

# Abstract

Densification from firn to ice is an essential phenomenon for the interpretation of the climate record. A good knowledge of this mechanism is necessary for the precise dating of the air embedded in the ice. Pore closure (or close-off) is the stage at which air becomes entrapped in the ice. Typically, the close-off arises approximately 50-120 m under the ice sheet surface. Because of gas flow in the firn column above close-off, the ice is older than the entrapped air. The difference between ice and gas is defined as  $\Delta\text{age}$  and may reach several millennia in certain sites. The precise determination of the  $\Delta\text{age}$  is mandatory to link temperature changes (recorded in the ice) and greenhouse gas concentrations (recorded in the gas phase). This issue may be addressed through the modeling of the firn densification processes that lead to pore-closure.

Firn densification consists of grain rearrangements, sintering and viscoplastic deformation. Although the viscoplastic behavior of the ice crystal is strongly anisotropic, densification models do not take into account this anisotropy. Firn also bears some granular characteristics that may affect its densification. The interactions between pore closure and microstructural mechanisms in the firn are still misunderstood. The aim of this PhD thesis is to incorporate both the granular aspect of firn and its anisotropy into an innovating approach of firn densification modeling. The mutual indentation of viscoplastic monocrySTALLINE ice cylinders was experimentally carried out to propose a contact law that is based on indentation theory and that takes into account the preferential viscoplastic deformation on the basal plane. We have integrated this contact law into a DEM (Discrete Element Method) code for the prediction of firn densification. 3D X-ray micro-tomography was performed on polar firn at different stages of the densification ( $\rho = 0.55 - 0.88 \text{ g.cm}^{-3}$ ) and depths ( $\approx 23 \text{ m} - 130 \text{ m}$ ). A thorough investigation of pore closure and of different morphological and physical parameters was achieved for the Dome C and the newly drilled Lock In polar sites. In addition to these ex situ analyses, in situ X-ray micro-mechanical experiments were carried out on firn extracted from Dome C in order to model its densification. Ex situ and in situ microstructural observations indicate significant differences that can be explained by the relatively large strain rates imposed to the firn during in situ tests. These large strain rates allow for a decoupling of the effects of diffusion kinetics and of viscoplastic deformation. Their relative weights on the morphology of pores and on their closure are discussed. To measure pore closure, we propose a connectivity index, which is the ratio of the largest pore volume over the total pore volume. We show that this index is better suited for X-ray tomography analysis than the classical closed porosity ratio to predict the close-off density.

**Key words :** firn, densification, pore closure, anisotropy, X-ray tomography, discrete simulations

# Résumé

Il est essentiel de comprendre le processus de densification du névé en glace afin d'interpréter les enregistrements climatiques. Une bonne connaissance des mécanismes permet une datation précise de l'air capturé dans la glace lors de la fermeture des pores. La glace est plus vieille que l'air capturé car le transport des gaz dans la colonne de névé est plus rapide que la densification de celui-ci. Cette différence d'âge entre la glace et le gaz est généralement appelée le  $\Delta$ age. La densification de la neige est un processus complexe de réarrangement de grains, de frittage et de déformation viscoplastique. Bien que le comportement viscoplastique du cristal de glace soit fortement anisotrope, les modèles de densification actuels ne tiennent pas compte de cette anisotropie. De plus, le caractère granulaire du névé affecte aussi sa densification. La relation entre la fermeture des pores et les mécanismes microstructuraux sous-jacents est encore méconnue. Le but de cette thèse est d'incorporer à la fois l'aspect granulaire et l'anisotropie du cristal de glace dans une approche de modélisation innovante de la densification. Des expériences sur l'indentation viscoplastique de cylindres monocristallins de glace ont été réalisées pour proposer une loi de contact basée sur la théorie de l'indentation, et prenant en compte la déformation préférentielle du cristal de glace sur les plans basaux. Cette loi de contact a été implémentée dans un code utilisant la méthode des éléments discrets pour prédire la densification du névé.

La micro-tomographie aux rayons X a été utilisée pour caractériser ex situ le névé polaire en trois dimensions à différentes étapes de la densification ( $\rho = 0.55 - 0.88 \text{ g.cm}^{-3}$ ), i.e. pour différentes profondeurs ( $\approx 23 \text{ m} - 130 \text{ m}$ ). Une étude fine de la fermeture des pores et de différentes caractéristiques morphologiques et physiques a été réalisée pour les sites polaires Dome C et Lock In. Des essais mécaniques ont aussi été réalisés in situ sur du névé extrait de Dome C dans le but de modéliser la densification du névé. Les observations microstructurales des expériences ex situ et in situ révèlent d'importantes différences dues aux vitesses relativement importantes utilisées lors des essais mécaniques. Ces vitesses élevées permettent de découpler la contribution des cinétiques de diffusion de la contribution viscoplastique de la déformation. Les effets de ces contributions sur la morphologie des pores et leur fermeture sont discutés. Pour caractériser la fermeture des pores, cette thèse propose un indice de connectivité défini par le ratio entre le volume du plus gros pore sur la porosité totale. En effet, cet indice est plus approprié lors de l'utilisation de la tomographie aux rayons X que le ratio de pores fermés pour prédire la densité au close-off.

**Mots clés :** névé, densification, fermeture des pores, anisotropie, tomographie X, simulations discrètes