

## ***Étude à micro-échelle du test de pénétration du cône dans la neige***

La prévision du risque d'avalanche, les prévisions hydrologiques ou l'estimation du bilan énergétique de la Terre dépendent d'une connaissance précise de la stratigraphie du manteau neigeux. Le test de pénétration du cône, qui consiste à enregistrer la force nécessaire pour faire pénétrer un cône dans le matériau d'intérêt, est largement utilisé pour mesurer des profils de neige. La sonde de battage développée et utilisée depuis 1930 a été continuellement améliorée. Aujourd'hui, des pénétromètres numériques, tel que le SnowMicroPenetrometer, permettent de mesurer la résistance à la pénétration à vitesse constante avec une résolution verticale de quelques microns. Les fluctuations de force mesurées à cette résolution contiennent des informations sur la microstructure essentielles pour compléter la connaissance de la dureté moyenne de chaque couche de neige. Néanmoins, le lien entre le profil de dureté et la microstructure de la neige n'est pas encore entièrement compris. En effet, les modèles d'inversion existants négligent certaines des interactions entre la pointe du cône et la neige, comme la formation d'une zone de compaction, et ils n'ont été évalués que par des relations empiriques avec des propriétés macroscopiques.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'interaction entre le cône et la neige à une échelle microscopique à l'aide de la tomographie à rayons X afin d'extraire, de manière plus précise, les propriétés microstructurelles de la neige à partir des mesures de résistance à la pénétration. Dans ce travail, nous analysons des tests de pénétration du cône de quelques centimètres de profondeur, qui contiennent une partie transitoire non négligeable due à la formation progressive d'une zone de compaction. Afin de prendre en compte explicitement ce processus, nous avons développé un modèle statistique non-homogène de Poisson qui prend en compte une dépendance à la profondeur du taux d'occurrence de rupture entre grains de neige. Nous avons utilisé ce modèle pour caractériser le frittage de la neige par des tests de pénétration du cône sous conditions contrôlées dans une chambre froide. D'après le modèle, l'hétérogénéité verticale des profils de dureté était due aux variations du taux d'occurrence de rupture, tandis que l'évolution temporelle de la force macroscopique était contrôlée par un renforcement des ponts. Cette partition est cohérente avec les processus de frittage connus et fournit une validation indirecte du modèle proposé.

Une deuxième partie de la thèse portait sur des expériences en chambre froide combinant des tests de pénétration du cône et d'imagerie par tomographie X. Des images tri-dimensionnelles à haute résolution d'un échantillon de neige étaient prises avant et après le test du cône. Sur ces images, un nouvel algorithme de suivi de grains a été appliqué pour déterminer les déplacements granulaires induits par le test. Nous avons quantifié avec précision la taille de la zone de compaction et sa relation avec les caractéristiques de la neige. Nous avons montré que les déplacements verticaux observés compliquent l'utilisation de modèles d'expansion de cavité comme modèles d'inversion. Enfin, nous avons lié les propriétés microstructurelles obtenues par tomographie, telles que la taille ou le nombre de ruptures de ponts, à des propriétés dérivées des profils de dureté. Nous avons montré que les propriétés estimées à partir des tests de pénétration du cône sont des approximations de la microstructure de la neige, mais reste trop conceptuelles pour espérer une relation directe. A l'avenir, ces études devraient permettre de dériver, de manière objective, la stratigraphie du manteau neigeux à partir d'une mesure de terrain simple et rapide.

## ***Microstructural analysis of cone penetration tests in snow***

Precise knowledge of the snowpack stratigraphy is crucial for different applications such as avalanche forecasting, predicting the water runoff, or estimating the Earth energy budget. The cone penetration test, which consists in recording the force required to make a cone penetrate the material of interest, is widely used to measure in situ snow profiles. The ramsonde developed in the 1930's was continuously improved into highly-resolved digital snow penetrometers. In particular, the SnowMicroPenetrometer measures the snow penetration resistance at constant speed with a vertical resolution of four microns. The force fluctuations measured at such a resolution contain information about the snow microstructure, which is essential to complete the knowledge of the mean hardness of each snow layer. Nevertheless, the link between the measured hardness profile and the snow microstructure is not yet fully understood. Indeed, existing inversion models neglect obvious interactions between the cone tip and the snow, such as the formation of a compaction zone, and have only been evaluated through empirical relations to macroscopic properties. The goal of this thesis is to investigate the interaction between the cone and the snow at a microscopic scale using X-ray tomography in order to better invert the hardness profiles into microstructural properties. In this work, we analyze cone penetration tests of a few centimeters and thus the measured profiles contain a non negligible transient part due to the progressive formation of a compaction zone. In order to explicitly account for this process in the inversion model, we successfully developed a non-homogeneous Poisson shot noise model which considers a depth dependency of the rupture occurrence rate. We used this model to characterize snow sintering with cone penetration tests under controlled cold-lab conditions. According to the model, the vertical heterogeneity of hardness profiles was due to variations of the rupture occurrence rate, while the time evolution of the macroscopic force was controlled by bond strengthening. This partition is consistent with the expected sintering processes and provides an indirect validation of the proposed model. The second part of the thesis consists of cold-lab experiments combining cone penetration tests and X-ray tomography. High resolution three dimensional images of the snow sample before and after the cone test were measured. On these images, a novel tracking algorithm was applied to determine granular displacements induced by the test. We precisely quantified the size of the compaction zone and its relation to the snow characteristics. Furthermore, we showed that the observed vertical displacements challenge the use of standard cavity expansion models as inversion models. Finally, we linked the microstructural properties obtained from tomography, such as the bond size or the number of failed bonds, to properties derived from hardness profiles. We showed that the properties estimated from cone penetration tests are proxies of the snow microstructure, but remain too conceptual to expect a straightforward relation. In the future, these studies should make it possible to derive in an objective way the stratigraphy of the snowpack from a simple and fast field measurement.