



HAL
open science

Hétérogénéités de déformation et mécanismes de recristallisation. Cas de la glace "2D-1/2"

Maurine Montagnat, Thomas Chauve, Fanny Benoit Grennerat, David
Georges, Pierre Vacher, Olivier Castelnau

► **To cite this version:**

Maurine Montagnat, Thomas Chauve, Fanny Benoit Grennerat, David Georges, Pierre Vacher, et al.. Hétérogénéités de déformation et mécanismes de recristallisation. Cas de la glace "2D-1/2". Colloque National MECAMAT" Matériaux Numériques: Microstructures et comportements thermomécaniques", Jan 2018, Aussois, France. hal-02010322

HAL Id: hal-02010322

<https://hal.science/hal-02010322>

Submitted on 7 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HÉTÉROGÉNÉITÉS DE DÉFORMATION ET MÉCANISMES DE RECRISTALLISATION. CAS DE LA GLACE "2D-1/2".

Maurine Montagnat ^a, Thomas Chauve ^a, Fanny Grennerat ^a, David Georges ^a, Pierre Vacher ^b, Olivier Castelnau ^c

^a Université Grenoble Alpes, CNRS, IGE, 38058 Grenoble, France, maurine.montagnat@univ-grenoble-alpes.fr

^b Lab. SYMME, Univ. Savoie Mont Blanc, 74944 Annecy le Vieux, France

^c PIMM, CNRS, Arts et Métiers ParisTech, 75013 Paris, France

Mots-clés : Hétérogénéités de déformation, Corrélation d'Images Numériques, Glace, Recristallisation dynamique.

1 Introduction

La glace est un matériau de structure cristallographique hexagonale qui a l'originalité de présenter une très forte anisotropie viscoplastique. En effet, lors de la déformation plastique, les dislocations glissent essentiellement dans le plan de base de la structure hexagonale. Un monocristal de glace "bien orienté" pour activer ces dislocations dites "basales" va se déformer, sous une même contrainte appliquée, jusqu'à 1000 fois plus vite qu'un monocristal "mal orienté" pour l'activation de ces dislocations [6]. A l'échelle du polycristal, cette forte anisotropie viscoplastique se traduit par de fortes incompatibilités de déformation entre les grains. Selon les conditions de sollicitation, les conséquences sont premièrement que le matériau est très fragile, et des fissures vont apparaître sous des contraintes à peine plus élevées qu'1MPa (en fluage) ou pour des vitesses de sollicitation supérieures à 10^{-6} s^{-1} , cela alors que la plupart du temps la glace est déformée à des températures proches de la température de fusion (à -50°C , $T/T_f = 0,81$) [14]. La deuxième conséquence importante est que, dans le domaine purement ductile, les mécanismes de recristallisation dynamique vont apparaître très "tôt", i.e. leur effet macroscopique se mesure à partir de 1% de déformation en fluage par exemple.

Le point commun de ces comportements vient du fait qu'ils résultent des fortes incompatibilités de déformation entre les grains, elles-mêmes responsables de fortes hétérogénéités de déformation et de contrainte. L'objectif de la présentation ci-dessous sera de caractériser expérimentalement ces hétérogénéités de déformation, par corrélation d'images numériques (CIN), dans trois situations d'intérêt; (i) dans des conditions du fluage transitoire, i.e. en deçà de 1% de déformation macroscopique, (ii) au cours de la recristallisation dynamique et (iii) lors de mécanisme de fissuration ductile.

Nous tenterons de mettre en évidence la complexité des mécanismes en jeu. Si la glace peut alors être considérée comme un matériau "extrême", la prise en compte de ces mécanismes pour le comportement des "matériaux numériques" est certainement un challenge intéressant à relever.

2 Champ de déformation en fluage transitoire

Au cours d'un essai de fluage, un échantillon de microstructure et de texture initiales isotropes va passer par trois stades de fluage (on se place en conditions de déformation ductiles, soit $T > 0,9 T_f$, $\sigma_{dev} < 0,9 \text{ MPa}$). Le fluage transitoire (ou primaire) qui correspond à une diminution importante de la vitesse de déformation (pouvant atteindre trois ordres de grandeur), et qui se termine par un minimum atteint systématiquement aux environs de 1% de déformation [9]. Ce minimum correspond au fluage secondaire, pour lequel il est possible de relier la vitesse de déformation minimale atteinte à la contrainte appliquée par une loi de type Norton-Hoff, dite loi de Glen [7]. L'exposant des contraintes obtenu pour cette loi est égal à 3 pour la glace polycristalline déformée en laboratoire [4, 5]. Ce stade n'est pas stable, et la vitesse de déformation augmente de nouveau rapidement, en raison des mécanismes de recristallisation dynamique, jusqu'à atteindre un fluage tertiaire quasi stable à partir d'environ 10% de déformation (voir [14] pour une revue sur ces stades du fluage).

Afin d'étudier la mise en place des hétérogénéités de déformation au cours du fluage transitoire, avant toute modification de microstructure associée à la recristallisation, nous avons imaginé l'expérience suivante (issue du travail de Grennerat et al. 2012 [8]). Des échantillons de glace de microstructure "colonnaire", proche d'une configuration 2D-1/2, ont été fabriqués sous forme parallélépipédique avec l'axe des colonnes dans le sens de la profondeur (Fig. 2). Nous avons alors une surface plane, contenant une centaine de grains, sur laquelle

il était possible d'effectuer des mesures par CIN au cours de l'essai (Fig. 2). Un deuxième avantage de cette microstructure est qu'il est possible d'extraire une lame mince de l'échantillon proche de la surface analysée avant essai, mais aussi après essai juste derrière la surface analysée. La quasi horizontalité des colonnes permet alors de garder des microstructures très similaires, et de comparer avant et après déformation, tout en utilisant la seule méthode facilement disponible pour caractériser la microstructure de la glace, la fabrication de lames minces (méthode destructive) et leur analyse sous lumière polarisée.

L'analyseur automatique des textures de glace utilisé [12] permet d'obtenir l'orientation de l'axe c (ou axe optique) avec une résolution spatiale comprise entre 5 et 50 μm selon les applications. Dans le reste de ce travail, pour lequel nous ne présentons pas de mesure en microscopie électronique via EBSD (comme dans [10, 1]), l'orientation renvoie donc à celle de cet axe c . Nous utilisons, par commodité de représentation, le facteur de Schmid m_s estimé en prenant en compte la direction de sollicitation (verticale ici) et l'azimut et la colatitude de l'orientation de l'axe c ($m_s = \sin\phi\sin\theta(1 - \sin^2\phi\sin^2\theta)^{1/2}$).

Les champs de déplacement et de déformation ont été mesurés au cours d'essais de fluage effectués à -10°C ,

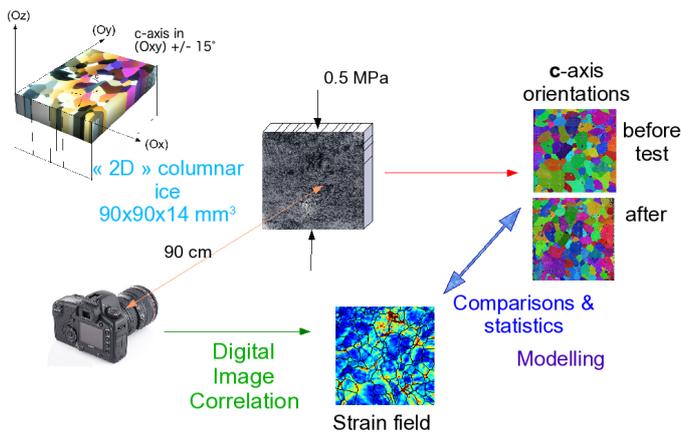


FIGURE 1 – Schéma explicatif des essais de fluage suivi par CIN, sur des échantillons de glace colonnaire [8].

sous une contrainte de compression appliquée de 0,5 MPa. Les analyses par CIN ont été effectuées en utilisant le logiciel 7D [16]. Pour plus de détails, se référer à [8]. La figure 2 montre l'évolution du champ de déformation au cours de l'un de ces essais. Il s'agit de la déformation équivalente calculée par $\varepsilon_{eq} = \sqrt{(2/3)(\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + 2\varepsilon_{xy}^2)}$. A partir de plusieurs tests équivalents, les champs de déformation ont été caractérisés spatialement, et on montre qu'ils s'organisent en "bandes de déformation" dont la longueur dépasse la taille moyenne des grains, et dont l'orientation varie entre 30 et 50° par rapport à la direction de compression. De plus, nous avons montré qu'il n'y avait pas de relation entre l'orientation d'un pixel et le niveau de déformation sur ce pixel (Fig. 3).

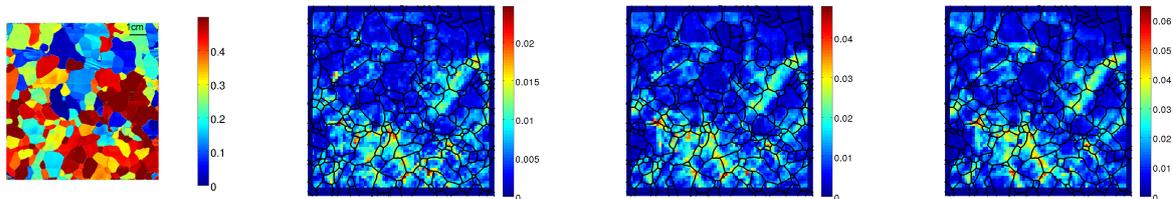


FIGURE 2 – De gauche à droite : microstructure de l'échantillon avant déformation, l'échelle est en "facteur de Schmid", m_s . Champ de déformation après -0,32, -0,62 et -0,82% de déformation macroscopique. Attention au changement d'échelle entre les figures. Les mesures de déformation ont été obtenues avec une résolution spatiale de 1,2 mm et en déformation de 0,16%. L'essai a duré 70 h pour atteindre environ 1% de compression macroscopique. Il a été effectué sous une contrainte de 0,5 MPa, à une température de -10°C [8].

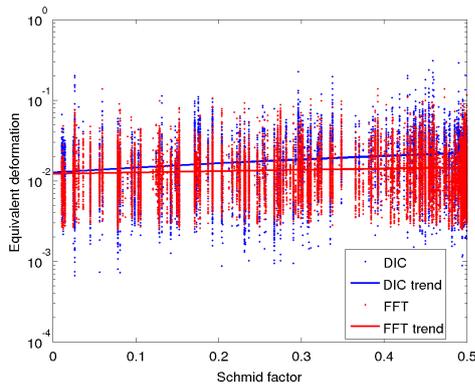


FIGURE 3 – Relation entre l'orientation à l'échelle du pixel de mesure ($43 \mu\text{m}$) et la déformation équivalente mesurée par CIN. Différents essais ont été pris en compte. En rouge apparaissent les résultats des simulations en champ complet effectuées avec l'outil CraFT [15], voir [8].

3 Evolution du champ de déformation au cours de la recristallisation dynamique

Si le champ de déformation semble prendre sa "forme" assez tôt au cours du fluage transitoire (Fig. 2), l'amplitude des hétérogénéités croît jusqu'à la fin de ce stade de fluage. Les mécanismes de recristallisation dynamique (germination et croissance des grains) ont un impact macroscopique (sur les courbes de fluage) dès la fin du fluage secondaire, en permettant une accélération de la vitesse de déformation. Qu'en est-il de l'impact de ces mécanismes sur la distribution locale des champs de déformation ? Telle est la question que nous nous sommes posée dans les travaux de Chauve et al. 2015 [3]. Pour y répondre, la configuration présentée dans la partie précédente a été adaptée, essentiellement en focalisant la prise de photos sur une zone de point triple, cela afin de bénéficier d'une meilleure résolution spatiale ($0,18 \text{ mm}$). Les images ont été acquises avec une plus grande fréquence (10 min) afin de suivre les modifications de microstructures. La température a été légèrement augmentée (-7°C) afin d'accélérer légèrement la déformation et la recristallisation, et limiter ainsi l'effet de la dégradation du mouchetis au cours du temps. L'essai a été interrompu au début de la recristallisation, à -3% de déformation macroscopique, afin de se concentrer sur les phénomènes initiaux (essentiellement la germination et l'apparition de sous-joints de grains).

La figure 4 représente la microstructure de l'échantillon global avant déformation, ainsi que la zone sur laquelle la mesure du champ de déformation a été effectuée par CIN. La figure 5 montre l'évolution du champ de déformation au cours d'incrément de déformation de 1% (une image sur deux est montrée) autour du point triple d'intérêt. Sur la figure 5 on observe la localisation de la déformation, initialement proche des joints de

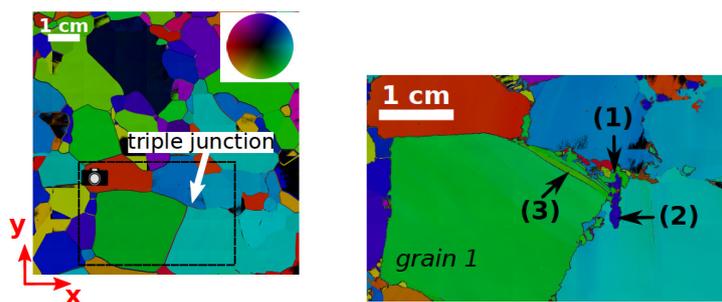


FIGURE 4 – Microstructure de l'échantillon avant déformation, et dans la zone suivie par CIN au cours de l'essai. Les mécanismes de recristallisation autour du point triple se caractérisent par de nouveaux grains (1 et 2 par exemple) et des sous-joints de flexion (3).

grains (mais pas sur ces joints), qui se répartit ensuite autour des nouvelles structures qui apparaissent, comme les nouveaux grains (1) et (2) (Fig. 4). Cette nouvelle répartition est tellement ajustée à ces nouvelles structures, qu'il est possible de suivre leur évolution, comme par exemple la croissance du nouveau grain (2) entre $-0,4$ et $-1,2\%$ de déformation macroscopique. Suite à ces modifications de microstructure, la déformation se répartit sur une zone beaucoup plus large, et les hétérogénéités semblent moins concentrées (voir [3] pour des calculs précis). Les mécanismes de recristallisation induisent donc une forte redistribution du champ de déformation en

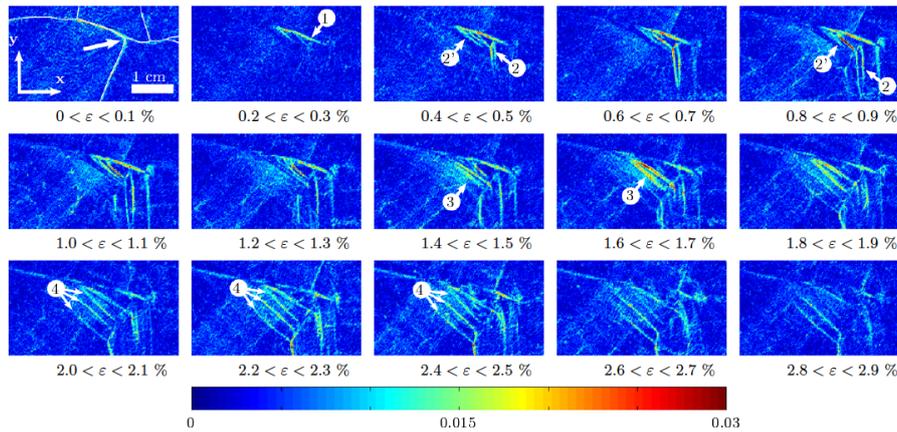


FIGURE 5 – Evolution du champ de déformation équivalente au cours de l'essai de fluage, calculé sur des incréments de déformation macroscopique de 1%. L'échelle de couleur est en déformation absolue. Les étapes 1 à 4 marquent la modification de la microstructure associée aux mécanismes de recristallisation dynamique. Issu de [3].

diminuant, localement, les incompatibilités de déformation.

4 Que se passe-t-il si on appuie un peu plus fort ?

L'essai que nous allons présenter ici repose sur les mêmes principes expérimentaux, et sur la même volonté d'observer l'évolution du champ de déformation. Cependant, pour cet essai (qui n'est pas unique mais utilisé pour illustration), une contrainte de 1 MPa a été appliquée (à $T = -7^\circ\text{C}$). Au cours de la déformation, et suivant le fluage primaire, les incompatibilités de déformation ont été accommodées par des fissures locales qu'il a été possible de suivre lors de la mesure par CIN. Tous les détails se trouvent dans Chauve et al. 2017 [2].

La figure 6 montre un zoom sur une zone sélectionnée dans l'échantillon total (de dimension $9 \times 9 \times 1,5 \text{ cm}^3$) pour le traitement détaillé autour d'une zone fissurée. On y observe les microstructures avant et après essai (arrêté à -5,5% de déformation macroscopique), ainsi qu'une photo du mouchetis en surface qui permet de repérer les zones de fissures. La méthode "simple" de suivi des champs de déformation par CIN telle que nous

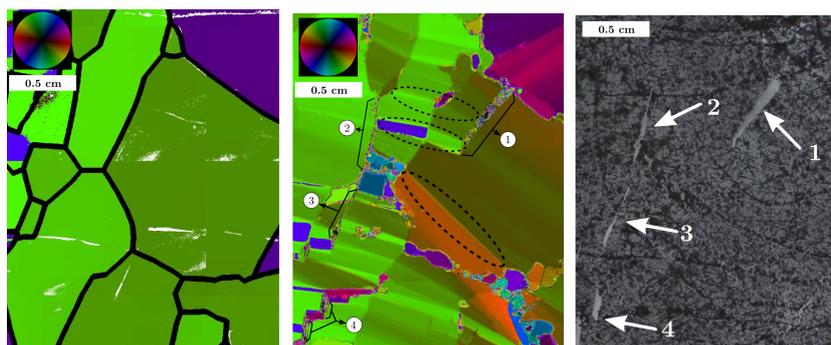


FIGURE 6 – Zoom sur une partie de l'échantillon déformé sous 1 MPa, à -7°C , jusqu'à -5,5%. Les images de gauche et du centre montrent la microstructure avant et après déformation, et celle de droite montre les zones de fissures sur le mouchetis. Les zones entourées par des ellipses correspondent à des sous-joints de flexions apparus proche des pointes de fissure.

l'utilisons n'est pas adaptée au suivi des champs au niveau d'une discontinuité telle que celles apparaissant au niveau des fissures (Fig. 6). Les champs mesurés à ce niveau seront donc interprétés qualitativement, même s'il serait possible d'en dire plus en suivant la méthode présentées dans [11] par exemple.

Les résultats présentés sur la figure 7 mettent en évidence une évolution du champ de déformation aux abords

des zones de fissures qui est liée à plusieurs mécanismes. Premièrement, l'apparition des fissures engendre une reorganisation rapide des bandes de déformation (non montrée ici, voir [2]). Ensuite, étant donné que l'évolution des champs de déformation (Fig. 7) coïncide bien avec la nouvelle microstructure observée à la fin de l'essai (Fig. 6), il semble que les mécanismes de recristallisation interagissent avec la fissuration. Cela est visible en pointe des fissures 1 et 2, via des sous-joints de flexion (Fig. 6), mais aussi autour de la fissure 3 via l'apparition de nouveaux grains. Ces expériences permettent donc de mettre en évidence le fait que les mécanismes de plasticité en pointe de fissure sont suffisamment importants pour générer de la germination et des sous-joints de grains. De plus, les modifications de microstructure créées par cette recristallisation semblent modifier, en retour, les champs locaux de façon importante, jusqu'à engendrer la fermeture de certaines fissures vers la fin de l'essai.

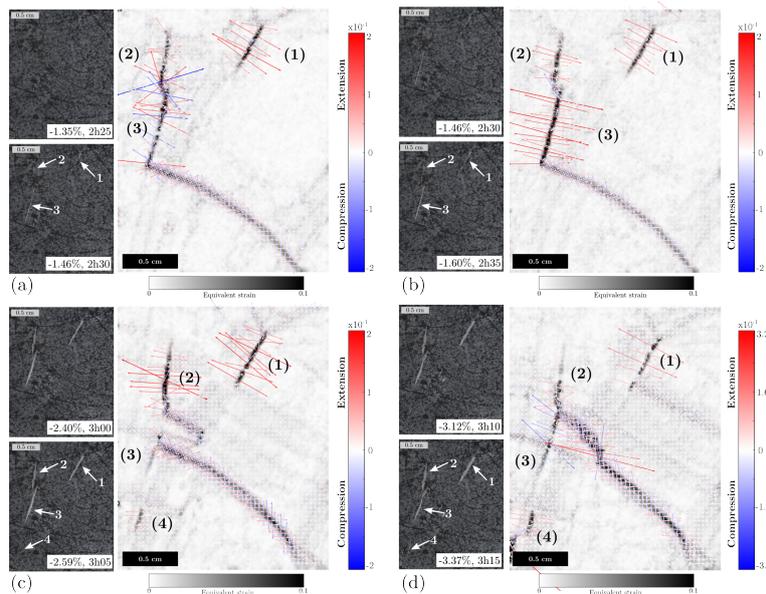


FIGURE 7 – Evolution des champs de déformation autour des fissures 1, 2, 3 et 4. Les champs sont représentés en composantes principales (flèches). Sur la gauche de chaque image de champ apparaissent les photos des mousetics prises aux instants t et $t+\Delta t$, Δt étant l'incrément de déformation utilisé pour le calcul du champ de l'image en question. Incrément du champ de déformation calculé entre a) -1,35 et -1,46% de déformation macroscopique, b) -1,46 et -1,60%, c) -2,40 et -2,59% et d) -3,12 et -3,37% (l'essai a été mené jusqu'à -5,5% de déformation macroscopique).

5 Conclusion

La glace est un matériau cristallin qui présente la particularité de posséder une très forte anisotropie viscoplastique. De cette anisotropie découlent des réponses en déformation fortement marquées par des champs très hétérogènes. Ces hétérogénéités de déformation, issues des incompatibilités de déformation entre les grains, peuvent être caractérisées par corrélation d'images numériques (CIN) sur des expériences "modèles". Les résultats présentés ici synthétisent les travaux de deux doctorants, publiés dans trois articles ([8, 3, 2]) qui couvrent différents domaines de la courbe de fluage de la glace déformée à haute température. On suit ainsi la mise en place des hétérogénéités de déformation au cours du fluage primaire (ou transitoire), lorsque la microstructure reste constante. Cette microstructure, qui joue un rôle important, n'en est pas moins "dépassée" par les champs de déformation dont la structure se situe à une échelle supérieure à celle de la microstructure. De plus, il n'apparaît pas de lien statistique entre orientation cristallographique et niveau de déformation, ce qui remet en cause la vision d'une microstructure séparée en "grains durs" et "grains mous". Une modification de cette microstructure au début du fluage tertiaire, via les mécanismes de recristallisation dynamique, engendre une redistribution importante du champ de déformation, et une diminution de l'amplitude locale de concentration. On confirme ainsi le fait que la recristallisation dynamique, en remodelant la microstructure, diminue localement les incompatibilités de déformation. L'impact de ces mécanismes au cours du fluage tertiaire "stationnaire" n'a

pas été évoqué ici, mais il serait essentiel de confronter l'évolution bien connue des microstructures à celle des champs de déformation sur des temps plus long. Enfin, lorsque le fluage tertiaire est accommodé par l'apparition de fissures, la recristallisation dynamique intervient là aussi. Elle est active comme mécanisme résultant de la plasticité en pointe de fissure, et les modifications de microstructure qu'elle induit engendrent une redistribution des contraintes locales pouvant conduire à la fermeture de certaines fissures.

L'ensemble de ces résultats mettent en évidence l'intérêt de coupler des études d'évolution microstructurales à des mesures par CIN sur un matériau modèle tel que la glace qui permet d'accéder à des microstructures "modèles", et de travailler "à chaud". Ces expériences peuvent fournir des bases de données importantes pour les simulations à champ complet qui visent à intégrer un grand niveau de complexité, que ce soit au niveau des lois de comportement comme nous l'avons fait avec l'outil CraFT [8, 15], ou par des approches à éléments finis intégrant les champs de dislocations [13], par exemple.

Références

- [1] T. Chauve, M. Montagnat, F. Barou, K. Hidas, A. Tommasi, and D. Mainprice. Investigation of nucleation processes during dynamic recrystallization of ice using cryo-ebstd. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2086), 12 2017.
- [2] T. Chauve, M. Montagnat, C. Lachaud, D. Georges, and P. Vacher. Strain field evolution at the ductile-to-brittle transition : a case study on ice. *Solid Earth*, 8(5) :943–953, 2017.
- [3] T. Chauve, M. Montagnat, and P. Vacher. Strain field evolution during dynamic recrystallization nucleation ; a case study on ice. *Acta Materialia*, 101 :116–124, 12 2015.
- [4] P. Duval. Lois du fluage transitoire ou permanent de la glace polycristalline pour divers états de contraintes. *Ann. Geophys*, 32(4) :335–350, 1976.
- [5] P. Duval. Creep and recrystallization of polycrystalline ice. *Bull. Mineral*, 102 :80–85, 1979.
- [6] P. Duval, M. Ashby, and I. Anderman. Rate controlling processes in the creep of polycrystalline ice. *J. Phys. Chem.*, 87(21) :4066–4074, 1983.
- [7] J. Glen. The creep of polycrystalline ice. *Proc. Roy. Soc. London*, A228 :519–538, 1955.
- [8] F. Grennerat, M. Montagnat, O. Castelnau, P. Vacher, H. Moulinec, P. Suquet, and P. Duval. Experimental characterization of the intragranular strain field in columnar ice during transient creep. *Acta Materialia*, 60(8) :3655–3666, 5 2012.
- [9] T. H. Jacka. The time and strain required for development of minimum strain rates in ice. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 3 :261–268, 1984.
- [10] M. Montagnat, T. Chauve, F. Barou, A. Tommasi, B. Beausir, and C. Fressengeas. Analysis of dynamic recrystallization of ice from EBSD orientation mapping. *Frontiers in Earth Science*, 3(81) :1–13, 2015.
- [11] T. L. Nguyen, S. A. Hall, P. Vacher, and G. Viggiani. Fracture mechanisms in soft rock : Identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation. *Tectonophysics*, 503 :117 – 128, 2011. <ce :title>Thermo-Hydro-Chemo-Mechanical Couplings in Rock Physics and Rock Mechanics</ce :title>.
- [12] M. Peternell, D. Russell-Head, and C. Wilson. A technique for recording polycrystalline structure and orientation during in situ deformation cycles of rock analogues using an automated fabric analyser. *Journal of Microscopy*, 242 :181–188, 2011.
- [13] T. Richeton, L. 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. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 25(2) :025010, 2017.
- [14] E. M. Schulson and P. Duval. *Creep and Fracture of Ice*. Cambridge University Press, 2009.
- [15] P. Suquet, H. Moulinec, O. Castelnau, M. Montagnat, N. Lahellec, F. Grennerat, P. Duval, and R. Brenner. Multi-scale modeling of the mechanical behavior of polycrystalline ice under transient creep. *Procedia IUTAM*, 3 :76–90, 2012.
- [16] P. Vacher, 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.