
Résumé

La glace est un matériau de structure cristallographique hexagonale ayant une anisotropie plastique très importante. La déformation est principalement accommodée par le glissement des dislocations dans le plan basal. Cette forte anisotropie du monocristal de glace conduit lors de la déformation d'un polycristal, à de fortes hétérogénéités de déformation et de contrainte. Lors de la déformation à haute température, les mécanismes de recristallisation dynamique permettent, par le développement d'une nouvelle microstructure et d'une nouvelle texture, d'augmenter la ductilité du matériau. L'objet de cette étude est de mieux caractériser les mécanismes de recristallisation et leurs liens avec les hétérogénéités de déformation afin de mieux comprendre le développement des nouvelles microstructures et textures ainsi que leurs impacts sur le comportement du matériaux.

Ce travail est basé sur des essais de type fluage dans les conditions où la recristallisation dynamique est importante ($T > 0.95T_f$ et $0.5 < \sigma < 1 \text{ MPa}$). Deux types de polycristaux sont étudiés : la glace granulaire, considérée comme un volume élémentaire représentatif, qui permet d'appréhender d'un point de vue statistique l'impact de la recristallisation sur le développement des microstructures et des textures ; et la glace colonnaire, qui permet d'étudier les différents mécanismes de germination et leurs liens avec les hétérogénéités de déformation à l'échelle inter et intra-granulaire. Les outils de caractérisation utilisés sont la mesure *in situ* de l'évolution du champ de déformation par corrélation d'images numériques et la caractérisation des microstructures et des textures *pré-* et *post-* déformation par mesure optique et *Electron BackScatter Diffraction* (EBSD).

Étant donné les fortes hétérogénéités de déformation, les mécanismes de recristallisation dynamique continue et discontinue sont actifs au cours de la déformation. La formation de sous-joints de grains, la germination par gonflement (*bulging*), où la migration de joints de grains ont été mises en évidence. Des germes fortement désorientés par rapport aux grains parents ont également été observés. Ces observations impliquent un mécanisme de germination différent de ceux mentionnés ci-dessus. De plus, les dislocations géométriquement nécessaires composant les sous-joints de grains ont été caractérisées à l'aide du tenseur de Nye extrait des mesures EBSD. Cela a permis d'observer des sous-structures de dislocations composées de dislocations *c*. Ces dislocations *c* étaient jusqu'alors très rarement observées et seulement dans des conditions très spécifiques.

Une forte corrélation entre les hétérogénéités de déformation et les mécanismes de recristallisation a été mise en évidence grâce aux mesures de champs de déformation. Les mécanismes de recristallisation se concentrent dans les zones où la déformation est importante et ont tendance à réduire les hétérogénéités de déformation. De plus, ces bandes de déformation, où la recristallisation est active, sont orientées à environ $\pm 45^\circ$ et ont une dimension supérieure à la taille moyenne des grains, ce qui montre une organisation des hétérogénéités de déformation et de contrainte à grande distance.

Un modèle théorique pouvant contraindre l'orientation des germes créés par la germination spontanée est proposé. Ce modèle, basé sur la relaxation de l'énergie élastique, du fait de l'anisotropie élastique du mono-cristal de glace, permettrait de favoriser les cristaux dont l'axe *c* est aligné avec la direction de la contrainte principale locale. Cette étude a été complétée par des expériences numériques, basées sur un modèle à champ complet et une loi de plasticité cristalline élasto-viscoplastique qui permet de reproduire les hétérogénéités de déformation et de contrainte. Ces expériences numériques ont montré que ce mécanisme de germination orienté pourrait permettre d'expliquer le développement des textures de recristallisation.

Abstract

Ice is an hexagonal material in which deformation mainly occurs by dislocation glide along the basal plane conferring a strong viscoplastic anisotropy to the single crystal. Hence, during polycrystalline ice deformation the incompatibility between grains lead to highly heterogeneous strain. During ice creep at high temperature, dynamic recrystallisation occurs, leading to the development of a new microstructure and strong recrystallisation textures. These new microstructure and texture increase the ductility of the material. The aims of this study is to investigate dynamic recrystallisation mechanisms and their links with strain heterogeneities to better understand the development of these microstructure and texture.

Creep experiments are carried out in conditions where dynamic recrystallisation is important ($T > 0.95T_f$ and $0.5 < \sigma < 1 \text{ MPa}$). Two kinds of polycrystalline samples are used: granular ice, which can be considered as a representative elementary volume and enable to understand the global impact of dynamic recrystallisation mechanisms on texture and microstructure; and columnar ice which enable to better constrain the dynamic recrystallisation mechanism such as nucleation and their link with the strain heterogeneities down to the intra and inter-granular scales. Strain field evolution is measured *in situ* using digital images correlation and *pre-* and *post-* deformation microstructures and textures are measured using optical imaging and *Electron BackScatter Diffraction* (EBSD).

Due to the strong strain heterogeneities, both continuous and discontinuous recrystallisation mechanisms occurred. Sub-grain boundary formation, nucleation by bulging and grain boundary migration are mechanisms very active during dynamic recrystallisation in ice. On top of that, we also observed new grains with orientations highly disoriented compared to the neighbouring grains. This observation implies a nucleation mechanism different compare to the one mentioned above. Using Nye theory on EBSD measurements constrains the geometrically necessary dislocations of the sub-grain boundaries. Tilt sub-grain boundaries made of non-basal *c* dislocations have been observed. Only few observations of *c* dislocations existed so far, all of them made in very specific conditions.

A strong correlation between recrystallisation mechanisms and strain field heterogeneities have been observed. Recrystallisation mechanisms lead to a decrease and spread of strain heterogeneities. The strain localise into bands of deformation oriented at around $\pm 45^\circ$ from the compression axis and with a typical length higher than the mean grain size. These bands of high deformation localise most of the dynamic recrystallisation mechanisms. This observation shows that the long range interaction of the strain and stress heterogeneities.

We propose a new model which could be able to constrain the nucleus orientation for spontaneous nucleation. This model, based on the elastic energy relaxation during nucleation tanks to the elastic anisotropy of ice single crystal, should constrain the *c* axis to be aligned with the locale principal stress direction. To investigate the impact of such oriented nucleation mechanism on the texture development, a numerical experiment has been proposed using full field simulation with an elasto-viscoplastic law able to simulate the strain and stress fields heterogeneities. These numerical experiments show that the oriented nucleation mechanism might be able to explain the development of recrystallisation texture.