



HAL
open science

Essais de compression à vitesse imposée sur des échantillons de neige avec suivi tomographique

Antoine Bernard, Pascal Hagenmuller, Guillaume Chambon, Maurine Montagnat

► **To cite this version:**

Antoine Bernard, Pascal Hagenmuller, Guillaume Chambon, Maurine Montagnat. Essais de compression à vitesse imposée sur des échantillons de neige avec suivi tomographique. Congrès Français de Mécanique 2022 (CFM 2022), Aug 2022, Nantes, France. hal-04172113

HAL Id: hal-04172113

<https://hal.science/hal-04172113>

Submitted on 27 Jul 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.

Essais de compression à vitesse imposée sur des échantillons de neige avec suivi tomographique.

A. BERNARD^{ab}, P. HAGENMULLER^a, G. CHAMBON^c, M. MONTAGNAT^{ab}

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

b. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, G-INP, IGE, Grenoble, France

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

Correspondance : Antoine Bernard <antoine.bernard@univ-grenoble-alpes.fr>

Résumé :

La compréhension des mécanismes régissant la déformation du squelette de glace de la neige sous un chargement mécanique reste encore aujourd'hui comprise de manière imparfaite, bien que nécessaire pour de nombreuses applications comme la prévision d'avalanches, la modélisation du manteau neigeux ou la quantification des efforts induits par la neige pour le dimensionnement d'ouvrages. Une meilleure compréhension passe par des essais de caractérisation mécanique du matériau neige. Dans ce travail, nous avons réalisé des essais de compression oedométrique contrôlés en déplacement, et suivi l'évolution des échantillons par tomographie à rayons X. Dans un premier temps, à l'aide d'un dispositif de compression spécifiquement conçu, nous avons observé l'évolution de la contrainte au cours du temps pour différentes vitesses de chargement. Les courbes de contrainte-déformation montrent une dépendance marquée de la réponse mécanique au taux de déformation. Nous observons un comportement ductile à un taux de chargement inférieur à 10^{-4} s^{-1} , un comportement fragile pour un taux supérieur à 10^{-3} s^{-1} , et un comportement intermédiaire marqué par un phénomène de type "glissé-collé" (stick-slip) entre ces deux taux. Dans un second temps, nous nous sommes penchés sur l'évolution de la microstructure de la neige entre les images tomographiques acquises avant et après l'essai de compression.

Abstract :

The mechanisms controlling the snow mechanical behavior remains poorly understood, although it is required for many applications such as avalanche forecasting, snowpack modeling or estimating of snow loads on structures. To better understand snow mechanics, it is necessary to carry out mechanical characterization tests. In this work, we performed oedometric compression tests controlled in displacement and followed the evolution of the sample microstructure with X-ray tomography measurements. First, using a compression device specifically designed for this purpose, we observed the evolution of the stress and strain over time for different imposed strain rates. The stress-strain curves show a clear dependence of the mechanical response on the strain rate. We observe a ductile behavior at a loading rate lower than 10^{-4} s^{-1} , a brittle behavior for a rate higher than 10^{-3} s^{-1} , and an intermediate behavior marked by a phenomenon of stick-slip type between these two rates. Then, we investigated the evolution

of the snow microstructure between the tomographic images acquired before and after the compression test.

Mots clefs : mécanique, neige, tomographie, microstructure,

1 Introduction

La neige est constituée d'un squelette de glace, de pores remplis d'air, et parfois d'eau liquide et d'impuretés. Les flocons de neige qui tombent sur le sol et s'accumulent, forment le manteau neigeux. Du fait de sa grande porosité et de sa température proche de son point de fusion, la neige au sol évolue rapidement et passe par de nombreuses formes.

Le métamorphisme d'isothermie se caractérise par le déplacement de matière des zones convexes vers les zones concaves, menant à une structure globalement plus lisse et un accroissement des connexions entre les grains [5]. Cette évolution permanente de la microstructure de la neige altère ses résistances mécaniques. Les propriétés mécaniques et le régime de déformation de la neige dépendent fortement de la vitesse du chargement. En particulier, il a été observé que la résistance décroît fortement quand la vitesse de chargement augmente [13, 10]. Pour de faibles taux de chargement, le matériau peut atteindre des déformations importantes en régime ductile, avant de rompre. Pour de très faibles taux de chargement, le matériau présente un comportement visqueux sans atteindre la rupture [12]. Ces mécanismes sont impliqués dans le tassement de la neige saisonnière et du névé. À l'inverse, lorsque le taux de chargement est élevé, un comportement fragile est observé, y compris pour des déformations faibles. La propagation de fissure au sein d'une plaque de neige menant à sa rupture et au déclenchement d'une avalanche est due au comportement fragile du matériau. Des essais expérimentaux, en traction et en cisaillement montrent une transition ductile-fragile pour des taux de déformation aux alentours de 10^{-4} s^{-1} - 10^{-3} s^{-1} [9, 13]. La dépendance du comportement mécanique de la neige au taux de déformation est généralement comprise comme résultant d'une compétition entre 1) l'endommagement des liaisons entre les grains et des processus de fracture, 2) l'auto-réparation et la consolidation de ces liaisons grâce au frittage, et 3) le comportement visco-plastique du squelette de glace [14]. Les modélisations les plus simples relient la transition ductile-fragile et une échelle de temps caractéristique du frittage [8, 11]. Toutefois, la réalité est plus complexe et on observe du frittage, associé à de multiples temps caractéristiques [2, 15] et un comportement viscoplastique. Dans ce travail, nous étudions la transition entre le comportement fragile et le comportement ductile de la neige en effectuant des essais de compression contrôlés en vitesse de déplacement et suivis à l'aide de la tomographie à rayons X. Nous avons spécifiquement conçu un appareil de chargement pour effectuer ces tests de compression dans l'espace réduit d'une cabine de tomographe, lui-même placé en chambre froide.

2 Méthodes

2.1 Essais de compression à vitesse imposée

Le but de notre étude est de mieux comprendre le lien entre le taux de déformation et la réponse mécanique de la neige, en particulier, le passage du régime ductile pour de faibles taux de déformation au régime fragile pour des taux plus élevés. Nous souhaitons caractériser l'évolution du squelette de glace à

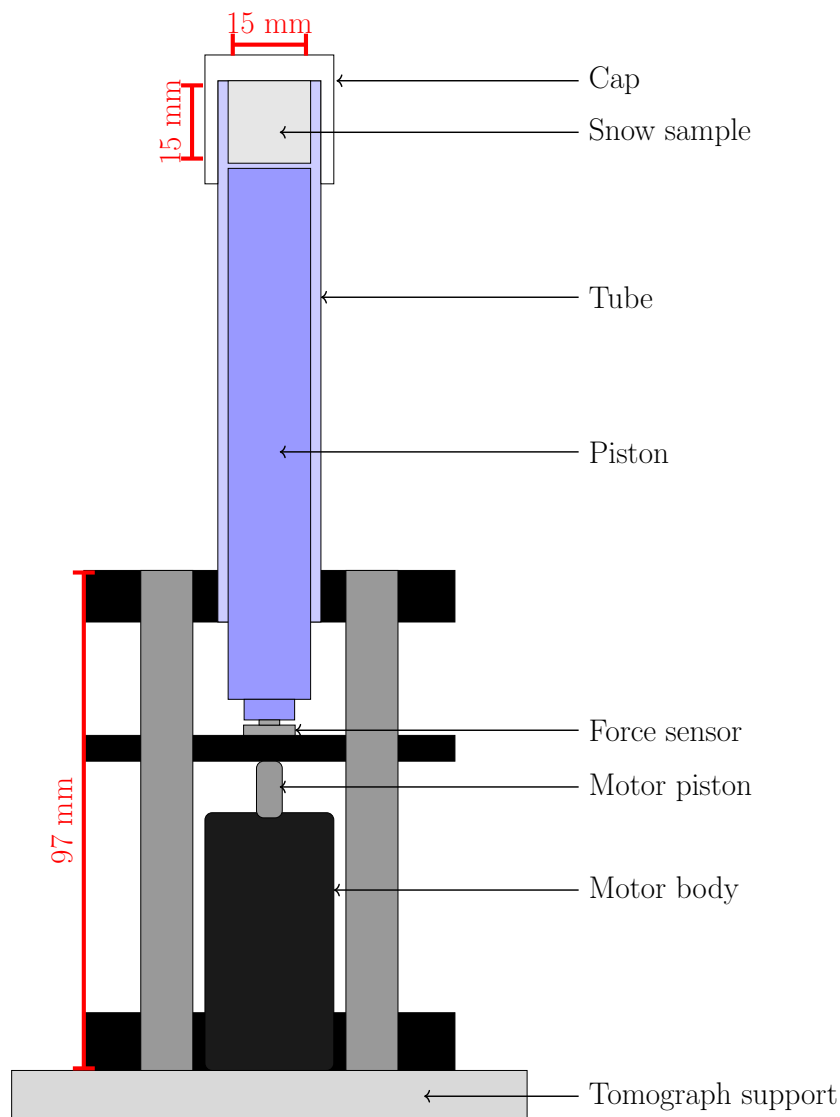


FIGURE 1 – Schéma du dispositif de compression.

l'aide d'indicateur microstructuraux pertinents. Nous recourrons à la tomographie pour capturer l'évolution de la microstructure au cours de l'essai mécanique. Pour répondre à cet objectif, nous réalisons des essais oedométriques, en variant le taux de déformation entre 10^{-6} s^{-1} et 10^{-2} s^{-1} et observons l'évolution de la microstructure.

L'appareil de chargement spécifiquement conçu pour la campagne expérimentale est illustré Figure 1. Les porte-échantillons sont conçus pour permettre une fabrication et un changement d'échantillon simple. Le tube est fileté en partie haute afin de pouvoir y visser le bouchon qui permet de 1) prévenir la sublimation pendant le stockage de l'échantillon, 2) mettre en compression l'échantillon de neige lors de l'essai.

L'application du chargement se fait par le bas, à l'aide du piston faisant contact entre le capteur de force et l'échantillon de neige. La force est appliquée à l'aide d'un moteur à déplacement linéaire (vitesse de 0 à 0.2 mm/s, charge max. 50 N) et est mesurée par un capteur de force miniature (max. 50 N, précision 0.1 N). Le contrôle du moteur et l'enregistrement des signaux se font via un programme basé sur le logiciel Labview. Le moteur communique sa position en temps réel, laquelle est vérifiée à posteriori

à l'aide des images tomographiques. L'air dans l'échantillon est libre de s'échapper et aucune force résistante due à l'air n'a été observée. Nous avons également vérifié pour chaque porte-échantillon que le frottement entre le tube et le piston est négligeable, pour toutes les vitesses dans la gamme de notre moteur (Figure 1). Le capteur de force a été calibré et la linéarité sur l'ensemble de la plage vérifiée à l'aide de masses étalons.

Des échantillons cylindriques (14 mm de diamètre, 14 mm de hauteur) ont été préparés à partir du même bloc de neige naturelle (composé de *Particules reconnaissables* ou *Decomposing and Fragmented precipitation particles* (DF) d'après la classification [3]). Le bloc a été tamisé directement dans les porte-échantillons avec une taille de maille de 1.6 mm. Un bouchon a ensuite été vissé en partie supérieure afin de fermer le porte-échantillon et prévenir la sublimation de la glace. Les échantillons sont entreposés pendant 72h à -20°C pour que les connexions entre les grains se reforment par frittage et finalement stockés à -50°C pour empêcher la microstructure de continuer son évolution. La densité initiale des échantillons est de 220 kg m^{-3} et la surface spécifique est de $28 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ immédiatement avant le lancement de l'essai. La surface spécifique (SSA) est le rapport entre l'aire de contact entre l'air et la glace $S_{\text{glace} \rightarrow \text{air}}$, et la masse de la neige. Trois séries de préparation ont été réalisées, les caractéristiques initiales des échantillons sont similaires lors de chacune des préparations ce qui indique une bonne reproductibilité du protocole. Au total, une trentaine d'échantillons ont été préparés et testés. Un sous-ensemble des échantillons ainsi que leurs propriétés sont présentés dans le Tableau 1.

Identifiant	V1-2	V3-5	V3-6	V5-1	V5-2	V5-3	V6-3	V6-4	V7-5	V7-6	V7-7
ε	0.52	0.45	0.45	0.44	0.45	0.43	0.41	0.45	0.45	0.54	0.52
$\dot{\varepsilon} (\text{s}^{-1})$	1.8e-6	3.1e-5	3.1e-5	2.2e-4	2.0e-4	2.2e-4	6.6e-4	6.0e-4	7.7e-3	7.8e-3	7.5e-3
Masse volumique (kg m^{-3})											
initiale	211.1	230.9	222.7	211.9	222.3	227.7	212.2	209.2	217.1	184.5	209.7
finale	461.8	426.4	422.6	389.8	405.5	400.9	370.7	385.0	414.7	445.1	426.3
SSA ($\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$)											
initiale	28.5	27.9	28.1	28.3	28.5	27.7	28.2	28.0	28.5	28.1	28.0
finale	23.8	26.2	26.2	26.9	26.7	26.4	27.3	26.7	28.3	27.4	27.5

TABLE 1 – Caractéristiques des essais mesurés au cours du chargement et paramètres microstructuraux calculés à partir des volumes 3D obtenus par tomographie. Les caractéristiques sont la déformation finale ε , la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$, les masses volumiques initiales et finales ainsi que les surfaces spécifiques initiales et finales.

Les échantillons ont été placés dans le dispositif de compression 30 min avant la première acquisition des microstructures par tomographie. Les échantillons ont ainsi le temps d'arriver à la température ambiante de la cabine de tomographie de $-18.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Une première mise en charge jusqu'à 2 kPa permet de s'assurer de la mise en contact de l'échantillon avec les autres éléments, le piston en partie basse et le bouchon en partie haute. Nous avons fait varier les taux de déformation de 10^{-6} s^{-1} à 10^{-2} s^{-1} jusqu'à une contrainte maximale de 290 kPa. La durée des essais varie de 3 jours pour les vitesses les plus lentes à 30 s pour les vitesses les plus rapides. Une fois l'essai terminé, la position finale est maintenue le temps de la relaxation, et les scans des microstructures finales sont réalisés.

2.2 Acquisitions tomographiques

Des scans à haute résolution ($8.5 \mu\text{m}$) caractérisent les échantillons sur toute leur largeur (14 mm) et durent 1h chacun. Ils sont effectués à l'aide d'un tomographe à rayons-X DeskTom130 (RX Solutions)

situé dans une chambre froide contrôlée en température. Pour l'ensemble des échantillons, les microstructures 3D initiales et finales ont été scannées. Des scans intermédiaires ont été effectués en cours d'essai lorsque la durée de l'essai le permettait, c'est-à-dire pour les taux de déformation $\dot{\epsilon} < 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Une déformation trop importante au cours d'un scan tomographique va conduire à du flou et à la présence d'artefacts lors de la reconstruction des projections en un volume 3D. Il est donc nécessaire que la déformation de l'échantillon soit négligeable pendant toute la durée du scan. Au cours des essais aux faibles taux de déformation ($\dot{\epsilon} < 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), la microstructure 3D a donc pu être scannée régulièrement pour produire une série temporelle. Aux taux de déformation élevés ($\dot{\epsilon} > 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), des radiographies simples ont été acquises pendant le chargement à une fréquence de 5 images par seconde, avec une résolution de $12 \mu\text{m}$ permettant d'avoir la totalité de l'échantillon dans le champ de vue.

2.3 Analyse de données

2.3.1 Traitement d'images

Les volumes 3D reconstruits en niveau de gris représentent l'absorption des différents matériaux (air, glace, porte-échantillon). Avant de calculer des propriétés microstructurelles, les volumes 3D de neige sont segmentés en une description binaire air-glace. L'utilisation de la technique de segmentation par minimisation d'une énergie (energy-based segmentation) permet de distinguer l'air et la glace à l'aide d'un seul paramètre, le lissage r [4].

Les radiographies permettent d'observer la localisation des déformations au sein de l'échantillon avec une haute résolution temporelle. Le déplacement mesuré à l'aide du moteur peut-être vérifié en suivant la position du piston au cours de l'essai.

Les propriétés microstructurelles (masse volumique et SSA) ont été calculées sur des sous-volumes cubiques de 800^3 voxels, i.e. 6.8 mm de côté extraient des scans tomographiques 3D.

2.3.2 Création des diagrammes spatiotemporels

Pour les taux de déformation élevés, nous avons acquis en continu des projections tomographiques à raison de 5 images par seconde. Nous disposons d'une série temporelle d'images (2 dimensions de l'espace + le temps) que nous souhaitons visualiser en 2D (1 dimension de l'espace + le temps) pour observer l'évolution de l'échantillon au cours de l'essai.

Le processus de traitement est illustré à la Figure 2. Au centre de l'image (projections 1800×1800 pixels), nous extrayons dans la hauteur de l'image une colonne de largeur 100 pixels dont nous faisons la moyenne des niveaux de gris pour toutes les projections : nous obtenons une série temporelle avec en abscisse le temps et en ordonnée la hauteur dans l'échantillon. La couleur d'un pixel représente l'absorption aux rayons X (i.e. un proxy de la densité) en un point de l'espace et du temps au sein de notre échantillon. Ainsi, des zones plus sombres représentent des zones moins denses et les zones plus claires des zones plus denses. Pour mettre en lumière les variations d'intensité (et donc de masse volumique) au cours du temps nous faisons la différence entre deux pas de temps successifs t et $t + 1$.

Sur l'image finale, l'absence de mouvement s'observe dans les zones grises et homogènes : entre deux instant successifs l'absorption ne varie pas. Les stries noires et blanches parallèles au piston illustrent une déformation homogène sur une hauteur donnée. Après le démarrage de l'essai, un front de compaction

est observable quand, à un même pas de temps t , il y a une partie immobile (zone grise) et une partie en mouvement (stries blanches et noires). Il est à noter la difficulté de suivre avec précision ce front de compaction : la transition entre la partie immobile et la partie en mouvement est floue. Cela peut s'expliquer 1) par le fait que le front soit d'une certaine épaisseur et/ou 2) par la faible résolution spatiale et temporelle de nos projections tomographiques.

2.3.3 Calcul des propriétés de la microstructure

Pour décrire la microstructure de la neige, nous utilisons les indicateurs classiques (masse volumique ρ , surface spécifique SSA).

La masse volumique de la neige ρ est évaluée en comptant le nombre de voxels de glace dont la masse volumique est $\rho_{ice} = 917 \text{ kg m}^{-3}$.

La surface spécifique SSA est le rapport entre l'aire de contact entre l'air et la glace $S_{glace \rightarrow air}$, et la masse de la neige. L'aire $S_{glace \rightarrow air}$ est estimée par la méthode de Crofton en considérant les 26 voisins à l'ordre 1, tel que présenté dans [3].

2.3.4 Analyse de la réponse mécanique

La caractérisation de l'essai mécanique en déformation se fait à l'aide des courbes de contrainte-déformation, pendant les phases de chargement (augmentation du déplacement, et de la contrainte associée) et de relaxation (diminution de la contrainte, la déformation étant fixée).

La contrainte σ est obtenue en faisant le rapport de la force mesurée à l'aide du capteur de force et de la surface de contact apparente de l'échantillon. La position du piston permet de suivre le déplacement de ce dernier, et de remonter au taux de déformation ε . Ces deux quantités sont enregistrées à une fréquence de 50 Hz et permettent de tracer les courbes de contrainte-déformation, pendant la totalité de l'essai mécanique. Le déplacement communiqué par le moteur est, de plus, vérifié à l'aide des projections tomographiques.

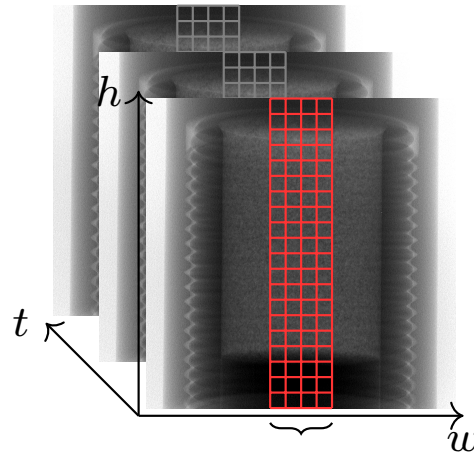
3 Résultats

3.1 Courbes contraintes-déformations

Les courbes contraintes-déformations (Figure 3) indiquent une dépendance marquée de la réponse mécanique de la neige à la vitesse de déformation. À des taux de déformation supérieurs à environ 10^{-3} s^{-1} , la courbe contrainte-déformation présente un comportement dentelé, avec des chutes brutales de la contrainte. Ces chutes brutales de la contrainte vers une valeur quasi nulle supposent une rupture de la continuité du matériau et signifient un comportement fragile. À des taux de déformation inférieurs à 10^{-4} s^{-1} , l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation est lisse et croît en s'accéléralant, signe d'un comportement ductile : aucun changement abrupt n'est visible sur les microstructures. Entre les deux taux de déformation ($10^{-4} \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon} < 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, courbes cyans et rouges), la courbe de contrainte-déformation présente des chutes de contraintes partielles, la contrainte chute mais ne retombe pas à zéro, ce qui peut signifier des ruptures locales dans le matériau.

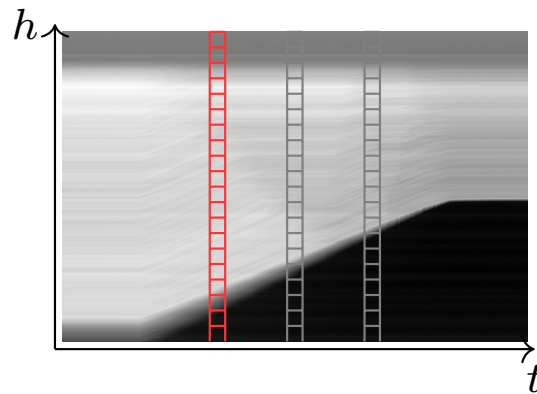
a) Projections

$$P_{h,w,t}$$



b) Average

$$I_{h,t} = \overline{P_{h,w,t}}$$



c) Time difference

$$D_{h,t} = I_{h,t+1} - I_{h,t}$$

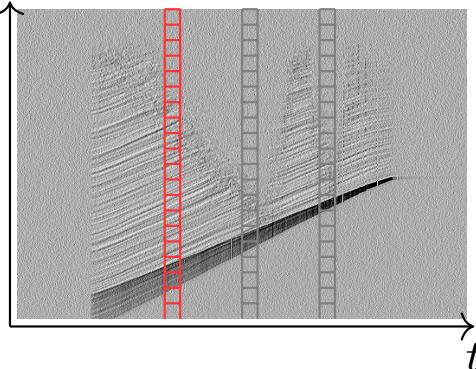


FIGURE 2 – Méthodes de traitement des projections pour obtenir les séries temporelles. a) Initialement, on dispose d'une série de projections (images 2D) prises consécutivement. b) Pour simplifier la visualisation, on résume l'information dans la largeur de l'image w en la moyennant sur toute la largeur w , puis on met côte à côte l'ensemble des colonnes obtenues pour obtenir une série temporelle. La colonne rouge de plusieurs pixel de côté dans la première figure est aminci et ne fait plus qu'un pixel de longueur dans la seconde suite au moyennage. c) Finalement, pour mettre en exergue les variations d'intensité dans l'image, on fait la différence entre deux pas de temps consécutif.

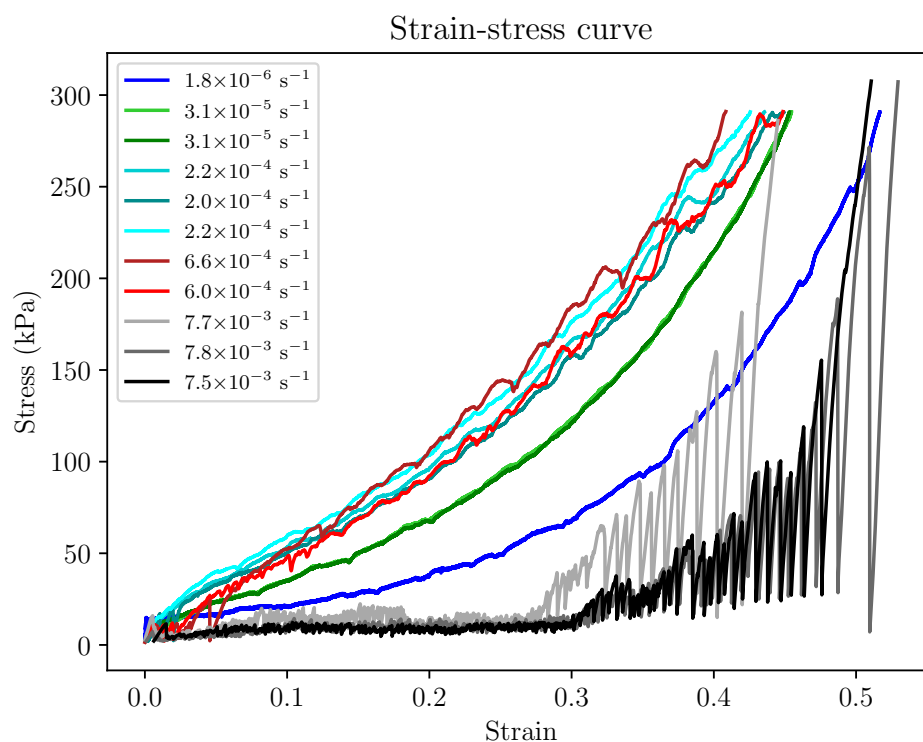


FIGURE 3 – Courbes contrainte-déformation des essais à différent taux de déformation. Les caractéristiques exactes des essais sont décrites dans le Tableau 1.

3.2 Bandes de compaction

La Figure 4 représente le traitement des radiographies acquises lors des essais les plus rapides afin de mettre en évidence la présence de bandes de compaction et leur évolution au cours des essais. Deux essais sont représentés, a) l'un à une vitesse de $6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et b) l'autre à une vitesse $7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Avant le début des essais (ligne rouge) et après l'arrêt du moteur (ligne bleue), il n'y a pas de mouvement du piston ni de l'échantillon : cela s'observe par des zones grises et homogènes : la masse volumique est similaire entre deux pas de temps successifs. De même, on constate qu'en partie haute de l'échantillon (h grand) il n'y a pas de variation d'intensité, c'est attendu puisque c'est le bouchon, qui est vissé dans cette zone de l'image. Et en partie basse (h petit), seul est visible la frontière entre l'échantillon de neige et le piston (en rose) de masse volumique différente. Dans les essais rapides (Figure 4.b), on observe des discontinuités sur les images, (flèches vertes) et qui correspondent au front de compaction. On observe une localisation de la densification pour les vitesses les plus rapides (Figure 4b) visibles via la discontinuité temporelle des niveaux de gris. Cette discontinuité est le front de compaction. D'un côté du front, la neige s'est suffisamment tassée (zone gris homogène) et résiste à la compaction, tandis que de l'autre côté du front l'échantillon continue de se déformer (stries blanches et noires). Le front de compaction s'initie dans la partie supérieure de l'échantillon et se propage jusqu'en bas. Une fois le bas atteint, ce front de compaction se reflète et se propage de bas en haut. Lors de la troisième compaction, le front ne semble pas atteindre le fond de l'échantillon, mais repart en sens inverse. Dans la série temporelle de l'essai à faible taux de déformations (Figure 4a), on observe une déformation homogène tout au long de l'essai dans la hauteur de l'échantillon, grâce aux stries noires et blanches parallèles au piston.

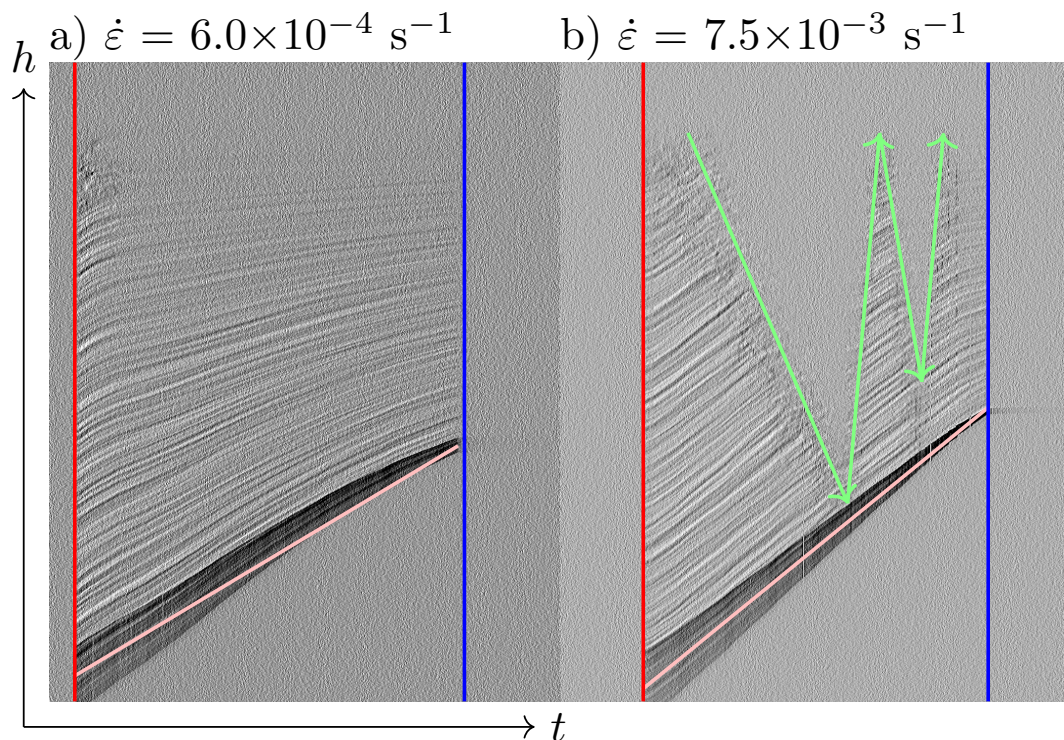


FIGURE 4 – Séries temporelles fabriquées à partir des projections tomographiques. Les lignes 1) rouges marquent le début de l'essai, 2) bleues la fin de l'essai, 3) roses la position du piston au cours du temps, 4) vertes la propagation du front de compaction.

3.3 Évolution micro-structurale

Masse volumique

L'ensemble des essais montre une augmentation de la masse volumique en fonction de la déformation (Figure 5). Dans le cas d'une déformation finale homogène, par principe de conservation de la masse et avec l'hypothèse des petites déformations, on relie la déformation ε et la masse volumique ρ par la formule $\rho = \rho_0 \times \frac{1}{1-\varepsilon}$ avec ρ_0 la masse volumique avant l'essai, quand la déformation est nulle $\varepsilon = 0$. Les résultats concordent avec une telle loi, ce qui confirme la représentativité des sous-volumes sélectionnés, en dépit des paramètres d'essais différents.

Surface spécifique

La surface spécifique a diminué au cours de tous les essais (Figure 6). Pour l'essai lent $1.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, la SSA a diminué de 17% au cours des 80 h de l'essai. Pour les essais plus rapides effectués à environ $3.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $6.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et $7.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, la surface spécifique diminue en moyenne respectivement de 7%, 4% et 1.5% entre l'état initial et final. Par comparaison, dans l'essai lent à $1.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, les diminutions de 7%, 4% et 1.5% sont atteintes au bout de respectivement 54 h, 38 h et 16 h pour des déformations finales similaires. La plus forte baisse de la surface spécifique a lieu sur les essais les plus longs. On observe que l'essai le plus lent présente une décroissance de la surface spécifique qui s'accélère au cours du temps.

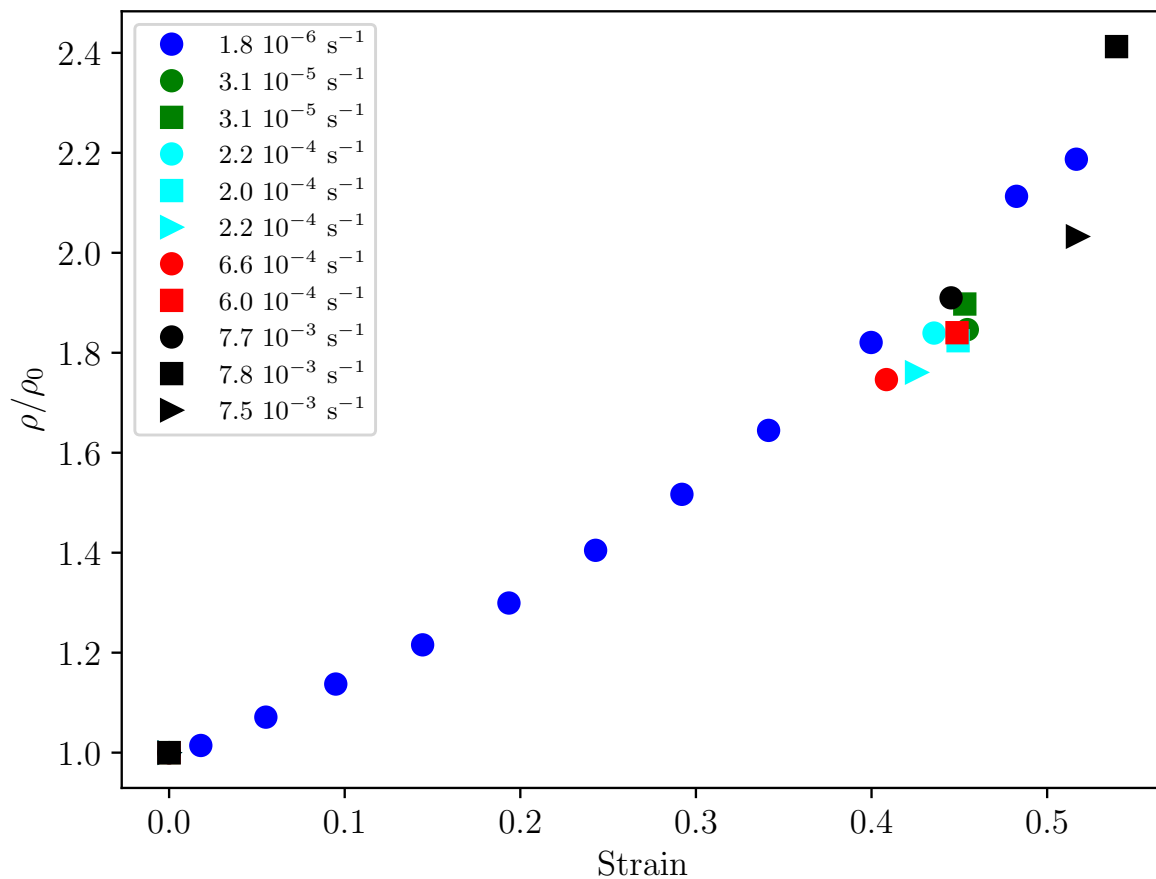


FIGURE 5 – Évolution de la masse volumique par rapport à la déformation.

4 Discussion

Les chutes de contraintes ayant lieu à haut taux de déformation ($\dot{\epsilon} > 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) sur les courbes de contrainte-déformation (Figure 3) indiquent une perte de continuité dans le squelette de glace suite à la rupture. Ces fractures ont probablement lieu au niveau des ponts reliant les grains de neige et surgissant pour de faibles déformations, révèlent le comportement fragile du squelette de glace. Le type de réponse n'est pas distinguable sur les indicateurs microstructuraux usuels tel que la masse volumique ou la surface spécifique. Ainsi pour quantifier le comportement fragile à haut taux de déformation, il est nécessaire de s'intéresser à un indicateur de la connectivité entre les grains de neige, comme la caractéristique d'Euler χ , le nombre de coordination des grains ou la distribution de tailles des ponts entre les grains. A des taux de déformation élevés ($\dot{\epsilon} > 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), nous observons la formation de bandes de compaction caractérisées par une densification localisée. D'un côté et de l'autre du front de compaction, les masses volumiques sont différentes. Les zones qui se sont compactées, sont maintenant plus résistantes mécaniquement, la déformation va donc prendre place dans les zones les moins denses de l'échantillon. Nous confirmons les résultats de [1] qui ont mis en évidence des bandes de compaction à l'aide de la corrélation d'images, d'images 2D obtenues par photographie

Nous observons que la surface spécifique (Figure 6) décroît de manière continue au cours de l'essai, mais que la dynamique n'est pas similaire à la décroissance due au seul métamorphisme d'isothermie. Quand seul le métamorphisme d'isothermie entre en jeu, la surface spécifique décroît exponentiellement

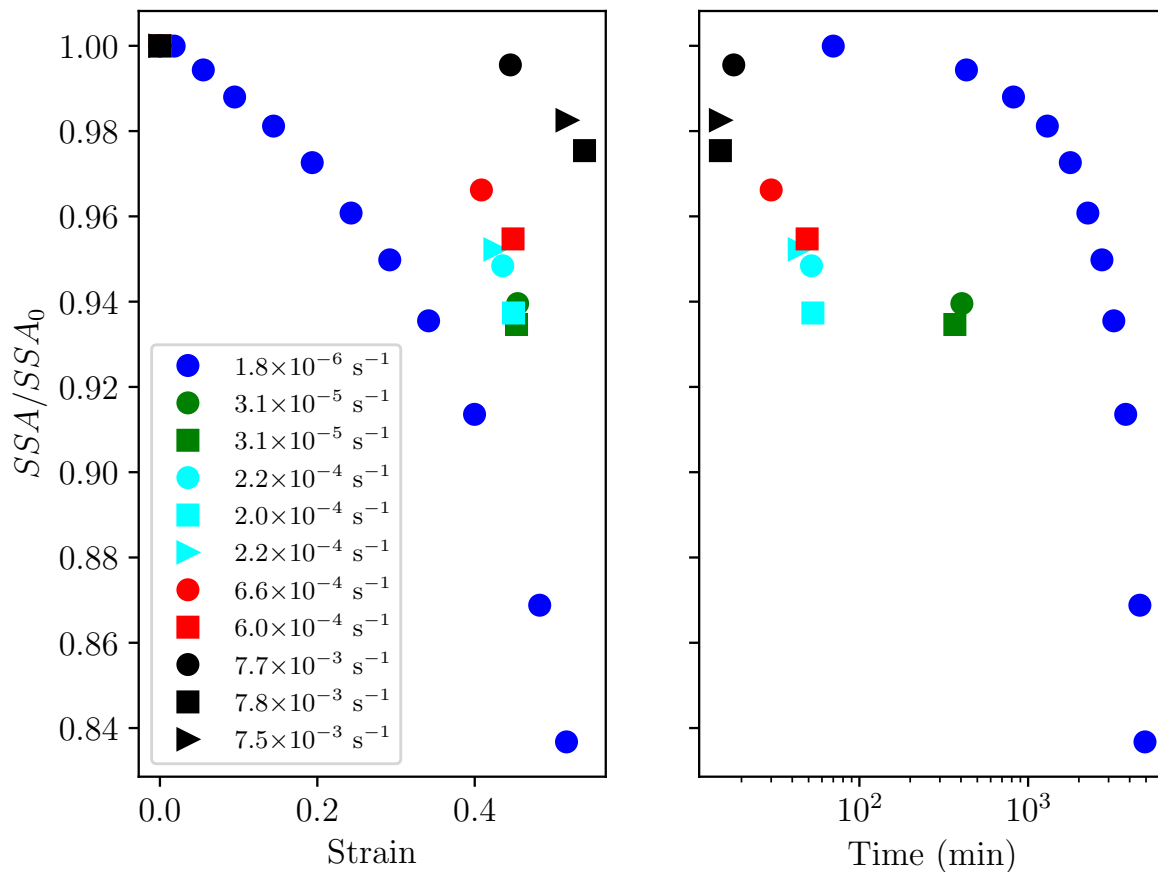


FIGURE 6 – Évolution de la surface spécifique par rapport à la déformation à gauche et par rapport au temps sur une échelle logarithmique à droite.

et sa décroissance ralentit avec le temps selon la théorie de [7, 6]. À l'instar de [16] nous observons une décroissance plus rapide de la surface spécifique sous l'effet du chargement mécanique. En revanche la cinétique d'évolution avec le chargement mécanique diffère de la cinétique d'évolution sous l'effet du métamorphisme d'isothermie seul, dont la décroissance ralentit au cours du temps. La diminution de surface spécifique due au métamorphisme d'isothermie est plus grande quand l'essai dure longtemps, elle sera donc d'autant plus grande sur les essais à faible taux de déformation. Une hypothèse pour expliquer la diminution de SSA plus forte dans les essais rapides, est que la modification de la microstructure génère des conditions propices au déplacement de matière. Durant la compression, le nombre de coordination des grains de neige augmente, et pour chaque nouveau contact des nouvelles convexités apparaissent. Ainsi, la déformation du squelette de glace générerait des conditions qui amplifient le phénomène de métamorphisme d'isothermie.

Références

- [1] T. W. Barraclough, J. R. Blackford, S. Liebenstein, S. Sandfeld, T. J. Stratford, G. Weinländer, and M. Zaiser. Propagating compaction bands in confined compression of snow. *Nature Physics*, 13(3) :272–275, nov 2016.
- [2] J. R. Blackford. Sintering and microstructure of ice : a review. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 40(21) :R355–R385, Oct. 2007.
- [3] P. Hagenmuller, N. Calonne, G. Chambon, F. Flin, C. Geindreau, and M. Naaim. Characterization of the snow microstructural bonding system through the minimum cut density. *Cold Regions Science and Technology*, 108 :72–79, Dec. 2014.
- [4] P. Hagenmuller, G. Chambon, B. Lesaffre, F. Flin, and M. Naaim. Energy-based binary segmentation of snow microtomographic images. *Journal of Glaciology*, 59(217) :859–873, 2013.
- [5] T. U. Kaempfer and M. Schneebeli. Observation of isothermal metamorphism of new snow and interpretation as a sintering process. *Journal of Geophysical Research*, 112(D24), Dec. 2007.
- [6] L. Legagneux and F. Dominé. A mean field model of the decrease of the specific surface area of dry snow during isothermal metamorphism. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 110(F4) :n/a–n/a, nov 2005.
- [7] L. Legagneux, T. Lauzier, F. Domin, W. F. Kuhs, T. Heinrichs, and K. Techmer. Rate of decay of specific surface area of snow during isothermal experiments and morphological changes studied by scanning electron microscopy. *Canadian Journal of Physics*, 81(1-2) :459–468, jan 2003.
- [8] F. Louchet. Creep instability of the weak layer and natural slab avalanche triggerings. *Cold Regions Science and Technology*, 33(2-3) :141–146, dec 2001.
- [9] H. Narita. An experimental study on tensile fracture of snow. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, A32 :1–37, Mar. 1984.
- [10] I. Reiweger and J. Schweizer. Weak layer fracture : facets and depth hoar. *The Cryosphere*, 7(5) :1447–1453, sep 2013.
- [11] I. Reiweger, J. Schweizer, J. Dual, and H. J. Herrmann. Modelling snow failure with a fibre bundle model. *Journal of Glaciology*, 55(194) :997–1002, 2009.
- [12] C. Scapozza and P. A. Bartelt. The influence of temperature on the small-strain viscous deformation mechanics of snow : a comparison with polycrystalline ice. *Annals of Glaciology*, 37 :90–96, 2003.
- [13] J. Schweizer. Laboratory experiments on shear failure of snow. *Annals of Glaciology*, 26 :97–102, 1998.
- [14] J. Schweizer. Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4), 2003.
- [15] D. Szabo and M. Schneebeli. Subsecond sintering of ice. *Applied Physics Letters*, 90(15) :151916, Apr. 2007.
- [16] X. Wang and I. Baker. Observation of the microstructural evolution of snow under uniaxial compression using x-ray computed microtomography. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118(22) :12,371–12,382, Nov. 2013.