



HAL
open science

Test de pénétration du cône dans la neige : nouvelles perspectives avec la tomographie et la modélisation par éléments discrets

Clémence Herny, Pascal Hagenmuller, Guillaume Chambon, Jacques Roulle,
Isabel Peinke

► To cite this version:

Clémence Herny, Pascal Hagenmuller, Guillaume Chambon, Jacques Roulle, Isabel Peinke. Test de pénétration du cône dans la neige : nouvelles perspectives avec la tomographie et la modélisation par éléments discrets. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280165

HAL Id: hal-04280165

<https://hal.science/hal-04280165>

Submitted on 15 Nov 2023

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.

Test de pénétration du cône dans la neige : nouvelles perspectives avec la tomographie et la modélisation par éléments discrets

C. HERNY^{a,b}, P. HAGENMULLER^a, G. CHAMBON^b, J. ROULLE^a, I. PEINKE^a

a. Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, Grenoble, France, pascal.hagenmuller@meteo.fr

b. Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, Grenoble, France

Résumé :

Le test de pénétration du cône est couramment utilisé pour déterminer le profil vertical des propriétés mécaniques du manteau neigeux, essentiel pour estimer le risque d'avalanche. Les pénétromètres digitaux tels que le Snow Micro Penetrometer permettent de capturer ces profils à haute résolution. Toutefois, une interprétation précise des profils de résistance à l'enfoncement nécessite de bien comprendre l'interaction entre la pointe du cône et le matériau neige. Dans cette étude, nous avons combiné des tests de pénétration du cône, des mesures de tomographie à rayons X et de la modélisation numérique. D'une part, nous avons mesuré les déplacements tridimensionnels des grains de neige entre les images tomographiques mesurées avant et après le test de cône avec un algorithme de suivi qui exploite la forme unique de chaque grain. D'autre part, nous avons alimenté un modèle par éléments discrets avec des microstructures de neige mesurées par tomographie et une loi de contact élastique fragile pour mener des expériences numériques. Nous avons montré que les déplacements des grains de neige autour du cône s'écartent de ceux supposés par les modèles standards tels que le modèle d'expansion de cavité. Les tests numériques nous ont permis d'analyser comment les différentes microstructures de neige et la loi de contact affectent le profil de pénétration et le déplacement autour du cône. Le modèle par éléments discrets reproduit à la fois le profil de force et le déplacement autour du cône mesurés expérimentalement.

Abstract :

The cone penetration test is commonly used to determine a vertical profile of the snowpack mechanical properties, which is essential for avalanche hazard assessment. Digital penetrometers such as the Snow Micro Penetrometer can measure penetration profiles at a very high resolution. An accurate interpretation of the measured profiles requires a good understanding of the interaction between the penetrometer tip and the snow material. In this study, we combined cone penetration testing, X-ray tomography measurements and numerical modeling. On the one hand, we measured the three-dimensional displacement of the snow grains between the tomographic images measured before and after the cone test, with a tracking algorithm which exploits the unique shape of each grain. On the other hand, we fed a discrete element

model with snow microstructures measured by tomography and an elastic brittle contact law. We showed that the snow grain displacements around the cone deviate from those assumed by standard models such as the cavity expansion model. The numerical tests allowed us to analyze how the different snow microstructures and the contact law affect the penetration profile and the snow displacement around the cone. The discrete element model reproduces both the force profile and the displacement around the cone measured experimentally.

Mots clefs : neige, test du cône, tomographie, éléments discrets

1 Introduction

La neige est constituée de beaucoup d'air, de glace et parfois d'un peu d'eau liquide. L'arrangement tri-dimensionnel de ces éléments à l'échelle microscopique, c'est à dire la microstructure de la neige, présente une large gamme de motifs caractéristiques des différents types de neige (Hagenmuller, 2014). En effet, d'une part, ses conditions de formation dans les nuages influencent la morphologie des flocons (Nakaya, 1954). D'autre part, une fois au sol, la neige continue d'évoluer au travers du fluage de la matrice de glace et des changements de phase très localisés et permanents entre glace, vapeur et eau liquide (Colbeck, 1982). Caractériser la stratigraphie du manteau neigeux est important pour de nombreuses applications. Le profil vertical des propriétés mécaniques du manteau neigeux détermine notamment la stabilité du manteau neigeux et, in fine, le danger d'avalanche (Schweizer et al., 2003).

Une méthode objective et relativement facile à mettre en oeuvre pour mesurer le profil vertical des propriétés mécaniques de la neige est le test de pénétration du cône (CPT). Cette méthode est largement utilisée pour caractériser la stratigraphie des sols en général (Lunne et al., 2009) et a été adaptée depuis longtemps à la mesure du manteau neigeux (Gubler, 1975). Le CPT mesure la force de résistance exercée sur une pointe pénétrant à vitesse constante dans un matériau. Le développement de pénétromètres sophistiqués dédiés à l'étude de la neige (Schneebeli et Johnson, 1998) permet aujourd'hui de capturer le signal de force à très haute résolution verticale de l'ordre du micron. Les fluctuations à haute fréquence du signal contiennent des informations précieuses sur les paramètres microstructurels de la neige (Marshall et Johnson, 2009).

Pour interpréter ces fluctuations, une bonne compréhension de l'interaction entre la pointe du cône et la microstructure de la neige est nécessaire. Plusieurs études ont cherché à mesurer le champ de déplacement des grains autour de la pointe par corrélation d'images de CPT modifiés (Floyer et Jamieson, 2010; van Herwijnen, 2013; Lebaron et Miller, 2014). Ces études ont révélé le développement d'une zone de compaction devant la pointe. Des modèles mécaniques ou statistiques ont été développés pour interpréter le signal de pénétration en termes de propriétés mécaniques à partir d'hypothèses sur le comportement mécanique à proximité de la pointe. Le modèle d'expansion de cavité (Bishop et al., 1945), couramment utilisé pour les CPT dans les sols, a été appliqué à la neige par Ruiz et al. (2017) et Peinke et al. (2020). Ce modèle considère la neige comme un continuum et se base sur une déformation élastique-plastique du matériau autour de la pointe. Il permet d'extraire des propriétés mécaniques macroscopiques (cohésion, angle de frottement, etc.) du profil de force (Ruiz et al., 2017; Peinke et al., 2020). Le modèle de bruit de grenaille (shot noise) considère que le signal de force et ses fluctuations résultent d'une superposition de ruptures aléatoires et indépendantes de liaisons élastiques-fragiles entre les grains de neige (Löwe et van Herwijnen, 2012; Peinke et al., 2020). Ce modèle considère la nature discrète des ruptures des

ponts de glace et permet de remonter à des variables décrivant la microstructure de la neige (nombre de ponts rompus, cohésion entre grains, etc.). Même si ces modèles permettent une interprétation des tests de pénétration du cône dans la neige (Proksch et al., 2015), leurs hypothèses constitutives restent discutables (e.g dans le modèle de cavité, la neige est modélisée comme un continuum alors que la taille des grains de neige s'approche de celle de la pointe du cône ; dans le modèle de grenaille, les effets de la compaction sont absents) et l'évaluation des limites associées à ces hypothèses reste incomplète.

Notre étude vise à mieux comprendre l'interaction du cône avec les grains de neige afin de pouvoir proposer, à terme, un modèle d'inversion du signal de pénétration adapté. Le matériau neige étant caractérisé par une grande variabilité et une manipulation expérimentale difficile (matériau fragile, évolutif avec la température, etc.), nous avons adopté une stratégie basée sur des expériences numériques exploitant la caractérisation initiale du matériau par tomographie. Pour cela, nous avons réalisé des tests de pénétration du cône sur différents échantillons de neige que nous avons suivis par tomographie à rayons X. La comparaison des images de la microstructure de la neige avant et après les tests nous a permis de remonter au champ de déplacement des grains induit par la pénétration du cône. L'image tri-dimensionnelle prise avant le test nous permet de dériver l'état initial d'un modèle par éléments discrets spécifiquement développé pour reproduire le test de pénétration. Dans cet article, nous nous focalisons sur le développement et l'évaluation complète de ce modèle à partir de données expérimentales décrivant le profil de force et le champ de déplacement.

2 Méthodes

2.1 Données expérimentales

Nos données expérimentales comprennent pour différents échantillons centimétriques de neige : la mesure par tomographie X de l'état initial de l'échantillon, la mesure du profil de force par CPT, la mesure par tomographie de l'état déformé de l'échantillon, et le calcul des déplacements de grains entre l'état final et initial. L'ensemble des mesures a été effectué à une température de -10°C . Dans cette section, nous présentons dans les grandes lignes ces données expérimentales. Les détails sont décrits par Peinke et al. (2020).

Échantillons de neige. Nous avons préparé plusieurs échantillons de neige représentatifs de différents types de neige naturelle. Après prélèvement sur le terrain, nous avons tamisé la neige dans des porte-échantillons cylindriques (diamètre et hauteur de 20 mm) et les avons laissé reposer durant quelques jours pour que les contacts entre grains de neige se reforment. Au final, les quatre échantillons testés ont les caractéristiques suivantes (description standard selon Fierz et al., 2009) : échantillon RG composé de grains fins avec une masse volumique de 289 kg m^{-3} ; RGlr gros grains fins denses (530 kg m^{-3}) ; DH givre de profondeur (364 kg m^{-3}) ; PP neige récente (90 kg m^{-3}). Un aperçu de la morphologie des microstructures de ces échantillons est présenté sur la Fig. 1.

Tomographie. Des scans tomographiques par rayons X de chaque échantillon ont été acquis avant et après avoir effectué le test de pénétration du cône pour capturer, respectivement, la microstructure initiale et finale de la neige. Chaque scan, constitué de 1440 radiographies 2D, a été reconstruit pour obtenir des images 3D à une résolution nominale de $15 \mu\text{m vox}^{-1}$ en niveaux de gris représentant les coefficients d'atténuation des différents matériaux composant les échantillons. Les images en niveaux de gris ont ensuite été transformées en images segmentées binaires (matrice de glace - pores) en utilisant un algorithme de segmentation basé sur la minimisation d'une énergie de segmentation (Hagenmuller et al.,

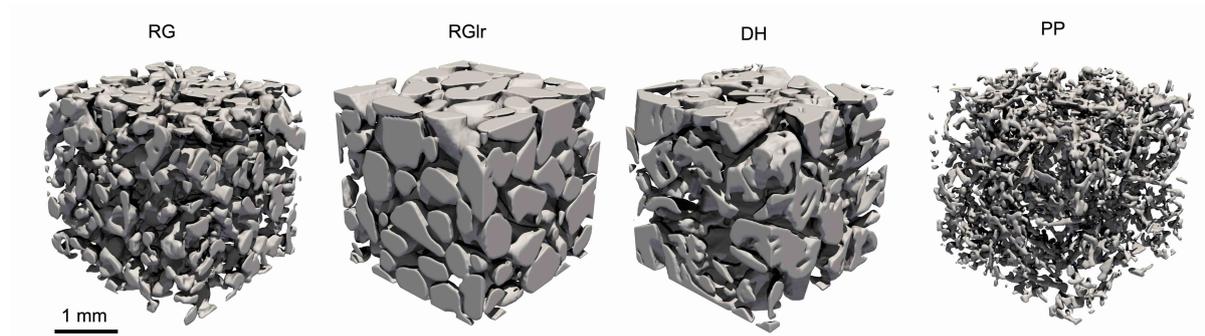


FIGURE 1 – Microstructure 3D des échantillons de neige utilisés dans cette étude. Les pores sont transparents et la glace est représentée de manière opaque en gris. Des sous-échantillons de 3 mm de côté ont été extraits des scans tomographiques pour une meilleure lisibilité. Le nom de l'échantillon est au dessus de l'image 3D et correspond à la nomenclature internationale des types de neige (Fierz et al., 2009) (RG : grains fins, RGlR : gros grains fins, DH : givre de profondeur, PP : neige récente).

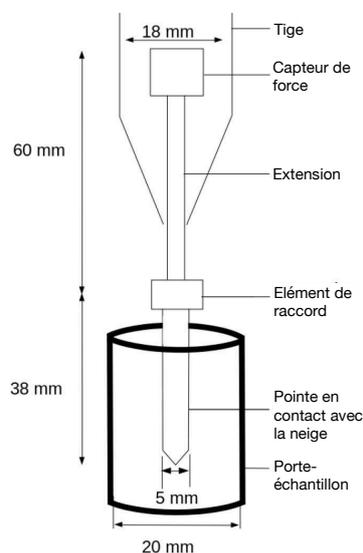


FIGURE 2 – Géométrie du test de pénétration du cône. Adapté de Peinke et al. (2020).

2013).

Test de pénétration du cône. Après le scan initial, un test de pénétration du cône (CPT) a été réalisé sur les échantillons de neige à l'aide du SnowMicroPenetrometer (Schneebeli et Johnson, 1998). Ce pénétromètre présente une pointe conique avec un angle d'apex de 60° et un rayon maximal de 2.5 mm (Peinke et al., 2020) (Fig. 2). La tige est insérée verticalement dans l'échantillon de neige à une vitesse de 20 mm s^{-1} . La force de résistance appliquée sur la tige est enregistrée tous les $4 \mu\text{m}$ d'incrément de pénétration avec une résolution de 0.01 N. A la fin du CPT, le cône est laissé plusieurs heures en position enfoncée, afin que l'empreinte de déformation du cône se solidifie par frittage, avant que le cône ne soit retiré.

Méthode de calcul du champ de déplacement. Pour mesurer les déplacements tridimensionnels complets entre les images tomographiques mesurées avant et après le test, nous avons précédemment conçu un algorithme de suivi qui exploite la forme unique de chaque grain de neige (Peinke et al., 2020). Tout d'abord le squelette de glace est segmenté en grains à partir de critères géométriques sur la courbure et la contiguïté (Hagenmuller et al., 2014). Ensuite à partir de la taille et de la forme de chaque grains,

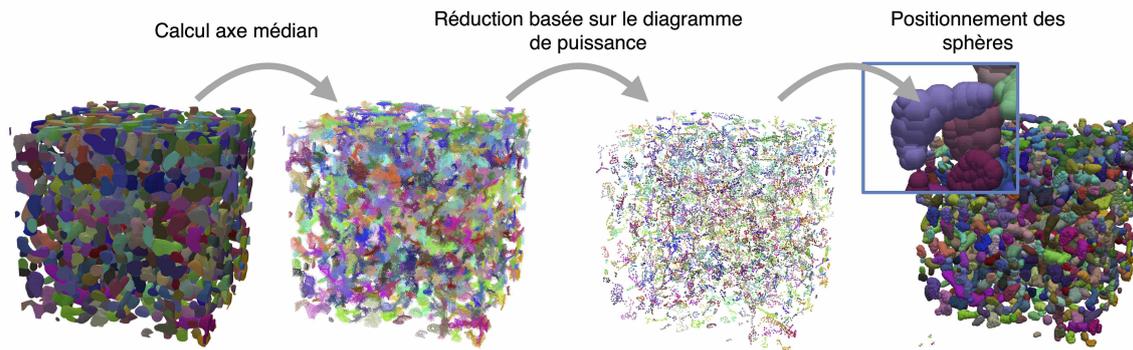


FIGURE 3 – Principe de représentation de la structure granulaire de la neige à partir d'agrégats de sphères inter-pénétrantes. L'échantillon représenté ici correspond à RG (sous-volume de 5 mm de côté). Dans cet exemple composé de 1 510 grains, on passe de 33 004 481 voxels de glace (à gauche) à 23 910 sphères (à droite).

une liste de couples possibles de grains entre l'image initiale et l'image après CPT (i.e. le grain déplacé) est déterminée. Le meilleur couple de grains est ensuite sélectionné par corrélation d'images classique (PIV). Cet algorithme permet de récupérer la plupart des déplacements des grains et de capturer avec précision la déformation volumétrique directement dérivée des changements de densité (Peinke et al., 2020).

2.2 Modèle par éléments discrets

Le modèle utilisé ici a été initialement développé par Hagenmuller et al. (2015) et approfondi par Mede et al. (2018b). L'originalité principale de notre approche réside dans la prise en compte explicite d'une microstructure 3D de neige comme état initial. C'est un modèle par éléments discrets qui est basé sur le code numérique YADE (Smilauer et al., 2021). En effet, pour des déformations suffisamment grandes et rapides (e.g., taux de déformation $> 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), le comportement mécanique de la neige peut être approché par un comportement granulaire (Hagenmuller et al., 2015). Cette hypothèse permet de réduire le nombre de degrés de liberté de la microstructure : les grains sont indéformables et interagissent uniquement à travers des contacts élastiques fragiles.

Représentation de la microstructure. Le squelette de glace est d'abord segmenté en grains à partir de critères géométriques sur la courbure et la contiguïté (Hagenmuller et al., 2014). Les ponts détectés entre grains correspondent aux faiblesses mécaniques potentielles (zones de constriction de la matrice de glace). Chaque grain présente une forme irrégulière qui ne peut être aisément représentée dans les modèles par éléments discrets. Nous approchons la forme de chaque grain par l'union de sphères inter-pénétrantes bien choisies. Pour réduire au maximum le nombre de sphères requis pour représenter un grain, nous exploitons l'axe médian et un diagramme de puissance afin d'écartier les sphères redondantes (Coeurjolly et Montanvert, 2007; Mede et al., 2018a) (Fig. 3). Les sphères appartenant à un même grain sont regroupées en agrégats rigides et constituent un élément discret.

Loi de contact. Les contacts entre grains sont représentés par plusieurs interactions entre les sphères des deux agrégats en contact (Fig. 4). Les interactions entre les sphères sont décrites par une loi élastique cohésive (Fig. 4). Cette loi de contact prend en compte l'aire de contact "portée" par le couple sphère-sphère considéré et dépend de la cohésion de la glace C , de son module de Young E , de son coefficient de Poisson ν et de son angle de friction ϕ . Les valeurs de ces paramètres physiques ont été choisies de manière cohérente avec les valeurs mesurées sur la glace (Mellor, 1975; Schulson et Duval, 2009;

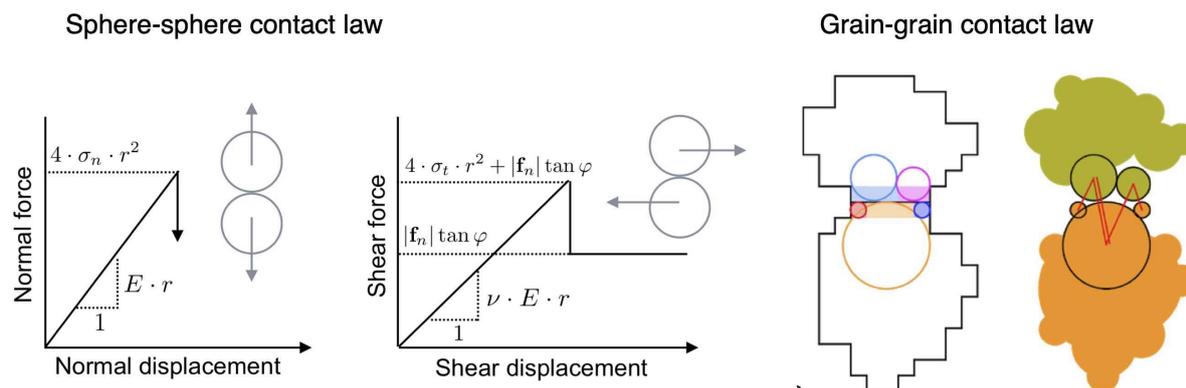


FIGURE 4 – Loi de contact sphère-sphère et interaction entre deux grains représentés comme des agrégats de sphères.

Chandel et al., 2014). Ici on a $C = 2$ MPa, $E = 1$ GPa, $\nu = 0.3$ et $\tan(\phi) = 0.2$. Les nouvelles interactions entre grains de neige apparaissant lors de la pénétration du cône, de même que les interactions neige-pénétromètre, ne sont pas cohésives mais seulement élastiques et frictionnelles.

Conditions aux bords. Les conditions aux bords sont choisies pour reproduire le test de pénétration du cône tel que mesuré expérimentalement (Fig. 2). L'échantillon de neige est contenu dans une boîte rectangulaire ($12.4 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$ de section horizontale et 15 mm de haut) ouverte sur le dessus. La pointe présente un rayon maximal de 2.5 mm et un angle d'apex de 60° . La pointe centrée à la surface de la boîte se déplace vers le bas, à travers l'échantillon, à une vitesse constante de 20 mm s^{-1} . La simulation s'arrête lorsque la pointe atteint le fond de la boîte. Les parois (boîte et pointe) sont représentées par des facettes rigides. La gravité est fixée à 9.81 m s^{-2} et la masse des sphères inter-pénétrantes est ajustée pour que la masse de chaque grain soit exacte. La force de pénétration F correspond à la somme des forces appliquées à la pointe sur les parties conique et cylindrique.

3 Résultats

3.1 Profil de force

Les profils de force simulés sont comparés aux profils expérimentaux pour les échantillons RGIr et DH sur la Fig. 5. Des résultats similaires sont observés sur les échantillons RG et PP (non montrés). D'un point de vue qualitatif, les deux types de profils semblent en bon accord à la fois sur la valeur moyenne de la force, sur la tendance générale avec la profondeur et sur l'allure des fluctuations à haute fréquence (écart-type à la moyenne glissante et longueur de corrélation). De plus, les résultats de simulation distinguent bien les deux types de neige aux caractéristiques différentes. Notons que les valeurs des paramètres n'ont ici pas été ajustés au profil expérimental. C'est bien la microstructure 3D qui permet d'expliquer la différence de comportement mécanique entre les deux échantillons. Néanmoins, en ajustant spécifiquement les propriétés de la glace contrôlant la loi de contact, on peut encore améliorer l'accord entre les profils, notamment l'amplitude des fluctuations et leur fréquence temporelle. Cette sensibilité des fluctuations de force à la loi de contact est intéressante car elle indique que le signal de pénétration est directement relié à des indicateurs microscopiques des ponts entre grains de glace.

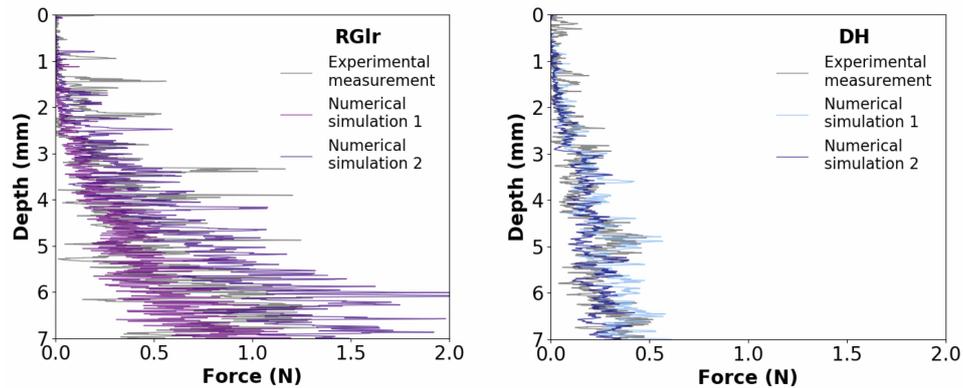


FIGURE 5 – Profils de force simulés ("Numerical simulation 2") et mesurés ("Experimental measurement") sur les échantillons RGlR et DH. A noter qu'une simulation ajustée à l'expérience, i.e. en optimisant les paramètres de la loi de contact pour coller au mieux aux données expérimentales, est aussi montrée pour les deux échantillons ("Numerical simulation 1").

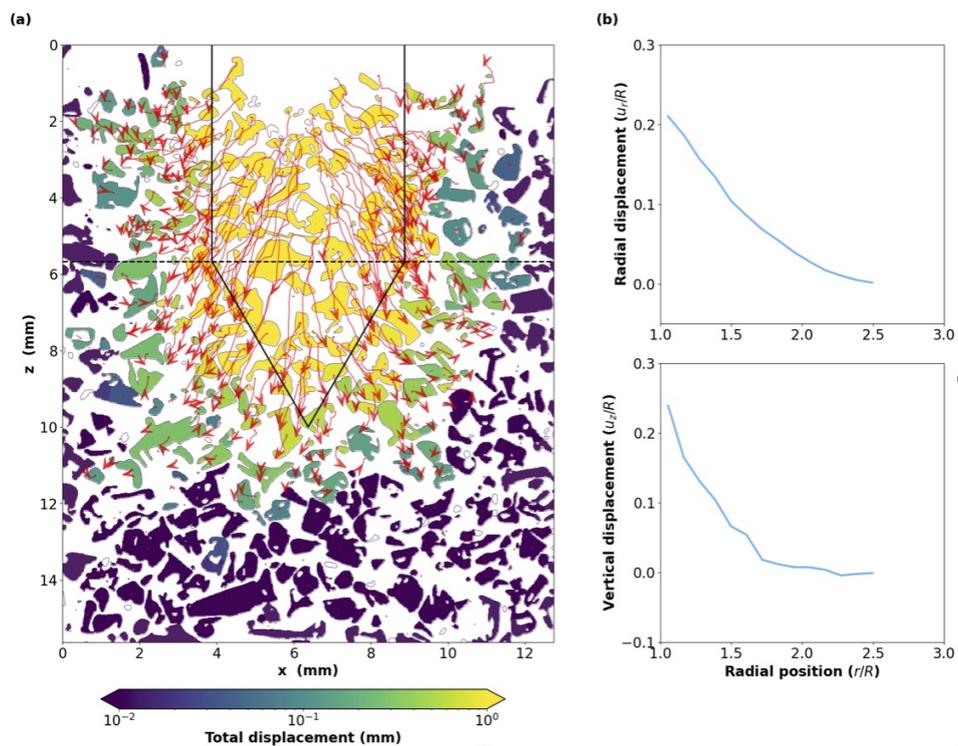


FIGURE 6 – Trajectoires (flèches rouges) simulées des grains de neige de l'échantillon DH poussés par la pénétration du cône. La couleur du grain représente l'amplitude de son déplacement total. Sur la figure de droite, les profils radiaux de déplacements radial et vertical moyennés le long de la partie cylindrique du cône sont représentés.

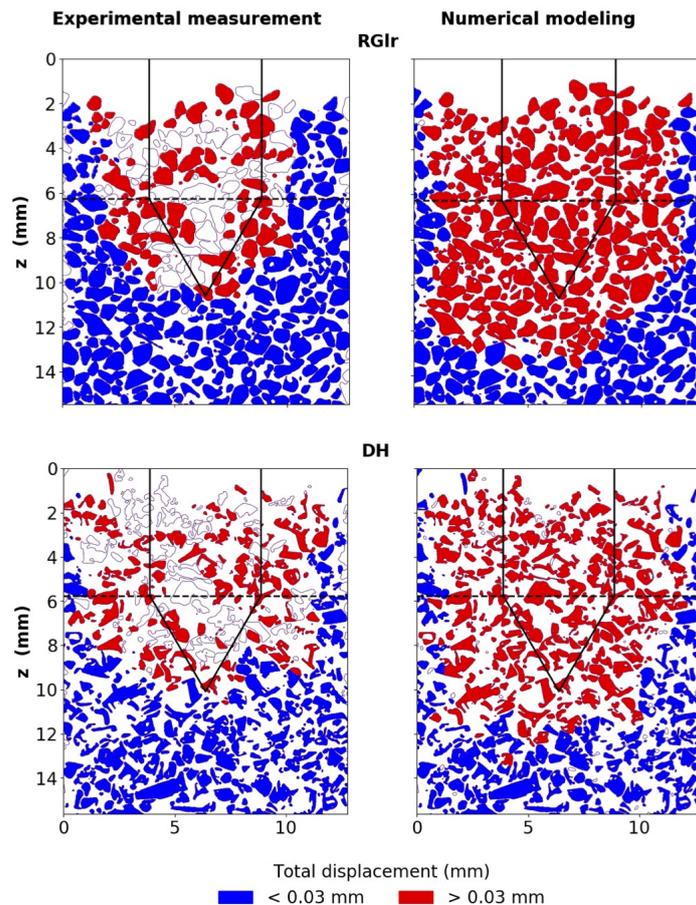


FIGURE 7 – Comparaison des zones de déplacement mesurées et simulées, induites par la pénétration du cône. Ici, un seuil arbitraire de 0.03 mm sur l’amplitude du déplacement est utilisé pour distinguer les grains déplacés des grains fixes. Les grains dont le déplacement n’a pu être suivi expérimentalement ne sont pas colorés.

3.2 Champ de déplacement autour de la pointe

La Figure 6 montre la trajectoire des grains de l’échantillon DH lors du test de pénétration du cône. Les grains sont principalement poussés vers le bas et de chaque côté de la pointe. Les grains situés au milieu de la trajectoire de la pointe présentent une trajectoire quasi-linéaire orientée vers le bas, alors que les grains situés plus loin de la pointe présentent une trajectoire courbe avec une composante radiale significative. Près de la surface, les trajectoires sont orientées vers le haut. De manière intéressante, le déplacement vertical des grains de neige est, en moyenne, de même amplitude que le déplacement radial. Cette observation est confirmée par le déplacement total mesuré expérimentalement, bien que ce dernier soit plus bruité que dans la simulation et sensiblement affecté par le retrait de la pointe dans la neige proche de la surface de l’échantillon (non montré, voir (Peinke et al., 2020)). Le modèle d’expansion de cavité prévoit un déplacement vertical nul, son utilisation pour interpréter le test de pénétration du cône semble donc discutable. Par ailleurs, le déplacement quasi-vertical des grains situés directement sous la pointe indique la formation d’un plug ou d’une zone de compaction sous la pointe que le modèle de bruit de grenaille ne peut prendre en compte.

La Figure 7 montre les zones où les grains de neige se déplacent sous l’effet de la pénétration du cône. L’extension radiale et verticale de la zone déplacée est similaire entre simulations et expériences. Néan-

moins, cette zone semble légèrement plus grande dans le cas de la simulation numérique, notamment pour l'échantillon le plus dense, RGl. Cette divergence s'observe (non montré) également dans le profil radial des déplacements, qui sont sensiblement plus marqués dans le cas de la simulation.

4 Conclusion

Pour mieux comprendre les mécanismes en jeu lors du test de pénétration du cône dans la neige, nous avons réalisé des tests de pénétration suivis par tomographie et développé un modèle numérique. Ce modèle est basé sur la méthode des éléments discrets et sur une représentation fine de l'état initial de l'échantillon directement issue de données tomographiques. A partir des propriétés typiques de la glace, le modèle permet de reproduire, de manière satisfaisante, à la fois le profil de force et le déplacement des grains autour de la pointe. Il arrive notamment à reproduire les fluctuations de force liées aux ruptures individuelles des ponts mais aussi des processus (déplacement vertical non négligeable, formation d'une zone de compaction ou plug sous la pointe) qui limitent actuellement les modèles d'interprétation du signal de force. Ce nouvel outil permettra de réaliser des expériences numériques pour dériver des relations entre les caractéristiques micro-structurelles de la neige (ou d'autres matériaux poreux) et les caractéristiques des profils de résistance à l'enfoncement.

Références

- Bishop RF, Hill R et Mott NF (1945) The theory of indentation and hardness tests. *Proceedings of the Physical Society*, **57**(3), 147–159, ISSN 0959-5309 (doi : 10.1088/0959-5309/57/3/301)
- Chandel C, Srivastava PK et Mahajan P (2014) Micromechanical analysis of deformation of snow using X-ray tomography. *Cold Regions Science and Technology*, **101**, 14–23, ISSN 0165232X (doi : 10.1016/j.coldregions.2014.01.005)
- Coeurjolly D et Montanvert A (2007) Descripteurs de forme et moments géométriques. In D Coeurjolly, A Montanvert et JM Chassery (eds.), *Géométrie discrète et images numériques*, Hermès
- Colbeck S (1982) An Overview of Seasonal Snow Metamorphism. *Reviews of Geophysics*, **20**(1), 45–61 (doi : 10.1029/RG020i001p00045)
- Fierz C, Durand R, Etchevers Y, Greene P, McClung DM, Nishimura K, Satyawali PK et Sokratov SA (2009) The international classification for seasonal snow on the ground. Technical report, IHP-VII Technical Documents in Hydrology N83, IACS Contribution N1, UNESCO-IHP, Paris
- Floyer JA et Jamieson J (2010) Rate-effect experiments on round-tipped penetrometer insertion into uniform snow. *Journal of Glaciology*, **56**(198), 664–672, ISSN 0022-1430 (doi : 10.3189/002214310793146322)
- Gubler H (1975) On the ramsonde hardness equation. In *Symposium at Grindelwald 1974 - Snow mechanics*, 110–121, IAHS Publication No. 114, Grindelwald
- Hagemuller P (2014) *Modélisation du comportement mécanique de la neige à partir d'images micro-tomographiques*. Ph.D. thesis, Université Grenoble Alpes (doi : 10.13140/2.1.2519.3764)

- Hagemuller P, Chambon G, Lesaffre B, Flin F et Naaim M (2013) Energy-based binary segmentation of snow microtomographic images. *Journal of Glaciology*, **59**(217), 859–873, ISSN 0022-1430 (doi : 10.3189/2013JoG13J035)
- Hagemuller P, Chambon G, Flin F, Morin S et Naaim M (2014) Snow as a granular material : assessment of a new grain segmentation algorithm. *Granular Matter*, **16**(4), 421–432, ISSN 1434-5021 (doi : 10.1007/s10035-014-0503-7)
- Hagemuller P, Chambon G et Naaim M (2015) Microstructure-based modeling of snow mechanics : a discrete element approach. *The Cryosphere*, **9**(5), 1969–1982, ISSN 1994-0424 (doi : 10.5194/tc-9-1969-2015)
- Lebaron AM et Miller DA (2014) An Energy-Based Microstructural Constitutive Model for Fracture in Snow. In *International Snow Science Workshop 2014 Proceedings, Banff, Canada*, 134–138
- Löwe H et van Herwijnen A (2012) A Poisson shot noise model for micro-penetration of snow. *Cold Regions Science and Technology*, **70**, 62–70, ISSN 0165232X (doi : 10.1016/j.coldregions.2011.09.001)
- Lunne T, Robertson PK et Powell JJM (2009) Cone-penetration testing in geotechnical practice. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **46**(6), 237–237, ISSN 0038-0741 (doi : 10.1007/s11204-010-9072-x)
- Marshall HP et Johnson JB (2009) Accurate inversion of high-resolution snow penetrometer signals for microstructural and micromechanical properties. *Journal of Geophysical Research*, **114**(F4), F04016, ISSN 0148-0227 (doi : 10.1029/2009JF001269)
- Mede T, Chambon G, Hagemuller P et Nicot F (2018a) A medial axis based method for irregular grain shape representation in DEM simulations. *Granular Matter*, **20**(1), 16, ISSN 1434-5021 (doi : 10.1007/s10035-017-0785-7)
- Mede T, Chambon G, Hagemuller P et Nicot F (2018b) Snow Failure Modes Under Mixed Loading. *Geophysical Research Letters*, **45**(24), 95–108, ISSN 0094-8276 (doi : 10.1029/2018GL080637)
- Mellor M (1975) A review of basic snow mechanics. *Symposium at Grindelwald 1974 - Snow mechanics*, **114**(442)
- Nakaya U (1954) *Snow crystals : natural and artificial*. Harvard University Press, 1954
- Peinke I, Hagemuller P, Andò E, Chambon G, Flin F et Roulle J (2020) Experimental Study of Cone Penetration in Snow Using X-Ray Tomography. *Frontiers in Earth Science*, **8**, 63, ISSN 2296-6463 (doi : 10.3389/feart.2020.00063)
- Proksch M, Löwe H et Schneebeli M (2015) Density, specific surface area and correlation length of snow measured by high-resolution penetrometry. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, **120**, 346–362 (doi : 10.1002/2014JF003266)
- Ruiz S, Capelli A, van Herwijnen A, Schneebeli M et Or D (2017) Continuum cavity expansion and discrete micromechanical models for inferring macroscopic snow mechanical properties from cone penetration data. *Geophysical Research Letters*, **44**(16), 8377–8386, ISSN 00948276 (doi : 10.1002/2017GL074063)

- Schneebeli M et Johnson JB (1998) A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy. *Annals of Glaciology*, **26**, 107–111, ISSN 0260-3055 (doi : 10.1017/S0260305500014658)
- Schulson EM et Duval P (2009) *Creep and Fracture of ice*. Cambridge University Press, ISBN 9780521806206
- Schweizer J, Jamieson J et Schneebeli M (2003) Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, **41**(4), 1016–1041 (doi : 10.1029/2002RG000123)
- Smilauer V, Angelidakis V, Catalano E, Caulk R, Chareyre B, Chèvremont W, Dorofeenko S, Duriez J, Dyck N, Elias J, Er B, Eulitz A, Gladky A, Guo N, Jakob C, Kneib F, Kozicki J, Marzougui D, Maurin R, Modenese C, Pekmezi G, Scholtès L, Sibille L, Stransky J, Sweijen T, Thoeni K et Yuan C (2021) *Yade documentation*. The Yade Project (doi : 10.5281/zenodo.5705394)
- van Herwijnen A (2013) Experimental analysis of snow micropenetrometer (SMP) cone penetration in homogeneous snow layers. *Canadian Geotechnical Journal*, **50**(10), 1044–1054, ISSN 0008-3674 (doi : 10.1139/cgj-2012-0336)