

Microstructural investigation of snow failure under mixed-mode loading

Tijan Mede, Guillaume Chambon, François Nicot, Pascal Hagenmuller

Abstract

Dry slab snow avalanches represent a major natural hazard that is extremely difficult to manage. Attempts to model this phenomenon are hindered by the lack of a constitutive law that would describe the mechanical behaviour of snow on a material scale. In particular, relatively little is known on the failure and post-failure response of snow at high loading-rates. The highly fragile nature of the material in this deformation regime renders experimental investigation difficult and complicates observation at the microstructural level.

As an alternative to experiments, a Discrete Element Method-based numerical model of snow is developed in this thesis. The model enables us to simulate the response of snow to mechanical loading, while accounting for actual snow microstructure by using X-ray attenuation images of snow microstructure as input. Snow is considered as a cohesive granular material and an original methodology is developed in order to model the shape of each grain. Individual grains are bound into the snow matrix by modelling cohesion between neighbouring grains.

The model is then used to explore the macroscopic mechanical response of different snow samples to mixed-mode loading. Three typical modes of failure are observed in all tested snow samples, depending on the level of applied normal stress: a localized shear failure at low normal stress (mode A), a shear failure-induced volumetric collapse at intermediate levels of normal stress (mode B), and a normal failure and collapse for high values of normal stress (mode C). The observed failure modes result in closed failure envelopes and no qualitative difference is observed between the mechanical responses of different snow types.

The internal mechanisms that lead to volumetric collapse are further examined on the microscale. Force chain buckling is identified as a trigger of

this material instability. Additionally, force chain stability appears to be controlled by the contacts between the force chain members and the surrounding grains. The failure in these contacts, which is evidenced in modes B and C, allows force chain buckling to develop and results in subsequent volumetric collapse.

Résumé

Les avalanches de plaque représentent un risque naturel majeur dont la prévision demeure très difficile. Le manque de lois constitutives fiables à l'échelle du matériau rend difficiles les tentatives de modélisation de ce phénomène. Plus spécifiquement, la réponse mécanique de la neige durant et après la rupture, dans des régimes de chargements rapides, demeure relativement méconnue. La nature particulièrement fragile du matériau au sein de ce régime de déformation rend ardue la réalisation d'expériences et complique l'observation à l'échelle microstructurale.

Dans ce travail de thèse, un modèle numérique de neige fondé sur la Méthode des Éléments Discrets a été développé en tant qu'alternative aux expériences. Le modèle nous permet de simuler la réponse de la neige à des chargements mécaniques en tenant compte de la microstructure réelle du matériau grâce à l'intégration d'images acquises par microtomographie à rayons X en entrée du modèle. La neige est considérée comme un matériau granulaire cohésif, et une méthode originale a été développée afin de modéliser la forme de chaque grain. Les grains individuels sont ensuite assemblés pour reconstituer la matrice de la neige grâce à la prise en compte de lois de contact cohésives.

Le modèle a été utilisé afin d'explorer la réponse mécanique macroscopique de différents échantillons de neige à un chargement mixte normal-cisailant. Trois modes de rupture ont été observés dans tous les échantillons de neige testés, en fonction du niveau de contrainte normale appliquée : une rupture en cisaillement localisée pour des niveaux de contrainte normale faibles (mode A), un effondrement normal induit par rupture en cisaillement à des niveaux intermédiaires de contrainte normale (mode B) et un effondrement normal pour des valeurs de contrainte normale élevées (mode C). Ces différents modes de rupture produisent une enveloppe de rupture fermée dans l'espace des contraintes, ce pour les différents types de neige étudiés.

Les mécanismes internes conduisant à l'effondrement normal des échantillons ont été étudiés plus en détail à l'échelle microscopique. Il a été montré que ce mode de rupture était associé à un mécanisme de flambement des

chaînes de force. En outre, la stabilité de ces chaînes de force semble être contrôlée par les contacts entre les éléments des chaînes et les grains environnants. La rupture de ces contacts, observée dans les modes B et C, autorise le développement du flambement des chaînes de force et aboutit à l'effondrement volumique.
