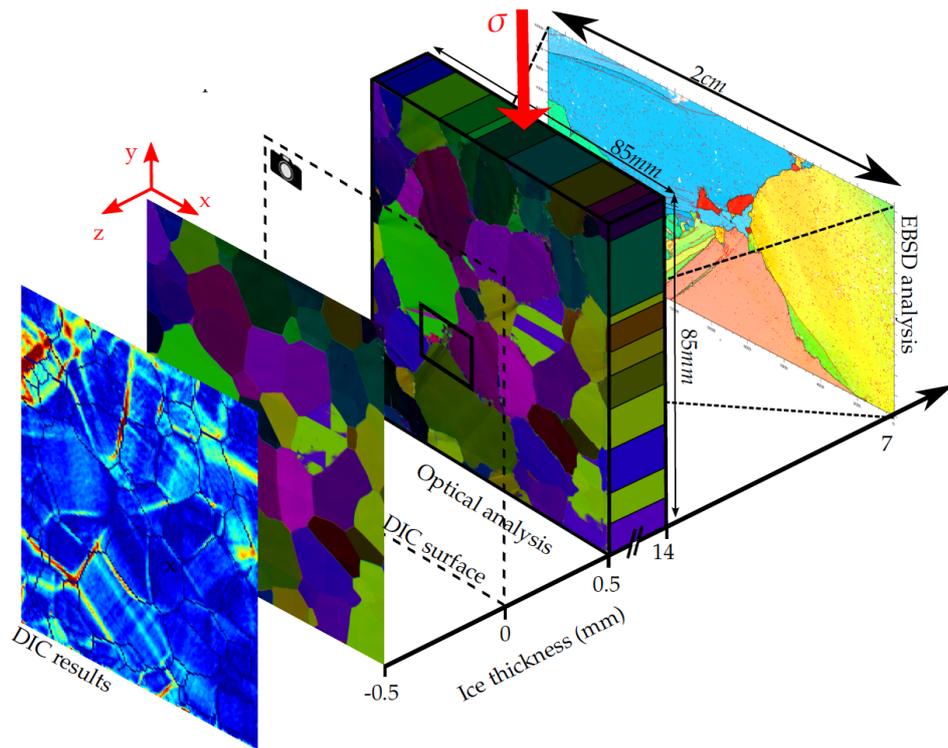


Schéma de principe des mesures de champs de déformation (Digital Image Correlation, DIC results) couplées aux mesures d'évolution des microstructures (analyse optique et EBSD) sur les échantillons de glace de structure « extrudée ».  $\sigma$  illustre la contrainte appliquée.

### **B.3 RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC EN ANGLAIS**

*Suivre impérativement les instructions ci-dessus.*

#### **Dynamic recrystallization, a complex and heterogeneous mechanism occurring during deformation of metals, ice and minerals.**

##### **Deformation heterogeneities and recrystallization :**

Dynamic recrystallization is an essential mechanism occurring during hot deformation of crystalline materials. It is fundamental to produce thin metallic plates during hot rolling. Similarly, glaciers would not flow and mountain ranges would not form without the occurrence of recrystallization. It consists of a microstructure (shape and size of crystals) and texture (crystallographic orientations) reorganization during deformation by the mean of nucleation of new grains and grain boundary migration. The driving force of this « restructuring » is the reduction of energy stored in the form of linear defects, the dislocations. Nucleation and grain boundary migration processes remain poorly understood, in particular because of the difficulty to characterize local strain heterogeneities. These heterogeneities are, indeed, an essential feature for recrystallization mechanisms to be activated. The DREAM project has tackled the issues of the origin of these heterogeneities and their interactions with recrystallization processes by studying two materials, which due to their high viscoplastic anisotropy display highly heterogeneous strain distributions, namely ice and magnesium.

##### **Experimentation, in-situ characterization, and modeling**

The strength of the DREAM project has associated experiments, high resolution characterization tools, and modeling approaches able to take into account processes at small scales (dislocations transport). Ice and Magnesium appeared as excellent analogues for minerals and metals, allowing to work into optimal experimental configurations. Indeed, ice deforms at « high temperature » in a cold room, and Mg recrystallization starts at 250°C. We took advantage of the electronic microscopy tools available at Geosciences Montpellier to obtain unrivalled quality maps of deformed and recrystallized microstructures. By associating such observations to in-situ strain field measurements by digital image correlation, we were able to directly link strain field evolution to recrystallization mechanisms. Those links have then been simulated thanks to a crystal plasticity model integrating fields of dislocations in order to estimate their impact of the strain response.

##### **Major results**

Observations on ice put forward (i) the role of recrystallization on the evolution of local strain field during deformation, (ii) the first small scale description of recrystallization mechanisms (notably nucleation) and of the type of dislocations involved, revealing long ignored fundamental mechanisms, and enabled to (iii) validate an innovative modeling approach based on field dislocations mechanics. Still on-going work on magnesium highlights the fundamental links between local strain heterogeneities and static recrystallization mechanisms.

##### **Scientific production**

11 articles have been published during the project, and 1 is in preparation. They show :

- in-situ observations of recrystallization impact of local strain fields (Chauve et al. 2015, Chauve et al. 2017a)
- coexistence and cooperation between different recrystallization mechanisms (bulging and sub-grain formation) often separated in theoretical and modeling approaches (Montagnat et al 2015, Chauve et al 2016)
- the role of complex and non-expected dislocation fields, during recrystallization (Chauve et al 2017b, Journaux et al In Press), that have further been implemented in the dislocation field mechanics modeling (Richeton et al 2017).
- the role of strain heterogeneities on the microstructure evolution during annealing (static recrystallization, post-deformation) (Hidas et al 2017, Lopez-Sanchez et al In Prep).
- (Fressengeas, 2019), (Richeton 2017) and (Schlosser et al. 2017) present peripheral studies based on the tools developed during the project.

DREAM is a fundamental research project coordinated by M. Montagnat from IGE, in association with Geosciences Montpellier (A. Tommasi), LEM3 (T. Richeton) and CEMEF (M. Bernacki). The project started in January 2014, lasted 48 months and was extended one more year until end of 2018. He benefited from an ANR support of 414 000 €, over a total estimated cost of 2 230 000 €.

## C MÉMOIRE SCIENTIFIQUE

**Mémoire scientifique confidentiel** : non

### C.1 RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

**La recristallisation dynamique, un mécanisme complexe et hétérogène de la déformation des matériaux métalliques et naturels (glace, roche).**

La recristallisation dynamique est un mécanisme essentiel lors de la déformation à chaud des matériaux cristallins. Elle est fondamentale pour produire des plaques métalliques minces lors de la mise en forme par laminage à chaud. De même, les glaciers ne pourraient s'écouler, ni les chaînes de montagne se former sans ce mécanisme essentiel. Il s'agit d'une restructuration de la microstructure (taille et forme des grains, les cristaux) et de la texture (orientations cristallographiques) par germination de nouveaux grains et migration des joints de grains, qui a lieu au cours de la déformation. Cette « restructuration » a pour force motrice la réduction de l'énergie stockée sous forme de défauts linéaires, les dislocations. Les processus de germination et de croissance des grains restent toutefois mal compris dû à la difficulté de la caractérisation d'un facteur essentiel pour leur activation: les hétérogénéités de déformation locales. Le projet DREAM s'est donc attelé à analyser en détail les processus à l'origine de ces hétérogénéités, et leurs interactions avec les mécanismes de recristallisation en étudiant des matériaux fortement anisotropes, dans lesquels les hétérogénéités sont encore plus fortes et plus facilement « caractérisables »: la glace et le magnésium.

La force du projet DREAM a été de proposer des méthodes expérimentales et de caractérisation à haute résolution, associées à des outils de modélisation prenant en compte les mécanismes à petites échelles (transport de dislocations). La glace et le magnésium se sont révélés d'excellents « analogues » des minéraux et des métaux, tout en permettant de travailler dans des configurations expérimentales optimales. En effet, la glace se déforme « à haute température » dans une chambre froide, et le magnésium recristallise dès 250°C . Les outils de microscopie électronique disponibles à Géosciences Montpellier ont permis d'obtenir des cartes inégalées de microstructures déformées et recristallisées. L'association de ces observations à des mesures de champs de déformation par corrélation d'images, en cours d'essai nous a permis de mettre en évidence un lien entre hétérogénéités de déformation et mécanismes de recristallisation. Ces mêmes liens ont été modélisés par le biais d'une approche intégrant les champs de dislocations dans un modèle de plasticité cristalline afin de tester le rôle de ces derniers sur la réponse en déformation.

Les travaux sur la glace ont permis de (i) montrer le rôle de la recristallisation sur l'évolution des champs de déformation, (ii) proposer une description fine des mécanismes de recristallisation (en particulier la germination) et la nature des dislocations impliquées, révélant des mécanismes fondamentaux ignorés, (iii) valider une approche de modélisation novatrice basée sur la mécanique des champs de dislocations. Les travaux sur le magnésium, démarrés plus tardivement, permettent de faire le lien entre hétérogénéité de l'énergie stockée et mécanismes locaux de recristallisation statique.

## C.2 ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE, ÉTAT DE L'ART

La connaissance de l'évolution des microstructures (taille et forme des grains ou cristaux) et des textures (orientations cristallographiques) au cours de la déformation, de la recristallisation et des transformations de phases est essentielle en Sciences des Matériaux, comme en Sciences de la Terre. En effet, les propriétés physiques et mécaniques des matériaux cristallins que sont les roches, la glace et les métaux sont fortement dépendantes des microstructures et textures. La recristallisation, qui se produit inévitablement au cours des processus à haute température, induit de fortes modifications de ces microstructures et des textures. Dans le cas des roches, au-delà des premiers 10-15 km qui sont contrôlés par des mécanismes fragiles, notre planète se déforme essentiellement par des procédés viscoplastiques qui ont lieu à haute température. L'anisotropie de texture qui en résulte est sondée par des méthodes sismiques et électromagnétiques permettant de cartographier la déformation du manteau profond, mais dont l'interprétation dépend de la connaissance des mécanismes à l'origine de cette anisotropie. La glace issue des calottes polaires contient des informations uniques sur l'histoire climatique de notre Terre. Cependant, les interprétations paléoclimatiques dépendent de nos capacités à établir une relation entre la profondeur de la glace extraite et son âge, et donc à remonter à son histoire de déformation. Dans les procédés industriels de mise en forme, les métaux sont souvent déformés à haute température. La recristallisation est aussi un élément essentiel de l'optimisation des traitements thermiques et mécaniques pour le contrôle des propriétés finales.

Dans tous ces matériaux cristallins, l'évolution des textures et microstructure sous l'effet de la recristallisation dynamique est associée aux processus fondamentaux que sont la germination et la migration des joints de grains. Ces processus sont eux-mêmes dépendants de mécanismes qui agissent sur des gammes d'échelles plus ou moins grandes. Il s'agit, entre autres, (i) des interactions entre grains, qui induisent des champs de contrainte au-delà de la taille des grains, et (ii) de la présence de structures de dislocations, qui interagissent avec ces champs de contrainte à longue distance. L'énergie de déformation, force motrice essentielle de la recristallisation, est associée aux hétérogénéités de densités de dislocations et de leurs arrangements et donc à l'histoire thermomécanique de la déformation.

La recristallisation dynamique est d'autant plus active dans les matériaux à forte anisotropie viscoplastique, comme le magnésium et la glace choisis pour cette étude. Ces deux matériaux, de structure cristallographique hexagonale, se déforment essentiellement par le glissement des dislocations sur leur plan basal (Duval et al. 1983, Chapuis and Driver, 2011). Les hétérogénéités de déformation et de contrainte sont donc fortement marquées, et la recristallisation intervient rapidement pour les relaxer.

Depuis une dizaine d'années, les méthodes de corrélation d'images numériques se déploient pour caractériser les hétérogénéités de déformation dans les métaux (e.g. Hériprié et al. 2007), les géomatériaux (e.g. Bornert et al. 2010), et la glace (Grennerat et al. 2012). Les hétérogénéités aux échelles inter et intra-granulaires sont ainsi révélées, ainsi que la complexité de l'état déformé. L'Electron Back-Scattered diffraction (EBSD, MEB) est aussi utilisée pour caractériser la déformation viscoplastique (voir Lehockey et al. 2000 pour une revue). Cette méthode, utilisée en routine sur les minéraux et les métaux, a été appliquée plus récemment à la glace (Piazolo et al. 2008, Montagnat et al. 2011). Les méthodes d'analyse EBSD « in-situ » permettent, depuis quelques dizaines d'années, de suivre l'évolution des microstructures et des textures au cours de la recristallisation (Bestmann et al. 2005). Si les

premiers développements ont été effectués dans les années 90 (Humphreys and Ferry, 1996, Weiland et al 1996), le développement approfondi de la méthode n'a été rendu possible que par l'avancée récente des outils d'acquisition de données EBSD (rapidité et qualité). Au démarrage du projet DREAM, peu d'observations avaient été faites à suffisamment haute résolution pour permettre de relier les mécanismes de germination et de migration des joints de grains aux sous-structures de dislocations issues des hétérogénéités de déformation et de contrainte.

En terme de modélisation, le challenge principal réside dans la capacité à prendre en compte, et représenter, les hétérogénéités de déformation et les champs de contraintes internes lors de la simulation de la déformation plastique puis de la germination et de la migration des joints de grains. Les modèles de plasticité cristalline à champs complets (aux éléments finis ou par transformées de Fourier rapides), s'ils prédisent une localisation des déformations et des contraintes en fonction des relations d'orientations entre les grains, ne sont pas capables de prendre en compte l'effet des champs de contrainte des dislocations, et représentent l'évolution des microstructures inhérents à la recristallisation par des hypothèses phénoménologiques basées sur la déformation locale essentiellement (Bernacki et al. 2009, Logé et al. 2008, Bernacki et al. 2011). L'approche récente intégrant la mécanique des champs de dislocations (FDM) permet de considérer les champs de contraintes qui résultent de la présence de densités de dislocations et de leur transport (Acharya, 2001). Cette approche dissocie le rôle des dislocations dites « statistiquement réparties » de celui de celles dites « géométriquement nécessaires » (Taupin et al. 2007, 2008, Richeton et al. 2011). Ces dernières étant fortement reliées aux mécanismes de recristallisation, il est maintenant nécessaire de les prendre en compte et de les représenter pour modéliser la germination et la croissance des grains au cours de la déformation plastique.

### **C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

Le projet DREAM s'est basé sur deux approches complémentaires : (i) des essais expérimentaux (compression uniaxiale et torsion) associés à des outils permettant de caractériser les phénomènes à l'échelle de l'échantillon (champs de déformation) et à l'échelle intra-granulaire (microscopie électronique), (ii) une approche de modélisation capable d'intégrer une partie de la complexité (théorie des champs de dislocations) afin de reproduire une partie des mécanismes à la base de la recristallisation dans une approche de plasticité cristalline résolue par éléments finis.

Une grande partie des observations de textures et microstructures ont été rendues possible par les performances du microscope électronique de Géosciences Montpellier, le CrystalProbe. Ce modèle, dont il n'existe que deux exemplaires au monde, présente la particularité d'avoir une colonne inclinée, et donc de pouvoir réaliser des mesures EBSD en gardant le porte-échantillon horizontal. Cela a permis d'obtenir d'excellentes résolutions sur la glace en utilisant une platine refroidissante à -100°C et de faciliter l'installation de platines chauffante et de déformation.

La mesure des champs de déformation au cours des essais de compression sur la glace a été effectuée par l'utilisation d'un appareil photographique à haute résolution (80MPx), et avec marquage de l'échantillon par un mouchetis (voir Chauve et al. 2015 pour plus de détails). La corrélation des images numériques est réalisée à l'aide du logiciel 7D développé par P. Vacher (Vacher et al. 1999, Grennerat et al. 2012).

Les microstructures et textures pré- et post-déformation dans la glace ont été caractérisées par l'utilisation d'un analyseur automatique de texture permettant de caractériser

l'orientation des axes c (axe optique = [0001]) dans la glace, sur des lames minces de surface pouvant atteindre 12x12 cm<sup>2</sup>. Les textures complètes (orientation de tous les axes cristallographiques) ont été obtenues par cryo-EBSD à Géosciences Montpellier (-100°C, 1MPa), afin de mesurer à relativement haute résolution (jusqu'à 2 microns) les désorientations locales du réseau cristallin et de remonter aux dislocations géométriquement nécessaires. Ces dernières ont été caractérisées par la méthode des Weighted Burgers Vectors développée par Wheeler et al. (2009) qui a permis de déterminer la nature des dislocations présentes sur les sous-structures de réseau (voir Chauve et al. 2017b). Cette méthode, dérivée de la mesure du tenseur de densité des dislocations (appelé aussi tenseur de Nye), est particulièrement adaptée aux limitations rencontrées dans le cas de mesures par EBSD qui sont à 2 dimensions.

Des essais de recuits ont été effectués sur la glace, puis sur l'alliage de Mg AZ31. Pour la glace, la phase de recuit (à -2°C ou -5°C) était effectuée hors du microscope pour éviter la sublimation des échantillons sous le vide du microscope. L'alliage de Mg a lui été au préalable déformé en channel-die à l'Ecole de Mines de St. Etienne à différentes vitesses de déformation (0.1-0.01 s<sup>-1</sup>), températures (250-300°C), déformations finies (10-25%) et différentes orientations de la texture initiale par rapport à la sollicitation, puis le recuit a été effectué sur une platine chauffante développée pour le projet (à 250°C, pendant des périodes de 250 minutes).

Enfin, la modélisation de la déformation plastique intégrant les champs de dislocations a été effectuée au LEM3, par l'utilisation du logiciel aux éléments finis FreeFem++ dans lequel les équations de transport des dislocations géométriquement nécessaires ont été implémentées, en distinguant pour la première fois le comportement sur les différents systèmes de glissement. L'application a été effectuée sur la glace en comparaison des observations expérimentales.

## **C.4 RÉSULTATS OBTENUS**

### *A – Etude des mécanismes fondamentaux de la recristallisation dynamique dans la glace.*

La glace a permis de travailler sur des microstructures dites « colonnaires » (proche d'une microstructure « 2D extrudée ») et donc de suivre les évolutions de microstructure liées à la recristallisation par comparaison directe pré- et post-essai, mais aussi de suivre les évolutions de microstructure indirectement par la mesure des champs de déformation en cours d'essai. La grande taille de grains a permis, pour la première fois, de suivre les mécanismes de germination et de formation de sous-joints de dislocations au niveau d'un point triple et de mettre en évidence leur effet important sur la redistribution de la déformation dans cette zone de forte incompatibilité plastique (Chauve et al. 2015). Cette approche a été étendue au cas de la rupture ductile, pour lequel nous avons montré, entre autres, que la recristallisation dynamique agissait sur les champs de contrainte au point de conduire à la neutralisation de certaines fissures (Chauve et al. 2017a).

Les caractérisations des échantillons post-déformation par EBSD associées à l'analyse des Weighted Burgers Vectors (WBV) a permis de mettre en évidence le rôle couplé des mécanismes de formation de sous-joints de grains, de bandes en genoux (kink-bands) et de gonflement des joints de grains (bulging) pour la germination et la migration des joints de grains (Montagnat et al. 2015, Chauve et al. 2016). Dans le cas des essais de torsion, représentant le cisaillement fréquemment rencontré à la base des glaciers, nous avons pu mettre en évidence le rôle prépondérant de la germination dans la formation des textures (Journaux et al. In Press). Enfin, et de façon inattendue, les WBV ont révélé la présence de

densités non négligeables de dislocations non-basales et parallèles à l'axe *c*, qui n'avaient jusque-là que très peu été observées dans la glace (Chauve et al. 2017b). Ces observations permettront de nourrir les modèles de plasticité cristalline de nouveaux systèmes secondaires d'accommodation de la déformation.

### ***B – Caractérisation expérimentale de l'évolution de la microstructure et de la texture pendant la recristallisation statique***

Au cours de ce projet, il n'a finalement pas été possible de développer une platine de déformation adaptée au MEB CrystalProbe de Géosciences Montpellier. Cette dernière a été achetée en 2018 et sera disponible très prochainement. Les essais in-situ dans le MEB CrystalProbe se sont concentrés sur l'étude du recuit, c'est à dire la recristallisation post-déformation sous conditions statiques. Sur la glace nous avons suivi les différentes étapes du recuit et mis en évidence la cinétique des mécanismes de restauration (diminution de la désorientation cristalline), d'incubation, puis de germination et de migration des joints de grains (Hidas et al. 2017). Ces essais ont aussi montré que la migration des joints de grains est contrôlée par les densités et l'arrangement des dislocations issus de la déformation, mais que les sous-joints de flexion et bandes en genoux montrent une grande stabilité.

Les essais de recuit in situ sur l'alliage de Mg AZ31 réalisés dans le MEB CrystalProbe sont encore en cours de traitement (Lopez-Sanchez et al. In Prep). Les premières analyses montrent que, comme pour la glace, la migration des joints de grain est contrôlée par des variations locales de densité de dislocations stockées. Une analyse statistique, rendue possible par le suivi d'un grand nombre de grains dans chaque échantillon montre que les cinétiques de recuit varient fortement d'un échantillon à l'autre et sont proportionnelles à la densité de dislocations stockées, donc à la contrainte d'écoulement. La recristallisation statique se fait essentiellement par croissance de germes formés pendant la déformation. La force motrice reste essentiellement l'hétérogénéité de densité de dislocations, la capillarité ne jouant un rôle que pour les joints de grain séparant deux grains recristallisés. De plus, contrairement à des propositions issues d'études précédentes, les macles ne semblent pas jouer un rôle important ni dans la germination, ni dans la migration de joints de grains.

### ***C- Modélisation du transport des dislocations géométriquement nécessaires (GND) au cours de la déformation plastique. Application à la glace.***

Comme observé expérimentalement, au cours de la déformation et recristallisation dynamique des matériaux à forte anisotropie viscoplastique, les dislocations géométriquement nécessaires jouent un rôle clé. Les prendre en compte dans la formulation de la déformation plastique est donc une étape essentiellement pour la modélisation de la recristallisation dynamique. L'approche novatrice adoptée ici a été de distinguer le rôle de ces GND en fonction de leur système de glissement (Richeton et al. 2017). Le modèle phénoménologique ainsi produit a permis de mettre en évidence, via des comparaisons à des observations expérimentales sur la glace (torsion et compression de multi-cristaux), qu'un écrouissage cinématique important pouvait avoir lieu sans l'introduction « ad-hoc » d'une contrainte inverse (back-stress). De plus, la localisation des sous-joints de flexion et kink bands a été bien reproduite, ce qui a permis de confirmer les mécanismes de dislocations associés. Une très bonne corrélation a été observée entre les zones de fortes désorientations cristallines et énergie élastique stockée prédites et les zones de recristallisation observées. Le modèle semble donc particulièrement adapté pour représenter les mécanismes fondamentaux à l'origine de la recristallisation dynamique.

Le couplage initialement prévu de cette approche coûteuse en temps de calcul à une approche phénoménologique simplifiée telles que celles développées au CEMEF avait pour objectif d'apporter des critères de germination et de migration de joints de grains intégrant indirectement la complexité des mécanismes en jeu. Cette étape n'a pas pu être effectuée dans le cadre du projet mais reste dans les objectifs de la collaboration mise en place.

## **C.5 DISCUSSION ET CONCLUSIONS**

Le projet proposait une continuité d'analyses entre des observations post-mortem à différentes échelles, permettant de relier les champs de déformation aux mécanismes de recristallisation, et la modélisation de la recristallisation dynamique à ces différentes échelles par le biais d'approches à complexité variables couplées. Certains verrous n'ont pu être levés. C'est le cas de la gestion des problèmes de sublimation lors du recuit in-situ de la glace, ou encore du transfert des paramètres entre les différentes approches de modélisation. Certains problèmes techniques ont ralenti la mise en œuvre, en particulier concernant le développement de la platine de déformation chauffante adaptée au MEB CrystalProbe. Le développement 'maison' de la platine de déformation à chaud a été remplacé par l'acquisition d'une platine de déformation chauffante fabriquée par une société commerciale – NewTec - à partir d'un brevet racheté au CNRS et qui a été adaptée aux conditions d'utilisation du MEB CrystalProbe. Cette acquisition, partiellement financée sur les crédits de l'ANR DREAM va permettre dans l'année qui vient de réaliser les essais prévus afin de mieux caractériser les interdépendances entre évolution de la microstructure de déformation et des textures et recristallisation dynamique.

La collaboration établie a permis de dépasser les attentes concernant la caractérisation des mécanismes de recristallisation dynamique dans la glace, et leur action sur les champs de déformation en cours d'essai. L'observation in-situ de l'évolution des champs de déformation au cours de la germination de nouveaux grains présentée dans Chauve et al. (2015) est tout à fait novatrice et montre clairement le rôle de la recristallisation dans la construction d'une microstructure plus « compatible ». De la même manière, la mise en évidence du rôle prépondérant d'un certain type de dislocations non-basales, jusque là négligées dans la glace, montre que le niveau de complexité à prendre en compte dans la modélisation viscoplastique de ce matériau est à reconsidérer (Chauve et al. 2017b). L'approche de modélisation choisie pour représenter cette complexité, qui intègre les dislocations géométriquement nécessaires et leur transport, s'est avérée essentielle pour s'affranchir d'une paramétrisation phénoménologique dans la prédiction des zones de recristallisation dynamique (Richeton et al. 2017). Si la limite actuelle reste le temps de calcul et l'intégration des mécanismes d'évolution des joints de grains, des résultats récents montrent que ces verrous seront bientôt levés (Richeton 2017). Enfin, les essais de recuits qui ont permis la caractérisation des mécanismes de recristallisation statique dans la glace et l'alliage de Mg AZ31 montrent que, même post-essai, les hétérogénéités de champ de déformation et de contrainte sont la clé des évolutions microstructurales et de leur cinétique. La migration des joints de grains, principalement à l'origine de la diminution de l'énergie de déformation stockée, est fortement localisée et hétérogène. Les simplifications des approches dites « à champ moyen », qui considèrent un grain comme homogène dans une matrice et qui sont classiquement utilisées dans l'industrie ou dans les simulations à grande échelle du manteau terrestre, sont certainement à questionner pour ces matériaux fortement anisotropes, même en conditions statiques.

## C.6 RÉFÉRENCES

- Acharya, A. A model of crystal plasticity based on the theory of continuously distributed dislocations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, 49, 761 – 784
- Bernacki M., Resk H., Coupez T., Logé R.E. Finite element model of primary recrystallization in polycrystalline aggregates using a level set framework. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 2009, 17, 064006.
- Bernacki M., Logé R.E., Coupez T. Level set framework for the finite element modelling of recrystallization and grain growth in polycrystalline materials. *Scripta Materialia*, 2011, 64, 525–528.
- Bestmann, M., Piazzolo, S., Spiers, C.J., Prior, D.J. (2005), Microstructural evolution during initial stages of static recovery and recrystallization: new insights from in-situ heating experiments combined with electron backscatter diffraction analysis. *Journal of Structural Geology*, 27, 447.
- Bornert, M.; Valès, F.; Gharbi, H. & Nguyen Minh, D. Multiscale Full-Field Strain Measurements for Micromechanical Investigations of the Hydromechanical Behaviour of Clayey Rocks Strain, Blackwell Publishing Ltd, 2010, 46, 33-46
- Chapuis, A. & Driver, J. H. Temperature dependency of slip and twinning in plane strain compressed magnesium single crystals *Acta Materialia*, 2011, 59, 1986 – 1994
- Chauve, T., M. Montagnat and P. Vacher. **Strain field evolution during dynamic recrystallization nucleation; a case study on ice.** *Acta Materialia*, 2015, 101, 116-124 .
- Chauve, T, Montagnat M, Barou F, Hidas K, Tommasi A, Mainprice D. 2016. Investigation of nucleation processes during dynamic recrystallization of ice using cryo-EBSD. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375: 20150345. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0345>
- Chauve, T., M. Montagnat, C. Lachaud, D. Georges and P. Vacher. **Strain heterogeneities at the ductile to brittle transition; a case study on ice.** *Solid Earth*, 8, 943-953, 2017a. <https://doi.org/10.5194/se-8-943-2017>
- Chauve, T., M. Montagnat, S. Piazzolo, B. Journaux, J. Wheeler, F. Barou, D. Mainprice and A. Tommasi. 2017b. Non-basal dislocations should be accounted for in simulating ice mass flow. *EPSL*. 473, 247-255,
- Hidas, K., A. Tommasi, D. Mainprice, T. Chauve, F. Barou and M. Montagnat. **Microstructural evolution 1 during thermal annealing of ice-Ih**, 2017. *Journal of Structural Geology*, Vol 99, 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.05.001>
- Duval, P.; Ashby, M. & Anderman, I. Rate controlling processes in the creep of polycrystalline ice *J.Phys. Chem.*, 1983, 87, 4066-4074
- Grennerat, F.; Montagnat, M.; Castelnau, O.; Vacher, P.; Moulinec, H.; Suquet, P. & Duval, P. Experimental characterization of intragranular strain field in columnar ice during transient creep *Acta Materialia*, 2012, 60, 3655-3666.
- Héripré, E.; Dextet, M.; Crépin, J.; Gélébart, L.; Roos, A.; Bornert, M. & Caldernaison, D. Coupling between experimental measurements and polycrystal finite element calculations for micromechanical study of metallic materials *International Journal of Plasticity*, 2007, 23, 1512 – 1539
- Humphreys, F. & Ferry, M. On the role of twinning in the recrystallization of aluminium *Scripta Materialia*, 1996, 35, 99 – 105
- Journaux, B., T. Chauve, M. Montagnat, A. Tommasi, F. Barou, D. Mainprice, and L. Gest. **Microstructure and texture evolution in polycrystalline ice during hot torsion. Impact of intragranular strain and recrystallization processes.** *The Cryosphere Discussion*. <https://doi.org/10.5194/tc-2018-213>
- Lehockey, E.M., Y. Lin and O.E. Lepik, in *Electron Backscatter Diffraction in Materials Science*, A.J. Schwartz, M. Kumer and B.L. Adams, eds., Kluwer/Plenum, New York, 2000.
- Logé R.E., Bernacki M., Resk H., Delannay L., Digonnet H., Chastel Y., Coupez T. Linking plastic deformation to recrystallization in metals, using digital microstructures. *Phil. Mag.* 2008, 88, 3691–3712.
- Montagnat, M.; Blackford, J. R.; Piazzolo, S.; Arnaud, L. & Lebensohn, R. A. Measurements and fullfield predictions of deformation heterogeneities in ice. *EPSL*, 2011, 305, 153 – 160

- Montagnat, M., T. Chauve, F. Barou, A. Tommasi, B. Beausir, C. Fressengeas. Analysis of dynamic recrystallization of ice from EBSD orientation mapping. 2015. *Frontiers In Earth Sciences*. 3:81. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00081>
- Piazzolo, S.; Montagnat, M. & Blackford, J. R. Sub-structure characterization of experimentally and naturally deformed ice using cryo-EBSD. *J. Microscopy*, 2008, 230, 509-519
- Richeton, T.; Wang, G. & Fressengeas, C. Continuity constraints at interfaces and their consequences on the work hardening of metal-matrix composites. *J. Mech.Phys.Solids*, 2011, 59, 2023-2043
- Richeton, T., L.T. Le, T. Chauve, M. Bernacki, S. Berbenni and M. Montagnat. Modelling the transport of geometrically necessary dislocations on slip systems: application to single- and multi-crystals of ice. 2017. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 25, 025010.
- Taupin, V.; Richeton, T.; Chevy, J.; Fressengeas, C.; Weiss, J.; Louchet, F. & Miguel, M. Rearrangement of dislocation structures in the aging of ice single crystals *Acta Materialia*, 2008, 56, 1555 -1563
- Taupin, V.; Varadhan, S.; Chevy, J.; Fressengeas, C.; Beaudoin, A. J.; Montagnat, M. & Duval, P. Effects of Size on the Dynamics of Dislocations in Ice Single Crystals *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, 2007, 99, 155507
- Vacher, P., S. Dumoulin, F. Morestin, and S. Mguil-Touchal. Bidimensional strain measurement using digital images. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 213(8):811–817, 1999.
- Weiland H, Field DP, Adams BL (1996) Local texture evolution during deformation by in situ OIM analysis. In: Liang Z, Zuo L, Chu Y (eds) *Proceedings of the eleventh international conference on textures of materials*. International Academic Publishers, Xi'an, China 1414–1419
- Wheeler, J. E. Mariani, S. Piazzolo, D. J. Prior, P. Trimby, and M. R. Drury. The weighted Burgers vector: a new quantity for constraining dislocation densities and types using electron backscatter diffraction on 2D sections through crystalline materials. *Journal of Microscopy*, 233(3):482–494, 2009.

## D LISTE DES LIVRABLES

*Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.*

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
	1				

## E IMPACT DU PROJET

*Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.*

## E.1 INDICATEURS D'IMPACT

### Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

Comptabiliser séparément les actions monopartenaies, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaies résultant d'un travail en commun.

**Attention** : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).

		Publications multipartenaies	Publications monopartenaies
<b>International</b>	Revue à comité de lecture	8	3
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	4 invitées 10 autres	
<b>France</b>	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	2 invitées 4 autres	
<b>Actions de diffusion</b>	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

### Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
<b>Brevets internationaux obtenus</b>	
<b>Brevet internationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Brevets nationaux obtenus</b>	
<b>Brevet nationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Licences d'exploitation (obtention / cession)</b>	
<b>Créations d'entreprises ou essaimage</b>	
<b>Nouveaux projets collaboratifs</b>	
<b>Colloques scientifiques</b>	
<b>Autres (préciser)</b>	

## E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section Error: Reference source not found en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.

Publications scientifiques :

- [11] C. Fressengeas, Curvature effects on boundary migration, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 124 (2019) 814-826
- [10] B. Journaux, T. Chauve, M. Montagnat, A. Tommasi, F. Barou, D. Mainprice, and L. Gest. Microstructure and texture evolution in polycrystalline ice during hot torsion. Impact of intragranular strain and recrystallization processes. *The Cryosphere Discussion*.
- [9] T. Richeton, Incompatibility stresses and lattice rotations due to grain boundary sliding in heterogeneous anisotropic elasticity, *Crystals*, 7 (2017) 203 (1-14)
- [8] F. Schlosser, C. Schwindt, V. Fuster, A. Tommasi, and J. Signorelli, 2017. Crystallographic texture evolution of a zinc sheet subjected to different strain paths. *Metallurgical Materials Trans. A*, doi:10.1007/s11661-017-4069-y
- [7] T. Chauve, M. Montagnat, C. Lachaud, D. Georges and P. Vacher. Strain heterogeneities at the ductile to brittle transition ; a case study on ice. *Solid Earth*, 8, 943-953, 2017. <https://doi.org/10.5194/se-8-943-2017>
- [6] T. Chauve, M. Montagnat, S. Piazzolo, B. Journaux, J. Wheeler, F. Barou, D. Mainprice and A. Tommasi. 2017. Non-basal dislocations should be accounted for in simulating ice mass flow. *EPSL*. 473, 247-255, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.06.020>
- [5] K. Hidas, A. Tommasi, D. Mainprice, T. Chauve, F. Barou and M. Montagnat. Microstructural evolution 1 during thermal annealing of ice-Ih, 2017. *Journal of Structural Geology*, Vol 99, 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.05.001>
- [4] T. Richeton, L.T. Le, T. Chauve, M. Bernacki, S. Berbenni and M. Montagnat. Modelling the transport of geometrically necessary dislocations on slip systems: application to single- and multi-crystals of ice. 2017. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 25, 025010.
- [3] Chauve T, Montagnat M, Barou F, Hidas K, Tommasi A, Mainprice D. 2016 Investigation of nucleation processes during dynamic recrystallization of ice using cryo-EBSD. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375: 20150345. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0345>
- [2] M. Montagnat, T. Chauve, F. Barou, A. Tommasi, B. Beausir, C. Fressengeas. Analysis of dynamic recrystallization of ice from EBSD orientation mapping. 2015. *Frontiers In Earth Sciences*. 3:81. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00081>
- [1] T. Chauve, M. Montagnat and P. Vacher. Strain field evolution during dynamic recrystallization nucleation; a case study on ice. *Acta Materialia*, 2015, 101, 116-124 . <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.08.033>

## **Communications :**

### **Invitées :**

#### Nationales :

- Deformation Twinning and Recrystallisation: Twin Variant Selection and Micromechanical Modeling, T. Richeton, Journées annuelles 2018 du GDR Recrystallisation, Saint-Etienne, June 7-8, 2018.

- Hétérogénéités de déformation et mécanismes de recrystallisation. Cas de la glace « 2D-1/2 ». M. Montagnat, T. Chauve, F. Grennerat, D. Georges, P. Vacher, O. Castelnau. Colloque MECAMAT, Aussois, 22-26 Janvier 2018,

#### Internationales :

- New insights about deformation and recrystallization mechanisms in ice from cryo-EBSD. M. Montagnat, T. Chauve, B. Journaux, F. Barou, A. Tommasi, D. Mainprice, S. Piazzolo, J. Wheeler. EBSD 2018, Ann Arbor USA, 23-25/05/2018.
- About mechanisms of relaxation of strain heterogeneities in ice - Recrystallization and ductile failure. M. Montagnat, T. Chauve, F. Grennerat, B. Journaux C. Lachaud D. Georges. Gordon Conference on Rock Deformation. Andover, August 2016.
- Microstructural of analysis by EBSD during deformation and annealing of ice Ih. D. Mainprice, K. Hidas, A. Tommasi, T. Chauve, F. Barou, M. Montagnat, AGU 2015, 14 – 18 décembre 2015, San Francisco
- New insights on dynamic recrystallization mechanisms in ice from high resolution EBSD observations and strain field measurements. M. Montagnat, T. Chauve, B. Journaux, F. Barou, K. Hidas, A. Tommasi, P. Vacher, S. Piazzolo, J. Wheeler. AGU 2015, 14 – 18 décembre 2015, San Francisco.

**Autres :**

Nationales :

- Effets de l'anisotropie élastique et de la rigidité des joints de grains sur les forces images, la longueur des empilements de dislocations et l'activation du glissement dans le grain voisin, T. Richeton, X. Chen, S. Berbenni, C. Motz, Conférence Matériaux 2018, Strasbourg, November 19-23, 2018.
- Hétérogénéités de déformation et recristallisation dynamique ; observations dans la glace polycristalline ». M. Montagnat, T. Chauve, F. Grennerat, O. Castelnau. Journée Annuelle de la SF2M, 23-25/10/2017.
- Un modèle de plasticité cristalline considérant le transport des dislocations géométriquement nécessaires sur les systèmes de glissement : application aux mono- et multi-cristaux de glace, L.T. Le, T. Chauve, M. Bernacki, S. Berbenni, M. Montagnat, T. Richeton, Colloque Plasticité, 11-13 avril 2016, Poitiers
- T. Richeton, I. Tiba, S. Berbenni, O. Bouaziz, Rôle de l'élasticité anisotrope sur la promotion du glissement simple dans les plans de macles aux joints  $3\langle 111 \rangle$ , Matériaux 2014, Montpellier, November 24-28, 2014

Internationales :

- Heterogeneities During Deformation of Polycrystalline Ice, Recent Advances in Cryo-EBSD Analyses. B Journaux, M Montagnat, T Chauve, F Barou, A Tommasi, D Mainprice 2017. AGU Fall Meeting, San Fransisco.
- Microstructural analysis of the thermal annealing of ice-Ih using EBSD. K Hidas, A Tommasi, D Mainprice, T Chauve, F Barou, M Montagnat. 2017 EGU General Assembly Conference Abstracts 19, 8470, Vienna.
- Modelling the transport of geometrically necessary dislocations on slip systems: application to single- and multi-crystals of ice, T. Richeton, L.T. Le, T. Chauve, M. Bernacki, S. Berbenni, M. Montagnat, European Mechanics of Materials Conference (EMMC15), September 7-9, 2016, Brussels
- Strain field evolution during dynamic recrystallization in ice, T. Chauve, M. Montagnat, F. Barou, A. Tommasi, P. Vacher, CREEP 2015, June 2015, Toulouse

- Nucleation processes occurring during dynamic recrystallization in ice. T. Chauve, M. Montagnat, B. Journaux, F. Barou, K. Hidas, A. Tommasi, P. Vacher, S. Piazzolo, J. Wheeler. AGU 2015, 14 – 18 décembre 2015, San Francisco
- Preliminary 3D In-situ measurements of the texture evolution of strained H<sub>2</sub>O ice during annealing using neutron Laue diffractometry, B. Journaux, M. Montagnat, T. Chauve, B. Ouladdiaf, J. Allibon, , EGU2015-3706-1, EGU General Assembly 2015,Vienna, April 2015.
- 3D in-situ measurements of nucleation and texture evolution of strained H<sub>2</sub>O ice during static recrystallisation using neutron Laue diffractometry, B. Journaux, M. Montagnat, T. Chauve, B. Ouladdiaf, J. Allibon, , Micro-Dice Final Conference, Montpellier, March 2015.
- Dislocation and disclination density fields from EBSD orientation mapping, B. Beausir and C. Fressengeas, MicroDice: Microstructural evolution during HT deformation: advances in the characterization techniques and consequences to physical properties, Montpellier 30 mars-1 avril, 2015.
- Dynamic recrystallization in ice, T. Chauve, M. Montagnat, F. Barou, A. Tommasi, P. Vacher, AGU symposium, december 2014, San Francisco
- EBSD observations of dynamic recrystallization mechanisms in ice, T. Chauve, M. Montagnat, F. Barou, B. Beausir, C. Fressengeas, A. Tommasi, EGU symposium, Vienna, April 27- May 2, 2014.

### **E.3 LISTE DES ÉLÉMENTS DE VALORISATION**

*La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section Error: Reference source not found. On détaillera notamment :*

- *brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.*
- *logiciels et tout autre prototype*
- *actions de normalisation*
- *lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...*
- *le développement d'un nouveau partenariat,*
- *la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté*
- *création d'entreprise, essaimage, levées de fonds*
- *autres (ouverture internationale,..)*

*Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.*

## E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTÉS EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Chauve Thomas	H	thomas.chauve@geo.uio.no	Décembre 2018	Master 2	France		IGE	Doctorant	36	01/2017	Post-doctorant étranger	Université	Post-doctorat	non	Oui
Journaux Baptiste	H	baptiste.journaux@gmail.com	Décembre 2018	Doctorat	France	0,5	IGE	Post-doctorant	18	04/2016	Post-doctorant étranger	Centre de recherche	Post-doctorat	non	Oui
Le Lu Tuan	H	lutuan.le@gmail.com	Novembre 2018	Doctorat	Hors UE + France		LEM3 puis CEMEF	Post-doctorant	24	04/2016	Post-doctorant	Centre de recherche	Post-doctorat	Non	Oui

### Aide pour le remplissage

(1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible

(2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)

(3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet

(4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles

(5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)

(6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)

(7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet

(8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

*Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).*