



HAL
open science

Etude multiéchelle de la transition ductile-fragile dans la neige

Antoine Bernard

► **To cite this version:**

Antoine Bernard. Etude multiéchelle de la transition ductile-fragile dans la neige. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. Français. NNT : 2023GRALI027 . tel-04145610

HAL Id: tel-04145610

<https://theses.hal.science/tel-04145610>

Submitted on 29 Jun 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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production

Spécialité : 2MGE : Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie

Unités de recherche : Institut des Géosciences de l'Environnement et Centre d'Étude de la Neige, CNRM

Etude multiéchelle de la transition ductile-fragile dans la neige

Multiscale investigation of ductile-to-brittle transition in snow

Présentée par :

Antoine BERNARD

Direction de thèse :

Maurine MONTAGNAT-RENTIER

Directrice de recherche CNRS, IGE, Université Grenoble Alpes

Directrice de thèse

Pascal HAGENMULLER

Ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts, Météo-France, CNRS

Co-encadrant de thèse

Guillaume CHAMBON

Directeur de recherche INRAE, IGE, Université Grenoble Alpes

Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Nathalie LIMODIN

Directrice de recherche CNRS, LaMcube, Université de Lille, Centrale Lille

Henning LÖWE

Chercheur senior, WSL Institute for Snow and Avalanche Research, SLF

Thèse soutenue publiquement le **28 mars 2023**, devant le jury composé de :

Maurine MONTAGNAT-RENTIER

Directrice de recherche CNRS, IGE, Université Grenoble Alpes

Directrice de thèse

Nathalie LIMODIN

Directrice de recherche CNRS, LaMcube, Université de Lille, Centrale Lille

Rapporteuse

Henning LÖWE

Chercheur senior, WSL Institute for Snow and Avalanche Research, SLF

Rapporteur

Christian GEINDREAU

Professeur des universités, 3SR, Université Grenoble Alpes,

Président du jury

Renaud TOUSSAINT

Directeur de recherche CNRS, Institut Terre et Environnement de Strasbourg,
Université de Strasbourg

Examineur

Invités :

Pascal HAGENMULLER

Ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts, CEN, CNRM, Météo-France, CNRS

Guillaume CHAMBON

Directeur de recherche INRAE, IGE, Université Grenoble Alpes



Abstract

Understanding snow mechanics is crucial for avalanche prediction, interaction with structures, or modelling the snowpack evolution.

Formed in clouds, snowflakes accumulate on the ground to form the snowpack. Snow is a porous material, composed of a skeleton of ice and air. The three-dimensional arrangement of these two phases, or microstructure, varies rapidly under natural conditions, due to metamorphism and the weight of the upper layers. The mechanical response of the snow is strongly influenced by the loading conditions (temperature, loading mode, stress or strain rate) and the microstructure. The mechanical strength of snow shows a strain rate-dependent hardening in the ductile regime and a softening in the brittle regime. The ductile-to-brittle transition, is observed between strain rates of 10^{-4} s^{-1} to 10^{-3} s^{-1} . This transition is controlled by the elasto-visco-plastic properties of ice and the competition between bond failures and bond healing. The relative importance of these mechanisms as a function of the loading conditions and the microstructure has yet to be determined. Observation at the microstructure scale and during testing is difficult.

In this work, we designed a specific experimental setup to conduct confined compression tests of snow samples under X-ray micro-tomography. In a first part, we conducted creep tests on snow samples with controlled microstructure. In a second part, we carried compression tests at controlled strain rate, in the range 10^{-6} – 10^{-2} s^{-1} . We used tomography to image the microstructure of the snow. For all tests, the initial and final states were acquired. For the lowest strain rates, scans were also taken during the test. For the others, we acquired series of radiographies at high-frequency. We applied image processing to measure the density, the specific surface, but also in a more original way, the size and the number of bonds. We quantified with precision the evolution of these characteristics under several stress conditions.

This study showed that, during snow compaction under low stress, the microstructure was mainly impacted by the mechanical stress in the form of an increase in density and number of bonds when the initial density is relatively low. Under these conditions, metamorphism remains the main driver for the evolution of bond size and specific surface area. Under controlled strain rates, the increase in mechanical strength can be attributed to a positive feedback between the increase in the number of bonds, induced by mechanics, and the increase in their size, due to metamorphism. The relative effects depend on the rate of loading. The ductile-to-brittle transition is estimated here to be around $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ for a density close to 300 kg m^{-3} . Our

observations in brittle behaviour highlight the impact of local fractures on the mechanical response with the propagation of compaction bands.

This study, which has the originality of systematically associating high-definition microstructural observations with the analysis of the mechanical response, should allow better consideration of small-scale mechanisms in the representation and modelling of the macroscopic response of the snowpack.

Résumé

Comprendre le comportement mécanique du matériau neige est crucial pour la prédiction des avalanches, l'interaction avec des structures, ou la modélisation de l'évolution du manteau neigeux.

Formés dans les nuages, les flocons de neige s'accumulent au sol pour former le manteau neigeux. La neige est un matériau poreux, composé d'un squelette de glace et d'air. L'arrangement tridimensionnel de ces deux phases, ou microstructure, varie rapidement dans les conditions naturelles, sous l'effet du métamorphisme et du poids des couches supérieures. La réponse mécanique de la neige est fortement influencée par les conditions de sollicitation (température, mode de chargement, contrainte ou vitesse de déformation) et la microstructure. Il a été observé que la résistance mécanique de la neige présente un durcissement en fonction de la vitesse de déformation dans le régime ductile et un adoucissement dans le régime fragile. La transition ductile-fragile, observée pour des gammes de vitesses de 10^{-4} s^{-1} à 10^{-3} s^{-1} correspond à la transition entre ces deux comportements. Cette transition est contrôlée par les propriétés élasto-visco-plastiques de la glace et la compétition entre des mécanismes de rupture de ponts et des mécanismes de cicatrisation associés au frittage. Leur importance relative en fonction des conditions de sollicitation et de la microstructure restent encore à préciser. L'observation à l'échelle de la microstructure et en cours d'essai est délicate.

Dans ce travail de thèse, nous avons conçu un dispositif expérimental spécifique pour mener des essais de compression confinée d'échantillons de neige sous microtomographie aux rayons X. Dans un premier temps, nous avons conduit des essais de fluage sur des échantillons de neige à microstructure contrôlée. Dans une deuxième partie, nous avons réalisé une campagne d'essais de compression à vitesse contrôlée pour des gammes de vitesse allant de 10^{-6} s^{-1} à 10^{-2} s^{-1} . Nous avons utilisé la tomographie pour imager la microstructure de la neige. Pour tous les essais, les états initiaux et finaux ont été acquis. Pour les plus faibles vitesses de déformation, des scans ont aussi été réalisés en cours d'essai. Pour les autres, nous avons procédé à une acquisition de radiographies simples à haute fréquence. Sur les images, nous avons appliqué des algorithmes de traitement pour mesurer la densité, la surface spécifique, mais aussi de façon plus originale, la taille et le nombre de ponts. Nous avons quantifié avec précision l'évolution de ces caractéristiques sous plusieurs conditions de sollicitation.

Cette étude a permis de mettre en évidence que, lors de la compaction de la neige sous

faible contrainte, la microstructure était essentiellement impactée par la sollicitation mécanique sous la forme d'une augmentation de la masse volumique et du nombre de ponts lorsque la densité initiale est relativement faible. Dans ces conditions, le métamorphisme reste le moteur principal de l'évolution de la taille des ponts et de la surface spécifique. Sous vitesse de déformation contrôlée, l'augmentation de la résistance mécanique peut être attribuée à une rétroaction positive entre l'augmentation du nombre de ponts, induite par « la mécanique », et l'augmentation de leur taille, due au métamorphisme. Les effets relatifs dépendent de la vitesse de sollicitation. La transition ductile-fragile est estimée ici autour de $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ pour une masse volumique proche de 300 kg m^{-3} . Nos observations en comportement fragile mettent en évidence l'impact des ruptures locales sur la réponse mécanique avec la propagation de bandes de compaction.

Cette étude, qui présente l'originalité d'associer systématiquement des observations microstructurales de haute définition à l'analyse de la réponse mécanique devrait permettre une meilleure prise en compte des mécanismes à petite échelle dans la représentation et la modélisation de la réponse macroscopique du manteau neigeux.

Plain language summary

Snow is a material, composed mainly of air and some ice. The mechanical response of snow is governed by the shape of the ice skeleton, the properties of the ice and the loading conditions. At low loading speeds, snow deforms viscously without breaking, while at high speeds it displays brittle behaviour. The aim of this thesis is to improve the understanding of the small-scale mechanisms in these two deformation regimes, and in particular at the transition. To this end, we built a compression device and used imaging techniques to observe the evolution of the ice skeleton during the tests. Our results provide new insights into the complexity of ice skeleton evolution under the combined effect of metamorphism and mechanical stress.

Résumé grand public

La neige est un matériau, composé surtout d'air et d'un peu de glace. La réponse mécanique de la neige est gouvernée par la forme du squelette de glace, les propriétés de la glace et les conditions de sollicitation. À faible vitesse de sollicitation, la neige se déforme de manière visqueuse sans rompre tandis qu'à haute vitesse elle a un comportement fragile. Cette thèse a pour objectif d'améliorer la compréhension des mécanismes à petite échelle dans ces deux régimes de déformation, et en particulier à la transition. Pour cela, nous avons fabriqué un dispositif de compression et utilisé des techniques d'imagerie pour observer l'évolution du squelette de glace au cours des essais. Nos résultats apportent des informations nouvelles sur la complexité de l'évolution du squelette de glace sous l'effet conjoint du métamorphisme et des efforts mécaniques.

Remerciements

chatGPT prompt : Écrit des remerciements de manuscrit de thèse portant sur la mécanique de la neige. Adopte un style décontracté, non-académique, avec quelques fautes d'orthographe et coquilles et sans nommer directement les personnes.

Je tiens à remercier en premier lieu mes encadrants de thèse : \shuffle { Guillaume, Pascal, Maurine }, sans qui je n'aurais pas pu faire cette thèse. Merci de m'avoir permis de travailler sur ce matériau, ô combien, intéressant, fascinant et éclectique qu'est la neige !

Merci à ma famille, qui, même si il ne comprenne pas tout à ce travail de thèse (mais ils ne sont pas les seuls!), m'ont encouragé et on fait de moins quelqu'un d'ouvert d'esprit (mais têtu).

Merci à toutes les personnes du Centre d'Étude de la Neige, pour leur bienveillance, sympathie, conseils. Vous avez là un beau cadre de travail (mais ne vous reposez pas sur vos lauriers). Merci les *les coolz kidz*, les co-doctorant·e·s, les ancien·ne·s doctorant·e·s (et courage aux futur·e·s!), les chercheur·euse·s, les technicien·e·s et les tout·e·s les autres qui font que le CEN tourne comme un engrenage bien huilé.

Merci aussi à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin et qui ne rentre pas dans les catégories précédentes ; membres du CSI, interlocuteur fortuits (ou régulier) en conférence, membres de mon jury (même si ne nous somme vus qu'en visio), techniciens aguerris, ...

Merci enfin aux amis et personnes qui était là avant mon épopée grenobloise. Et à ceux que j'ai découvert dans cette ville au milieu des montagnes.

Et merci a toi, lecteur de ce manuscrit. Si tu le lis, c'est peut-être que finalement, ça valait le coup d'être écrit.

Bref, si j'ai fini, c'est bien grâce à vous tous !

À plus,

--

ab

Table des matières

Abstract	i
Résumé	iii
Plain language summary	v
Résumé grand public	vii
Remerciements	ix
1 Introduction	1
1.1 Généralités	1
1.1.1 La neige dans le système Terre et nos sociétés	1
1.1.2 Le matériau neige	2
1.1.3 La mécanique de la neige	4
1.2 État de l’art : la mécanique de la neige	6
1.2.1 Principes généraux	6
1.2.2 Facteurs influençant le comportement mécanique de la neige .	7
1.2.2.1 Masse volumique	7
1.2.2.2 Surface spécifique	8
1.2.2.3 Autres descripteurs de la microstructure	9
1.2.2.4 Température	11
1.2.2.5 Taux de déformation	12
1.2.3 Méthode de caractérisation de la neige	13
1.2.3.1 Caractérisation visuelle	13
1.2.3.2 Le profil stratigraphique standard sur le terrain . . .	14
1.2.3.3 La tomographie en laboratoire	15
1.2.3.4 Les expériences numériques à partir d’images tomo- graphiques	16
1.3 Questions scientifiques et contribution	18
1.4 Plan de la thèse	19
I Méthodes & données : création, gestion et utilisation	21
2 Conception d’un dispositif expérimental	23
2.1 Introduction	23

2.2	Essai de fluage œdométriques	24
2.2.1	Principe de l'essai de fluage	24
2.2.2	Conception de l'œdomètre	24
2.2.3	Caractéristiques des essais	26
2.2.4	Pistes d'améliorations	29
2.3	Essai de chargement à vitesse imposée	29
2.3.1	Principe de l'essai à vitesse imposée	30
2.3.2	Conception d'une presse mécanique	30
2.3.3	Conception du logiciel de pilotage	34
2.3.4	Caractéristiques des essais	35
2.3.5	Pistes d'améliorations	36
3	Utilisation de la tomographie	39
3.1	Acquisition tomographique	39
3.1.1	Description des paramètres d'acquisition	39
3.1.2	Choix des paramètres	41
3.1.3	Automatisation des scans	42
3.2	Reconstruction des projections	43
3.3	Pistes d'améliorations	45
4	Traitements d'images	47
4.1	Recalage	47
4.2	Binarisation	47
4.3	Fraction volumique et masse volumique	49
4.4	Surface spécifique	49
4.5	Coupe minimale transverse ou « Min-cut »	50
4.6	Caractéristique d'Euler	50
4.7	Distribution des longueurs de cordes	51
4.8	Facteur d'anisotropie	51
4.9	DVC - Corrélacion volumique	52
4.10	Autres	53
II	Essai de fluage	55
5	Essai de fluage	57
5.1	Introduction	57
5.2	Methods	60
5.2.1	Oedometric compression tests	60
5.2.2	X-ray tomography	60
5.2.3	Data analysis	62
5.2.3.1	Image processing	62
5.2.3.2	Microstructural characteristics	63
5.3	Results	65
5.4	Discussion	71
5.5	Conclusion	74
5.6	Acknowledgements	75

5.A	Appendix : Sensitivity of microstructural characteristics to the segmentation procedure	75
5.B	Supplementary material	76
III	Essai à déformation imposée	79
6	Effet de la vitesse de compression sur l'évolution des microstructures de neige	81
6.1	Introduction	81
6.2	Méthodologie	82
6.2.1	Essais de compression à vitesse imposée	82
6.2.2	Micro-tomographie à rayons-X	85
6.2.3	Analyse des données	85
6.2.3.1	Traitements d'images	85
6.2.3.2	Propriétés mesurées	85
6.3	Résultats	87
6.4	Discussion	97
6.5	Conclusion	99
7	Réponse macroscopique et hétérogénéités de déformation lors d'essais à vitesse imposée	101
7.1	Introduction	101
7.2	Méthodes	101
7.3	Résultats	104
7.4	Discussion	109
8	Conclusion & perspectives	115
8.1	Conclusion	115
8.1.1	Conception d'un dispositif expérimental	115
8.1.2	Évolution des microstructures sous l'effet de la compaction	116
8.1.3	Transition ductile-fragile et hétérogénéités de déformation	116
8.2	Perspectives	117
	Bibliographie	119
A	Appendix of I	131
A.1	Fiche technique du moteur	132
A.2	Méta-données	137

1 Introduction

1.1 Généralités

1.1.1 La neige dans le système Terre et nos sociétés

Durant l'hiver boréal, environ la moitié des surfaces continentales de l'hémisphère nord, soit 45 millions de km², est recouverte de neige (ESTILOW, YOUNG et ROBINSON, 2015). Cette couverture peut-être permanente à haute altitude ou à des latitudes extrêmes, ou saisonnière. La capacité de la neige à fortement réfléchir l'énergie solaire et à limiter les transferts thermiques entre le sol et l'atmosphère en fait une composante essentielle du système climatique terrestre (e.g. ZHANG, OSTERKAMP et STAMNES, 1996 ; FLANNER et al., 2011). Plus proche de nous en termes d'échelles spatiales et temporelles, l'omniprésence de la neige dans la vie de certaines populations a conduit à façonner leurs sociétés. La neige est parfois appelée « or blanc » en tant que ressource essentielle du tourisme hivernal en montagne (e.g., ski alpin, ski de randonnée) (e.g. SPANDRE et al., 2016), et dont la gestion technique devient critique dans le contexte de changement climatique et de raréfaction de la ressource (e.g. SPANDRE et al., 2019). Elle se transforme en « houille blanche » en tant que ressource pour la production d'hydro-électricité ou directement comme stock d'eau disponible à la fonte au printemps pour l'agriculture et l'alimentation (e.g. BARNETT, ADAM et LETTENMAIER, 2005). La neige est aussi source de difficultés et de dangers. Elle entrave les déplacements en montagne (route enneigée, col impraticable) (e.g. SHOOP, RICHMOND et LACOMBE, 2006). Son poids ou son glissement lent dans les pentes sollicitent fortement les ouvrages de génie civil ou la végétation (e.g. LE ROUX et al., 2020). Son glissement rapide dans les fortes pentes est à l'origine des avalanches qui, chaque année, entraînent le décès d'environ une centaine de personnes dans l'arc alpin européen (TECHEL et al., 2016). Cette omniprésence de la neige module ainsi fortement les activités humaines.

Il n'existe pas une neige mais une infinité de neiges aux propriétés différentes. L'importance de cette variété de type de neige a également façonné jusqu'au vocabulaire des sociétés concernées. Il est communément évoqué que les inuits posséderaient des centaines de mots pour décrire la neige. Néanmoins, cette affirmation semble fortement exagérée (CICHOCKI et KILARSKI, 2010). Toutefois, il est à noter que, quantitativement, les nivologues ont identifié 37 types de neiges différentes dans la classification internationale de la neige au sol (FIERZ et al., 2009). En décrivant la

neige par un type primaire et secondaire, on dénombre ainsi 1369 types de neige différents !

Estimer et prédire la quantité et la qualité de la neige au sol est essentiel pour faire face à des enjeux sociétaux majeurs. Pour améliorer cette connaissance, il faut comprendre comment la neige évolue et réagit à différentes sollicitations quelles soient mécaniques, thermiques etc. Cette compréhension est encore incomplète et fait l'objet de questions scientifiques ouvertes.

1.1.2 Le matériau neige

La neige commence son cycle de vie dans l'atmosphère, lorsque l'eau contenue dans les nuages se transforme en glace lors de la germination. Ces cristaux de glace croissent rapidement par condensation solide de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère (LIBBRECHT, 2012). Ces cristaux de glace sont aussi appelés flocons de neige et chutent lentement au sol sous l'effet de la gravité. La croissance des cristaux dans l'atmosphère dépend des conditions de pression et de température. Le diagramme de Nakaya (Figure 1.1) recense les différentes formes de flocons possibles. La forme la plus commune lors de chute de neige, et connue du grand public, est en forme d'étoile à 6 branches (voir Figure 1.1). La classification internationale proposée par FIERZ et al. (2009) recense 9 types de neige tombante (en anglais Precipitation Particles) : étoiles, aiguille, plaquettes, neige roulée, dendrites, etc. La géométrie des flocons arrivant au sol est donc déjà très variable ce qui impacte fortement leurs propriétés et leur évolution au sol (e.g. VÁZQUEZ-MARTÍN, KUHN et ELIASSON, 2020).

L'accumulation des flocons sur le sol va former une couche de neige. Les chutes de neige successives vont s'entasser et former des couches avec des propriétés différentes. Ces accumulations forment le manteau neigeux. Une fois au sol, la neige continue à évoluer en fonction des conditions de température (température moyenne et gradient de température) et des sollicitations mécaniques (e.g. vent, poids des couches supérieures). Contre-intuitivement, la neige est considérée comme un matériau « chaud » avec une température d'existence souvent proche de son point de fusion (i.e. température homologue proche de 1). Cette température relativement élevée associée à une forte porosité favorise l'évolution rapide de la neige par métamorphisme, c'est à dire par transfert de matière au sein du squelette de glace. Quand la température est homogène dans la couche, le métamorphisme est dit d'isothermie. Il se caractérise par la sublimation de la glace dans les zones convexes du squelette de glace et la condensation solide de la vapeur d'eau contenue dans les pores sur des zones concaves de la structure. Ces évolutions sont guidées par la minimisation de l'énergie de la surface air-glace (COLBECK, 1982) et sont influencées par les conditions de températures (TAILLANDIER et al., 2007). Ce métamorphisme entraîne l'arrondissement des grains (voir Figure 1.2, type RG). Quand un gradient thermique traverse l'échantillon, le métamorphisme est dit de gradient. Dans ce cas, ce sont les variations de température à l'échelle microscopique et le coefficient d'adhésion des molécules d'eau qui vont

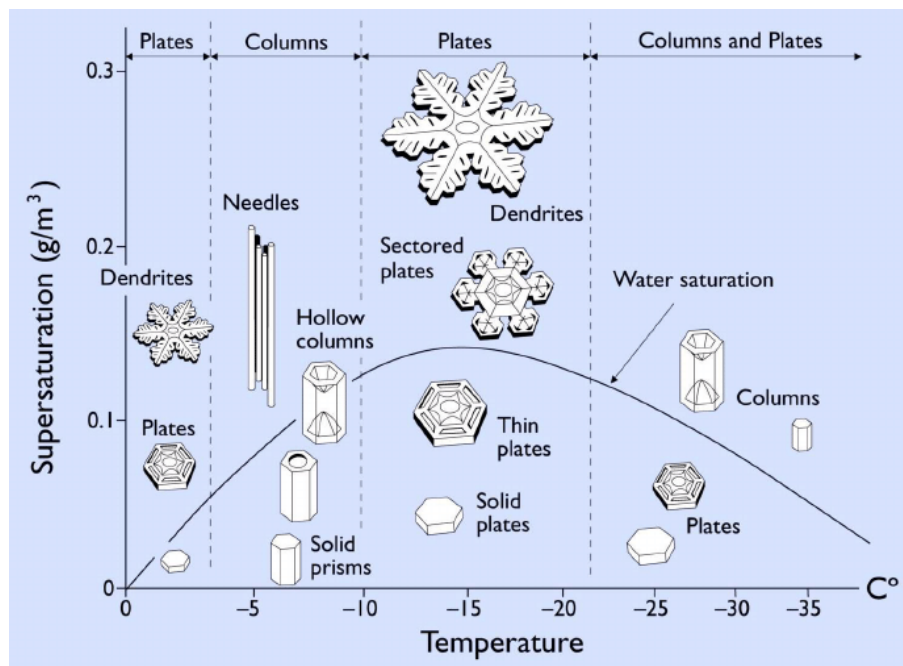


Figure 1.1 – Le diagramme de Nakaya décrit la forme des flocons de neige dans l'air à pression atmosphérique en fonction de la température et la saturation de la vapeur d'eau par rapport à la glace. L'image est extraite de LIBBRECHT (2012).

contrôler l'évolution de la neige (COLBECK, 1982). Il se forme alors des neiges à la structure anisotrope et avec des formes géométriques (facettes, angle à 120°) révélant la structure hexagonale du cristal de glace (voir Figure 1.2, type DH). Quand la température de la neige est de 0 °C, de l'eau liquide peut être présente en plus de l'air dans les pores. La présence d'eau vient fortement influencer sur les propriétés physiques et mécaniques de la neige. De même, on peut aussi retrouver des particules telles que des poussières du Sahara ou du carbone suie dans la neige.

La neige est donc un matériau constitué de deux phases principales : la glace (solide, la matrice) et l'air (fluide, les pores). La fraction volumique de chacune des phases varie au cours de la vie de la neige : de la neige fraîche (50 kg m^{-3}) composée à 95 % d'air, à la neige de printemps (pour la neige saisonnière) composée à 50 % d'air ou à la glace poreuse (800 kg m^{-3}) contenant seulement 10 % d'air (pour les neiges dites éternelles). Cela illustre la grande variété des types de neige présents sur Terre mais n'en constitue qu'une description partielle. La façon dont sont arrangés les pores et le squelette de glace en trois dimensions, la microstructure de la neige, va fortement influencer les propriétés effectives de la neige vue comme un matériau homogène (Figure 1.2). Dans cette thèse, nous nous appuyons sur une démarche typique en science des matériaux en essayant de comprendre les liens entre la structure (i.e., l'agencement des éléments) et les propriétés des matériaux du matériau neige (e.g., résistance mécanique, conductivité thermique). L'étude d'un matériau peut se faire à plusieurs niveaux : de l'échelle sub-atomique à l'échelle macroscopique. Dans ce travail, nous étudions la neige et nous travaillons à deux échelles. L'échelle des

1 Introduction

cristaux de glace est appelée microscopique (~ 0.1 mm). L'échelle d'un échantillon est appelée macroscopique (~ 1 cm). On différencie les propriétés inhérentes aux matériaux constitutifs de la neige (i.e., la glace et l'air) et les propriétés effectives, qui prennent en compte l'impact de la microstructure. Les propriétés peuvent être : mécaniques (résistance à la rupture, permettant de prévoir le déclenchement d'avalanche), thermiques (conduction de la chaleur, la neige est un très bon isolant), chimiques (présence d'impuretés, la concentration de certains éléments permettent la datation) ou radiatives (réflexion du rayonnement solaire, la diminution de l'albédo contribue à l'augmentation du forçage radiatif). Bien sûr, les sollicitations et interactions qui s'appliquent sont multiples, et influent les unes sur les autres. Par exemple la présence d'impuretés visibles dans le manteau neigeux diminue l'albédo de la surface de neige, laquelle absorbe plus d'énergie et sa température augmente. Cela complexifie la compréhension que nous avons du matériau. Dans cette thèse, nous essayons de séparer les processus et nous nous concentrons sur la mécanique de la neige sèche (i.e. pas d'eau liquide).

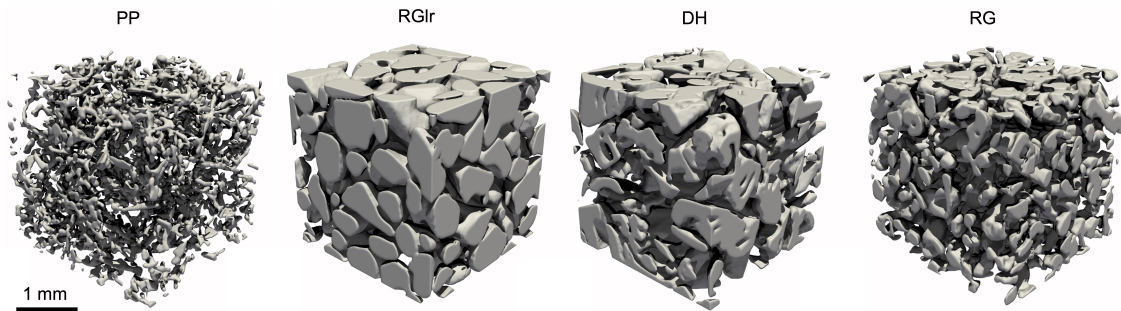


Figure 1.2 – Différentes microstructures de neige. Le squelette est en gris. Les pores sont affichés en transparence. La dénomination des échantillons suit la classification internationale (FIERZ et al., 2009). PP : précipitation particles ou neige récente ; RGl large rounded grains ou grands grains fins ; DH : depth hoar ou givre de profondeur ; RG : rounded grains ou grains fins. La figure est adaptée de LIN et al. (2022).

La neige est donc un matériaux poreux et hétérogène, dont le comportement macroscopique est issu des propriétés de ses constituants (l'air et la glace) modulées par sa microstructure (arrangement 3D d'air et de glace). La diversité des microstructures de neiges existantes rend toutes les approches n'en tenant pas compte inadaptées. De plus, la microstructure de neige évolue en permanence, ce qui complexifie les études.

1.1.3 La mécanique de la neige

MELLOR (1974) définit la mécanique de la neige ainsi (traduit de l'anglais) : « la mécanique de la neige traite des forces et des déplacements dans toutes les formes de neige, c'est-à-dire de la cinématique, de la dynamique et de l'énergétique de la neige à l'état condensé et dispersé. Plus largement, elle englobe également la

physique sous-jacente des processus pertinents pour le comportement mécanique ». Pour prédire le comportement macroscopique de la neige, il ne suffit pas de multiplier des essais mécaniques mais il faut également comprendre les processus en jeu à l'échelle microscopique pour espérer pouvoir extrapoler ces essais macroscopiques à des conditions sensiblement différentes. En effet, on peut s'attendre à prédire le comportement macroscopique de la neige par la seule connaissance des propriétés physiques de l'air et de la glace et de leur interaction à travers une microstructure donnée. Cette technique s'appelle l'homogénéisation et se base sur le principe général que l'observation à l'échelle macroscopique est la moyenne de tous les événements qui ont lieu à plus petites échelles. Même si le comportement global semble homogène, cela ne signifie pas que les réponses mécaniques sont les mêmes en tout point de la microstructure. Les propriétés des matériaux constitutifs de la neige, sont plutôt aujourd'hui bien comprises (BLACKFORD, 2007). C'est l'arrangement spatial 3D, i.e. la microstructure, qui nécessite d'être mieux caractérisé, puis relié aux propriétés mécaniques, comme le soulignent les articles de synthèse (MELLOR, 1974; SALM, 1982; SHAPIRO et al., 1997).

La réponse mécanique de la neige est multiple et varie en fonction de ses caractéristiques et de la sollicitation. Notamment selon la vitesse de sollicitation, on peut observer différents comportements mécaniques :

- à faible vitesse de déformation, la neige peut se comporter comme un fluide très visqueux avec de grandes déformations ductiles (Figure 1.3). On parle alors de comportement visco-plastique. On retrouve notamment ce comportement quand la neige se tasse lentement sous son propre poids. Dans un modèle linéaire, ce comportement se caractérise par une viscosité η , rapport entre contrainte et taux de déformation.
- à haute vitesse de déformation, la neige présente un comportement fragile. Après une déformation élastique infinitésimale, le matériau atteint une contrainte qu'il ne peut plus supporter et se rompt brutalement. On retrouve notamment ce comportement quand la neige se détache d'une pente sous la forme d'une avalanche de plaque (Figure 1.4). Ce comportement peut se caractériser par un module élastique E (ou rigidité) et par une contrainte à la rupture σ_c . Ces grandeurs sont généralement tensorielles pour prendre en compte l'anisotropie de la réponse et dépendent de la direction de la sollicitations (compression, traction, ...)

En résumé, la mécanique de la neige est complexe car : 1) il existe une grande diversité de microstructures de neige, 2) il existe différents comportements mécaniques de la glace, et 3) cette microstructure est en permanente évolution sous l'effet du métamorphisme.



Figure 1.3 – La plaque de neige glisse du toit et se courbe sans se rompre. La déformation sans rupture de la neige est l'illustration d'un comportement ductile.



Figure 1.4 – Cassure linéaire sommitale d'une avalanche de plaque. Cette cassure nette qui s'est développée en quelques secondes est l'illustration d'un comportement fragile.

1.2 État de l'art : la mécanique de la neige

1.2.1 Principes généraux

À l'origine, les premières campagnes d'essais concernant les propriétés mécaniques de la neige sont motivées par le besoin de comprendre et de maîtriser le risque d'avalanche dans les Alpes et émergent dans l'entre deux guerres du fait de chercheurs Suisses. En France, c'est suite à l'avalanche du Val d'Isère en 1970, que des politiques pour la prévention d'avalanches et des recherches appliquées associées ont émergé (COLÉOU et MORIN, 2018). La période de la guerre froide, sera l'une des plus fastes pour les glaciologues et les nivologues (HERZBERG, KEHRT et TORMA, 2018).

Un des objectifs de la mécanique de la neige est de trouver une équation constitutive reliant la déformation à la contrainte en passant par des variables d'état décrivant la microstructure interne du matériau. Il s'agit de prévoir comment la neige va réagir mécaniquement à une sollicitation étant donnée sa microstructure initiale mais aussi comment son état évolue sous cette sollicitation. Pour prédire, il faut généralement aussi comprendre les mécanismes en jeu. Dans l'idéal, il s'agit de trouver une équation constitutive la plus générale possible. Dans les faits, il est compliqué d'obtenir des équations représentatives de tous les phénomènes à toutes les échelles. Il est plus opportun de chercher à obtenir des formulations simples et ajustées aux mécanismes, aux conditions et aux échelles que l'on souhaite représenter. Dans le cadre de nos recherches, ce sont les formulations qui caractérisent les comportements ductile et fragile et la transition qui nous intéressent, à l'échelle des grains de glace.

Pour répondre à cet objectif, les développements peuvent être à base phénoménolo-

gique (i.e., issues d'observations) ou théoriques (i.e., dérivant d'autres lois ou principes physiques). La plupart des modèles utilisés actuellement sont phénoménologiques (MELLOR, 1974 ; SALM, 1982 ; SHAPIRO et al., 1997 ; SHENVI, SANDU et UNTAROIU, 2022). Il s'agit de préparer et réaliser des expériences mécaniques en faisant varier les modes de sollicitations (compression, traction, cisaillement, mixte, vitesse de l'essai) et l'état de la neige sollicitée (densité, type de neige, température, etc.). Au cours de l'essai, l'évolution des caractéristiques est mesurée : directement avec des capteurs (température, position, force, hygrométrie, etc.) ou indirectement avec des techniques d'imageries permettant d'accéder à des paramètres microstructuraux. Finalement, on propose ensuite des modèles mécaniques mettant en relation les quantités d'intérêts, qui sont capables de représenter les résultats obtenus à partir des conditions d'essai et des caractéristiques des échantillons. Pour le moment, certains modèles phénoménologiques ou numériques apportent des résultats satisfaisants. En revanche, dans l'état actuel, les modèles peinent à prendre en compte les mécanismes locaux, c'est la résultante de la complexité de la microstructure. C'est à dire l'évolution conjointe in-situ des microstructures liées au métamorphisme et à la réponse mécanique. En effet, la microstructure est souvent réduite à une masse volumique et le type de neige testée est en majorité du grains fins (MELLOR, 1974 ; SALM, 1982 ; SHAPIRO et al., 1997). Plus récemment, certains travaux exploitent la puissance de calcul actuelle pour reproduire le comportement mécanique de la neige à partir d'une modélisation des mécanismes de base à l'échelle microscopique et une représentation explicite de la microstructure de la neige. Il s'agit de faire des expériences numériques ce qui facilite la répétitivité des expériences et la prise de mesure mais les résultats restent très dépendants des choix de modélisation (WAUTIER, GEINDREAU et FLIN, 2015 ; WAUTIER, GEINDREAU et FLIN, 2017 ; THEILE et al., 2020).

1.2.2 Facteurs influençant le comportement mécanique de la neige

Cette section recense les différents facteurs pouvant influencer le comportement mécanique de la neige. Ces facteurs peuvent être reliés soit à des caractéristiques internes du matériau (microstructure, température) soit à des caractéristiques de la sollicitation (vitesse de déformation, direction de déformation, etc.).

1.2.2.1 Masse volumique

La masse volumique est le paramètre systématiquement étudié dans les travaux scientifiques sur la neige, du fait de la simplicité de sa mesure, en laboratoire aussi bien que sur le terrain, et du fait de sa pertinence pour caractériser au premier ordre la neige. La masse volumique ρ_{snow} est définie par le ratio entre la masse de la neige et son volume. En moyenne, plus la neige est dense, plus elle « s'oppose » à la déformation. Cette « opposition » se traduit par une augmentation du module

1 Introduction

d'Young E (GERLING, LÖWE et HERWIJNEN, 2017) (augmentation de la rigidité), de la viscosité η (BARTELT et MOOS, 2000) (écoulement plus lent) et de la résistance à la rupture R (MELLOR, 1974) (rupture à contrainte plus élevée) quand la densité de la neige ρ_{snow} augmente. Ainsi, de nombreux travaux proposent des paramétrisations ou des lois de comportement de caractéristiques mécaniques en fonction de la densité (KINOSITA, 1967; KRY, 1975b; NARITA, 1980; SCHWEIZER, 1998; BARTELT et MOOS, 2000) mais les résultats expérimentaux montrent une forte variabilité (VOITKOVSKY et al., 1975; FUKUE, 1979) comme l'illustrent les Figures 1.5 et 1.6. KOJIMA (1967) a mesuré la viscosité η de la neige à -10°C et a relevé des valeurs allant de 10 MPas à 10^6 MPas; et jusqu'à deux ordres de grandeurs de différence pour des neiges de même densité et température. La masse volumique de la neige ρ_{snow} qui semblait bonne candidate pour décrire l'évolution des propriétés mécaniques de la neige en fonction de sa structure, apparaît incapable d'en capturer toute la finesse. Il faut donc y ajouter plus d'informations, à l'aide d'autres indicateurs.

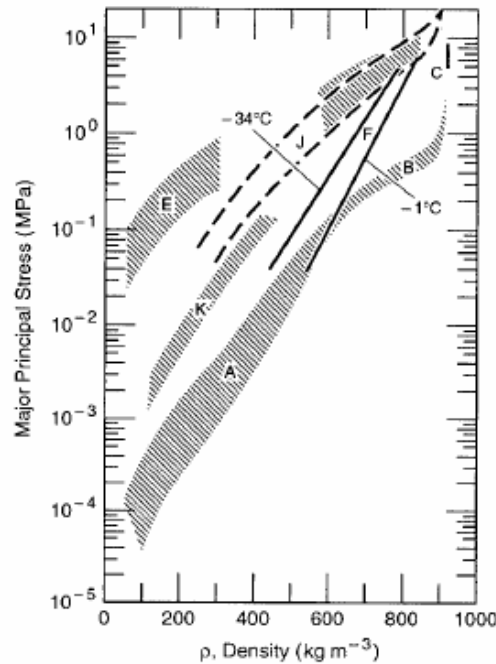


Figure 1.5 – Évolution de la première contrainte principale à rupture σ_I en fonction de la densité de la neige ρ_{snow} , d'après MELLOR (1974).

1.2.2.2 Surface spécifique

La surface spécifique¹ (SSA) est une mesure de l'interface entre les phases d'un milieu, ici, c'est la surface de contact entre le squelette de glace et l'air, normalisée par la masse de la phase solide. Elle est définie par $SSA = \frac{S_{air \leftrightarrow glace}}{\rho_{snow} \times V_{snow}}$ et exprimée en $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$. La SSA peut se mesurer par plusieurs méthodes : en laboratoire (mesure

1. Specific Surface Area ou *SSA* en anglais

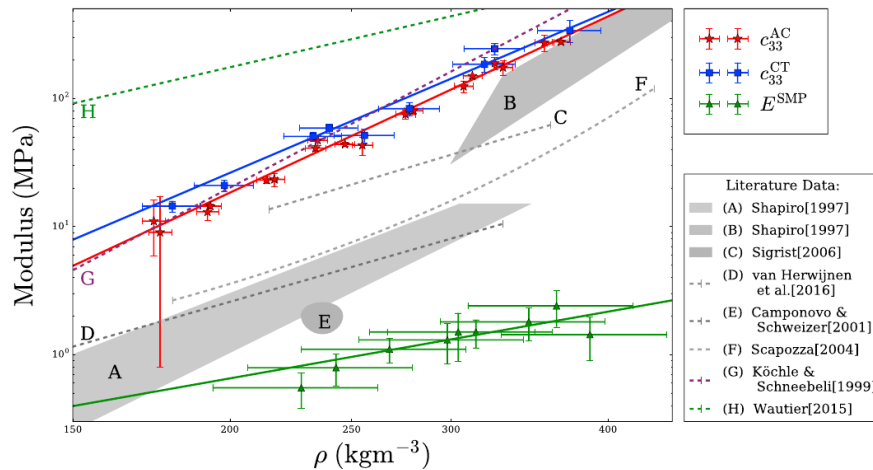


Figure 1.6 – Évolution du module d'Young E de la neige, en fonction de sa densité ρ_{snow} , d'après GERLING, LÖWE et HERWIJNEN (2017).

par absorption de gaz ou analyse d'image obtenue par tomographie) ou sur le terrain (mesure optique de réflectance). Une SSA élevée caractérise un rayon optique petit soit une microstructure plus fine. Une SSA plus faible est caractéristique d'une microstructure plus grossière. La structure de la neige fraîche est initialement fine et dendritique à l'image des flocons de neige. La SSA diminue fortement sous l'effet du métamorphisme d'isothermie, c'est à dire que la structure devient plus arrondie avec des formes plus épaisses. L'ensemble des mécanismes responsables du frittage de la neige (et de la croissance des ponts entre les grains) sont décrits et illustrés par MAENO et EBINUMA (1983).

La SSA est devenue une mesure standard dans l'étude de la neige. Son utilisation est principalement motivée par des études sur les propriétés radiatives. Son impact sur les propriétés mécaniques ou son évolution avec la déformation font l'objet de résultats contrastés. L'évolution de la SSA ne semble pas affectée par la déformation lors d'un essai de fluage, comme montré par (SCHLEEF et LÖWE, 2013). À l'inverse, lors d'essais à déformation imposée, la dynamique (vitesse et forme) de décroissance de la SSA changerait (WANG et BAKER, 2013; SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI, 2014). Cette accélération de la décroissance de la SSA au cours de l'essai est partiellement attribuée au phénomène de frittage sous pression (i.e., la surface de contact entre deux grains de glace augmente sous l'effet de la contrainte). À notre connaissance, il n'y a pas d'étude qui propose de loi de comportement des propriétés mécaniques (par exemple, module d'Young E , contrainte à rupture, etc) en fonction de la SSA.

1.2.2.3 Autres descripteurs de la microstructure

La microstructure de la neige décrit l'arrangement tri-dimensionnel d'un squelette connexe de glace dans un ensemble de pores d'air. Ce squelette est souvent décomposé

comme un ensemble de grains, en contact les uns avec les autres via les ponts (voir Figure 1.7). Toutefois, ce découpage est délicat avec une définition du grain qui est équivoque. Dans le contexte de la neige, le terme de grain est souvent mal défini. Un grain est alors un continuum du squelette de glace qui est séparé d'un autre grain par un pont, ce dernier étant une zone de glace moins épaisse. Un algorithme de séparation en grains à partir d'un critère local a été développé par HAGENMULLER et al. (2014b). Ce découpage est pertinent pour les maillages d'entrée des simulations. Toutefois, le nombre et les propriétés géométriques des grains ainsi obtenus, varient fortement en fonction des paramètres de découpage, ce qui peut mener à une variabilité de la réponse mécanique à cause du découpage. Un « grain » peut aussi être assimilé à un cristal, soit une région du matériau et de l'espace continu dans lequel l'orientation cristalline est identique. La séparation en grains peut alors se faire selon les différentes orientations cristallines identifiées. Les moyens expérimentaux pour identifier les orientations cristallines, sont décrites dans la sous-section suivante 1.2.3.

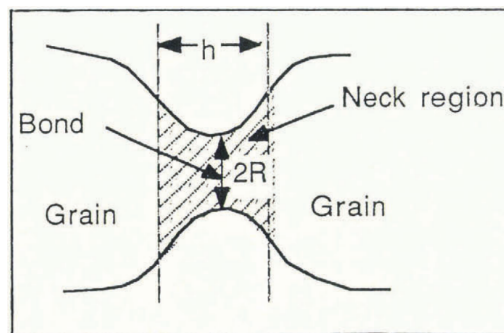


Figure 1.7 – Représentation schématique de la notion de grains et ponts par BROWN et EDENS (1991).

Les ponts et leurs évolutions (création, évolution, fracture), jouent un rôle essentiel sur les propriétés mécaniques. BROWN et EDENS (1991) et EDENS et BROWN (1991) s'intéressent à l'évolution du nombre de coordination, la taille des grains, l'aire des ponts et la taille des pores, la taille des pores et le nombre de grains par unité de volume, et trouvent une augmentation de toutes ces caractéristiques lors de la compaction de la neige. Des tailles de ponts plus importantes et un plus grand nombre de ponts résultent en un module de Young de la neige E plus élevé (WANG et BAKER, 2013). Il faut toutefois rester prudent, la mesure du module d'Young est imprécise (KIRCHNER, MICHOT et NARIT, 2001). VOITKOVSKY et al. (1975) observe que les ponts sont créés lors de la déformation puis croissent lors du frittage. FUKUE (1979) observe que la résistance de la neige augmente avec le temps de frittage, et donc la taille des ponts.

Toutefois, KRY (1975b) observe que la seule quantité ou surface des ponts ne suffit pas à expliquer l'augmentation des caractéristiques mécaniques mesurées macroscopiquement. Pour expliquer cela, il suppose qu'il existe des chaînes de grains activées mécaniquement en transmettant la charge. Ainsi, seule une partie des grains participe à la reprise des charges. De manière contre-intuitive, AGRAWAL et MITTAL (1995) constatent que les ponts sont créés préférentiellement dans la direction orthogonale à

la direction de déformation, cette configuration serait plus favorable au renforcement structurel.

La réponse mécanique de la neige dépend donc principalement des liaisons intergranulaires et des caractéristiques géométriques des grains. Les ponts évoluent conjointement à la densité au cours de la compaction. Dans un article de synthèse, SHAPIRO et al. (1997) réaffirme que les liens entre les grains sont la vraie origine des résistances mécaniques.

Dans un effort de quantification de la microstructure, de nouveaux indicateurs mesurables de la microstructure ont émergé (AGRAWAL et MITTAL, 1995). La coupe de densité minimale développée par HAGENMULLER et al. (2014a) et la caractéristique d'Euler χ (SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI, 2014) sont des quantificateurs du nombre de ponts et de la taille des ponts. Ils sont utilisés dans nos travaux et sont décrit plus en détails dans le chapitre 4. L'épaisseur des phases solides représente la distribution ou l'épaisseur moyenne des phases du milieu (i.e., la glace et l'air) et permet de quantifier l'évolution des phases (WANG et BAKER, 2013; KAEMPFER, SCHNEEBELI et SOKRATOV, 2005). La fonction de corrélation à deux points est une information statistique qui renseigne sur la distance moyenne et la similarité au sein d'un champ scalaire (LÖWE, SPIEGEL et SCHNEEBELI, 2011; LÖWE, RICHE et SCHNEEBELI, 2013). Les courbures moyennes et gaussiennes caractérisent la forme des surfaces (BRZOSKA, COLÉOU et LESAFFRE, 1998; CALONNE et al., 2014; FLIN et al., 2005). La tortuosité d'un élément est le rapport de la longueur de l'élément et la distance entre ses extrémités, et permet d'en caractériser sa forme (KAEMPFER, SCHNEEBELI et SOKRATOV, 2005; CALONNE et al., 2014).

Une des difficultés majeures dans l'établissement du lien entre une microstructure et ses résistances mécaniques sont les effets de rétroaction entre ces deux paramètres. Contrairement à des matériaux classiques, la microstructure de neige évolue constamment sous l'effet du métamorphisme. Cet effet est d'autant plus fort que la neige est fraîche. Les ponts de neige frittent, ce qui augmente les résistances mécaniques.

1.2.2.4 Température

La neige hérite de la dépendance du comportement mécanique de la glace à la température. Une température élevée réduit la rigidité et la résistance du matériau, tandis qu'une température basse augmente la rigidité et la résistance du matériau (SCHWEIZER, 1998; SCAPOZZA et BARTELT, 2003; DELMAS, 2013). Par ailleurs, en plus de cette dépendance, la neige présente un frittage entre grains dépendant de la température. Plus la température est élevée, plus les éléments de glace en contact vont se coller rapidement et fortement (SZABO et SCHNEEBELI, 2007). La vitesse de cicatrisation des ponts rompus peut fortement influencer le comportement mécanique de la neige (CAPELLI, REIWEGGER et SCHWEIZER, 2020). Dans le cas de la neige, les conditions de température vont de plus influencer sur l'évolution de la microstructure par le processus de métamorphisme, que ce dernier soit d'isothermie

ou de gradient. En particulier, la microstructure de la neige va éventuellement devenir fortement anisotrope (CALONNE et al., 2014; FLIN et al., 2005), et la densification (ou compaction) va être impactée (WIESE et SCHNEEBELI, 2017b; WIESE et SCHNEEBELI, 2017a).

1.2.2.5 Taux de déformation

La dépendance du comportement mécanique de la neige à la vitesse de déformation a été observée en traction (NARITA, 1984), en compression non-confinée (KINOSITA, 1967) et plus récemment lors d'essais de compression confinée par BARRACLOUGH et al. (2016) et LÖWE et al. (2020). À faible vitesse de déformation la déformation est ductile, tandis qu'à haute vitesse de déformation, le matériau se fracture et présente une réponse fragile. Ainsi, dans la neige, la transition ductile-fragile a lieu autour de $\dot{\epsilon} \sim 10^{-4} s^{-1}$ en compression et à $-15^\circ C$. En cisaillement et à $-18^\circ C$ la transition apparaît autour de $\dot{\epsilon} \sim 10^{-3} s^{-1}$. Cette valeur de vitesse de déformation de la transition dépend de plusieurs facteurs. Elle est croissante avec la température et varie en fonction des conditions de sollicitation.

NARITA (1984) est le premier à observer un adoucissement suivi d'un affaiblissement des contraintes en fonction de la vitesse de déformation. Il y a donc une vitesse optimale à laquelle la contrainte est la plus élevée. Cette vitesse coïncide avec la transition ductile fragile. Cette transition n'est pas nette et se décompose en une fragilité partielle, puis totale à plus haute vitesse. Il propose de découper la transition en trois étapes : « ductile, fragile du 1er type et fragile du 2nd type ». PUZRIN, FAUG et EINAV (2019) compile des résultats d'essais de rupture de plaque en cisaillement et reporte les mêmes observations.

La caractérisation du régime (ductile ou fragile) a surtout été observée à partir de l'évolution de la contrainte, comme décrit précédemment. Des chutes brutales de la contrainte indiquent une perte de continuité de la structure, i.e. une réponse mécanique fragile. Tandis qu'une augmentation de la contrainte monotone avec la déformation est le signe d'un régime ductile. L'hypothèse est que le comportement mécanique fragile de la neige émerge lorsqu'un nombre suffisant de ponts du squelette de glace cassent fragilement (KIRCHNER, MICHOT et NARIT, 2001). L'observation directe et en temps réel de fissuration dans le squelette de glace est complexe.

À faible masse volumique ($< 550 \text{ kg m}^{-3}$), la déformation ductile est supposément dominée par le réarrangement granulaire par glissement des grains entre eux, mais cela est rarement observé (WAKAHAMA, 1967). Finalement, comme pour des masses volumiques élevées, c'est probablement la déformation intra-cristalline qui est dominante (KINOSITA, 1967) comme dans la glace (IGNAT et FROST, 1987). Le comportement fragile de la neige est quant à lui caractérisé par la rupture des ponts entre les grains. La cohésion des grains étant alors plus proche des matériaux granulaires classiques. HANSEN et BROWN (1988) observe du réarrangement granulaire avec rupture des ponts entre les grains, à des vitesses de déformation supérieures à $10^{-3} s^{-1}$, ce qui

correspond à des vitesses auxquelles on observe des comportements macroscopiques fragiles. Quelque part entre ces deux comportements mécaniques parfaits, la rupture en continu de ponts de glace compensée par la création en continu des liaisons au sein de la microstructure constitue un régime intermédiaire permettant de larges déformations avant d'atteindre la ruine de l'échantillon MONTMOLLIN, 1982. Cette hypothèse semble confirmée par REIWEGER et al. (2009) qui la modélise à l'aide d'éléments poutres.

Plus récemment, BARRACLOUGH et al. (2016) a observé l'initiation et la propagation de bandes de compaction au sein d'échantillons de neige, pour des vitesses de déformation supérieures à $5.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. De plus, la contrainte à laquelle s'initie le front de propagation est plus importante lorsque que l'échantillon de neige a eu le temps de fritter. Pour modéliser la propagation des bandes de compaction, il développe un modèle phénoménologique plastique avec une variable interne, représentatif de la contribution des ponts à la résistance de la microstructure. Plus simplement, cette variable représente la compétition entre la cassure de ponts, due à la déformation, et à la croissance des ponts, due au métamorphisme d'isothermie. L'existence et la propagation de bandes de compaction est un phénomène général des milieux granulaires. À l'aide d'un modèle généralisé à ressort, GUILLARD et al. (2015) prédit au moins 5 motifs de propagation de la compaction, dont certains avec de multiples fronts de propagation simultanée. Si lors d'un essai, des bandes de compaction sont observables à l'échelle macroscopique, le signal de contrainte se révèle dentelé. LÖWE et al. (2020) cherche à modéliser ce comportement dentelé de la contrainte. Pour cela, un modèle phénoménologique visco-plastique est considéré. La variable interne d'intérêt est cette fois le temps de frittage depuis la dernière cassure du point. Ce modèle réplique de manière convaincante la plage de vitesses de déformation dans laquelle on observe des chutes brutales de contrainte, ainsi que la période et l'amplitude des oscillations. Toutefois, on peut reprocher à ce modèle de ne pas proprement représenter la chute brutale de la contrainte. Ces deux modèles appartiennent plus globalement à la famille des modèles « rate-and-state ».

1.2.3 Méthode de caractérisation de la neige

Les méthodes de mesure et d'observation de la neige ont évolué avec les innovations scientifiques. Elles conditionnent fortement notre compréhension des mécanismes actifs lors de la déformation de la neige. Les données issues des observations sont aux modèles mécaniques ce que la nourriture est à l'être humain. Les chercheurs proposent des modèles, qui sont ensuite confrontés aux observations.

1.2.3.1 Caractérisation visuelle

L'outil le plus simple pour l'observation et l'analyse microstructurale de la neige est l'œil nu ou la loupe. Une loupe est utilisable à la fois en laboratoire et sur le terrain,

et du fait de la simplicité d'utilisation, la méthode est encore utilisée aujourd'hui. En laboratoire, l'utilisation de photos – permettant de figer dans le temps la géométrie des grains – et de microscopes – offrant une meilleure appréciation de la géométrie – permettent d'améliorer la qualité et la représentativité statistique des observations. La classification de FIERZ et al. (2009) repose sur la taille et la forme des grains ; informations qui varient d'un observateur à l'autre.

1.2.3.2 Le profil stratigraphique standard sur le terrain

Pour étudier les propriétés du manteau neigeux selon le profil vertical, on réalise un puits à neige ou *snow pit* ; une excavation du sommet du manteau neigeux jusqu'au sol. Puis, on analyse les propriétés de la neige en fonction de la profondeur. C'est un profil stratigraphique. Pour la prévision du risque d'avalanche, la réalisation de ce profil suit un protocole standardisé (FIERZ et al., 2009). En effet, l'étude des couches stratigraphiques du manteau neigeux occupe une place importante des travaux en déclenchement d'avalanche (GAUME et al., 2013 ; SCHWEIZER et al., 2016). Une fois le puit creusé, on identifie les différentes couches, marqueurs de différents épisodes météorologiques. Les propriétés que l'on mesure ensuite sont :

- la densité, à l'aide d'un *snow cutter*. Ce sont des boîtes de volumes et masse connues, avec lesquelles on prélève un morceau de neige que l'on pèse,
- la température à l'aide d'un thermomètre simple. Pour les neiges à 0°C, cette mesure est complétée par une estimation de la teneur en eau liquide,
- la classification des grains, à l'aide de leur taille et leur forme,
- la dureté de la couche à l'aide de tests mécaniques simples tels que le Hand Penetration Tests ou la sonde de battage (PIELMEIER et SCHNEEBELI, 2003).

Ces observations nécessitent très peu de matériel mais contiennent inévitablement une part de subjectivité et se limitent à une résolution centimétrique pour la position et de classes de valeurs pour la variable mesurée. Ainsi, la caractérisation sur le terrain est souvent complétée par les nivologues par les mesures suivantes :

- la surface spécifique, à l'aide d'appareil mesurant la réflectance (DUFISSS ou ICECUBE) (ZUANON, 2013),
- la résistance à l'enfoncement à haute résolution. Le micro-pénétrromètre à neige², est un appareil de mesure de la force de pénétration dans le manteau neigeux, pendant le sondage vertical de ce dernier. À partir des courbes de force et de déplacement on peut extrapoler les propriétés des couches du manteau neigeux (PROKSCH, LÖWE et SCHNEEBELI, 2015).

Les méthodes que l'on a présentées jusque-là, dites de « terrain » ne sont pas limitées à l'utilisation en montagne mais peuvent aussi être utilisées en laboratoire. C'est même un point essentiel afin de pouvoir quantifier les biais entre les mesures sur le terrain et les mesures dans un environnement contrôlé.

2. Snow Micro Penetrometer, *SMP*

1.2.3.3 La tomographie en laboratoire

BRZOSKA, COLÉOU et LESAFFRE (1998) ont été les premiers à utiliser la tomographie pour étudier la microstructure de la neige. Avant cela, les méthodes stéréologiques permettaient déjà d'étudier les effets des grains et des ponts sur les résistances mécaniques (SHAPIRO et al., 1997). La tomographie est une technique d'imagerie permettant d'obtenir l'information 3D d'un échantillon à partir de coupes obtenues par la traversée d'ondes du dit échantillon. Cette technique est particulièrement intéressante dans l'étude des matériaux, car elle permet de lier les mesures et propriétés macroscopiques à la microstructure (SALVO et al., 2003). Ses autres avantages sont : la non-destructivité (ce qui permet un suivi dans le temps d'un échantillon), la possibilité d'essais in-situ (i.e., l'échantillon peut-être laissé en place et l'essai réalisé dans la cabine de tomographie). VÁSÁRHELYI et al. (2020) fournit une revue de la méthode de tomographie et compare les différentes modalités d'imageries 3D, la Figure 1.8 en est un résumé. La technique utilisée dans ce travail de thèse est la tomographie à rayons-X par absorption. Un faisceau de rayons-X traverse un échantillon et une image de contraste d'atténuation est obtenue. Avec un tomographe de laboratoire, le flux et la résolution maximale sont limités par rapport à la capacité d'un synchrotron (e.g., 4 W à taille de spot de 4 μm pour le tomographe utilisé dans notre étude). Le temps de scan est donc plus long (e.g. 90 minutes pour 4×10^9 vx avec une résolution de $\sim 8 \mu\text{m}$). Deux autres techniques de tomographie présentent des fonctionnalités intéressantes. La tomographie à rayons-X à contraste de phases³, est adaptée aux matériaux à faible densité avec un coefficient d'atténuation similaire (MAYO, STEVENSON et WILKINS, 2012). La tomographie à rayons-X par diffraction⁴(ODDERSHEDE et al., 2010), permet de différencier les grains par leur orientation cristalline (ROSCOAT et al., 2010). Cette dernière technique est toutefois plus rarement utilisée car plus complexe et limitée à un nombre restreint de cristaux à imager.

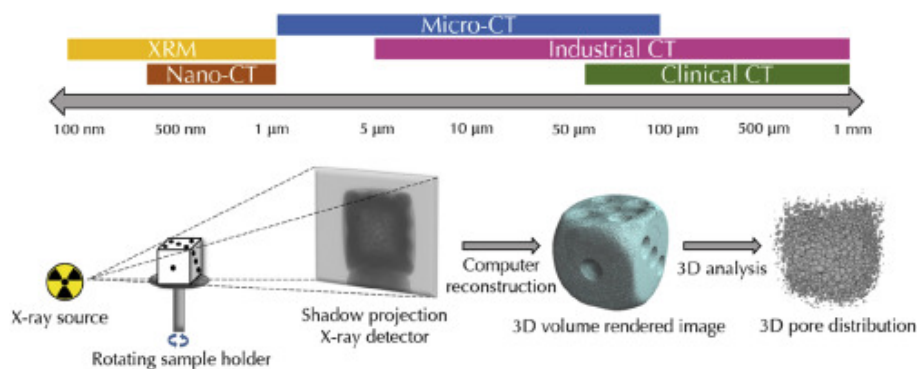


Figure 1.8 – Résumé des techniques de tomographie. Tirée de VÁSÁRHELYI et al., 2020. Pour cette thèse, nous utilisons un tomographe de type Micro-CT.

Avec ce nouveau type de données, il a fallu vérifier la vraisemblance des caractéristiques calculées avec les méthodes traditionnelles et avec la micro-tomographie par

3. phase-contrast X-ray tomography

4. X-ray diffraction method, *DCT*

rayons-X. LUNDY, EDENS et BROWN (2002) montrent une bonne cohérence pour les valeurs de densité et propriétés micro-structurales entre les méthodes traditionnelles et la micro-tomographie. Toutefois, les valeurs obtenues par micro-CT requièrent une attention particulière. HAGENMULLER et al. (2016) montrent que les valeurs obtenues varient de $\pm 5\%$ en fonction des algorithmes de segmentations et des méthodes de calcul de densité et *SSA*. La résolution des volumes 3D influe aussi. Les propriétés surfaciques, telle que la *SSA*, y sont particulièrement sensibles.

À partir de cette caractérisation 3D, différentes méthodes et indicateurs ont été développés. Par exemple, de nouvelles manières de calculer la *SSA* ont émergé (FLIN et al., 2005; HAGENMULLER et al., 2016). De nouveaux paramètres ont pu être calculés comme la courbure, la tortuosité, la caractéristique d'Euler, des métriques pour la connectivité la microstructure, etc.

La micro-tomographie à rayons-X permet d'observer l'évolution de la neige sous différentes conditions (e.g. CALONNE et al., 2014; SCHNEEBELI, 2004). Les données acquises en 4D nécessitent l'emploi d'outils spécifiques pour quantifier les évolutions. Les déformations de l'échantillon peuvent être estimées par corrélation de volumes numériques⁵ (SCHREIER, ORTEU et SUTTON, 2009). On peut ainsi observer les mouvements dans l'ensemble de l'échantillon par corrélation des niveaux de gris (EPPANAPELLI et al., 2019). La corrélation grain à grain, ou « particle-tracking » est autre autre technique permettant de suivre chaque grain indépendamment (PEINKE et al., 2020). La corrélation discrète nécessite d'identifier les différentes particules de la microstructure; cela peut se faire à posteriori de la tomographie grâce à un algorithme de segmentation en grains (HAGENMULLER et al., 2014b). On a ensuite accès aux champs de déformations du volume.

Même si des températures basses permettent de ralentir l'évolution de la microstructure due aux transferts de vapeur via le métamorphisme d'isothermie, cela ne permet pas de complètement bloquer l'évolution de la microstructure (KAEMPFER et SCHNEEBELI, 2007). La technique d'imprégnation permet de stabiliser la microstructure d'un échantillon de neige (FLIN et al., 2003; HEGGLI, FREI et SCHNEEBELI, 2009; LOMBARDO, SCHNEEBELI et LÖWE, 2021). Cela permet d'acquérir de la neige sur le terrain et de la figer, de stocker la neige avant essai ou encore de la transporter. Les échantillons imprégnés peuvent aussi être découpés pour en obtenir des lames minces.

1.2.3.4 Les expériences numériques à partir d'images tomographiques

Les représentations microstructurales en 3D obtenues par micro-tomographie ont permis l'essor de la simulation numérique. Les microstructures réelles peuvent être injectées dans le modèle mécanique qui est ensuite résolu numériquement. Ces modèles micro peuvent être imaginés à partir des observations lors des essais. Et inversement,

5. Digital Volume Correlation, *DVC*

des modèles conçus théoriquement nécessitent d'être vérifiés lors d'essais sur des échantillons réels. Les capacités d'un modèle à correctement prédire l'évolution d'une microstructure permettent de déduire les mécanismes mis en jeu.

Plus la résolution spatiale des microstructures est importante, mieux l'arrangement spatial du squelette de glace peut-être représenté, mais demande un plus grand nombre de voxels pour une même taille physique. Le nombre d'éléments à simuler peut rapidement devenir un critère limitant. Notamment, le volume simulé doit être suffisamment grand pour être représentatif du matériau.

PODOLSKIY et al. (2013) synthétise toutes les études à l'aide de la méthode des éléments finis⁶ sur la neige jusqu'en 2012. Cette méthode consiste à discrétiser un domaine en un nombre de sous-domaines finis et de résoudre les équations approximées entre chacun des sous-domaines. L'utilisation de microstructures réelles comme données d'entrée a permis de mettre en évidence le rôle de ces microstructures sur la répartition des contraintes (HAGENMULLER, THEILE et SCHNEEBELI, 2014) dans différents domaines de sollicitation (élastique, viscoplastiques) (WAUTIER, GEINDREAU et FLIN, 2015 ; WAUTIER, GEINDREAU et FLIN, 2017). Les observations faites par THEILE et al. (2011) montrent que l'importance de la prise en compte de la microstructure est d'autant plus forte que la densité est faible.

La méthode des éléments discrets⁷ est plus appropriée pour représenter des interactions à la frontière des grains et d'importants ré-arrangements granulaires. JOHNSON et HOPKINS (2005) est le premier à réaliser une simulation *DEM* dans laquelle les grains de neige sont modélisés par des cylindres orientés aléatoirement. Les simulations *DEM* ont permis de mieux quantifier le comportement et les interactions entre les grains (ré-arrangement, rupture des ponts, déformation des grains) dans différentes combinaisons de sollicitations (compression, cisaillement, mixte, régime ductile, régime fragile) (THEILE et al., 2020 ; HAGENMULLER, CHAMBON et NAAIM, 2015).

Récemment, des méthodes basées sur des transformations de Fourier rapide⁸ ont fait leur apparition pour la résolution des problèmes de la mécanique du contact (CHEN, 2013 ; WANG et al., 2021 ; LUCARINI, UPADHYAY et SEGURADO, 2021). Cette approche semble bien adaptée aux matériaux granulaires, et demande à être utilisée sur la neige.

L'utilisation de méthodes numériques permet de considérer des microstructures complexes, au prix d'un temps de calcul important. Les modèles utilisent des hypothèses simplificatrices sur les géométries des microstructures. Le manque de microstructures de neige disponibles en entrée en limite une évaluation représentative de la diversité des types de neige.

6. *FEM*, Finite-Element Method

7. *DEM*, Discrete Elements Method

8. *FFT* ou Fast Fourier Transform

1.3 Questions scientifiques et contribution

Au travers de la bibliographie sur la mécanique de la neige, deux challenges scientifiques apparaissent clairement. D'une part, la prise en compte de la microstructure de manière plus détaillée que par sa simple masse volumique est une étape essentielle pour comprendre le comportement mécanique de la neige et pouvoir mieux le prédire. Il s'agit d'estimer quelle est la réponse en contrainte d'une microstructure donnée soumise à une sollicitation mais aussi de savoir comment la microstructure elle-même évolue sous cette sollicitation. Avec le développement de la tomographie, une caractérisation explicite de la microstructure devient possible mais très peu d'études ont jusqu'alors exploité cet outil pour quantifier les évolutions micro-structurelles sous chargement mécanique. D'autre part, la diversité du comportement mécanique de la neige émane de la sensibilité du comportement de glace et des interfaces air-glace à la vitesse de déformation. L'évolution de la microstructure sous chargement mécanique est sans doute modulée par la vitesse de déformation qui conditionne l'activation des mécanismes différents à l'échelle des grains. Néanmoins, très peu d'observations permettent d'évaluer les mécanismes intuités ou de quantifier leur contribution sur la réponse macroscopique du matériau neige.

Cette thèse tente d'apporter des éléments de réponse à cette problématique par un travail essentiellement expérimental. Elle s'organise autour des questions clés suivantes :

- Comment capturer l'évolution de la microstructure de la neige sous un chargement mécanique contrôlé ? Comment exploiter la tomographie et l'espace contraint de la cabine de tomographie pour mener des essais in-situ ?
- Comment le métamorphisme d'isothermie et le fluage de la glace influencent l'évolution de la microstructure quand la neige se tasse ? Sous l'effet du métamorphisme d'isothermie, les transferts de vapeur et le frittage épaississent la microstructure de glace qui s'endurcit. Lors de l'application d'un poids mort, la neige se déforme pour reprendre les nouvelles contraintes mécaniques. Comment ces mécanismes qui apparaissent de manière couplée interagissent-ils ?
- Si le taux de déformation imposé est plus élevé, est-ce que l'évolution de la microstructure est différente ? Que se passe-t-il à l'échelle des grains quand on se rapproche de la transition ductile-fragile ? À faible vitesse de déformation, les ponts évoluent par le fluage de la glace et par le métamorphisme. La réponse mécanique est donc celle d'un matériau poreux ductile dont la microstructure est évolutive. À haute vitesse de déformation, c'est la rupture des ponts et le frittage qui dominent. Que se passe-t-il entre les deux ?
- Comment l'observation couplée des réponses macroscopiques et de l'évolution microstructurale peut nous renseigner sur les mécanismes en jeu ? Quelle est la marque de ces différents mécanismes sur la microstructure et quelles métriques sont adaptées ? En combinant l'observation des hétérogénéités à l'échelle macroscopique et l'évolution de caractéristiques bien choisies de l'échelle microscopique, on peut essayer de lier les comportements aux deux échelles.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la compréhension de la réponse mécanique

de la neige, en particulier de caractériser l'évolution microstructurale de la neige, d'abord dans le cadre d'essais mécaniques classiques, ainsi que proches de la transition ductile-fragile. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps organisé des campagnes d'essais dont les microstructures sont obtenues à l'aide de la tomographie à rayons-X. Dans un second temps, nous exploiterons les algorithmes de traitements d'images pour caractériser la microstructure et son évolution, et pour l'évaluation des microstructures de neige.

1.4 Plan de la thèse

Chapitre 1 : Dans ce premier chapitre, nous avons initialement présenté les enjeux sociétaux liés à la neige, les spécificités de la neige, et introduit la mécanique de la neige. Nous avons continué en introduisant le contexte scientifique général et les questions pertinentes à l'étude de la neige. Nous décrivons ensuite de manière non-exhaustive les travaux et les connaissances relatives à la mécanique de la neige ; en particulier le lien entre les propriétés mécaniques du matériau et sa microstructure. Nous terminons par une présentation des questions clés qui ont guidé cette thèse.

Chapitre 2 : Le second chapitre présente les développements expérimentaux mis en place pour répondre aux défis scientifiques de la thèse. Cette thèse a nécessité un important travail expérimental, de par le développement d'un dispositif spécifique. Nous avons réalisé 1) une campagne d'essais de fluage d'échantillons de neige, et 2) une campagne d'essais de déformation à vitesse imposée d'échantillons de neige, le tout suivi par micro-tomographie à rayons-X. Pour ces deux campagnes, il a fallu concevoir des dispositifs expérimentaux et calibrer les différents éléments, qui puissent convenir aux contraintes expérimentales (encombrement réduit dans la cabine de tomographie, température négative, exposition aux rayons-X, ...). Nous décrivons également les choix des paramètres quant à la tomographie et les processus de post-traitements des données.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre nous étudions l'évolution de la microstructure de la neige sous un chargement de fluage, à l'aide de la micro-tomographie à rayons-X. Dans cette optique, nous avons appliqué un chargement mécanique constant à l'aide de masses étalons et numérisé la microstructure à intervalles réguliers à une résolution élevée (taille de voxel 8.5 μm) pendant 2 semaines. Nous avons mesuré les propriétés de l'échantillon de neige au cours du temps.

Ce travail a été publié dans *Journal of Glaciology*, (BERNARD et al., 2022).

Chapitre 4 : Le quatrième chapitre porte encore une fois sur l'étude microstructurale de la neige, cette fois sous un chargement à vitesse de déformation imposée, et avec la micro-tomographie à rayons-X. Nous avons préparé en laboratoire plusieurs échantillons et les avons déformés à des vitesses de déformation comprises entre 10^{-6} s^{-1} à 10^{-2} s^{-1} . En plus des indicateurs microstructuraux déjà exploités dans le précédent chapitre, nous en incluons de nouveaux. En outre, nous constatons la difficulté de découpler les effets mécaniques dus aux vitesses de déformation et les effets du frittage dû au temps.

Ce travail est une ébauche, qui fera l'objet d'une publication.

Chapitre 5 : L'avant-dernier chapitre s'intéresse aux liens entre l'évolution de la microstructure et la réponse mécanique macroscopique observée. Nous observons macroscopiquement deux régimes de déformations, ductile et fragile, en fonction de la vitesse de déformation imposée. À faible vitesse, la déformation de l'échantillon semble homogène et la contrainte présente une croissance en loi puissance de la déformation. À haute vitesse, l'échantillon se déforme par strates, et on observe des bandes de compaction qui se déplacent dans la hauteur de l'échantillon et la contrainte présente des chutes brutales et totales.

Ce travail est une ébauche, qui fera l'objet d'une publication.

Chapitre 6 : Le chapitre final synthétise les résultats principaux de la thèse et suggère les futurs travaux à mener, à la fois scientifiquement et techniquement.

Première partie

Méthodes & données : création, gestion et utilisation

Here we go

2 Conception d'un dispositif expérimental

2.1 Introduction

Afin d'étudier la transition ductile-fragile dans la neige et l'évolution conjointe des microstructures, il a fallu concevoir un protocole permettant d'observer cette transition.

Notre objectif est d'observer à l'échelle microscopique l'évolution de la neige en cours d'essai mécanique. En faisant cela, nous souhaitons mieux décrire et quantifier les modifications et les relier aux mécanismes prépondérants à cette échelle. Dans l'idéal, pour pouvoir généraliser les résultats, il est souhaitable de réaliser des essais avec des configurations variées : température (e.g., -30°C à -1°C), masse volumique (e.g., 50 à 300 kg/m^3), type de neige (e.g., Neige Récente à Givre de profondeur), etc.

Dans ce travail de thèse, nous avons réalisé des essais mécaniques sur de la neige selon plusieurs modes de chargement à l'aide de dispositifs expérimentaux spécialement conçus à cet effet, et nous avons suivi l'évolution de la microstructure de neige au cours des essais à l'aide de la tomographie à rayons X.

Nous avons réalisé deux types d'essais :

- des essais de fluage sur des échantillons cylindriques de neige (40 mm de hauteur et 40 mm de diamètre) durant plusieurs jours,
- des essais de compression à différentes vitesses de déformation imposées, sur des échantillons cylindriques de neige (16 mm de hauteur et 16 mm de diamètre) durant de 30 secondes pour les plus rapides à 3 jours pour les plus longs.

Les spécificités de nos essais mécaniques sur la neige sont liées à :

- la température négative de l'environnement de travail dans lequel va être placé le dispositif,
- l'encombrement réduit du dispositif pour être placé dans l'enceinte de la cabine du tomographe,
- les matériaux utilisés qui ne doivent pas perturber le passage des rayons X dans la zone à imager,
- la neige qui est un matériau thixotrope et fragile, le dispositif doit être modulable pour aider à une mise en place délicate des échantillons,

2 Conception d'un dispositif expérimental

Le Centre d'Étude de la Neige (CEN) possède une chambre froide permettant de contrôler la température de l'environnement. Il est possible d'atteindre une température de consigne allant jusqu'à -30°C . Les pièces, câbles, capteurs sont classiquement prévus pour des usages dans des conditions classiques (typiquement autour de 20°C). À des températures négatives, les câbles se rigidifient, les capteurs doivent être re-calibrés. Il faut vérifier les liaisons mécaniques à cause des variations dues aux dilatations thermiques. De plus, le passage d'un milieu froid et sec à un milieu extérieur à température et hygrométrie ambiante (e.g. sortie de la chambre froide vers le reste du laboratoire), est susceptible d'endommager les circuits électriques à cause de la condensation.

Un tomographe à rayons X (TomoCold, DeskTom130 spécifiquement adapté au froid, RX Solutions), placé dans cette chambre froide sera utilisé pour les caractérisations de nos échantillons. En tomographie à rayons X, les matériaux se caractérisent par leur atténuation. Cette atténuation dépend surtout de la densité et du numéro atomique du matériau. Afin d'obtenir des images utilisables, il est nécessaire que le porte-échantillon, – et plus globalement, tous les éléments qui seront traversés par les photons X – ne soit pas trop absorbant. De plus, la place dans la cabine de tomographie est restreinte : il faut que le dispositif ait un rayon d'encombrement minimal pour pouvoir se rapprocher de la source des rayons X et « zoomer » sur l'échantillon. En particulier, les dispositifs expérimentaux utilisés sont élancés pour que l'échantillon de neige soit dans le champ de vue, entre la source des rayons X et le capteur. Enfin, le dispositif est conçu de manière modulaire. Les échantillons peuvent être préparés dans une partie indépendante, ce qui permet leur stockage et facilite leur manipulation. Dans le cas de la presse instrumentée, une partie fixe vient s'installer dans la cabine de tomographie, et seuls les échantillons contenus dans les porte-échantillons sont changés.

2.2 Essai de fluage œdométriques

2.2.1 Principe de l'essai de fluage

Un essai de fluage est un essai dans lequel on applique une contrainte constante σ_0 et on observe l'évolution de la déformation au cours du temps $\varepsilon(t, \sigma)$. Un exemple de fluage naturel est l'écoulement des glaciers, qui fluent sous leur poids propre. Le tassement de la neige est également dû au fluage.

2.2.2 Conception de l'œdomètre

L'œdomètre utilisé est fabriqué en polyméthyl méthacrylate (PMMA). Il se compose de trois parties 1) le tube en PMMA transparent confinant la neige radialement, 2)

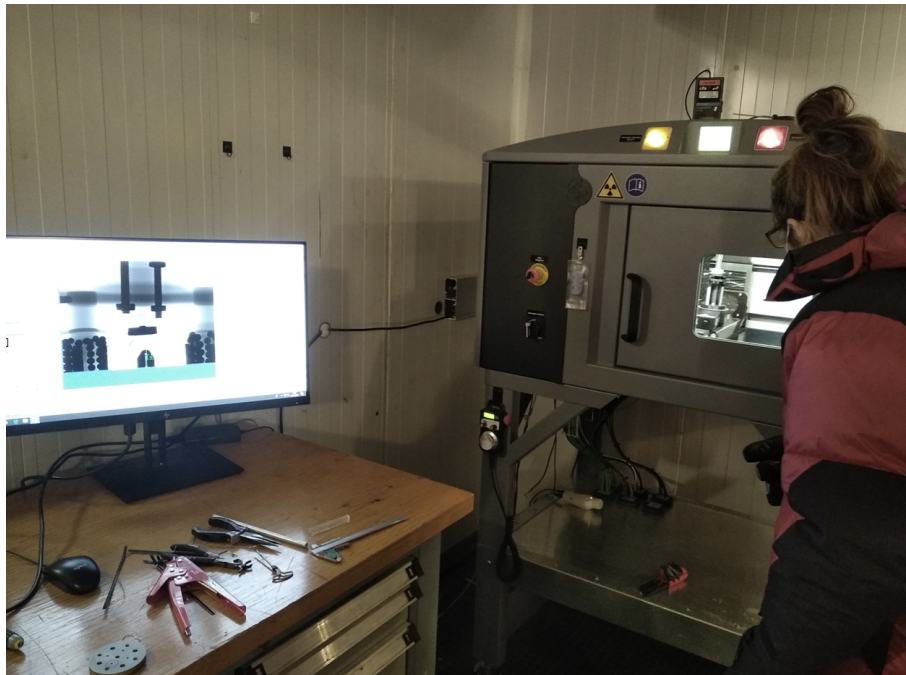


Figure 2.1 – Illustration du travail en chambre froide. Le travail en chambre froide se fait avec des vêtements adaptés. De gauche à droite on distingue, 1) le poste de travail à l'intérieur de la chambre, permettant de piloter et de visualiser le scan en cours, 2) des outils sur la table nécessaire au montage et démontage, 3) en arrière-plan, la cabine de tomographie au cours d'un scan et 4) l'opérateur vérifiant le déroulement dans la cabine.

2 Conception d'un dispositif expérimental

le support inférieur positionnant l'échantillon dans le champ de vu du tomographe, et 3) le piston, qui permet un guidage de la charge. La Figure 2.2 illustre par un schéma et une photo l'œdomètre.

Le choix du PMMA transparent pour fabriquer le tube repose sur deux critères : 1) La transparence du matériau permet d'observer l'échantillon de neige au cours de l'essai et ainsi de s'assurer visuellement du bon déroulement de l'essai (pas de fonte, pas de frottement évident, ...), 2) Le PMMA est peu absorbant pour les rayons X; ainsi, on n'affecte que peu la qualité des scans tomographiques. L'épaisseur du tube doit être suffisante pour reprendre la contrainte qui se reporte sur les bords; le PMMA ayant une résistance mécanique bien supérieure à la neige, et les forces mises en jeu étant relativement faibles, l'épaisseur du tube PMMA n'est pas une contrainte. Notre choix correspond aux standards vendus dans le commerce.

Une rehausse permet de positionner l'échantillon de manière optimale par rapport à la source de rayons X et de choisir la zone à scanner dans l'échantillon de neige. Afin de correctement transmettre la charge, le piston doit être assez haut et être bien guidé verticalement.

Afin de vérifier l'absence de frottements, nous avons comparé la masse du piston m_p à la charge mesurée lorsqu'il est placé dans le tube. En plus, pour augmenter l'hydrophobie et réduire la condensation de glace sur les parois nous avons utilisé du « fart liquide » destiné au fartage de ski. Son utilisation n'a pas amélioré les choses : nos pièces étant déjà bien ajustées, la fine couche de fart a, au contraire, créé un frottement. De plus, à cause de la forme des pièces, il était difficile d'appliquer le fart de manière homogène le long des pièces. Après avoir observé que l'air ne pouvait pas s'évacuer correctement et opposait une force au mouvement du piston, des rainures ont été ajoutées sur les bords du piston pour faciliter l'écoulement.

La vérification de l'encombrement du montage s'est faite en positionnant le tout comme lors des essais, et en observant via le tomographe les caractéristiques de zones à scanner. La Figure 2.2 illustre la position de l'œdomètre dans la cabine tomographique et les volumes obtenus par acquisition tomographique.

2.2.3 Caractéristiques des essais

Pour ces essais de fluage, la température de consigne de la chambre froide est de -12°C . La température mesurée à l'intérieur de la cabine du tomographe est de -8.5°C . Cette différence est due aux gradients thermiques au sein de la chambre froide, à l'enceinte fermée de la cabine de tomographie qui limite les échanges de chaleur par convection, et à la présence de résistances chauffantes pour permettre le bon fonctionnement de la source de rayons X.

En effet, le tomographe a été adapté par *RX Solutions* pour pouvoir être utilisé à

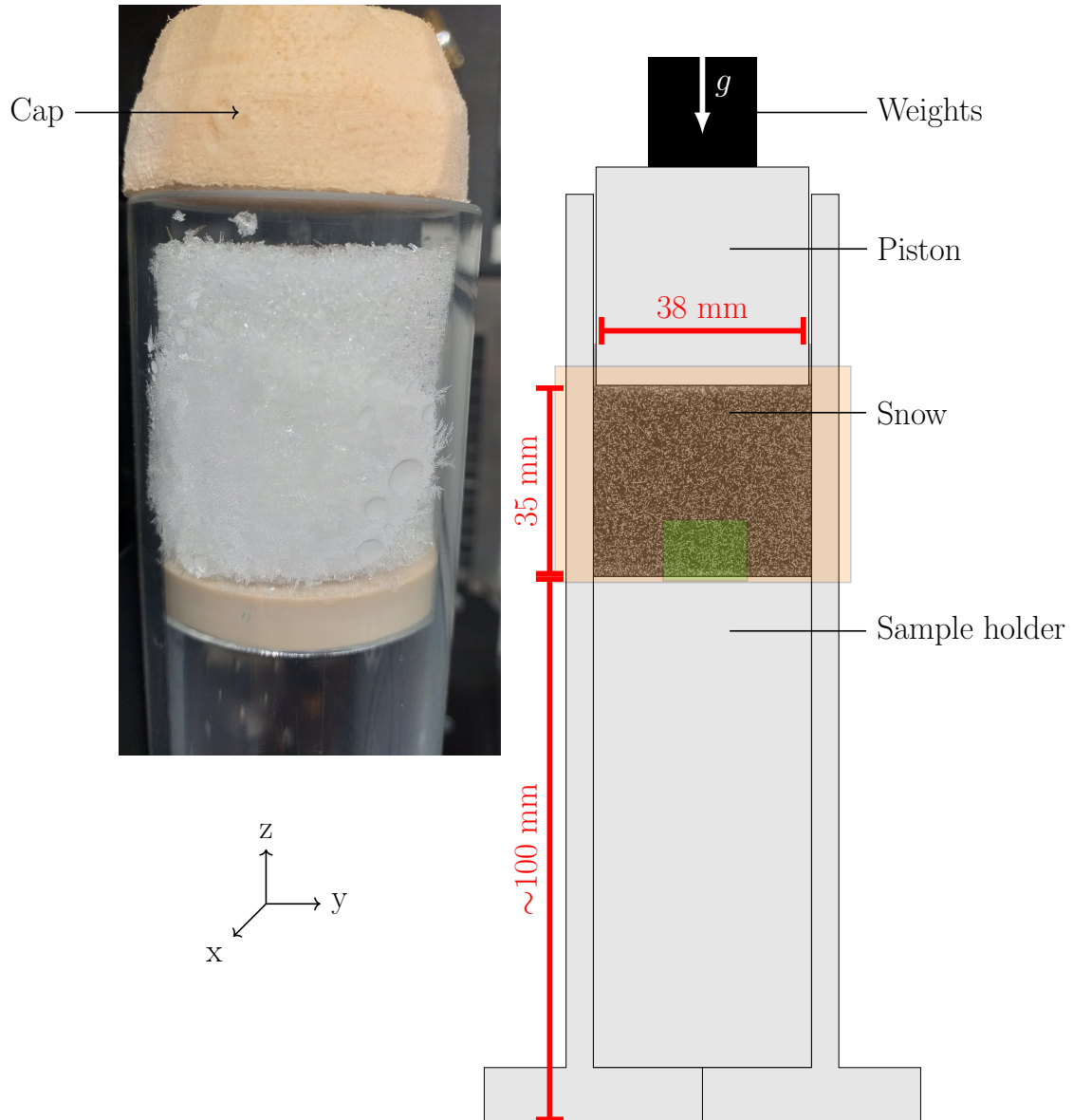


Figure 2.2 – À gauche, une photo de l'échantillon positionné dans l'oedomètre avant essai, le bouchon en partie supérieure permet d'éviter la sublimation. À droite le schéma de l'oedomètre. L'aire orange comprend l'ensemble de l'échantillon et correspond à la zone scannée lors des scans à faible résolution. L'aire verte correspond à la partie de l'échantillon imagée lors des scans à haute résolution.

2 Conception d'un dispositif expérimental

des températures négatives. Pour cela, la source a été isolée thermiquement et une résistance chauffante permet qu'elle reste tout le temps à une température supérieure à 20 °C. La résistance chauffante fonctionne par cycle, et lors de l'allumage des rayons X, la température de la source oscille entre 20 °C à 40 °C. Cette variation de températures n'affecte pas la taille du voxel, laquelle dépend de l'imageur, qui reste à température constante, à l'autre extrémité de la cabine de tomographie.

Quand on cherche à obtenir des volumes avec de hautes résolutions spatiales, l'échantillon doit être placé au plus proche de la source. À proximité de cette dernière, il faut vérifier que la température de l'échantillon reste négative et constante : pour cela, nous avons placé des sondes de température PT100 au sein d'un échantillon, sans chargement mécanique, afin de quantifier l'influence de la température de la source au cours d'une acquisition tomographique.

Le paramètre variable est la contrainte appliquée σ . Tous les autres paramètres tels que la température T , le type de neige m , le mode de chargement sont similaires entre les essais. Les contraintes choisies sont 0 kPa – correspondant à la phase isotherme non chargée, l'échantillon n'est soumis qu'à son poids propre, soit $g \times \rho_{neige} \times h_{echantillon} = 78$ Pa au bas de l'échantillon –, 2.1 kPa et 4.7 kPa. Les contraintes sont appliquées en posant un poids calibré sur le piston. Si l'on souhaite modifier la charge appliquée, pour des raisons d'encombrement dans la cabine du tomographe, il n'est pas possible de superposer les poids : il a donc fallu les échanger. Le remplacement de la première charge par la seconde a provoqué des changements dans la microstructure observée sur les scans tomographiques. Ces changements visibles sont localisés dans la partie supérieure et la partie inférieure de l'échantillon et n'ont pas semblé trop dommageables à l'exploitation de l'essai.

Le déroulement d'un essai est le suivant :

- préparation de l'échantillon : la neige récoltée sur le terrain puis stockée pendant plusieurs semaines à -20°C est tamisée directement au-dessus des dispositifs expérimentaux via un tamis de taille de maille 1.6 mm. Le remplissage se fait en minimisant les interruptions et le plus rapidement possible pour éviter la formation de différentes couches. Le porte-échantillon est rempli en moins de 5 minutes. Une fois le porte-échantillon rempli, le sommet est épousseté à l'aide d'un pinceau et arasé pour assurer la planéité et une bonne surface de contact avec le piston. L'arasage doit se faire rapidement, avant le frittage de la neige, pour éviter d'arracher des grains dans la partie supérieure.
- mise en position de l'échantillon : immédiatement après la préparation, les échantillons sont scellés avec un capuchon en polystyrène pour prévenir toute perte de masse via la sublimation. Ils sont ensuite mis en place dans la cabine de tomographie et la microstructure initiale de l'échantillon est scannée.
- phase isotherme : pendant 24h, l'échantillon est laissé en position à température constante et sans charge pour permettre le frittage des ponts qui ont été cassés lors du tamisage. À l'issue de la phase isotherme, la microstructure est à nouveau scannée grâce à la tomographie avant d'appliquer la contrainte.

- chargement de l'échantillon : immédiatement après l'application de la contrainte, un scan tomographique rapide est lancé : la déformation de l'échantillon est trop rapide pour obtenir un scan long exploitable. Tout au long du chargement, des scans de la microstructure sont obtenus, en ajustant la durée des scans à la vitesse de déformation courante. Pour plus de détails, voir 3.
- si besoin, changement de la charge de l'échantillon : pour un seul échantillon S2, nous avons augmenté la contrainte appliquée. La procédure et les difficultés dues au changement de la charge sont décrites dans le paragraphe précédent.

Les caractéristiques détaillées des essais de fluages sont présentées dans la Partie II.

2.2.4 Pistes d'améliorations

Les essais de fluages sont rudimentaires, les principaux axes d'amélioration concernent l'instrumentation :

- améliorer la méthode d'application de la charge : l'utilisation de masses calibrées rend l'expérience simple, mais le jeu de masses à notre disposition limite les valeurs utilisables et la granularité d'icelles. Afin de mieux explorer la réponse mécanique, il faut être capable d'appliquer des valeurs de chargement de manière continue et sur une plus grande plage de valeurs. Une première solution est de construire une presse permettant un pilotage en force, une seconde solution est d'appliquer la charge à l'aide de fluide tel que l'eau ou le sable, permettant une meilleure granularité dans le choix des charges.
- ajouter un contrôle de la température au cours de l'essai, au sein de l'échantillon : nous avons observé des variations de températures dans la cabine de tomographie et à proximité des échantillons, au cours des essais. Les propriétés de la neige sont fortement dépendantes de la température, il semble donc important de mieux suivre cette quantité.
- réaliser une étude complète pour caractériser la température dans le tomographe, et dans l'échantillon prenant en compte les résistances chauffantes proches de la source et le flux d'air dans la cabine. L'objectif est d'être capable de mieux prédire les températures effectives des échantillons à partir des températures de consignes et des paramètres de l'essai.

2.3 Essai de chargement à vitesse imposée

L'objectif de l'essai à vitesse imposée est d'observer la dépendance de la réponse mécanique de la neige à la vitesse de déformation, en particulier, d'encadrer en terme de vitesse de déformation, la transition entre le régime ductile et le régime fragile,

afin de l'observer. Pour cela, on cherche à réaliser des essais dans lesquels seule la vitesse de déformation change.

2.3.1 Principe de l'essai à vitesse imposée

Un essai à vitesse imposée consiste à imposer la vitesse de déplacement $v = \Delta l / \Delta t$ qui se traduit en une vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ et à mesurer la contrainte au cours du temps σ ($\varepsilon = t \times \dot{\varepsilon}$). Quand le critère d'arrêt est atteint, la déformation finale ε_f est maintenue constante. On assiste alors au phénomène de relaxation, à une déformation fixée ε_f les contraintes diminuent.

L'essai à vitesse de déformation imposée est un essai de caractérisation mécanique de la neige. Il n'y a pas de situation réelle qui s'y rapporte exactement. Dans notre cas, l'objectif est de faire des essais de compression à vitesse constante, pour plusieurs gammes de vitesses, tout autre paramètre constant (température T , type de neige, etc).

2.3.2 Conception d'une presse mécanique

Pour effectuer ces essais, nous avons conçu un dispositif expérimental adapté. Le processus de conception est un processus itératif. Chaque élément apporte des contraintes nouvelles à différentes étapes de la conception. Dans notre travail, le moteur a été un élément central du processus car il en existe peu avec l'encombrement minimal requis par la cabine de tomographie et dans la plage de vitesses qui nous intéresse.

La conception de la presse est ici décrite de manière quasiment chronologique, avec quelques entorses pour plus de clarté. La Figure 2.3 présente la presse positionnée dans le tomographe.

Le moteur utilisé est un PZA12 de la marque *Newport*. C'est un moteur à déplacement linéaire avec une course allant jusqu'à 12.7 mm. La force axiale maximale est de 50 N et la vitesse de déplacement maximale de 0.2 mm s^{-1} . 7 vitesses sont disponibles, encodées en dur dans le moteur. Il se pilote, au choix à l'aide d'un contrôleur manuel (utile pour la mise en place) ou d'une commande envoyée par un port série. La fiche technique du moteur est disponible en Annexe A.1. Nous avons sélectionné ce moteur pour son faible encombrement, sa simplicité d'utilisation et la longueur de sa course. La position du piston est communiquée par le moteur, ce qui permet de remonter à la déformation ε puis à la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$,

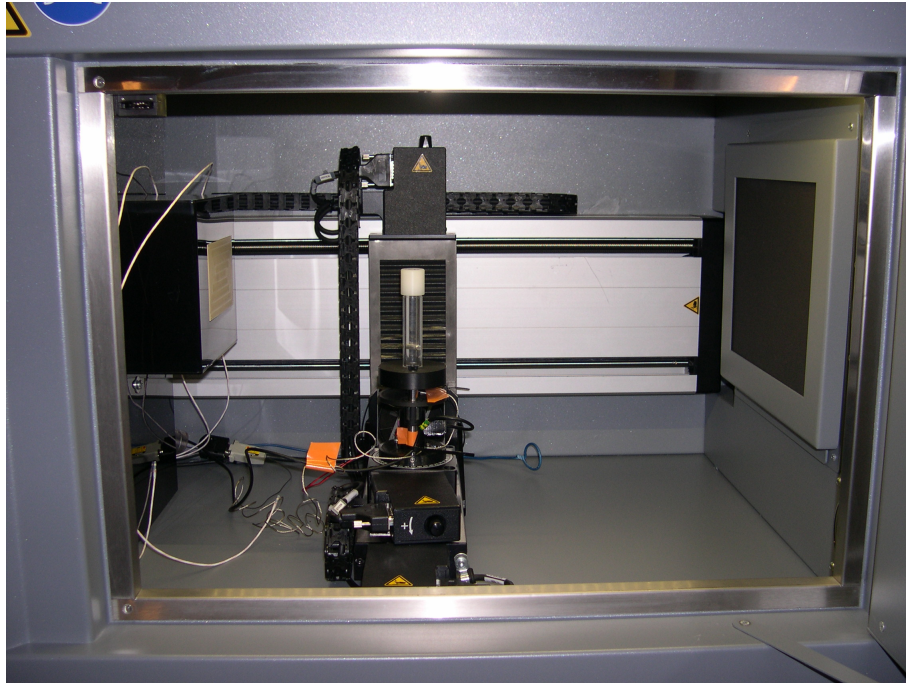


Figure 2.3 – La presse est positionnée, câblée et fixée sur la platine de rotation dans la cabine du tomographe. Un porte-échantillon est vissé sur la partie supérieure de la presse.

Le corps de presse est fabriqué en impression 3D. L'impression 3D permet de façonner des formes de pièces complexes de manière peu coûteuse ; cela a permis d'essayer plusieurs conceptions avant de converger vers la forme finale. Le corps est composé de deux parties fixes reliées par deux colonnes en aluminium. La partie fixe « basse » possède un emplacement pour fixer le moteur et des trous pour visser la presse à la platine rotative du tomographe. La partie « haute » possède deux encoches dans lesquelles se fixent et se vissent les colonnes de guidages, et un pas de vis dans lequel viennent se visser les porte-échantillons avant l'essai. La hauteur des colonnes de guidage, égale à la distance entre les deux parties fixes, est contrainte par la place disponible dans le tomographe : pour approcher l'échantillon proche de la source, afin d'obtenir une meilleure résolution spatiale, il est nécessaire que la hauteur des colonnes de guidages soit inférieure à 11 cm. Cette hauteur réduite permet au bas encombrant de la presse (moteur, capteur, etc.) de passer en dessous de la cabine contenant la source des rayons X (voir Figure 2.3). Un plateau mobile est attaché aux colonnes de guidage par des roulements à billes, qui permettent le coulissement en minimisant les frottements du plateau. Le capteur de force est positionné sur ce plateau et ne mesure donc pas ces frottements.

À basse température, les lubrifiants et les dilatations thermiques différentielles peuvent gêner le coulissement sans frottement. La conception et le montage sont réalisés pour minimiser ces frottements et leur influence sur les résultats.

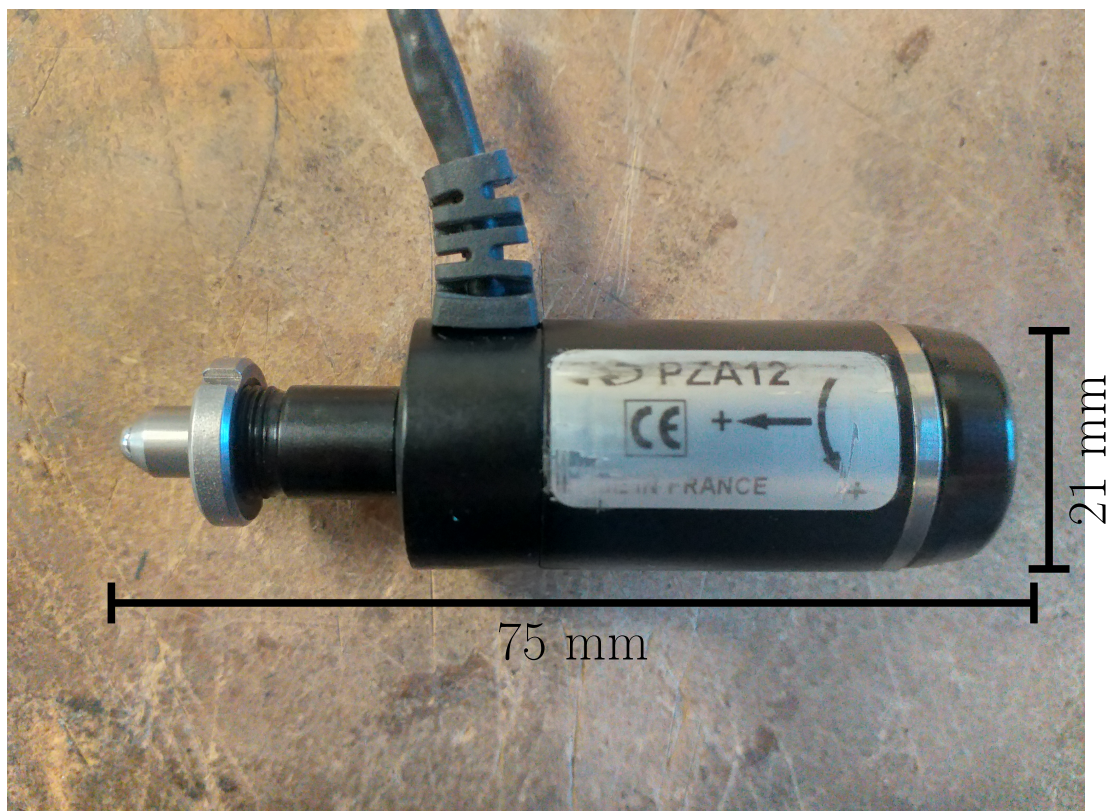


Figure 2.4 – Moteur à déplacement linéaire utilisé dans la presse. Le piston est en position basse. La taille du moteur et sa fiche électrique conditionnent la conception du corps de la presse.

Les porte-échantillons sont conçus pour être modulables et facilement interchangeables, en venant les visser dans la partie fixe supérieure de la presse. Cela permet de préparer les échantillons par lot. Un porte-échantillon se décompose en trois parties : 1) le tube creux avec des pas de vis aux extrémités, 2) le piston fixé dans le tube par une vis papillon et 3) le bouchon vissable en partie supérieure.

Des capteurs de force et de température sont utilisés pour mesurer en permanence plusieurs quantités : la force F de laquelle on obtient la contrainte σ au cours du temps t et la température T .

Les capteurs de force sont livrés avec des certificats d'étalonnage qui garantissent leur fiabilité et autres informations quant à l'erreur de mesure. Toutefois, ces calibrations sont réalisées à des températures classiques de pression et de température – 1 atm et 25 °C. Afin de s'assurer du bon fonctionnement de ceux-ci aux températures qui nous intéressent, nous les avons calibrés à l'aide de masses calibrées. Le capteur de force miniature a été choisi pour sa taille de 9.5 mm de diamètre, son étendue de mesure de 0 N à 50 N et il est utilisable jusqu'à –51 °C. Les capteurs de température sont des PT100 sans gaine de protection pour les miniaturisés, et ont été calibrés en les

plaçant dans une pièce à température contrôlée et à proximité d'autres thermomètres pour confirmer la mesure.

Une calibration du capteur de force est présentée dans la Figure 2.5. Pour chaque poids, on procède à 3 mesures. Une fois l'ensemble de la gamme de poids parcouru, on vient vérifier la linéarité et les valeurs extrêmes mesurées. On remarque qu'une fois un poids posé, il faut attendre que la valeur se stabilise : cela est dû aux oscillations provoquées par la manipulation manuelle qui est imparfaite. Les capteurs peuvent être sujets à la dérive, il est nécessaire de procéder à une calibration régulièrement. Pour faire le lien entre les valeurs mesurées, on stocke dans les méta-données de chaque essai les informations nécessaires pour convertir le signal électrique en V en la force en N.

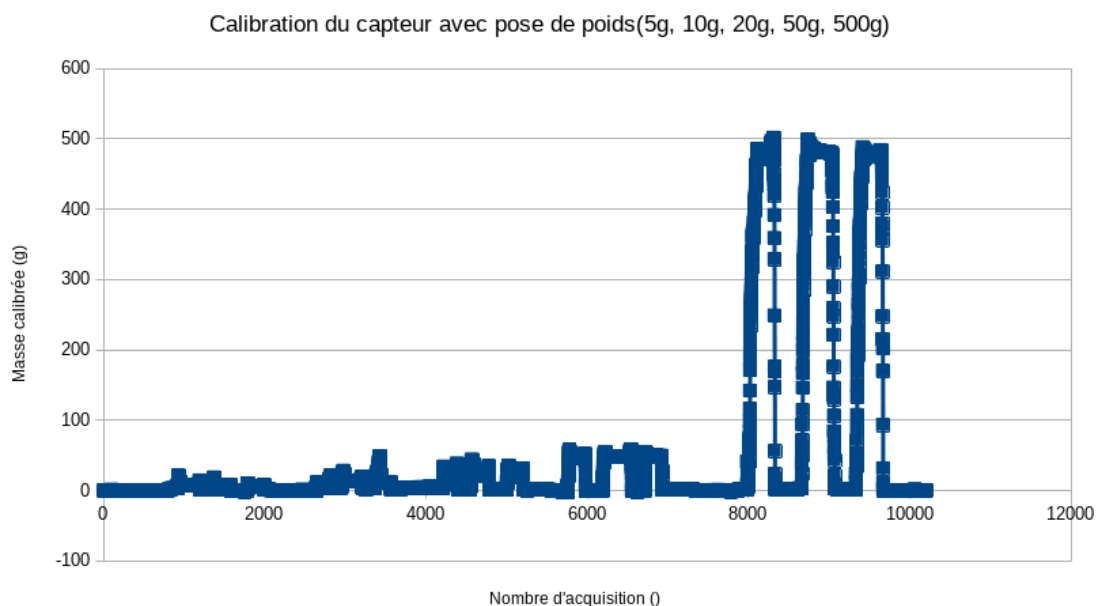


Figure 2.5 – Mesure de la masse par le capteur lors de l'étape de calibrage. Pour chaque masse, 3 mesures sont réalisées.

La contrainte d'arrêt de l'essai a été fixée à une valeur de 297 kPa. Sur les essais à haute vitesse de déformation, on observe que la contrainte dépasse ce seuil : cela est dû au fait que la réactivité du montage n'a pas permis de couper immédiatement le moteur. La déformation a donc continué pendant quelques instants (< 1 s) ce qui a entraîné un dépassement de la contrainte d'arrêt. L'étendue de la surcharge n'a pas pu être mesurée, mais a dépassé 305 kPa.

Fort de l'expérience acquise pendant les campagnes expérimentales, nous avons effectué des modifications pour aboutir à une version améliorée. Cette version est visible à la Figure 2.6. Ainsi, le corps de la presse est plus rigide. Les colonnes de guidages, sont maintenant indépendantes du report de charges et 4 colonnes de maintien en acier servent à la rigidification de la structure. Nous avons ajouté un capteur de déplacement laser pour suivre en temps réel la position, et donc le

2 Conception d'un dispositif expérimental

déplacement. La nouvelle pièce usinée reste compatible avec le moteur, les jeux de porte-échantillons et les capteurs. La dernière version n'a pas été testée en condition réelle dans le cadre de cette thèse.



Figure 2.6 – La dernière version de la presse a été usinée et possède plus de colonnes de guidages. La presse est ainsi plus rigide. Le poids supplémentaire du plateau de chargement que devra reprendre le moteur a été calculé pour ne pas être rédhibitoire. Il est aussi prévu de rajouter un capteur de déplacement laser pour une mesure plus précise.

2.3.3 Conception du logiciel de pilotage

Pour contrôler la presse, nous avons conçu une interface logicielle. La conception a été faite par Alexis BUFFET (INRAE), à l'aide du langage LabVIEW de National Instruments. Le programme s'exécute sur un ordinateur avec système d'exploitation Windows. Le logiciel permet de choisir la vitesse $v(m/s)$ de déplacement du piston, une durée de chargement et/ou une valeur maximale de tension V limite. Sur l'interface, on peut observer l'évolution de la tension V du capteur de force au cours du temps t en temps réel. Les valeurs de temps t , tension V , vitesse $v(\mu - steps/s)$ et position $y(steps)$ sont sauvegardées dans un fichier à une fréquence de 50 Hz.

On remarque que le moteur ne parvient pas à communiquer sa position à une telle fréquence, on doit donc parfois interpoler les valeurs intermédiaires.

2.3.4 Caractéristiques des essais

La préparation des échantillons a été faite de manière similaire à la préparation pour les essais de fluage, en tamisant directement au-dessus des porte-échantillons. On note plusieurs différences. La taille des échantillons est plus petite (14 mm de diamètre et 14 mm de hauteur), ce qui les rend plus sujets aux effets de bords : l'arasage en partie supérieure est plus critique. Les échantillons sont préparés en un seul passage, en tamisant un bloc de neige au-dessus d'eux à l'aide d'un tamis de taille de maille 1.6 mm. Les échantillons sont ensuite tous arasés. L'arasage doit être fait de manière précautionneuse pour 1) ne pas endommager la partie supérieure de l'échantillon en entraînant des grains, et 2) ne pas toucher les autres échantillons à proximité (voir Figure 2.7). On nettoie ensuite à l'aide d'un pinceau fin le pas de vis et tout endroit où les grains de glace sont susceptibles de gêner la bonne mise en place mécanique. Enfin, le bouchon est vissé en partie supérieure. Au total, la préparation prend environ 15 minutes. Les échantillons sont ensuite stockés dans leur boîte isotherme à -20°C pendant 72 heures pour leur permettre de fritter et de réacquérir des résistances mécaniques. À l'issue de ces 3 jours, les échantillons sont déplacés à -50°C pour stopper l'évolution de la microstructure. Avant l'essai, l'échantillon à tester est sorti du congélateur à -50°C et est vissé sur la presse, dans la cabine tomographique. Dans un premier temps, le piston du moteur est mis en contact avec le piston en PMMA du porte-échantillon. On retire ensuite la vis papillon servant à immobiliser le piston en PMMA puis on applique une précharge de 2 kPa afin de s'assurer d'un état initial identique pour tous les échantillons. Une fois la précharge atteinte, le moteur est immobilisé, et on lance une acquisition tomographique de la microstructure initiale. Pendant ce temps l'échantillon a pu complètement thermaliser. Une fois l'acquisition des microstructures initiales terminée, on commence le chargement mécanique à une vitesse constante. Pour les essais à haute vitesse de déformation ($\dot{\epsilon} > 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) des radiographies simples sont acquises à raison de 5 images par secondes. Pour les essais à faible vitesse de déformation ($\dot{\epsilon} < 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) des scans tomographiques complets ont été réalisés à intervalles réguliers. L'essai se termine lorsqu'on atteint la contrainte maximale, le piston s'immobilise et maintient l'échantillon dans une déformation constante. À la suite de quoi, on observe la relaxation de l'échantillon, et l'on réalise une acquisition tomographique complète de la microstructure finale au cours de la relaxation. Après quoi, l'échantillon est retiré et la mesure arrêtée.

Trois séries d'essais ont été réalisées ainsi. Les caractéristiques détaillées des échantillons et des essais sont disponibles dans la Partie III.

Les données brutes se composent d'un fichier au format *csv* de quatre colonnes comportant la date, la tension électrique du capteur de force, la vitesse du moteur et le nombre de pas du moteur, à la fréquence de 50 Hz. Chaque fichier de données

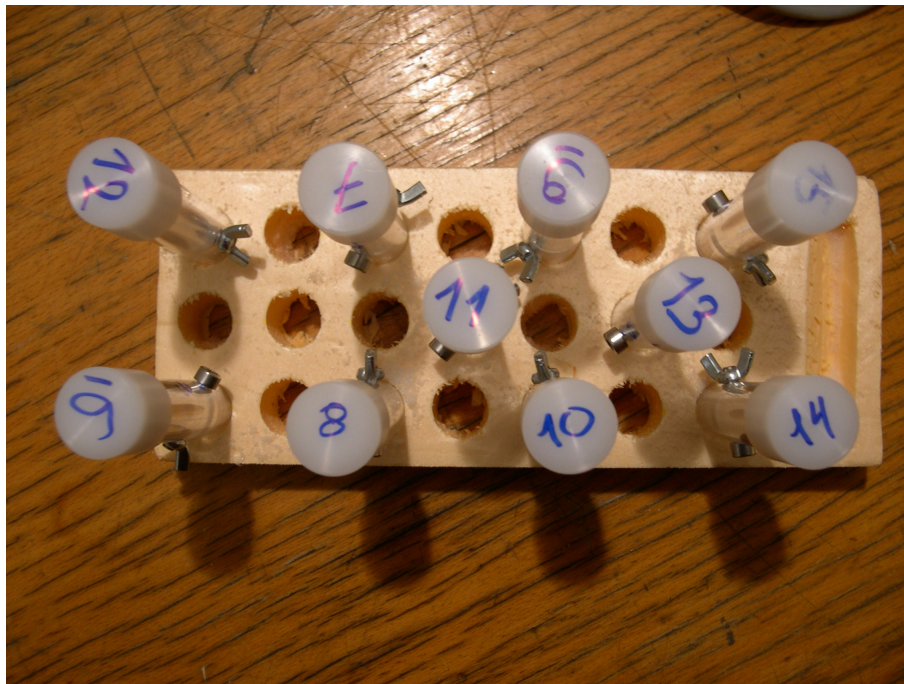


Figure 2.7 – Les échantillons sont placés dans un support lors de leur préparation. Chaque composant (tube, piston, bouchon) des portes-échantillons est numéroté pour l'identifier. Les porte-échantillons sont ensuite placés dans leur boîte en polystyrène. La boîte fermée en polystyrène permet d'assurer stabilité et homogénéité thermique aux échantillons.

brutes s'accompagne d'un fichier de méta-données au format *yaml*. Ce fichier de méta-données contient toutes les informations concernant l'essai : il permet de passer des données brutes aux données exploitables. La description complète du fichier de méta-données est en annexe Listing 1.

2.3.5 Pistes d'améliorations

Une seconde version de la presse a été fabriquée et testée, mais n'a pas servi aux travaux présents dans cette thèse. Dans cette seconde version, on a rajouté un capteur laser de déplacement pour un contrôle plus simple de la position en temps réel. De plus, le corps de presse, qui n'est pas dans le champ de vue, a été usiné en aluminium, et des colonnes ont été ajoutées pour améliorer la raideur du montage. Cette seconde version a été pensée pour rester compatible avec les porte-échantillons précédents.

Voici quelques idées pour améliorer les futures versions de la presse :

- utilisation d'un logiciel libre et non propriétaire : *LabVIEW* est un logiciel distribué par *National Instruments*, ce dernier permet de créer des interfaces aux fonctionnalités complexes sans trop de connaissances en programmation, la majorité des pièces sont compatibles. En contrepartie, le développement,

l'utilisation de certains modules et la création d'un exécutable requièrent l'achat d'une licence et l'utilisation d'un poste informatique compatible.

- pilotage de la partie logiciel via une *RaspberryPi* ou *Arduino* : le contrôle actuel de la presse est fait via un ordinateur. Bien que portable, ce dernier reste encombrant dans le cadre de certaines manipulations. Ma suggestion serait de migrer le pilotage sur des micro-ordinateurs. Ce changement doit évidemment se faire conjointement au changement de la partie logicielle afin de vérifier la compatibilité.
- contrôle à distance, utilisation d'un dongle et communication sans-fil : dans notre version, le contrôle du moteur et l'alimentation des différents composants se font de manière filaire, ces fils sont amenés à tourner autour de la presse au cours d'un scan tomographique. À température négative, les câbles deviennent plus rigides, ont des difficultés à s'enrouler correctement et peuvent amener des contraintes sur le dispositif expérimental. L'utilisation d'une technologie sans-fil et d'une alimentation située à l'intérieur même de la cabine de tomographie permettrait de faciliter ces essais. L'utilisation de câbles adaptés au froid est une autre possibilité.
- utilisation d'un moteur pas à pas, avec réducteurs : un inconvénient du moteur à déplacement linéaire est le manque de granularité des vitesses que l'on peut imposer ainsi que la difficulté à connaître la position vraie. L'utilisation de réducteurs permet aussi de déporter le moteur et d'envisager un gain de place. Le choix du type de réducteur dépend de ces facteurs.
- ajout d'un capteur de force en partie supérieure : pour le moment, on dispose d'un unique capteur de force. En utilisant deux capteurs de forces situés aux extrémités de l'échantillon, on pourra mesurer les éventuels frottements et dissipation et si la fréquence d'acquisition est suffisante, quantifier certains effets dynamiques.
- plusieurs postes informatiques sont utilisés au cours de nos expériences : le poste d'imagerie tomographique et le poste de contrôle de la presse. Le temps de ces deux ordinateurs n'est pas forcément synchronisé. La synchronisation temporelle pour l'horodatage des fichiers et données doit être fait manuellement. Pour résoudre ce problème, il faut soit réaliser toutes les opérations sur une seule machine, soit synchroniser régulièrement les différentes machines. Ce dernier point nécessite que les machines partagent un réseau commun.

3 Utilisation de la tomographie

Durant l'acquisition tomographique, la source émet des rayons-X qui traversent l'échantillon pour venir frapper le détecteur situé derrière. Les photons traversant sont comptés et permettent de connaître l'absorption sous un angle de vue donné, qui est résumée par une image en niveaux de gris. L'échantillon placé sur une platine rotative tourne légèrement et on obtient une nouvelle projection, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'objet à scanner ait été vu sous un nombre de vues suffisant. Ensuite, l'ensemble de projections est traité par un algorithme de reconstruction et permet d'obtenir un volume 3D représentant l'intérieur du matériau scanné (la distribution 3D du coefficient d'atténuation). Dans le même temps, des artefacts liés à un positionnement géométrique imparfait, au faisceau conique de rayons X, etc. sont corrigés afin d'obtenir un volume le plus net possible.

Le tomographe est fourni avec son logiciel de pilotage, d'acquisition de scans et de reconstruction par *RX Solutions*. La source est un tube à vide scellé : un faisceau d'électrons vient percuter une cible en tungstène, libérant de l'énergie sous forme de chaleur et de rayonnement X. La durée de vie de la source est de 3000 heures environ. Le tomographe a été adapté pour le fonctionnement en chambre froide.

3.1 Acquisition tomographique

3.1.1 Description des paramètres d'acquisition

Pour réaliser une acquisition tomographique, il existe de nombreux paramètres à choisir, qui dépendent des matériaux à scanner, de la qualité et de la résolution de l'image voulue et de la durée d'un scan. Il y a un compromis à faire entre la qualité de l'image et le temps de scan. Les paramètres sont de trois natures : 1) les paramètres de la source de rayons-X, 2) les paramètres de l'imageur, et 3) les paramètres d'acquisition. On discute ci-dessous des paramètres utilisés.

Les paramètres propres à la source régissent l'émission de rayons-X. On distingue :

- la tension d'accélération des photons qui est comprise entre 40 kV et 130 kV (ie, 20 keV à 65 keV en moyenne pour une source polychromatique). Plus exactement, la tension contrôle le spectre d'énergie des photons émis. Plus les

matériaux traversés sont absorbants, plus la tension d'accélération doit être élevée. Dans notre cas, on utilise une tension d'accélération relativement faible de 50 kV pour la majorité de nos scans. Le contraste de matériaux peu denses, comme l'air et la glace, est meilleur aux faibles énergies.

- l'intensité du courant qui régit le nombre de photons émis. Sa valeur est comprise entre $0\ \mu\text{A}$ à $300\ \mu\text{A}$. Plus le flux est élevé, plus l'imageur reçoit un nombre important de photons, et donc produit des images de meilleure qualité. Un flux plus important tend à améliorer le rapport signal-sur-bruit, ce qui est bénéfique pour les post-traitements. Il faut toutefois faire attention à ne pas saturer l'imageur. Dans notre cas, on utilise une intensité du courant de filament entre $160\ \mu\text{A}$ à $300\ \mu\text{A}$.
- La puissance W est le produit entre la tension d'accélération et l'intensité. On jouera sur la valeur de l'intensité quand on désire modifier la puissance. La puissance maximale est 39 W.
- le mode focal permet de limiter la taille de foyer de la source de rayons-X. Une faible taille de foyer est nécessaire lorsque la résolution des images est forte pour obtenir des images nettes. En diminuant la taille du foyer la puissance maximum est aussi réduite. Pour obtenir des images nettes, il faut respecter la règle empirique : la résolution de l'image en microns doit être égale ou supérieure à la puissance des rayons-x en watts. Par exemple, pour un volume de résolution $7\ \mu\text{m}$ on choisira une puissance égale ou inférieure à 7 W.

Les paramètres de l'imageur sont :

- le mode de l'imageur qui permet de définir la taille du pixel (i.e., binning) et la sensibilité du pixel. Selon le mode utilisé, les dimensions des images projetées et le nombre d'images par seconde maximum changent. Nous choisissons toujours le mode permettant la plus petite taille de pixel (i.e., la meilleure résolution).
- le nombre d'images par seconde ou « framerate » fps , qui est l'inverse du temps d'exposition. Plus le nombre d'images par seconde est faible, plus nombreux sont les électrons à atteindre l'imageur. Attention donc à la saturation de l'imageur. Il influe sur le temps total d'un scan et le contraste des projections. C'est une forme de moyennage physique.
- le nombre d'images par projections $\#avg$, qui permet de réaliser plusieurs images qui seront moyennées afin d'obtenir une seule projection. C'est une forme de moyennage numérique.

L'imageur plan est un capteur dont la réponse dépend fortement des conditions de travail (paramètres de la source, mode de l'imageur, ou encore pression et température de l'imageur). Il est nécessaire de procéder régulièrement à des calibrations. La calibration au noir se réalise les rayons-X éteints et permet d'annuler le bruit de fond des images. La calibration du gain se réalise les rayons-X allumés sans échantillon dans le champ de vue et permet de normaliser la réponse des pixels de l'imageur. Malgré le respect des consignes des étapes de calibration (i.e., temps d'allumage et temps d'extinction des rayons-X), il apparaît rapidement une dérive de la mesure de l'imageur. Cette dérive est connue et semble due à la température négative à laquelle opère le tomographe. La dérive ne semble pas trop gênante puisque nous obtenons des images bien résolues et facilement segmentables. Dans certains cas, nous enchaînons

des scans à haute résolution et à basse résolution. Dans un environnement parfait, il est nécessaire de refaire une calibration à chaque changement de résolution. Cela demande malheureusement trop de temps ; nous nous contentons donc de calibrer l'imageur pour les scans à haute résolution.

Enfin, les autres paramètres définissant l'acquisition tomographique sont :

- le facteur de zoom, ou la taille de voxel. Plus la taille de voxel est petite, plus l'image est résolue. La résolution est meilleure quand l'échantillon est proche de la source. En contrepartie, le volume physique scanné est lui plus réduit.
- le nombre d'images prises pendant l'acquisition N_{frames} . Le logiciel recommande automatiquement l'optimal en fonction des autres paramètres. Une règle empirique consiste à faire un nombre de projections égal au nombre de pixels dans la largeur de l'image. Quand il augmente, la qualité de l'image reconstruite et le temps d'acquisition augmentent.
- il existe plusieurs méthodes d'acquisitions. On choisira toujours une acquisition en continu (pas d'immobilisation de la platine lors de la prise de vue) en un seul tour et avec la prises d'images de références (à la fin de l'acquisition, une trentaine de projections sont prises et permettent de quantifier le mouvement de l'ensemble pendant la durée du scan).
- le centrage virtuel. Un léger défaut de centrage invisible à l'œil nu, devient visible à la tomographie du fait de la haute résolution. Pour corriger cela, et faciliter plus tard le traitement d'images, nous utilisons le centrage virtuel, qui permet de s'assurer que le centre de l'échantillon est au centre de l'image reconstruite. Pour obtenir la valeur de centrage virtuel, nous faisons un scan rapide à faible résolution duquel nous extrayons la distance au centre du volume (cf Figure 3.1).

3.1.2 Choix des paramètres

Le premier critère choisi est la résolution spatiale des images. Pour la maximiser, il faut placer l'échantillon le plus proche possible de la source. Nous réalisons des essais ininterrompus et effectuons des scans pendant ces essais, il y a donc une transformation de l'échantillon au cours du scan. Pour obtenir des acquisitions exploitables, le mouvement entre le début et la fin du scan doit être limité. Autrement dit, plus la vitesse de déformation est importante, plus le temps de scan doit être court. On fait donc un compromis entre le temps du scan et la qualité du scan.

La durée d'un scan d_{scan} est régie par l'équation 3.1.

$$d_{scan} = N_{frames} \times \#avg / fps \quad (3.1)$$

avec N_{frames} le nombre d'images d'un scan, $\#avg$ le nombre d'images utilisées pour une projection et fps le nombre d'images par seconde.

La qualité d'un scan ne possède pas de définition formelle. On parle souvent de résolution effective, ie, la résolution des plus petites caractéristiques mesurables, mais

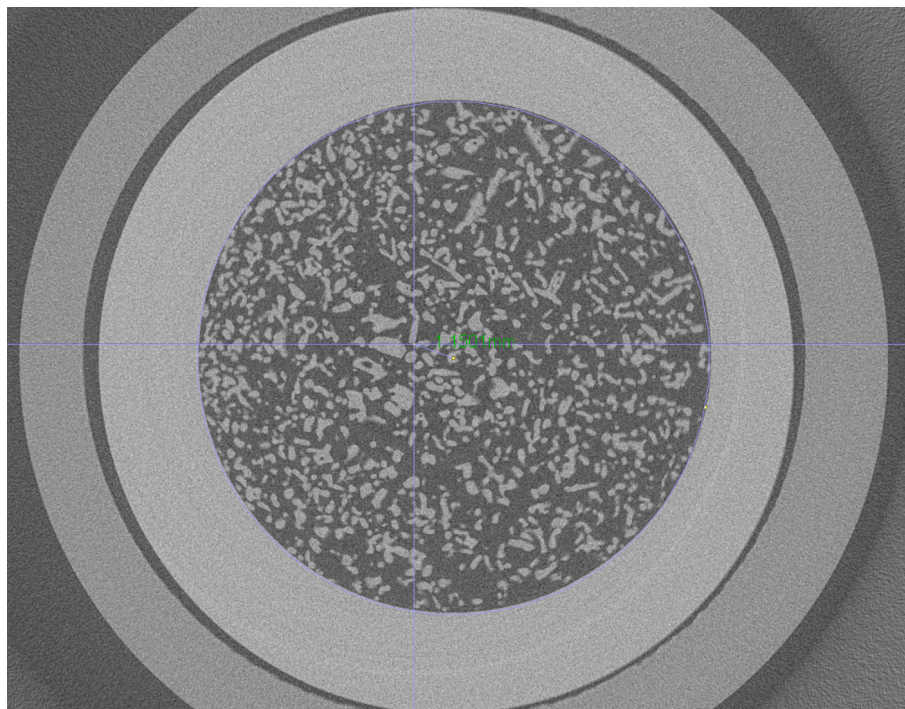


Figure 3.1 – Exemple d’un premier scan tomographique rapide (2 minutes) pour déterminer le décentrage.

elle ne possède pas de définition objective. On détermine donc la qualité d’un scan subjectivement.

Pour chaque scan effectué, le logiciel sauvegarde l’ensemble des paramètres du scan au format ‘XML’ dans un fichier nommé ‘restore.macro’. Le logiciel permet aussi de relire ces fichiers ‘restore.macro’ afin de recharger les paramètres des scans précédents pour les suivants. Cette fonctionnalité permet ainsi la similarité des paramètres d’un scan au suivant.

3.1.3 Automatisation des scans

La durée des essais peut aller de quelques secondes à quelques jours. Même si la durée de l’essai est longue, il est nécessaire que les scans tomographiques soient faits régulièrement, y compris hors des périodes de travail (nuit, week-ends et jours fériés). Le logiciel de pilotage de *RX Solutions* ne permet qu’une automatisation rudimentaire. En revanche, il dispose d’une API¹ en *javascript*.

J’ai développé un script en *javascript* pour permettre une automatisation des acquisitions qui conviendrait à nos besoins : 1) pouvoir contrôler le temps d’attente entre deux scans, 2) que le script puisse réaliser des scans avec des paramètres variables

1. Application Programming Interface

au cours du temps, et 3) acquérir des radiographies entre les scans quand cela est nécessaire. J'ai donc implémenté ces fonctionnalités dans un script en *javascript*.

3.2 Reconstruction des projections

Une fois le scan terminé, les projections et les projections de référence sont sauvegardées et vont permettre la reconstruction du volume 3D à l'aide d'algorithmes mathématiques. Le processus de transformation des projections sous différents angles en volume 3D possède quelques options :

- le volume par défaut à reconstruire est l'ensemble du volume scanné. Toutefois, il est rare que l'ensemble du volume soit correctement résolu. Il est donc souhaitable de sélectionner le sous-volume d'intérêt à reconstruire.
- le spot est la position d'origine des rayons-X. Ce dernier peut bouger ou se déformer au cours du temps, engendrant du flou dans l'image reconstruite. La correction de ce dernier se fait à l'aide des projections de références.
- la géométrie du montage tomographique peut aussi mener à des artefacts d'imagerie. La Figure 3.2 présente les différents mouvements possibles. Pour procéder à des reconstructions, il y a un grand nombre d'hypothèses sur la géométrie de chacun des éléments du montage (source, platine, échantillon, imageur). De manière systématique, nous appliquons une correction sur « l'offset X » comme préconisé par la documentation. Ce paramètre correspond à un décalage horizontal du centre de l'échantillon, de l'axe centre source - centre de l'imageur.
- les « rings artefacts » sont des cercles qui apparaissent sur les images reconstruites. Ces artefacts d'imagerie sont particulièrement visibles sur les coupes dans le plan de rotation de la platine tomographique. Ils ont pour origine les différences de sensibilité entre chaque pixel de l'imageur. Pour les corriger, nous appliquons un filtre de correction disponible dans le logiciel de reconstruction. La valeur de paramètre de lissage est choisie telle que les coupes soient visuellement satisfaisantes, puis appliquée à toutes les images de la même série. De manière générale, un filtre de 30 px est appliqué sur les images haute-résolution.
- l'algorithme de reconstruction utilisé est une « Rétroprojection filtrée » (« Filtered BackProjection » ou FBP). Il existe différentes classes et algorithmes de reconstruction. Le choix repose sur un compromis entre temps de calcul, sensibilité au bruit et hypothèses suffisamment générales. La méthode FBP est une méthode analytique rapide mais qui requiert un nombre important de projections équiréparties spatialement.

Les volumes reconstruits sont enregistrés au format *tiff* ou *raw*. Ce sont des volumes en niveau de gris codé sur 16-bit. À chaque voxel est associé une valeur entière entre 0 et $2^{16} - 1 = 65535$ représentant l'atténuation aux rayons-X du matériau en un point de l'espace.

De la même manière que pour les paramètres d'acquisition, les paramètres de

3 Utilisation de la tomographie

reconstruction peuvent être facilement chargés depuis un fichier au format *XML* nommé *unireconstruction.xml*.

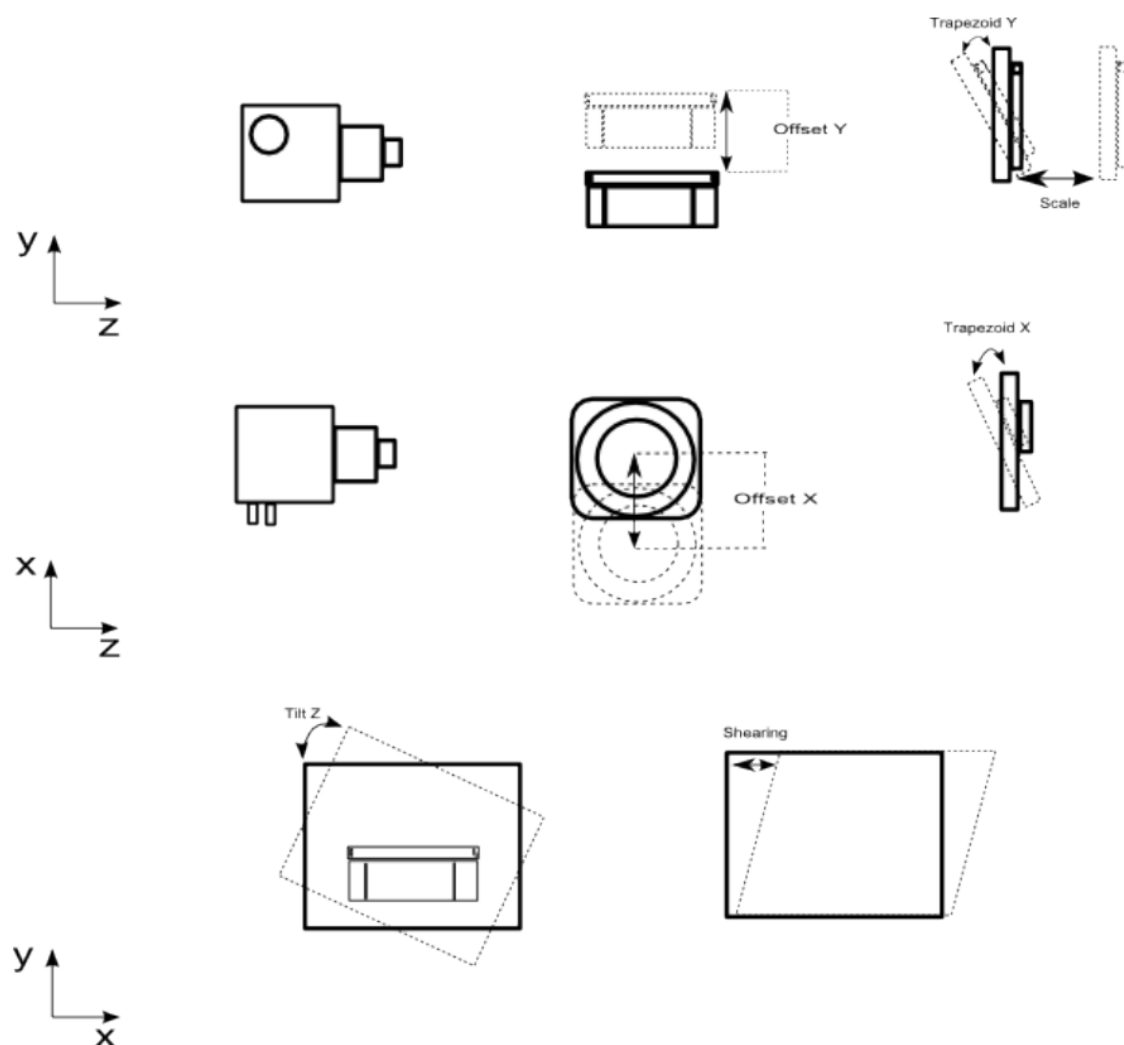


Figure 3.2 – Les différents paramètres géométriques pouvant mener à des transformations du volume reconstruit. Tiré du manuel d'utilisation du logiciel de reconstruction de *RX Solutions*.

Le logiciel de reconstruction possède déjà une interface rudimentaire suffisante pour la reconstruction de scans en masse. Pour des acquisitions tomographiques d'une même série et de même qualité, on peut propager les paramètres de reconstruction d'un scan (volume à reconstruire, « rings artefacts », etc.) à un autre et reconstruire toute la série. Les corrections de la position du spot et de la géométrie peuvent être automatiquement réalisées pour chaque reconstruction.

3.3 Pistes d'améliorations

Afin de s'assurer que nos successeurs évitent tous les écueils possibles lors des prochaines expériences, on propose une liste d'améliorations :

- il faut chercher à relier la prise de scan et le contrôle de la presse : l'utilisation de deux terminaux différents oblige à plus d'interventions de l'expérimentateur. Avec les données et informations des deux terminaux mises en commun, on pourra conditionner la mise en route de la compression de l'échantillon à l'achèvement du scan initial. Et idem pour le scan final. On résout aussi le problème de synchronisation temporelle des terminaux.
- il faut utiliser des interfaces en CLI² au lieu de GUI³ : les interfaces en ligne de commande permettent de programmer plus facilement et une meilleure répliquabilité des actions.
- exploiter des techniques de reconstruction plus avancées : la tomographie de laboratoire ne peut pas rivaliser en termes de résolution, vitesse ou qualité avec les tomographies réalisées dans des synchrotrons. En revanche, elle peut exploiter les avancées des techniques de reconstruction telles que la super-résolution (PARK, PARK et KANG, 2003), ou des méthodes de reconstruction à l'aide d'apprentissage machine (WANG, YE et MAN, 2020).

2. *Command Line Interface* ou Interface en ligne de commande

3. *Graphical User Interface* ou Interface graphique

4 Traitements d'images

Une fois le volume 3D en niveau de gris représentant un échantillon de neige obtenu, on peut y appliquer des algorithmes et des traitements pour connaître ses propriétés. La Figure 4.1 présente la structure des post-traitements effectués et des propriétés mesurées.

4.1 Recalage

Quand on souhaite comparer les volumes d'un même échantillon, pris à différents temps d'une même série temporelle, il est nécessaire qu'ils possèdent le même repère spatial. On procède alors à un recalage ou «*registration*» des images par rapport à une référence commune. Pour cela, on commence par isoler un détail qui n'est pas censé bouger, cela permet de supposer une transformation rigide, composée de 3 translations et de 3 rotations. Dans les essais de fluage, nous avons réalisé des entailles dans le porte-échantillon pour servir de repère. Dans les essais à vitesse imposée, nous utilisons les caractéristiques uniques de chaque porte-échantillon. On commence par appliquer un masque autour du détail d'intérêt, dans l'image de référence et dans l'image à recalcr. On cherche la transformation à appliquer sur ce sous-volume pour passer de l'un à l'autre. Enfin, on applique la transformation obtenue sur les sous-volumes au volume complet. Nous utilisons la librairie python SimpleITK (voir BEARE, LOWEKAMP et YANIV, 2018) pour ces traitements.

Les corrections géométriques dont on a parlé à la Figure 3.2 peuvent induire des transformations dans les volumes finaux. Ces transformations sont relativement faibles. Typiquement, la correction sur l'offset-X, est d'environ 3 px.

4.2 Binarisation

On dispose en entrée des volumes en niveau de gris issus de la reconstruction tomographique. Pour la suite de nos traitements, on souhaite distinguer formellement la phase d'air et le squelette de glace, on passe pour cela par une étape de binarisation. On utilise une *energy-based-segmentation*, comme décrit dans HAGENMULLER et al. (2014a). Cette formulation a plusieurs avantages : 1) elle prend en compte l'information

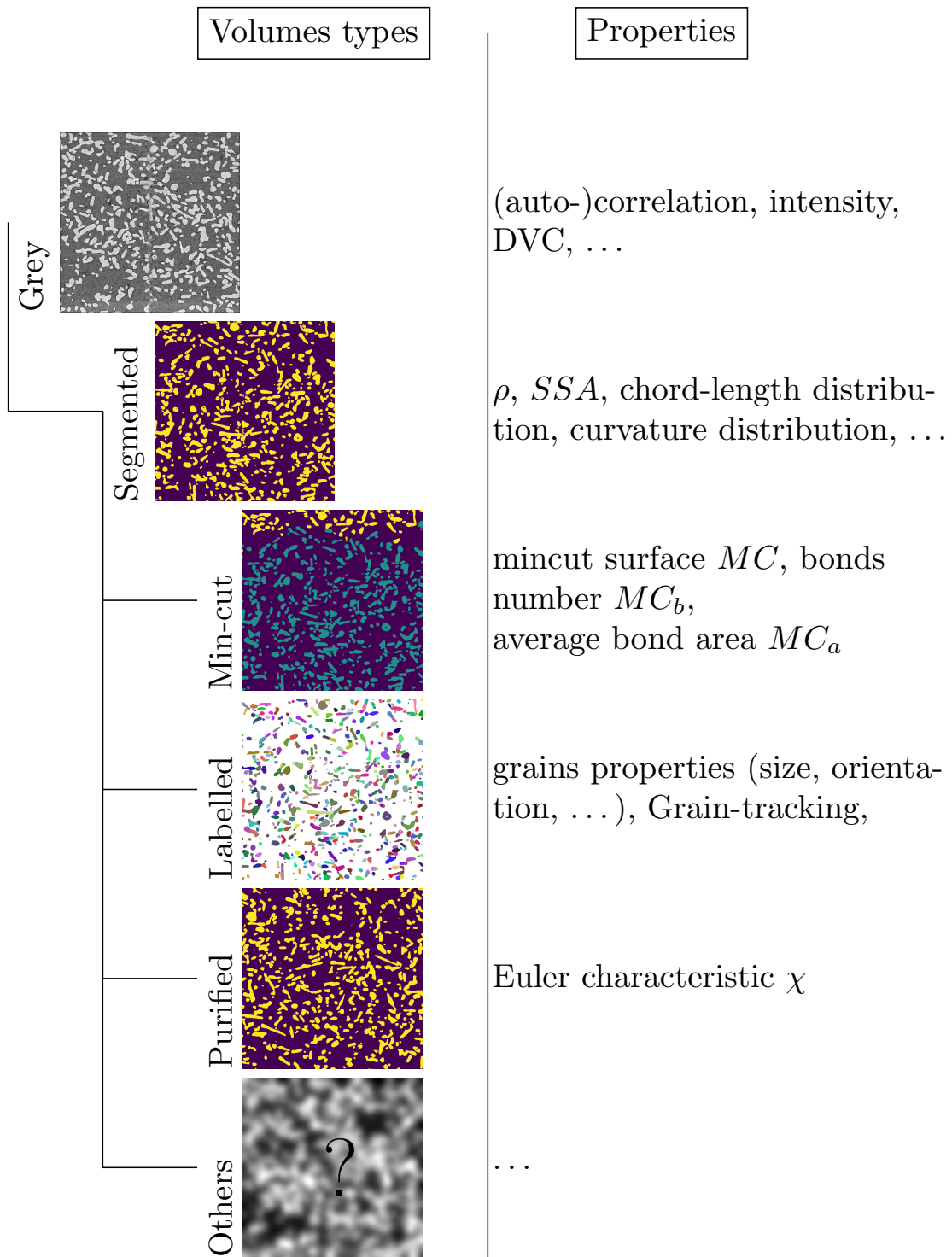


Figure 4.1 – Schéma présentant la démarche de post-traitement des scans tomographiques à partir d'une image reconstruite en niveau de gris.

non-locale, et 2) elle est applicable à des images avec différentes caractéristiques. Après la binarisation, on obtient une image binaire différenciant la phase d'air et le squelette de glace. D'autres méthodes de binarisation existent, comme le seuillage (on choisit une valeur seuil, en dessous de cette valeur les voxels sont de la phase

d'air, au-dessus ces voxels sont du squelette de glace) qui reste encore très utilisé dans la communauté de recherche sur la neige. Le choix du seuil lui-même peut se faire arbitrairement ou à l'aide d'algorithmes. Ces méthodes à base de seuillage sont simples mais peu robustes (BOYKOV et FUNKA-LEA, 2006). Le choix par l'opérateur d'un seuil rend la méthode biaisée et n'exploite pas l'information locale disponible (IASSONOV, GEBRENEGUS et TULLER, 2009). Une mauvaise binarisation ne représente pas fidèlement la microstructure, et conduit à des résultats faussés ou complètement erronés.

4.3 Fraction volumique et masse volumique

La fraction volumique d'une phase i , Φ_i est le rapport entre le volume de la phase i et le volume total. On l'obtient en comptant le nombre de voxels de la phase i divisé par le nombre de voxels total de l'image.

La masse volumique de la neige ρ_{snow} est obtenue par une loi des mélanges entre les différentes phases. De manière générale $\rho = \sum_{i=0}^n \Phi_i \rho_i$. Dans la neige, on a donc $\rho_{snow} = \Phi_{ice} \rho_{ice}$ avec $\rho_{ice} = 917 \text{ kg m}^{-3}$, la masse volumique de l'air étant considérée comme nulle.

4.4 Surface spécifique

La surface spécifique SSA est calculée comme le rapport entre la surface de contact entre l'air et la glace $S_{air \leftrightarrow glace}$ et la masse de la neige m_{snow} . La surface $S_{air \leftrightarrow glace}$ est calculée par la méthode de Crofton avec une connectivité de 26 voisins, comme décrit dans HAGENMULLER et al. (2016).

De plus, pour quantifier l'anisotropie de cette surface, on projette la surface selon les trois directions cartésiennes, horizontales (x et y) et verticale (z). On utilise une méthode stéréologique (ARAKAWA et al., 2009 ; CALONNE et al., 2014). On nomme ces quantités SSA directionnelles ou stéréologiques, noté SSA_d avec $d \in \{x, y, z\}$ la direction cartésienne considérée. Elles sont reliées à la surface spécifique par l'équation 4.1.

$$SSA = \frac{S_{air \leftrightarrow glace}}{m_{snow}} = \frac{\sum_{d \in \{x, y, z\}} \vec{S} \cdot \vec{e}_d}{m_{snow}} = SSA_x + SSA_y + SSA_z \quad (4.1)$$

4.5 Coupe minimale transverse ou « Min-cut »

La min-cut est un objet issu de la théorie des graphes en informatique théorique. L'objectif est de trouver le minimum d'arêtes à couper pour séparer le graphe en deux parties. On définit le graphe associé au volume de la microstructure de manière à ce que le graphe représente le squelette de glace. Avec cette approche il est possible de calculer la surface de coupe minimum. La min-cut est la plus petite surface qui désolidarise les deux côtés d'une même microstructure. Autrement dit, en séparant un échantillon de neige le long de cette surface, on minimise la quantité de glace découpée. Cette quantité est directionnelle : on peut la calculer dans chaque direction normale aux faces du volume, soit les trois directions cartésiennes x , y et z . Elle a été utilisée pour la première fois par HAGENMULLER et al. (2014a) pour quantifier le système de ponts et de grains dans la neige. On extrait de ce traitement trois informations : 1) la valeur de l'aire de la min-cut, 2) le nombre de ponts de la min-cut, et 3) la taille moyenne des ponts, qui est le ratio entre l'aire de la min-cut et le nombre de ponts qui la compose. La min-cut est sensible à la géométrie du volume (taille et (an-)isotropie) par effets d'échelle. HAGENMULLER et al. (2014a) mesure un volume élémentaire représentatif de 5^3 mm^3 .

4.6 Caractéristique d'Euler

La caractéristique d'Euler, notée χ est un invariant topologique qui décrit la structure d'un objet. Elle est reliée au genre ou « genus » noté g par la relation $\chi = 2 - 2g$ avec g qui peut être vu comme un nombre de coordination, et à la courbure Gaussienne moyenne par le théorème de Gauss-Bonnet (voir p.12 MICHELSEN, RAEDT et HOSSON, 2003). Pour coller à la littérature (SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI, 2014; ODGAARD et GUNDERSEN, 1993), nous mesurons χ sur un volume purifié, c'est à dire duquel on a éliminé les cavités (ie, bulles d'air) de la glace, gardant uniquement les deux plus grandes composantes connexes d'air et de glace. Nous avons implémenté en langage *C* une fonction permettant de calculer χ à partir de l'algorithme décrit dans MICHELSEN, RAEDT et HOSSON (2003). La Figure 4.2 présente la comparaison de notre implémentation avec celle présente dans *ImageJ*. Cette comparaison montre que notre implémentation donne des résultats similaires au code dans *BoneJ*. Les valeurs obtenues par notre code sont de 4% supérieures à l'implémentation de *BoneJ*. Nous attribuons l'origine de cette différence, aux effets de bords de l'image. Toutefois, nous jugeons notre implémentation correcte.

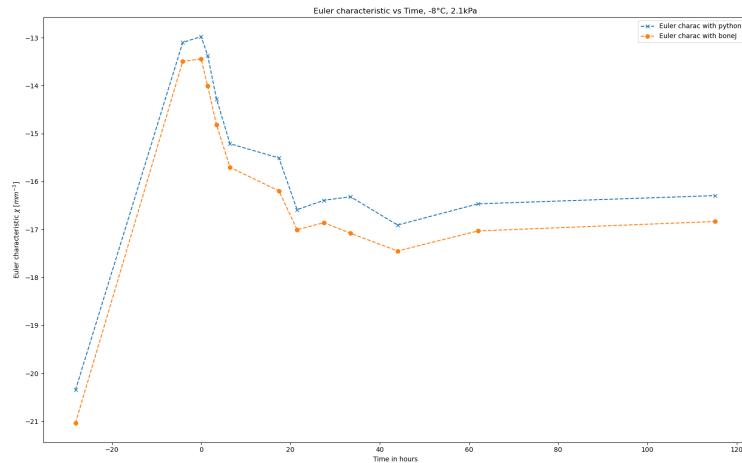


Figure 4.2 – Calcul de la caractéristique d’Euler χ sur plusieurs images. La courbe bleue est obtenue avec notre implémentation en C et Python, la courbe orange est obtenue avec le plugin BoneJ de ImageJ.

4.7 Distribution des longueurs de cordes

La méthode des longueurs de cordes consiste à positionner des éléments rectilignes appelés « cordes » dans le volume d’intérêt, dans chaque phase, et dans chaque direction cartésienne de l’espace. On dénombre ensuite le nombre et la longueur des cordes dans chaque phase. On obtient donc une distribution de longueurs de cordes pour chaque phase et chaque direction. C’est une méthode simple, similaire au ray-tracing. Ce paramètre permet de suivre l’évolution de la taille et forme moyennes des phases entre deux images. Cette méthode est décrite plus en détails dans le paragraphe 6.2.3.2.

4.8 Facteur d’anisotropie

Le facteur d’anisotropie quantifie l’anisotropie des propriétés étudiées, c’est-à-dire la variabilité des propriétés en fonction de l’orientation considérée. Il est utilisable sur toutes les propriétés directionnelles (SSA , MC , MC_b , MC_a , les distributions de longueur de cordes). Nous avons retenu un facteur d’anisotropie par différence normalisée, noté A_* , comme LEINSS et al. (2016), donné par l’équation 4.2

$$A_* = \frac{\star_{xy} - \star_z}{\star_{xy} + \star_z} \quad (4.2)$$

avec A_\star le facteur d'anisotropie de la propriété d'intérêt \star , et \star_{xy} (resp. \star_z) la valeur de la propriété dans la direction horizontale xy (resp. verticale z). Cette définition fait l'hypothèse d'une isotropie transverse dans le plan horizontal.

La différenciation régit le signe du facteur : un signe $+$, positif indique une direction préférentielle horizontale tandis qu'un signe $-$, négatif indique une direction préférentielle verticale. Le facteur d'anisotropie A_\star est compris entre -1 et 1 , et vaut 0 pour une structure isotrope.

Cette définition permet de faire des comparaisons entre différentes propriétés. De plus, grâce à la normalisation, l'échelle n'est pas biaisée dans une direction. En revanche, la conversion entre la valeur du facteur d'anisotropie vers le ratio des valeurs directionnelles, noté b_\star (cf. équation 4.3) n'est pas intuitive.

$$b_\star = \frac{\star_{xy}}{\star_z} \quad (4.3)$$

avec b_\star le ratio de la propriété d'intérêt \star , et \star_{xy} (resp. \star_z) la valeur de la propriété dans la direction horizontale xy (resp. verticale z).

Les fonctions de passage de l'un à l'autre sont données dans l'équation 4.4.

$$A_\star = \frac{b_\star - 1}{b_\star + 1} b_\star = \frac{1 + A_\star}{1 - A_\star} \quad (4.4)$$

4.9 DVC - Corrélation volumique

La corrélation d'images 2D (*DIC* ou *Digital Image Correlation*) et son pendant 3D (*DVC* ou *Digital Volume Correlation*) sont des techniques classiques utilisées en science des matériaux (voir SCHREIER, ORTEU et SUTTON, 2009). L'objectif est de mesurer le champ de déplacement entre deux images d'un même échantillon qui s'est déformé. On peut ensuite calculer les champs de déformations. L'objectif est de quantifier le déplacement de chaque pixel dans l'image. Malheureusement, il est rarement possible de faire correspondre de manière unique un pixel d'une image, à un pixel d'une seconde image. Pour résoudre de manière unique de ce problème, l'image ou le volume doit présenter des caractéristiques distinguables. D'après SCHREIER, ORTEU et SUTTON (2009), la texture de la surface doit être isotrope, non-périodique et aléatoire. Pour du suivi de surface, un mouchetis¹ qui se déforme avec la surface est appliqué. Dans nos volumes, le contraste des niveaux de gris aux interfaces air-glace (pas de texture interne dans la glace ou les pores) est utilisé comme mouchetis. Plus la texturation est de qualité, plus la correspondance de motif est simple et

1. *Speckle* en anglais

précise. La correspondance est faite par groupe de pixels, à l'aide d'un algorithme de minimisation.

Nous utilisons le logiciel *spam*² (STAMATI et al., 2020) pour calculer nos corrélations d'images.

La corrélation peut aussi être discrète. Au lieu de considérer les niveaux de gris, l'image est segmentée en grains, et ce sont ces grains qui sont recherchés d'une image à l'autre. On parle alors aussi de *particle tracking*.

4.10 Autres

On trouve dans la littérature d'autres propriétés utilisées pour caractériser la microstructure de la neige. Différentes propriétés peuvent toutefois contenir une même information sur la microstructure (CUI et al., 2021).

2. The Software for the Practical Analysis of Materials

Deuxième partie

Essai de fluage

5 Essai de fluage

Ce chapitre est issu de l'article suivant :

Bernard A., Hagenmuller P., Montagnat M., Chambon G. 2022. Disentangling creep and isothermal metamorphism during snow settlement with X-ray tomography. *Journal of Glaciology*, 1-12. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.109>.

5.1 Introduction

Once fallen on the ground, snow naturally settles under gravity. Its density typically increases from 100 kg m^{-3} for recent snow to about 500 kg m^{-3} at the end of the winter season (BRUN et al., 1989), up to 800 kg m^{-3} for firn (HERRON et LANGWAY, 1980) or even to the density of ice on glaciers and ice caps (GOUJON, BARNOLA et RITZ, 2003). This densification is associated to changes in the three-dimensional arrangement of ice crystals and pores, i.e., in the microstructure of the material (COLBECK, 1982). In turn, this microstructure fully controls the effective properties of the material associated to, e.g., its mechanical behavior (e.g. THEILE et al., 2011; HAGENMULLER, CHAMBON et NAAIM, 2015; SRIVASTAVA et al., 2016), heat and vapor diffusion in the snowpack (e.g. CALONNE et al., 2014; KAEMPFER, SCHNEEBELI et SOKRATOV, 2005; FOURTEAU, DOMINE et HAGENMULLER, 2021), or interaction of the snowpack with electromagnetic waves (e.g. XIONG et SHI, 2014; DUMONT et al., 2021). Understanding the evolution of snow microstructure during settlement is thus critical for accurate snowpack modelling (LEHNING et al., 2002; VIONNET et al., 2012) and for numerous applications such as forecasting the avalanche danger (SCHWEIZER, 2003), predicting the water run-off in spring (DEBEER et POMEROY, 2017), or estimating the surface energy budget in polar regions (FLANNER et al., 2012).

For dry seasonal snow, the settlement process is caused by two main mechanisms, namely dry snow metamorphism and deformation of the ice skeleton (e.g. SCHLEEF et LÖWE, 2013). Metamorphism results from ice sublimation, vapor transport and solid condensation onto snow grains (COLBECK, 1997). Under isothermal conditions, this process is controlled by the minimization of the interfacial curvature and leads to a coarsening of snow microstructure (LÖWE, SPIEGEL et SCHNEEBELI, 2011). Deformation of the ice skeleton is induced by the mechanical load applied to the material. Depending on the strain rate, this load-induced compaction can either

be related to brittle failures of the bonds between the ice grains and granular rearrangements (e.g. HAGENMULLER, CHAMBON et NAAIM, 2015), or to visco-plastic creep of the ice matrix (e.g. WAUTIER, GEINDREAU et FLIN, 2017). In this study, we focus on thermal and loading conditions where snow compaction mainly results from the interplay between isothermal metamorphism and deformation of the ice matrix. The main objective was to investigate the interactions between these two processes, and whether their signatures on snow microstructure evolution can be distinguished.

In addition to density, a metric frequently used to characterize snow microstructure is Specific Surface Area (SSA), defined as the ratio between the area of the ice-air interface and the mass of ice. This quantity is sensitive to small-scale features of the microstructure and can be easily computed from X-ray microtomography images of snow samples at typical voxel size of 10 μm (COLÉOU et al., 2001; FLIN et al., 2004; KAEMPFER et SCHNEEBELI, 2007; HAGENMULLER et al., 2016). The few existing studies that investigated the respective influence of metamorphism and load-induced compaction on the SSA led to contrasted conclusions. Microstructure coarsening induced by curvature-driven metamorphism typically leads to a reduction of the SSA over time (LEGAGNEUX et DOMINE, 2005; FLANNER et ZENDER, 2006; TAILLANDIER et al., 2007). SCHLEEF et LÖWE (2013) showed that, for recent snow (initial SSA around $65 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) at a temperature of -20°C and over timescales of two days, this reduction of the SSA is influenced neither by creep-induced densification (under dead loads in the range $[0, 0.3] \text{ kPa}$) nor by the initial sample density (in the range $[100, 125] \text{ kg m}^{-3}$). In contrast, SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) reported a pronounced effect of compression on the SSA evolution. Their observation is based on strain-controlled compression tests on snow samples with an initial density ranging between 120 and 150 kg m^{-3} , an initial SSA around $33 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, a load up to 15 kPa , and for a duration of about two days at a temperature of -15°C . The authors explained this discrepancy with their former study by the fact that, in the latter case, applied loads were larger and therefore led to significant microstructural changes in the samples and creation of new contacts at the cost of a reduction in the air-ice surface area. Similarly, during strain-controlled compression experiments, WANG et BAKER, 2013 observed that the SSA of low-density fresh snow samples (initial SSA of about $130 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) evolved faster than predicted by the coarsening theory of LEGAGNEUX et DOMINE (2005), and concluded on a relevant impact of loading on the SSA evolution. Overall, these studies tend to show that SSA might not be sufficient to fully characterize the evolution of snow microstructure during load-induced compaction. The response of this quantity to an applied load appears to vary depending on the initial sample properties and the loading conditions.

In detail, mechanical strength and deformation of snow mostly result from mechanisms taking place at narrow constrictions between grains, also called bonds, where stresses tend to concentrate (COLBECK, 1997). The importance of these bonds to understand snow physics has long been recognized (BALLARD et FELDT, 1966; KRY, 1975b). One may therefore expect the characteristics of the bonding system (e.g., bond number and bond area) to be more sensitive than the SSA to microstructure changes caused

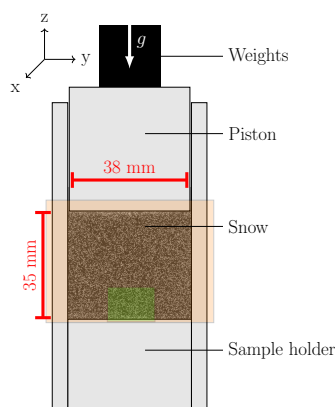


Figure 5.1 – Scheme of the oedometer setup. Two different snow volumes were monitored by tomography : the whole sample (orange box) at high-resolution (voxel size of $30\ \mu\text{m}$), and an inner portion located near the sample base (green box) at low-resolution (voxel size of $8.5\ \mu\text{m}$).

by loading. In practice, however, definition of the bonds often relies on arbitrary thresholds, which can hamper the possibility to consistently detect changes in bond topology (HAGENMULLER, THEILE et SCHNEEBELI, 2014). Owing to data provided by μCT technique, it is now possible to access more objective topological metrics related to the bonding system. Hence, WANG et BAKER (2013) measured an increase of the structure connectivity, presumably related to new bond formation, during their compression experiments. Similarly, SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) observed a decrease of the Euler characteristic, which is indicative of the creation of new contacts.

Is the creation of new contacts a systematic signature of load-induced compaction? How can the concurrent evolutions of the SSA and the contact network be interpreted to disentangle the roles of metamorphism and load-induced deformation on microstructure evolution? To further investigate these issues, we conducted oedometric experiments on snow samples using dead loads up to 4.7 kPa. High-resolution μCT scans performed at a regular frequency during the tests were used to follow the evolution of sample density, SSA, as well as two independent topological metrics related to the bonding system, namely the Euler characteristic and the minimum cut surface as defined in (HAGENMULLER, THEILE et SCHNEEBELI, 2014). Interestingly, this latter quantity can give access not only to the bond number, but also to the average bond size.

5.2 Methods

5.2.1 Oedometric compression tests

We conducted vertical confined compression tests under a constant applied dead load using a specifically designed oedometer setup made of PMMA (Fig. 5.1). The tested snow samples were cylindrical, 3.8 cm in diameter and 3.5 cm in height. The load was applied on top of the samples with calibrated weights guided by a piston. Air in the sample was free to flow through the piston and did not yield any resisting force. It was also checked that static friction between the piston and the sample holder can be neglected. The load on snow can thus be directly calculated from the weight of the piston and the additional applied weights.

Three different snow samples (S1, S2 and S3) were prepared as follows. Two blocks of natural snow were collected in the field and stored in a cold room at -6°C for several weeks, during which they evolved into *Decomposing* and *Fragmented* precipitation particles (DF). Snow particles were then sieved into the oedometer sample holder with a sieve whose mesh size was 1.6 mm. Samples S1 and S2 were prepared from the same snow block, and are characterized by an initial density of 230 kg m^{-3} and an initial specific surface area of $30\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$ after sieving. Sample S3 was prepared from the other snow block, with an initial density of 290 kg m^{-3} and an initial specific surface area of $25\text{ m}^2\text{ kg}^{-1}$ after sieving.

Different loading stages were then applied to the samples at a constant temperature of $-8.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. First, the samples were left evolving under their own weight (average stress lower than 0.1 kPa) for 25 hours after sieving. During this initial stage, snow evolution is mostly driven by isothermal metamorphism, with a progressive strengthening of the structure through sintering. Then, to investigate the impact of an external stress, sample S2 was successively subjected to a load of 2.1 kPa for 120 hours (5 days), and to a load of 4.7 kPa for another 120 hours. Sample S3 was subjected to a load of 2.1 kPa for 90 hours. Sample S1 was followed only during the sintering phase and will be used in the following as a reference for the microstructure evolution under isothermal metamorphism.

5.2.2 X-ray tomography

For the three samples, the evolution of the snow microstructure was monitored during the initial sintering phase and, for samples S2 and S3, during the subsequent oedometric loading stages with an X-ray tomograph (DeskTom130, RX Solutions). Four (resp. two) scans were performed during the initial sintering phase for sample S1 (resp. for samples S2 and S3). About 20 scans were then performed during each loading stages, with a higher frequency just after application of the loads. These scans, with a nominal voxel size of $8.5\text{ }\mu\text{m}$, captured an inner portion (diameter of

Volume	Whole sample		Inner portion		
Scan height (mm)	39.6		11.2		
Scan diameter (mm)	54.2		15.4		
Nominal voxel size (μm)	30.0		8.5		
Scan type	Long	Short	Long	Medium	Short
Duration (min)	60	5	96	64	32
Framerate (s^{-1})	2	8	0.75	0.75	1
Number of averaged frames	2	2	3	2	1
Number of projections	1440	1280	1440	1440	1440
Tension (kV)	50	50	50	50	50
Accelerating voltage (keV)	25	25	25	25	25
Current (μA)	300	300	160	160	160

Table 5.1 – Settings of the X-ray tomographic scans. Shorter scans correspond to scans performed immediately after load application, while medium and long scans are performed later during the loading stages (see text).

15.4 mm and height of 11.2 mm) of the sample located near the bottom, where the displacements are the smallest (Fig. 5.1). In addition, these high-resolution scans were systematically paired with scans of the whole sample at a nominal voxel size of $30\ \mu\text{m}$, in order to capture the overall deformation of the samples. Note that the proximity to the X-ray source may induce a slight warming of the samples. On a test sample fixed close to the source, we measured a difference of $1\ ^\circ\text{C}$ between the closest and opposite faces to the source. To avoid temperature gradient metamorphism during the tests, the samples were kept close to the source only for the duration of the high-resolution scans (about 1 h30). In addition, continuous rotation of the samples during these scans prevents the establishment of a constant temperature gradient. We did not observe any pattern of grain growth characteristic of a temperature gradient metamorphism in the tomographic time series (see video in supplementary materials).

Any significant deformation or displacement of the sample during a tomographic scan induces blurring and artefacts on the reconstructed images. Therefore, it is important that the actual displacement of the piston remains negligible during the duration of each scan. In practice, the strain rate varied with time during our tests, since the experiments were load-controlled. Typically, the strain rate is maximum just after the application of the load, and subsequently decreases. To be able to always reconstruct sharp 3D images, the scan duration and tomographic settings were adjusted during the tests. In particular, the duration of the high-resolution scans was varied from 32 minutes after application of the load, up to 96 minutes at the end of the loading stages. The settings of the different scanning modalities are summarized in Table 5.1. Note that even if the nominal voxel size remained constant for a given imaged snow volume (whole sample or inner portion), the quality of the reconstructed images can be affected by these variations in scan duration (e.g. HAGENMULLER et al., 2016). In particular, shorter-duration scans generally exhibit a lower signal-to-noise ratio.

5.2.3 Data analysis

5.2.3.1 Image processing

Due to the unavoidable micro-metric movements of the tomograph rotation stage over long periods (sample S2 was scanned for about two weeks), different scans of the same evolving sample do not necessarily share the exact same coordinate system. All the images were therefore first realigned by a registration procedure, taking the sample holder as a reference. Different marks were used to automatically determine and correct the apparent displacement (three translations and three rotations) of the sample holder in the 3D images (see e.g. HAGENMULLER et al., 2019).

The reconstructed grey-scale 3D images represent the X-ray attenuation of the different materials in the oedometer, namely air, ice and PMMA. These images have to be segmented prior to conducting quantitative analyses. PMMA and ice attenuate X-rays similarly. However, the sample holder can be identified based on its known geometry. Air and ice were segmented based on their different attenuation coefficients, using an energy-based technique (HAGENMULLER et al., 2013). The only parameter of this segmentation is a smoothing factor r . As explained above, the quality of our different scans was not constant, due to variations in the tomographic settings (Table 5.1). We chose to optimize the value of the segmentation parameter r based on the lowest quality scans (short scans in Table 5.1), and to subsequently apply this value to all other scans. This procedure ensures that the temporal trends derived from the tomographic data are unaffected by changes in the scan settings, but at the cost of slightly degrading the information extracted from the highest-quality scans. The sensitivity of our results to the segmentation parameters is further discussed in Appendix (Fig. 5.10) .

The scans of the whole sample were used to compute the macroscopic strain of the sample, and to investigate potential heterogeneities of the strain field. The macroscopic vertical strain was inferred from the piston position visible in the images. The displacement field within the sample was computed by digital image correlation (DIC) on a vertical slice extracted from the center of the sample, using the python package Spam (STAMATI et al., 2020). Fig. 5.2 shows the vertical displacement field in sample S2 after 120 hours under a load of 2.1 kPa. Slight boundary effects, attributable to friction between snow and the sample holder, are visible (Fig. 5.2a). Some heterogeneities can also be noticed at the top of the sample, probably due to slight irregularities of the sample free surface after sieving. However, in the central-bottom portion of the sample, where the high-resolution scans were performed, the vertical displacement profile increases linearly with depth and corresponds well with the profile derived from the displacement of the upper piston assuming a perfectly homogeneous deformation in the sample (Fig. 5.2b). In this region, the displacement of the upper piston thus represents a relevant proxy for the average strain, and the strain field is unaffected by boundary effects.

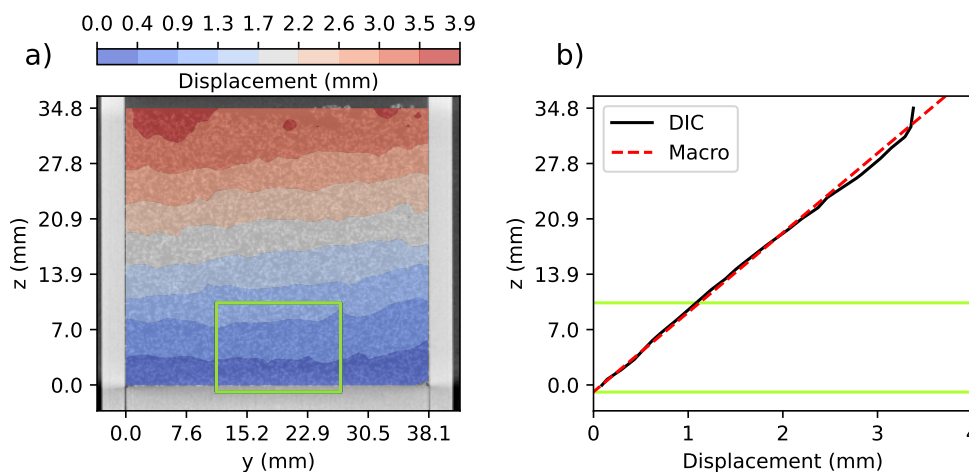


Figure 5.2 – a) Vertical displacement field on sample S2 after 120 h of compression under a load of 2.1 kPa. The displacement was computed by digital image correlation (DIC). The green box delineates the inner portion located near the bottom of the sample, where the high-resolution scans were performed. b) Vertical displacement profile averaged in the central part of the sample. The red dashed line represents the displacement profile computed from the macroscopic strain measured with the displacement of the piston considering a perfectly homogeneous deformation in the sample.

The high-resolution scans of the inner portion were used to derive several microstructural characteristics of the samples. To this end, these scans were cropped to cubic volumes of 900^3 voxels, i.e. 7.65^3 mm³. During the compression tests, mass enters in these volumes from the top and may leave on the sides. However, since snow samples and strain field are homogeneous in this region, we considered that this mass flux does not affect the computed microstructural characteristics (SCHLEEF et LÖWE, 2013).

5.2.3.2 Microstructural characteristics

Snow microstructure was characterized through classical descriptors, namely the density and the specific surface area, as well as through more advanced properties related to the bonding system of the ice matrix, namely the Euler characteristic and the minimum cut surface. Typical measurement uncertainties on these different microstructural characteristics were assessed by mean of a sensitivity study to the segmentation parameter r , and are described in Appendix (Fig. 5.10). Note however that these uncertainties should be regarded as only indicative, since other sources of errors may also affect the values of the microstructural characteristics. They illustrate the robustness of the observed trends with respect to changes in the binary segmentation.

The density ρ was computed by counting the number of ice voxels and assigning them

the density of ice $\rho_{ice} = 917 \text{ kg m}^{-3}$. The specific surface area SSA was computed as the ratio of the ice-air surface area S divided by the mass of snow M . The area S was obtained using Crofton approach and assuming a full cubic connectivity, as described by HAGENMULLER et al. (2016). In addition, to characterize the anisotropy of this surface, projections of the ice-air surface area along the horizontal (x and y) and vertical (z) directions were computed using a stereological method (ARAKAWA et al., 2009; CALONNE et al., 2014). These quantities will be referred to as directional SSA in the following.

The Euler characteristic χ is a topological invariant of the structure, which describes its shape independently of any continuous deformation. For a closed orientable surface, the Euler characteristic can be related to the genus g as $\chi = 2 - 2g$, where g can be interpreted as a generalized coordination number (MICHELSEN, RAEDT et HOSSON, 2003). The Euler characteristic can thus be regarded as a metric of the bonding system of the ice matrix, and was already used as such by SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) to characterize the snow microstructure evolution. Typically, formation of new bonds increases the genus g and decreases the Euler characteristic χ . In this study, χ was computed based on the algorithm described in MICHELSEN, RAEDT et HOSSON (2003), and normalized by the volume of ice. Prior to the computation of χ , the binary ice-air images were pre-processed with a purification algorithm in order to keep only the two largest connected components of ice and air.

The minimum cut surface MC represents the surface of minimal area among all the surfaces that disconnect two opposite faces of a given microstructure (Fig. 5.3). In other words, cutting a snow sample along this surface separates the two opposite faces with the smallest amount of broken ice. This quantity is directional, since a value can be computed along each direction normal to sample faces. The minimum cut surface can thus also be used to quantify the anisotropy of the microstructure. It was introduced by HAGENMULLER et al., 2014a to characterize the snow bonding system. Here, for each Cartesian direction, we calculated the minimum cut surface area normalized by the cross-section of the sample. We also computed the number of "broken" bonds MC_b (i.e. the connected components of the minimum cut surface, see Fig. 5.3) and the average bond surface area MC_a .

Lastly, for any directional quantity α (where α can be SSA , MC , MC_a or MC_b), we computed an anisotropy factor A_α following the definition of LEINSS et al. (2016) :

$$A_\alpha = \frac{2(\alpha_{xy} - \alpha_z)}{\alpha_{xy} + \alpha_z} \quad (5.1)$$

where α_{xy} is the mean of the two components in the horizontal directions x and y , and α_z is the component in the vertical direction z . This definition assumes a transverse isotropy in the horizontal plane. The factor A_α varies in the range ± 2 , with $A_\alpha = 0$ for a purely isotropic structure.

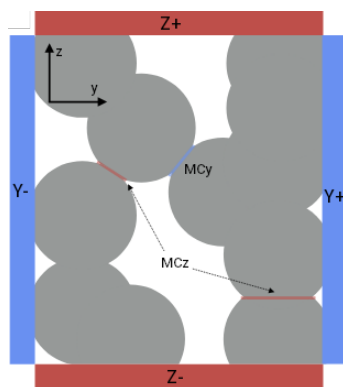


Figure 5.3 – Minimum cut surfaces on a 2D microstructure. The minimum cut surface MC_y between faces Y- and Y+ is composed of a single bond (in blue), while the minimum cut surface MC_z between faces Z- and Z+ is the union of two disjoint bonds (in red). Figure adapted from HAGENMULLER et al. (2014a).

5.3 Results

Overall, the evolution of the microstructure captured by tomography does not show abrupt changes during the loading phases, as exemplified during the first loading stage of sample S2 by Fig. 5.4 and the video provided in the supplementary material (see section 5.B). In particular, no large microstructural rearrangements are visible in the images, nor any obvious bond breakings or grain shape modifications. Hence, the densification of the samples appears to occur through a progressive reduction of the pore space caused by small, continuous deformations of the ice skeleton.

The evolution of the snow density ρ , specific surface area SSA , Euler characteristics χ and minimum cut surface MC before and during mechanical loading, are presented in Figs. 5.5 to 5.8. By convention, time was reset to zero at the beginning of each loading stage. Recall that for sample S2, the loading stage at 4.7 kPa directly followed the first loading stage at 2.1 kPa. Negative time values correspond to the initial sintering phases with no applied load.

Density. During the initial sintering phase of all three samples, the snow density displays only negligible variations over the course of 24 hours (Fig. 5.5). The slight increase of ρ measured for samples S1 and S2 lies within the bounds of experimental uncertainties (Appendix 5.A). For sample S2, application of the 2.1 kPa load results in an immediate and abrupt increase in density, whose value increases by about 18 kg m^{-3} during the first 50 hours of loading. The densification rate then progressively diminishes, and tends to stabilize after about 50 hours. A similar evolution is observed after application of the 4.7 kPa load, although the additional density increase after 50 hours is only of about 12 kg m^{-3} in this case, due to the higher "initial" density of the sample. For sample S3, with an even higher initial density, the loading at 2.1 kPa induces a density increase of only about 2.5 kg m^{-3} during the first 50 hours.

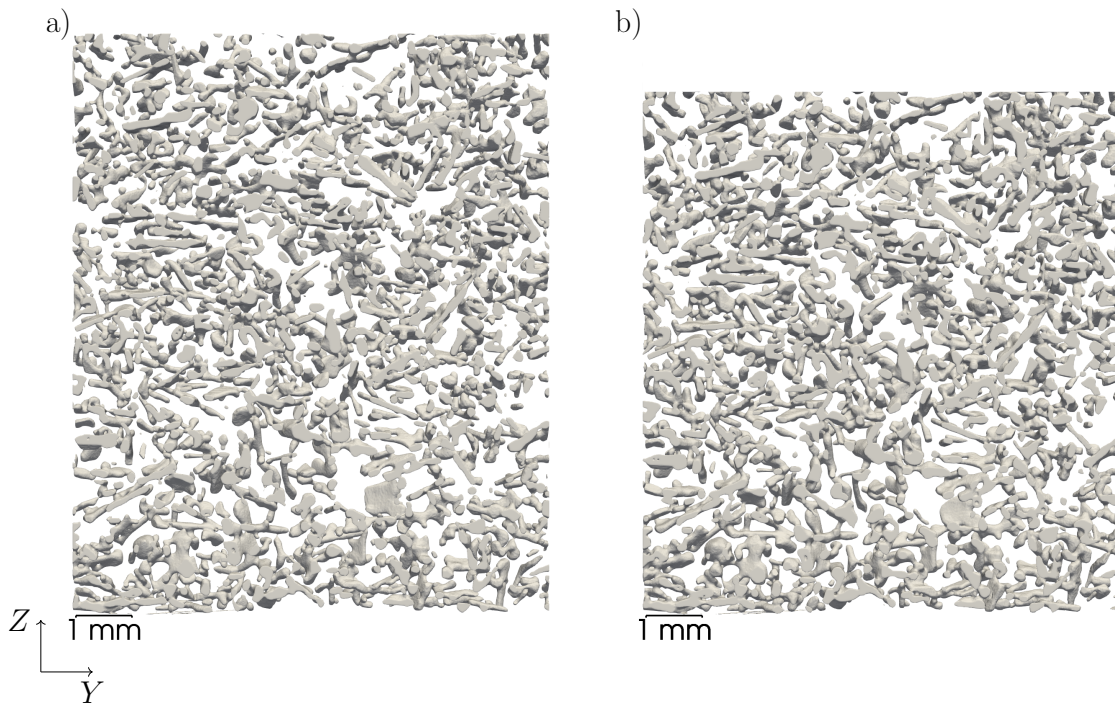


Figure 5.4 – Vertical slices of segmented tomography images for sample S2 representing the same region a) before loading ; b) after 120 hours under a dead load of 2.1 kPa. Note that most grains remain well identifiable in the two images. The volume b) after 120 hours is smaller to reflect the compaction.

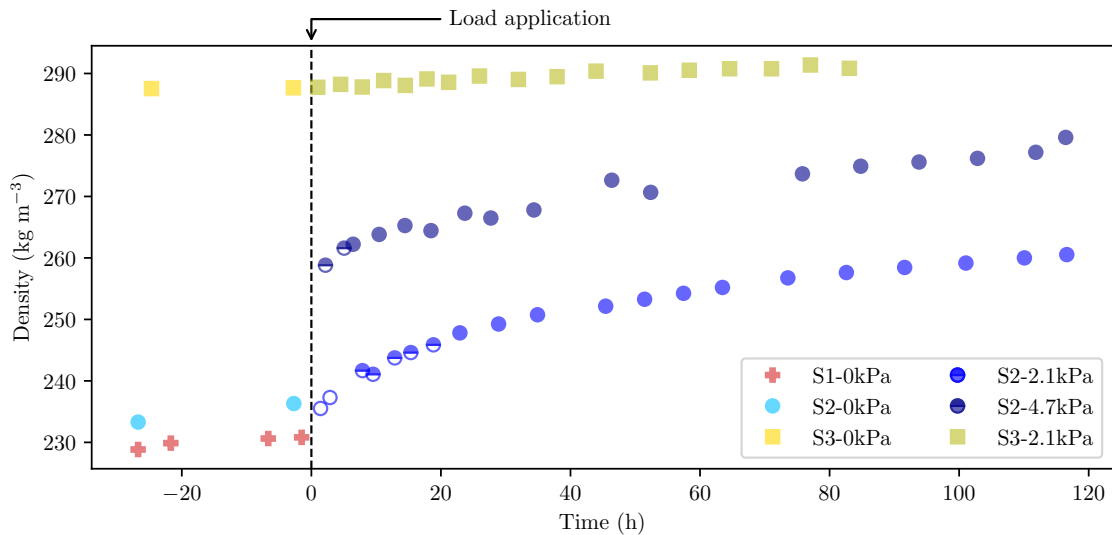


Figure 5.5 – Evolution of the sample density ρ as a function of time during the sintering and loading phases. The filling of the markers (empty, half-filled, fully-filled) indicates whether the values are obtained from short, medium or long duration scans, respectively (see Table 5.1).

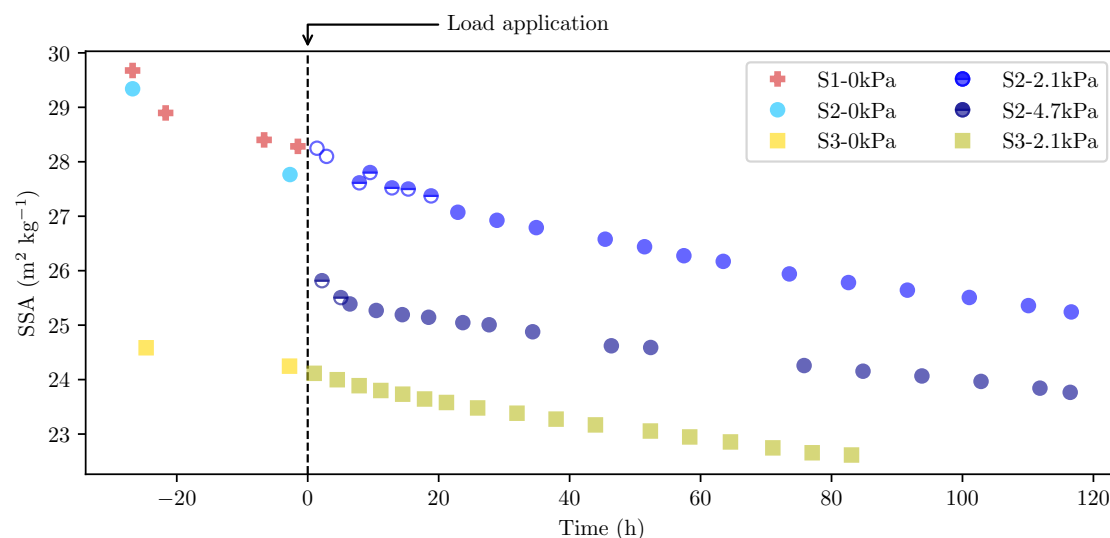


Figure 5.6 – Evolution of the specific surface area SSA as a function of time during the sintering and loading phases. Same legend as Fig. 5.5.

Specific surface area. Unlike density, the SSA does not display any abrupt variations following the load application (Fig. 5.6). The SSA shows a decreasing trend of about $-1.5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ on average per 24 hours during the initial sintering phase for samples S1 and S2, and of about $-0.3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ for sample S3. These trends remain essentially unchanged after the application of the 2.1 kPa load for samples S2 and S3, and the SSA decrease then tends to slow down as time progresses. Similarly, the application of the 4.7 kPa load on sample S2 does not induce any significant change in the SSA trend. Note that the slight discontinuity observed on the first few points of the two series for sample S2 immediately after changing the load is presumably attributable to larger uncertainties on these data (see Appendix 5.A and Fig. 5.10).

Euler characteristic. During the initial sintering phase, the Euler characteristic χ displays an increasing trend for samples S1 and S2 (Fig. 5.7). Application of the 2.1 kPa load on sample S2 results in a significant decrease of χ . This decrease levels out after about 50 hours, after which a mild increasing trend in χ is again observed. Similarly, application of the 4.7 kPa load induces a new decrease of χ , albeit of smaller amplitude, that levels out after about 50 hours to give way to a mild increase. For sample S3, no significant variation of χ is observed during the initial sintering phase. Note however that only two data points are available, and that the first measurement of χ after the sample preparation tends to be affected by a disproportionately large uncertainty (see Fig 5.10). Hence, an increasing trend similar to that observed for samples S1 and S2 during this phase cannot be excluded. It is however clear that, unlike for sample S2, the application of the load does not induce a decrease of χ for sample S3 : the Euler characteristic continuously increases during loading.

Minimum cut surface. For all the samples, the evolution of the minimum cut surface MC shows an increasing trend that does not appear to be significantly influenced by the load application (Fig. 5.8). The increase rate regularly slows down with time.

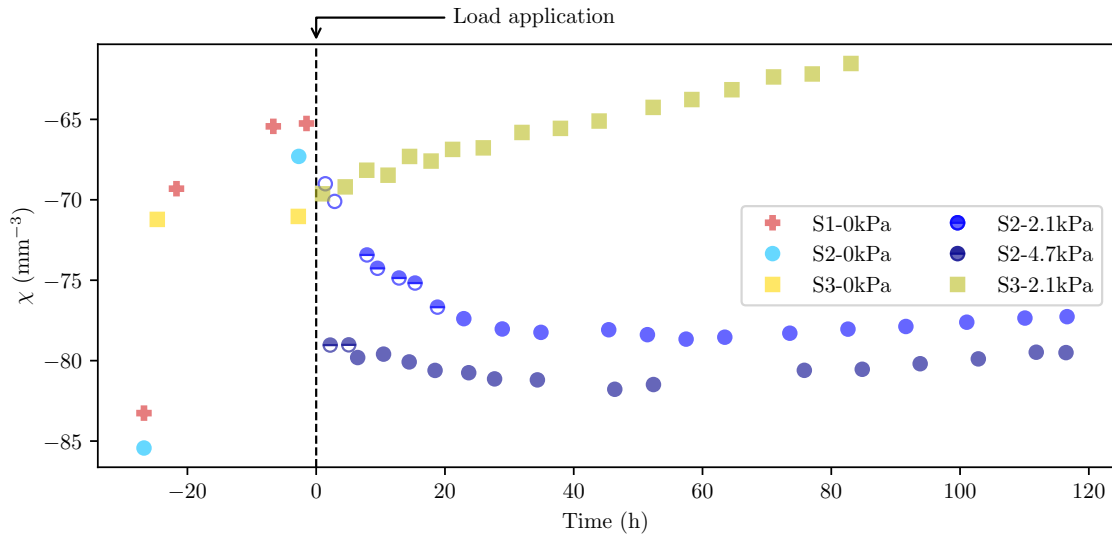


Figure 5.7 – Evolution of the Euler characteristic χ as a function of time during the sintering and loading phases. Same legend as Fig. 5.5.

This observation can however be qualified by looking separately at the bond number MC_b and the average bond area MC_a . While the latter quantity also appears to be unaffected by the mechanical loading, the evolution of the bond number seems to display a sensitivity to loading despite a relatively large level of noise on the data. In absence of load, the bond number first shows a rapid decrease during the first few hours of the initial sintering phase, and then remains essentially stable. For sample S2, application of the 2.1 kPa load is observed to induce an increase in the bond number during about 40-50 hours, after which the evolution levels out again. Similarly, another increase in the bond number, over a similar duration, is observed after application of the 4.7 kPa load. For sample S3, the bond number remains essentially constant, or slightly decreases, during loading.

Anisotropy. The evolution of the anisotropy of the different directional properties is shown on Fig. 5.9. For samples S1 and S2, the directional SSA exhibits a larger value in the vertical direction, by about 12%, compared to the horizontal directions. This anisotropy is already present at the beginning of the tests, and remains essentially constant during both the sintering and the loading phases (as observed on sample S2). Sample S3 is characterised by an isotropic SSA, which again does not show any significant evolution during the sintering or loading phases. For all samples, the anisotropy factor of the minimum cut surface A_{MC} is generally positive, which indicates that MC is larger in the horizontal directions compared to the vertical direction. Samples S1 and S2 show no evolution of A_{MC} during the initial sintering phase. For sample S2, application of the 2.1 kPa load leads to a rapid decrease of A_{MC} , which varies from 0.2 during the initial sintering phase to 0.12 after 8 hours of loading. After this initial decrease, A_{MC} remains essentially constant for this sample during the two successive loading phases. For sample S3, A_{MC} is observed to increase from -0.08 to 0.11 during the initial sintering phase. It then remains essentially constant during the loading phase. Looking separately at the contributions of the

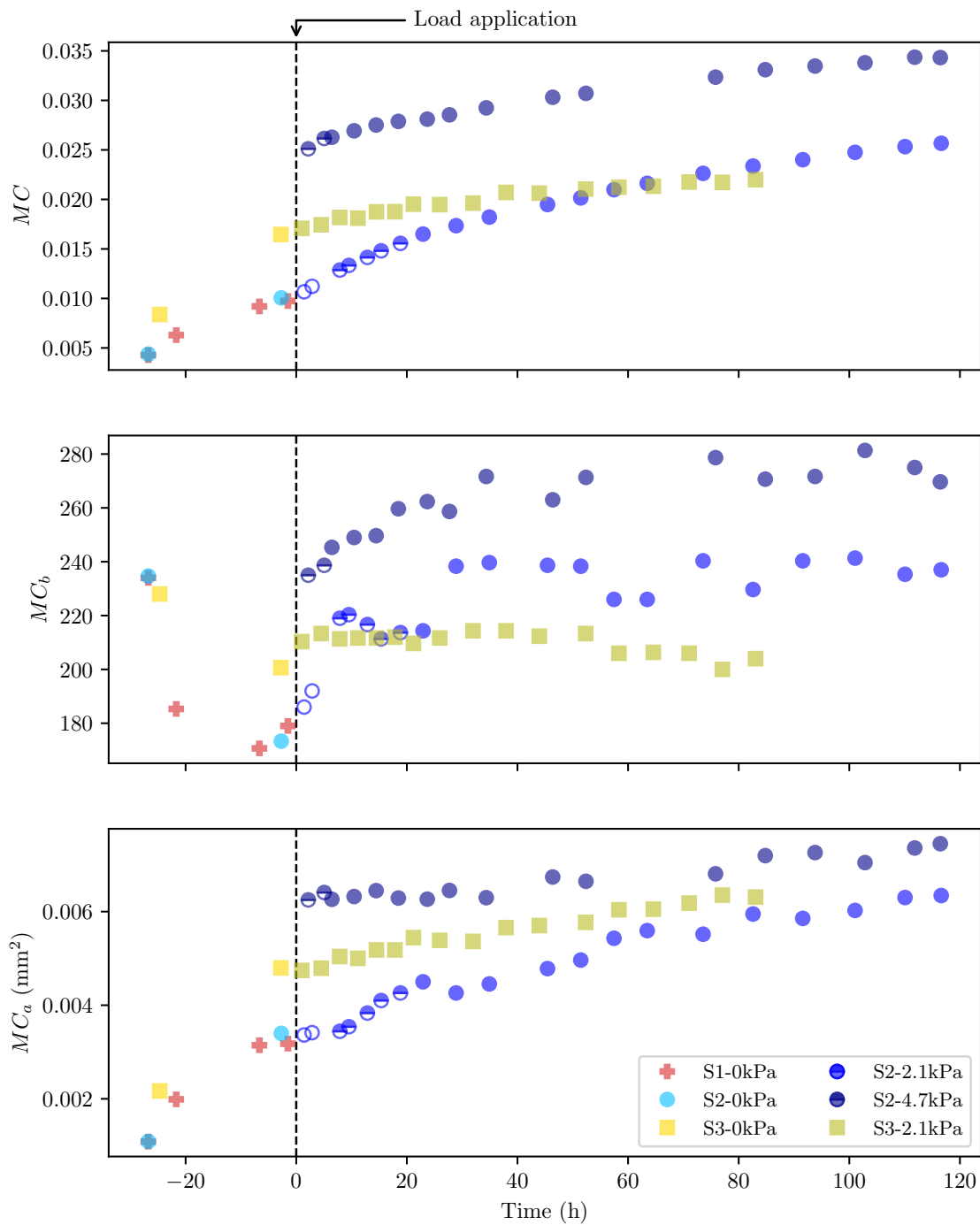


Figure 5.8 – Evolution of the minimum cut surface MC , bond number MC_b , and average bond area MC_a , as a function of time during the sintering and loading phases. The data points shown in these plots correspond to the average values of the minimum cut surface characteristics computed along x, y and z directions. Same legend as Fig. 5.5.

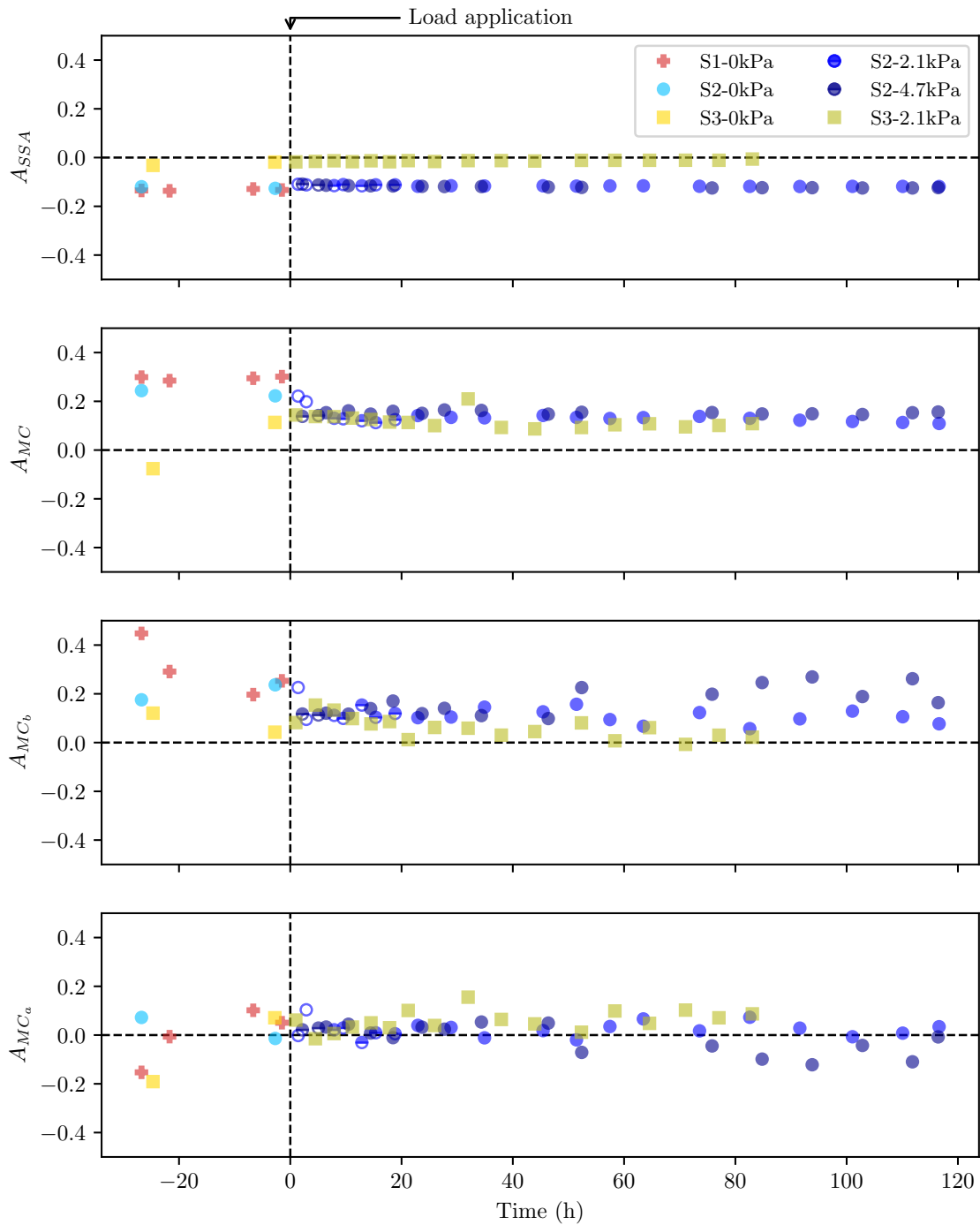


Figure 5.9 – Evolution of the anisotropy factors for the SSA, minimum cut surface area MC , bond number MC_b , and average bond area MC_a , as a function of time during the sintering and loading phases. The anisotropy factor is defined in Eq. (5.1). Same legend as Fig. 5.5.

bond number A_{MC_b} and bond area A_{MC_a} , it appears that the anisotropy observed on A_{MC} is mainly explained by an anisotropy of the bond number, which tends to be higher in the horizontal direction. In contrast, the average bond area is essentially isotropic. Note also that bond number tends to evolve towards a more isotropic distribution during the initial sintering phase, and that the corresponding anisotropy factor A_{MC_b} then remains almost constant during the loading phases.

5.4 Discussion

New insights on snow microstructure evolution in terms of bond size and bond number.

In order to overcome the limitations of standard microstructure descriptors (density, SSA) to account for snow mechanical behavior, SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) introduced the Euler characteristic χ as a proxy for the bond number. Recall that χ is expected to decrease when the bond number increases. Alternatively, HAGENMULLER, THEILE et SCHNEEBELI (2014) characterized the snow bonding system through the minimum cut surface. This quantity, defined as a flux-limiting surface, complements the information provided by the Euler characteristic in that it provides the number of bonds MC_b , but also the typical size of these bonds MC_a and the associated anisotropy. In this paper, these two proxies of the bonding system were investigated on the same samples (Figs. 5.7 and 5.8). For sample S2, the number of bonds derived either from the Euler characteristic or from the minimum cut surface showed consistent trends : a pronounced decrease during the initial sintering phase, when no load is applied, and an increase during the first 50 h following the application of a load. For sample S3, consistent trends are also observed during loading (slightly decreasing bond number in this case). For this sample, however the signal observed during the initial sintering phase is less clear : MC_b decreases, while χ remains essentially constant, but only two data points are available.

The overall agreement between the two descriptors gives confidence that χ and MC_b indeed provide relevant information on the bonding system. The values of MC_b (Fig. 5.8), however, tend to show a higher variability compared to Euler characteristic χ . This difference can be explained by the fact that χ is computed as a volume average, whereas the minimum cut surface characterizes an "extreme" or limiting surface, and is thus more sensitive to spatial variability in the microstructure. Nevertheless, the complementary information provided by the minimum cut surface, namely the bonding anisotropy and the bond size, is very useful to further understand how the bonding system evolves with creep and metamorphism. In particular, we observed that the increase of bond size MC_a with time seems mostly unaffected by the application of an external load.

Influence of an external stress on snow metamorphism. Our results show that, in the absence of an external load, the SSA and the number of bonds (either derived from the minimum cut surface or from the Euler characteristic) decrease with time (Figs. 5.7 and 5.8), consistently with the generic coarsening of snow microstructure

under isothermal metamorphism (SCHLEEF et LÖWE, 2013). Application of a load leaves the SSA decreasing trend essentially unaffected (Fig. 5.6). In contrast, loading does affect the evolution of bond number, depending on the initial sample density. For sample S2, with a lower initial density (230 kg m^{-3}), the number of bonds started to increase after application of the load (Figs. 5.7 and 5.8). For sample S3, with the largest initial density (290 kg m^{-3}), the bond number continues to decrease. In parallel, our results also show that the initial density of the sample plays a strong role on the snow densification rate for a given level of loading (see Fig. 5.5). Combining these observations, it can be concluded that the densification observed for low-density snow is reflected in the microstructure by changes in the bonding topology, but does not affect the SSA evolution. For a sufficiently large initial density, application of the load induces only negligible densification and has essentially no effect on the microstructure evolution, which remains governed by isothermal metamorphism.

In contrast, SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) reported an effect of compression on both SSA and the Euler characteristic. These authors studied fresh snow samples characterized by an initial density between 55 and 110 kg m^{-3} and an initial SSA between 70 and $110 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, submitted to stress levels up to 318 Pa . They argued that the effect of compression on SSA is related to newly formed bonds at the cost of ice-air interfaces. In comparison to this former study, our results thus demonstrate that an increase in bond number under an external load is not necessarily associated to a change in the SSA evolution. As shown by the absence of large microstructural rearrangements (see video in supplementary materials, section 5.B and Fig. 5.4), the increase in bond number in our tests is presumably related only to the slow creep of the ice matrix. In other words, the microstructural evolution caused by the applied load is sufficient to affect the bonding system, but might have been too limited to affect the SSA evolution in our case. On the contrary, we may hypothesize that larger rearrangements were involved in the tests of SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014), which were conducted under larger loads and lower initial densities. Globally, the evolution of SSA and bond number during densification thus appear to depend on both sample density and stress level. For very low applied stress (relative to the sample density), isothermal metamorphism is unaffected, and neither of the two quantities shows a sensitivity to the load. For low applied stress (relative to the sample density), load induces additional creep of the ice matrix, which results in an increase in the bond number but has no effect on the SSA evolution. Finally, for larger applied stresses (relative to the sample density), larger microstructural rearrangements might affect both bond number and SSA, as observed by SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014). Let us however note that, for recent snow, FLIN et al. (2011) showed that grain contact area represents only a small fraction ($\leq 10\%$) of the total surface area of grains. One can thus wonder whether the significant evolution of SSA reported by SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) can really be explained only by an evolution of the bonding system.

Finally, also interesting is the observation that, for sample S2, the increase in bond number after application of a load seems to display a characteristic time of about 50 hours, and this for the two levels of load investigated (Figs. 5.7 and 5.8). Hence,

the creep-induced evolution of the bonding system seems to occur over a finite duration. After this characteristic time, a decreasing trend in bond number (or an increasing trend in χ) similar to that observed in the absence of load is recovered, presumably indicating that metamorphism-induced structure coarsening becomes again the dominant process. Note that this characteristic time is also visible, albeit less clearly, in the evolution of density (Fig. 5.5). We may hypothesize that this progressive slowdown of creep-induced compaction is related to a hardening of the material associated with the creation of new contacts (THEILE et al., 2011).

Directional creep does not induce structural or bonding anisotropy. As expected, application of an external vertical stress induces a compaction of the snow, which is more pronounced when the initial sample density is low and/or the applied stress is large. Here, for sample S2, density increased from 235 to 255 kg m⁻³ (i.e. 8.5%) for a load of 2.1 kPa during 5 days, and from 255 to 280 kg m⁻³ (i.e. 10%) for a load of 4.7 kPa during 5 additional days. For sample S3 with an initial density of 290 kg m⁻³, the load of 2.1 kPa did not induce any additional compaction compared to that due to isothermal metamorphism.

The application of an external stress could also have more subtle effects on snow microstructure evolution. In particular, one could expect a specific strengthening of the bonds in the loading direction, or the emergence of a local anisotropic strain pattern. Hence, LÖWE, SPIEGEL et SCHNEEBELI (2011) observed a scale-dependent anisotropy of the microstructure between the direction of gravity and the horizontal directions in a snow evolving under isothermal metamorphism. This result was based on the analysis of the two-point correlation function computed from tomographic images. The anisotropy was shown to emerge at the scale of several grains, but not at smaller scales. The authors hypothesized that the origin of this large-scale anisotropy is due to gravity, since it is the only parameter that breaks the symmetry between horizontal and vertical directions in their experiments. This hypothesis was later simplified by LEINSS et al. (2016), who assumed that all structural length scales actually inherit the macroscopically imposed strain anisotropy (see also LEINSS et al., 2020). In our results, consistent with LÖWE, SPIEGEL et SCHNEEBELI (2011), the structural anisotropy at the smallest scales, captured by the anisotropy of the directional SSA (Fig. 5.9), did not show any evolution during compression. The initial anisotropy of this quantity (revealing more horizontal than vertical surfaces) presumably originates from the sample sieving, with the deposition of anisotropic forms (fragmented plates, needles, or dendrites) that tend to align predominantly horizontally in the gravity field (GARRETT et al., 2012). On the other hand, the evolution of the bonding system captured by the minimum cut surface can be used to characterize the anisotropy of the structure at larger scales. Importantly, our results did also not reveal any creation of anisotropy at this scale, since no significant evolution of the anisotropy factors on bond number and bond area could be observed during compression (Fig. 5.9). Accordingly, and in contrast to the hypotheses of LEINSS et al., 2020, our study does not support the existence of a generic relation between uniaxial compaction and the creation of a microstructure anisotropy. As modelled by HAGENMULLER et al. (2014a), the stress and strain

fields at the microscopic level can significantly deviate from the macroscopic applied stress or strain, which may explain the essentially isotropic strengthening of the microstructure in our case. However, testing a larger set of samples covering more snow types and values of initial anisotropy would certainly be needed to draw definite conclusions.

5.5 Conclusion

Oedometric compression tests were performed on snow samples with an initial density ranging between 200 and 300 kg m⁻³, and under two different loads of 2.1 kPa and 4.7 kPa. The tested samples exhibited a compaction of at most 10 % over the course of about one week. In addition, for a given load, the compaction rate was observed to be strongly dependent on the initial density of the sample. The sample with the highest density is barely affected by the application of the load, while low density snow undergoes significant densification under mechanical loading. The microstructure evolution was captured with tomographic measurements during the loading stages and the initial sintering phase. Qualitatively, and even when macroscopic vertical compaction of the samples was significant, grain arrangement appeared to remain mostly unaffected by the application of the load. More quantitatively, tomographic images were used to follow the evolution of density, specific surface area, as well as of more advanced descriptors of the bonding system, namely the Euler characteristic and the minimum cut surface.

Our results show that the evolution of the specific surface area appears to be mainly controlled by isothermal metamorphism, and does not seem to be affected by the load application. Similarly the average bond area, derived from the minimum cut surface, steadily increases and remains essentially unaffected by the applied load. In contrast, while the number of bonds decreases during the initial sintering stage, it increases after load application when compaction is observed (i.e. for low density snow). This impact of loading on the bond number remains visible during about 50 h, regardless of the applied load. After this transient period, the metamorphism-induced coarsening of the microstructure takes over again, with a slightly decreasing bond number and an increasing bond area. Finally, it was also shown that the vertical compaction does not impact the anisotropy of the microstructure in our tests. The initial anisotropy inherited from sample preparation remains unchanged during the loading phases. Accordingly, no sign of preferential bond strengthening in the loading direction could be observed.

This study provides new insights into the interplay between isothermal metamorphism and load-induced deformation in snow microstructure evolution. Overall, our results show that, for the considered thermal and loading conditions, the load-induced deformation of the ice matrix mainly results from slow creep that leads to a reduction of the pore space and an increase of the coordination number, while metamorphism mainly affects the grain and bond sizes. In particular, the specific surface area cannot

capture the microstructure changes driven by creep in our tests. Load-induced creep occurs only for sufficiently large loads and/or sufficiently small initial density, and manifests itself through a subtle evolution of the bonding system at a scale of several grains that require advanced topological metrics to be quantified. Let us however recall that these conclusions are based on a limited number of samples tested in specific conditions. Our results would now need to be extended to a larger range of initial density and loads, in order to better understand the effect of strain rate and strain amplitude on the microstructure evolution. The sensitivity of snow creep to the initial sample anisotropy would also need to be investigated.

5.6 Acknowledgements

This project benefited from the support of ED-IMEP2 through a PhD fellowship. The tomography apparatus (TomoCold) was funded by INSU-LEFE, Labex OSUG (Investissements d’avenir – ANR10 LABX56) and the CNRM. This work has been supported by the French National Research Agency in the framework of the "Investissements d’avenir" program (ANR-15-IDEX-02). The authors would like to thank J. Roulle for help during the experiments.

5.A Appendix : Sensitivity of microstructural characteristics to the segmentation procedure

As stated before, the value of the segmentation parameter r (smoothing factor) was optimized based on the shortest-duration (i.e. lowest-quality) scans, and subsequently applied to all other scans. This procedure allowed us to achieve a similar effective resolution for all scans, thus ensuring that changes in scan settings (see Table 5.1) do not affect the temporal trends in the derived microstructural parameters. In practice, segmented images obtained with a smoothing factor r varying in the range $[1 - 5]$ were all visually satisfying. The results presented in the paper correspond to the median value $r = 3$.

Fig. 5.10 illustrates the sensitivity of microstructural characteristics to variations of r in the range $[1 - 5]$ for the case of sample S2. This sensitivity is converted into typical measurement uncertainties (error bars) on the parameters. In detail, the effect of r depends on the parameter considered : e.g., a larger smoothing factor, which smooths out small features in the tomographic images, tends to lower the value of SSA but to increase the value of Euler characteristic χ . Overall, during loading stages, it is observed that the sensitivity to r tends to be slightly larger for the first few data points, which correspond to lowest-quality scans, and then to remain fairly constant for all data points derived from high-quality scans. It can also be noticed that the SSA and the parameters related to the bond number, namely χ and MC_b ,

are affected by significantly larger error bars for the first scan of the initial sintering phase (although this scan is of high quality). This can be explained by the fact that, since this scan was performed shortly after sieving the samples, newly-formed bonds are still small at this time and slight variations in smoothing parameter can thus lead to strong changes in the topology of the bonding network in the segmented images.

5.B Supplementary material

The video provided in the Supplementary Material (see <https://doi.org/10.1017/jog.2022.109>) shows the evolution of the microstructure of sample S2 during the loading stage at 2.1 kPa. The shown volume corresponds to the inner portion of the sample (see Fig. 5.1) which was further cropped along the x -axis for visualisation purposes. The volume was rendered with ParaView.

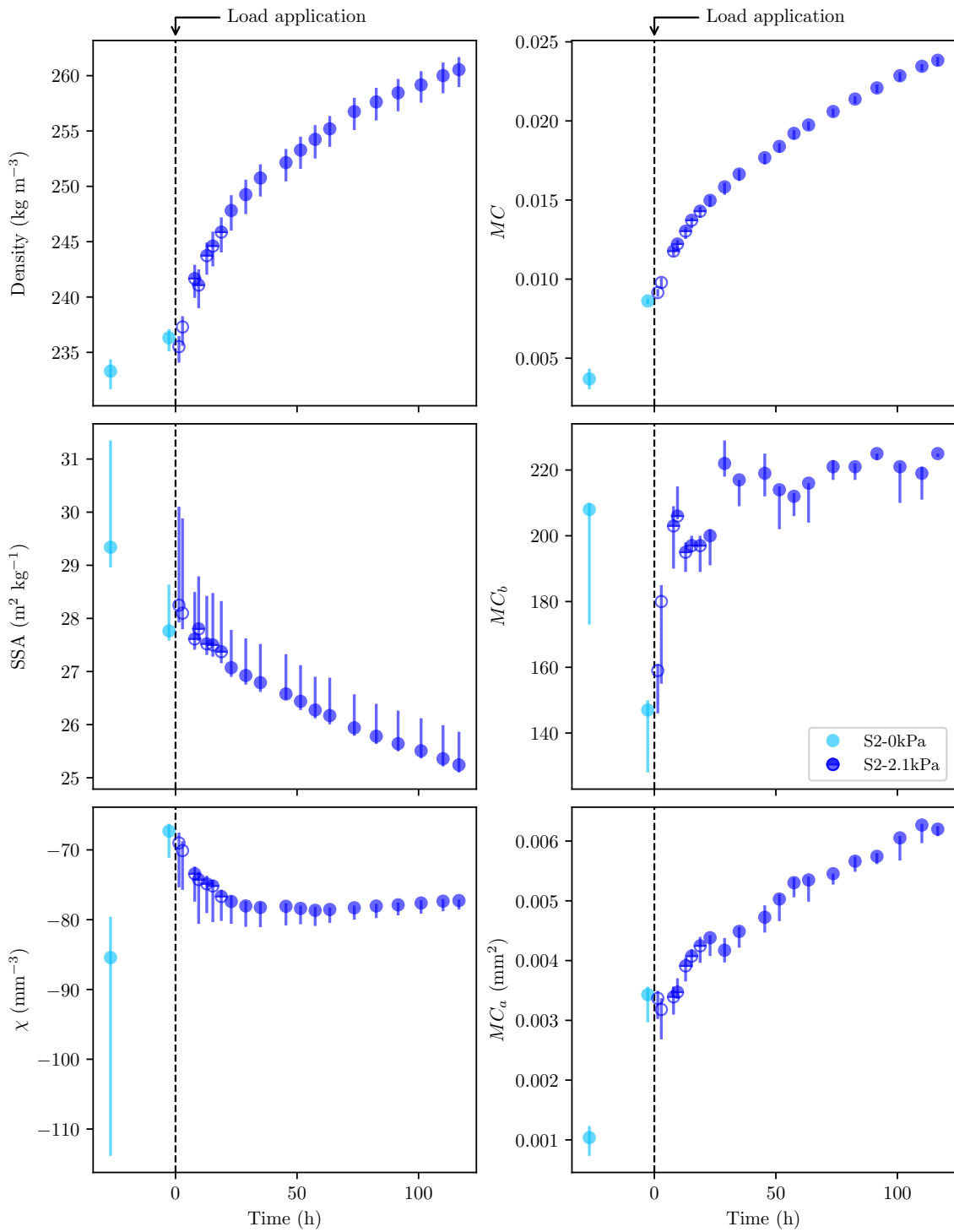


Figure 5.10 – Sensitivity of density ρ , specific surface area SSA , Euler characteristic χ , minimum cut surface MC , bond number MC_b , and average bond area MC_a to the segmentation smoothing parameter r for the different scans performed on sample S2 during the initial sintering phase and the loading stage at 2.1 kPa. For each scan, the data point corresponds to $r = 3$, while the error bar reflects variations obtained for r ranging between 1 and 5. Empty, half-filled, and filled markers correspond to short, medium, and long duration scans, respectively.

Troisième partie

Essai à déformation imposée

6 Effet de la vitesse de compression sur l'évolution des microstructures de neige

6.1 Introduction

La neige est un matériau composé d'un squelette de glace et de pores d'air. À l'instar des matériaux poreux, la compréhension du comportement mécanique de la neige passe par une meilleure connaissance des interactions entre, d'un côté la microstructure, et de l'autre le chargement mécanique en contrainte ou en déformation. Par ailleurs, la microstructure de la neige subit des évolutions constantes du fait des processus de métamorphisme. La sublimation de la glace, le transfert de vapeur et la recristallisation dans les concavités des grains de neige (COLBECK, 1997) modifient la forme et la taille des grains de neige. Selon les cas, ces processus conduisent à une structure plus arrondie par la minimisation de l'énergie de surface via le métamorphisme d'isothermie (LÖWE, SPIEGEL et SCHNEEBELI, 2011), ou au contraire à une facettisation des grains dans le cas d'un métamorphisme sous gradient de température (TAILLANDIER et al., 2007). Du fait de ces couplages, les relations entre la microstructure de la neige et ses propriétés mécaniques sont difficiles à quantifier. Les travaux expérimentaux en laboratoire dans ce domaine sont peu nombreux. Les essais de fluage, plus simples expérimentalement, ont mis en lumière l'influence du métamorphisme sur la densification (voir SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI, 2014) et du chargement mécanique externe sur la connectivité du squelette de glace (voir BERNARD et al., 2022). Des essais à déformation imposée ont aussi montré l'impact de la vitesse de déformation sur l'évolution de la surface spécifique (SCHLEEF et LÖWE, 2013 ; WANG et BAKER, 2013), y compris pour de faibles vitesses de déformations ($< 1.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). La compréhension du système de contacts de la microstructure, notamment des ponts liant les grains, est d'une importance capitale (KRY, 1975a), car ces ponts constituent à priori les zones de concentrations de contraintes (EDENS et BROWN, 1991). Récemment, des métriques spécifiques telles que la caractéristique d'Euler (SCHLEEF et LÖWE, 2013 ; SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI, 2014 ; BERNARD et al., 2022) et la coupe-minimum (HAGENMULLER et al., 2014a ; BERNARD et al., 2022) ont été utilisées pour quantifier la connectivité de la microstructure, à l'échelle globale et locale.

Les objectifs de cette partie sont les suivants : 1) mesurer expérimentalement l'effet

de la vitesse de déformation sur la réponse macroscopique du matériau, 2) quantifier l'évolution de la microstructure durant ces essais, et 3) identifier les rétroactions entre les deux échelles. Pour mesurer la réponse mécanique, nous avons conçu un dispositif de compression original permettant d'effectuer des essais à vitesse imposée in-situ, en chambre froide, dans une cabine de tomographie.

6.2 Méthodologie

6.2.1 Essais de compression à vitesse imposée

Nous avons mené des essais de compression uniaxiale contrôlés en vitesse de déformation à l'aide d'une presse développée spécifiquement (Figure 6.1). Le dispositif est décrit en détail dans le Chapitre 2. Nous ne rappelons ici que les principaux éléments.

Les échantillons testés sont cylindriques, de dimensions 14 mm de hauteur et 14 mm de diamètre. Le déplacement est appliqué par le bas de l'échantillon à l'aide d'un piston et d'un moteur à déplacement linéaire. Le haut de l'échantillon est bloqué par un bouchon. L'air peut librement s'échapper du porte-échantillon, et nous avons vérifié que les frottements sur les parties coulissantes du montage (porte-échantillon/échantillon et piston/porte-échantillon) sont négligeables. La charge appliquée sur l'échantillon est mesurée à l'aide d'un capteur de force miniature régulièrement calibré, et la déformation est déterminée via la position du moteur.

Trois séries, comportant chacune une dizaine d'échantillons, ont été préparées comme suit : un bloc de neige naturelle a été récolté à 1300 m d'altitude et stocké dans une chambre froide à -20°C pendant plusieurs semaines. La neige, composée de *Particules reconnaissables* (DF) et de *Grains fins* (RG), a ensuite été tamisée directement dans les porte-échantillons avec une taille de maille de 1.6 mm. Après 72 h à une température de -20°C pour permettre aux ponts entre les grains de se reformer, les échantillons sont placés à une température de $-50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ pour prévenir une évolution plus importante de la microstructure sous l'effet du métamorphisme d'isothermie. Une demi-heure avant essai, l'échantillon à tester est vissé sur le corps de presse, permettant une remontée à température ambiante ($-18.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$).

La plage des vitesses de déformation accessibles avec notre dispositif s'étend de $1.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ à $7.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Pour chaque essai, la vitesse de déformation est maintenue constante, ainsi que la température de consigne (-18.5°C). La déformation est stoppée lorsque l'on atteint la contrainte maximale admissible par le moteur, soit 290 kPa. La déformation finale est alors maintenue, permettant l'observation de la relaxation des contraintes dans l'échantillon. Le tableau 6.1 récapitule les différents essais qui seront exploités dans la suite.

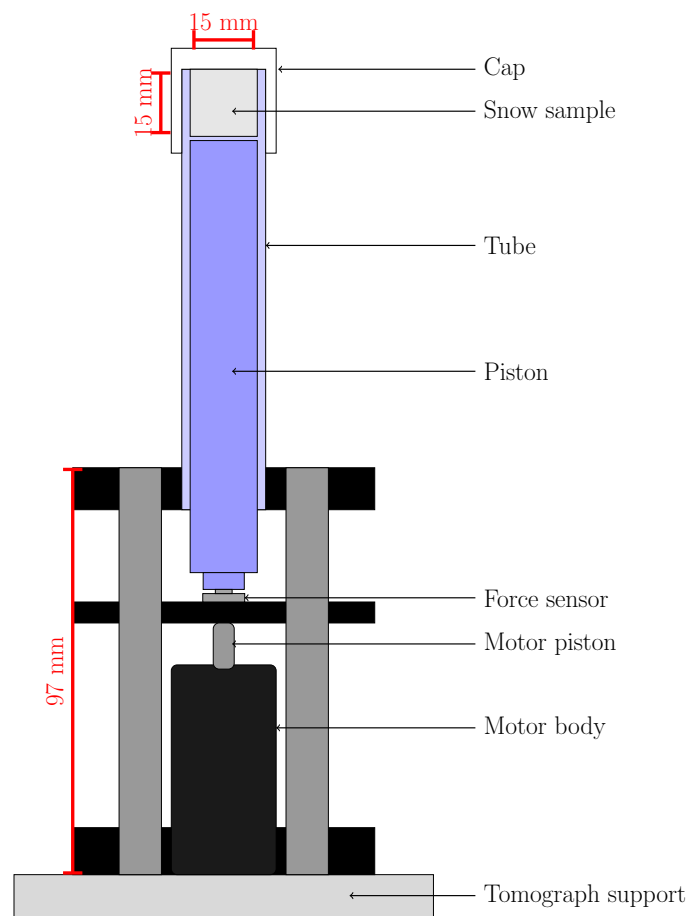


Figure 6.1 – Schéma de la presse conçue pour les essais en chambre froide suivis par tomographie.

Table 6.1 – Principales caractéristiques des essais réalisés : vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$, déformation maximale ϵ_{max} , valeurs initiales et finales de masse volumique ρ et de surface spécifique SSA . Pour ces deux dernières quantités, les valeurs obtenues en considérant les volumes de 800^3 voxels et 500^3 voxels sont indiquées.

800^3	$\dot{\epsilon}$	ϵ_{max}	ρ_{ini}	SSA_{ini}	ρ_{fin}	SSA_{fin}
V1-2	1.8e-06	5.2e-01	211.14	28.51	461.81	23.86
V3-5	3.1e-05	4.5e-01	230.97	27.95	426.45	26.26
V3-6	3.1e-05	4.5e-01	222.75	28.10	422.67	26.27
V5-1	2.2e-04	4.4e-01	211.95	28.37	389.87	26.91
V5-2	2.0e-04	4.5e-01	222.34	28.59	405.58	26.80
V5-3	2.2e-04	4.3e-01	227.71	27.78	400.94	26.46
V6-3	6.6e-04	4.1e-01	212.29	28.26	370.73	27.30
V6-4	6.0e-04	4.5e-01	209.23	28.06	385.02	26.79
V7-5	7.7e-03	4.5e-01	217.17	28.52	414.77	28.39
V7-6	7.8e-03	5.4e-01	184.52	28.16	445.17	27.46
V7-7	7.5e-03	5.2e-01	209.77	28.07	426.38	27.58
Mean		4.6e-01	214.53	28.22		
Std		4.0e-02	11.89	2.5e-01		
500^3	$\dot{\epsilon}$	ϵ_{max}	ρ_{ini}	SSA_{ini}	ρ_{fin}	SSA_{fin}
V1-2	1.8e-06	5.2e-01	245.40	28.42	458.32	25.01
V3-5	3.1e-05	4.5e-01	250.95	27.85	427.34	26.37
V3-6	3.1e-05	4.5e-01	244.89	27.91	429.10	26.18
V5-1	2.2e-04	4.4e-01	241.59	28.01	391.09	26.87
V5-2	2.0e-04	4.5e-01	234.02	29.09	400.66	27.10
V5-3	2.2e-04	4.3e-01	247.72	27.93	408.46	26.57
V6-3	6.6e-04	4.1e-01	237.83	28.25	375.52	27.30
V6-4	6.0e-04	4.5e-01	228.81	27.97	387.45	26.91
V7-5	7.7e-03	4.5e-01	242.02	28.68	407.46	28.54
V7-6	7.8e-03	5.4e-01	216.40	28.34	451.05	28.01
V7-7	7.5e-03	5.2e-01	215.44	28.29	421.94	28.18
Mean		4.6e-01	236.82	28.25		
Std		4.0e-02	11.50	3.6e-01		

6.2.2 Micro-tomographie à rayons-X

Pour chaque essai, nous réalisons des scans des microstructures initiales et finales à l'aide du tomographe décrit dans le chapitre 3. Pour les essais aux vitesses de déformation les plus lentes, des scans tomographiques ont également été réalisés au cours de la compaction, et permettent de mieux suivre l'évolution de la microstructure au cours de la déformation.

Lors de chaque acquisition tomographique, deux types de scans sont réalisés : une acquisition globale de l'ensemble de l'échantillon (taille de voxel $12.5\ \mu\text{m}$, diamètre de $22.5\ \text{mm}$ et hauteur $16.25\ \text{mm}$) et une acquisition d'un sous-volume à l'intérieur de l'échantillon (taille de voxel de $8\ \mu\text{m}$, diamètre de $14.4\ \text{mm}$ et hauteur de $10.4\ \text{mm}$). Les scans à haute résolution sont réalisés dans la partie supérieure de l'échantillon, proche du bouchon, où le déplacement est le plus faible.

6.2.3 Analyse des données

6.2.3.1 Traitements d'images

Pour permettre l'analyse des images, nous avons extrait à partir des scans à haute-résolution des volumes cubiques de 800^3 voxels, i.e. $6.4^3\ \text{mm}^3$.

En examinant les profils verticaux de densité (Figure 6.5), nous avons remarqué que les échantillons n'étaient pas toujours homogènes dans les volumes pré-cités. Dans un deuxième temps, il a donc été décidé de considérer également des volumes cubiques plus petits de 500^3 voxels, i.e. $4.0^3\ \text{mm}^3$. Ces sous-volumes sont choisis pour être situés dans la partie la plus homogène des volumes de 800^3 voxels.

6.2.3.2 Propriétés mesurées

Les propriétés suivies et les protocoles de mesure sont décrits exhaustivement dans les Chapitres 2 et 4. Nous ne revenons ici que sur les éléments spécifiques à ces essais avec la presse.

Contrainte et déformation. Les valeurs de force F et de déplacement d au cours de l'essai sont enregistrées à une fréquence de $50\ \text{Hz}$. On en déduit les valeurs de contraintes σ et de déformation ε à l'aide des caractéristiques géométriques des échantillons. Ceci permet de tracer les courbes contraintes-déformations ($\sigma - \varepsilon$) en fonction des vitesses de déformations imposées.

Profils verticaux de masse volumique Des profils de masse volumique ont été tracés à partir des images tomographiques en découpant dans la direction verticale z des couches de 5 px de hauteur, sans recouvrement. Dans chacune des couches, la masse volumique est moyennée. L'épaisseur de 5 px ou 0.04 mm a été choisie car elle permet de mettre en évidence une hétérogénéité des profils tout en fournissant un signal qui n'est pas trop bruité. D'autres quantités microstructurelles ont aussi fait l'objet de profilages, mais elles ne présentent pas d'hétérogénéités.

Distribution des longueurs de cordes et longueur de persistance. La technique de mesure (TORQUATO et LU, 1993) consiste à placer des « cordes » au sein d'une phase (air ou glace), et à déterminer la distribution des longueurs de ces cordes au sein de la phase. Dans notre approche, nous positionnons des cordes dans les trois directions cartésiennes de l'espace. Un exemple de distribution obtenue sur un essai est montré sur Figure 6.2. On observe que ces distributions présentent une décroissance quasi-exponentielle sur plusieurs décades.

Afin de caractériser ces distributions, on réalise un ajustement des courbes à une fonction exponentielle de la forme $f(r) = \beta \exp(-r/\alpha)$. Le paramètre α , qui correspond à la pente de la courbe en échelle semi-logarithmique, est appelé longueur de persistance. L'ajustement est réalisé pour des longueurs de cordes comprises entre 50 vx (après le pic) et le premier passage à zéro de la distribution.

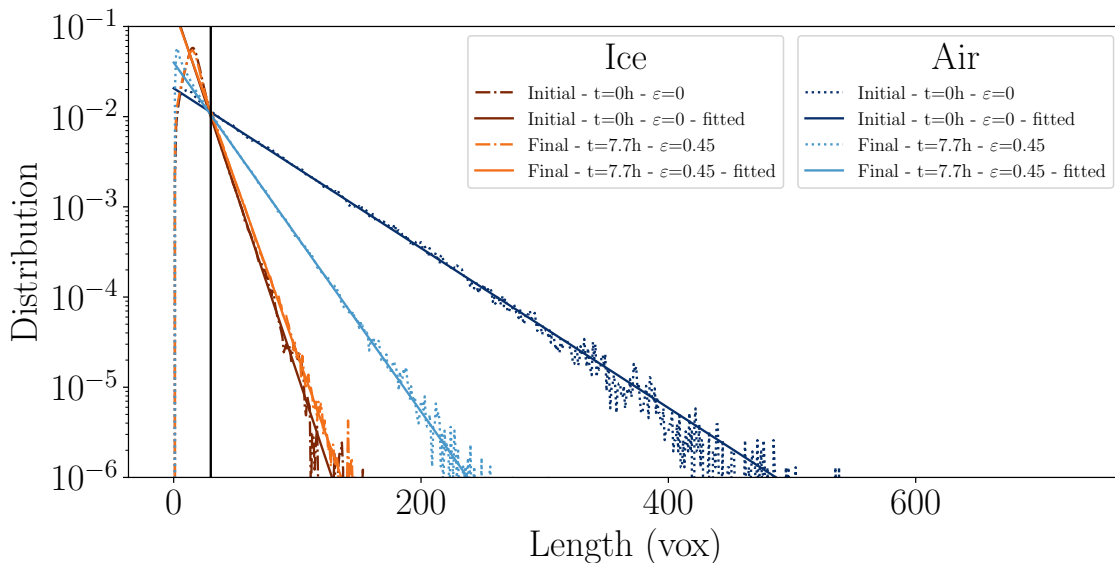


Figure 6.2 – Distributions initiale et finale des longueurs de cordes dans la glace et dans l'air selon l'axe vertical z pour l'essai V3-6 (vitesse de déformation $\dot{\epsilon} = 3.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ et ajustements exponentiels correspondants. Le trait noir vertical représente le seuil inférieur considéré pour l'ajustement (voir texte).

6.3 Résultats

Le Tableau 6.1 synthétise les valeurs initiales et finales de la masse volumique ρ et de la surface spécifique SSA pour les différents essais réalisés. Pour correctement interpréter les effets de phénomènes mécanique ou thermodynamique, il faut tenir compte de l'importance relative du métamorphisme d'isothermie pendant le chargement. Pour les essais les plus rapides, le chargement a duré ~ 30 s, et les scans tomographiques ~ 90 minutes. Autrement dit, à même déformation finale, les essais plus lents ont été en absolu plus influencés par le métamorphisme que les essais les plus rapides. Pour les valeurs représentées en fonction du temps écoulé depuis le début du chargement, nous avons ajouté une incertitude représentant le temps du scan.

Courbes $\sigma - \varepsilon$. La Figure 6.3 présente la réponse en contrainte des échantillons pour différentes gammes de vitesse de déformation. À forte vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon} > 10^{-3} s^{-1}$), le signal de contrainte est caractérisé par une forme en dents de scie. Au début de l'essai ($\varepsilon < 0.3$), la contrainte reste faible et constante en moyenne. Dans un second temps ($\varepsilon > 0.3$), la contrainte augmente rapidement, en présentant toujours des chutes brutales. À l'inverse, à faible vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon} < 10^{-4} s^{-1}$) la contrainte présente une croissance lisse, qui accélère régulièrement au cours de l'essai. Les petites fluctuations observées pour l'essai le plus lent correspondent aux instants où ont été réalisés les scans tomographiques. Pour des vitesses intermédiaires ($10^{-4} s^{-1} < \dot{\varepsilon} < 10^{-3} s^{-1}$), la contrainte est globalement croissante mais les courbes présentent des fluctuations relativement marquées autour de la tendance moyenne. Rappelons que nous n'avons pas réalisé de scans intermédiaires au cours de ces essais. On peut aussi noter que c'est pour ces vitesses intermédiaires que l'augmentation de la contrainte avec la déformation est la plus rapide.

Masse volumique. Les masses volumiques initiales ρ_{ini} sont similaires pour tous les échantillons, avec une moyenne de $215.0 \pm 12.5 \text{ kg m}^{-3}$ (resp. $237.0 \pm 12.1 \text{ kg m}^{-3}$) calculée sur les volumes de 800^3 vx (resp. 500^3 vx). La conservation de la masse permet d'obtenir l'équation (6.1) reliant masse volumique et déformation :

$$\rho = \rho_{ini} \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (6.1)$$

Comme le montre la Figure 6.4, les mesures expérimentales sont globalement en bon accord avec cette relation. Les faibles écarts observés entre la courbe théorique et les valeurs mesurées peuvent vraisemblablement s'expliquer par les hétérogénéités au sein des échantillons.

Profils de masse volumique. La Figure 6.5 présente les profils de masse volumique déterminés sur les volumes de 800^3 vx . À l'état initial, ces profils montrent clairement une hétérogénéité en partie supérieure de l'échantillon, présente sur environ 300 px

6 Effet de la vitesse de compression sur l'évolution des microstructures de neige

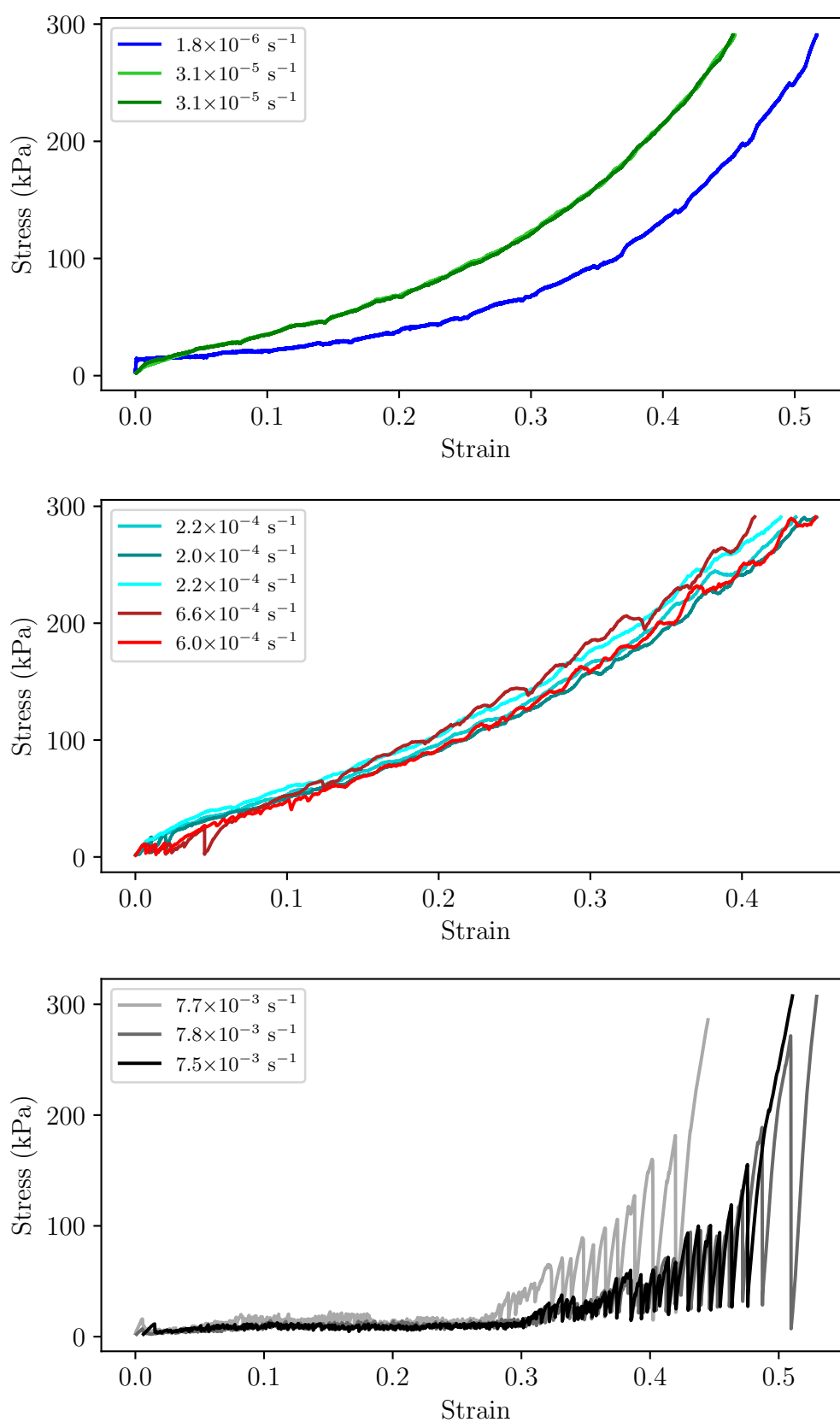


Figure 6.3 – Courbes contrainte-déformation pour trois gammes de vitesse de déformation.

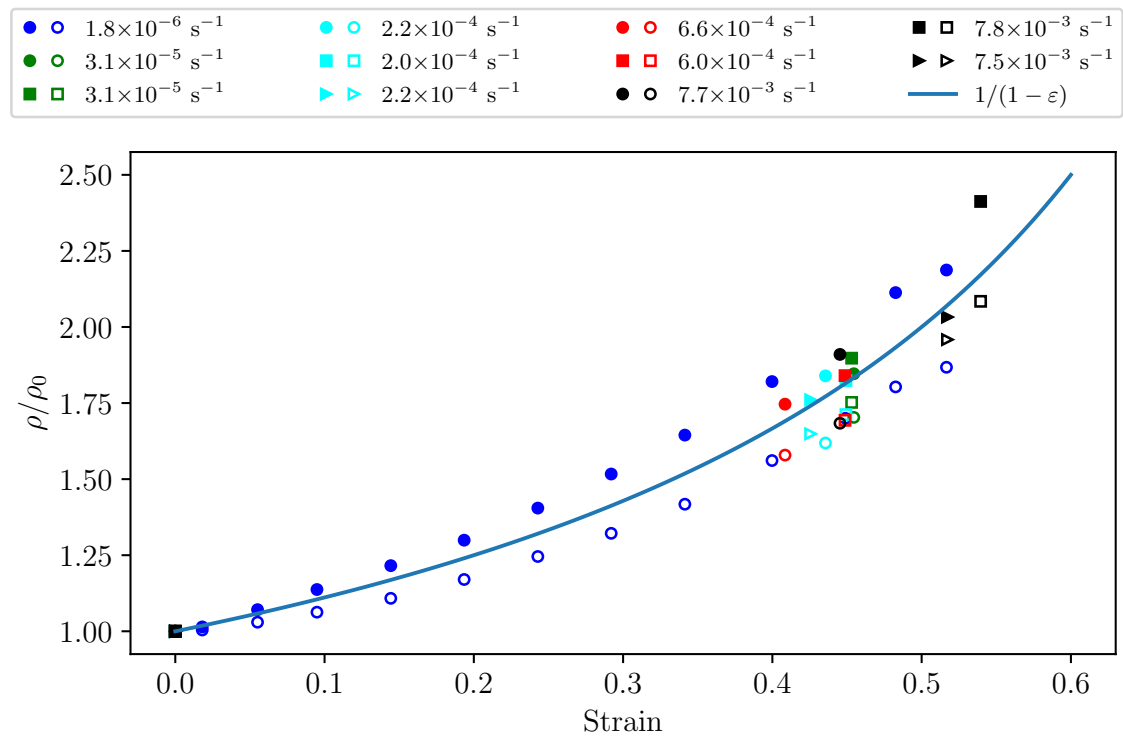


Figure 6.4 – Évolution relative de la masse volumique en fonction de la déformation. Les symboles pleins (resp. vide) correspondent aux propriétés mesurées sur les volumes de 800^3 vx (resp. 500^3 vx) pour les différentes vitesses de déformation (voir légende). La courbe en trait plein représente la prédiction théorique (équation (6.1)).

(i.e., 2.4 mm) en partie haute du volume. Dans cette zone, la masse volumique est plus faible (-15% en moyenne) que la masse volumique moyenne. Pour un des échantillons, la masse volumique mesurée au sommet de l'échantillon vaut 20 kg m^{-3} . Cette hétérogénéité se résorbe ensuite à mesure que la compaction de l'échantillon augmente, comme le montrent les scans intermédiaires réalisés à vitesse lente. Les microstructures finales présentent des profils de densité homogènes pour toutes les vitesses de déformation imposées. On remarque que des artefacts présents avant l'essai, sont identifiables et persistent tout au long de l'essai. Enfin, notons que les mêmes profils réalisés sur les volumes de 500^3 vx sont homogènes dès l'état initial.

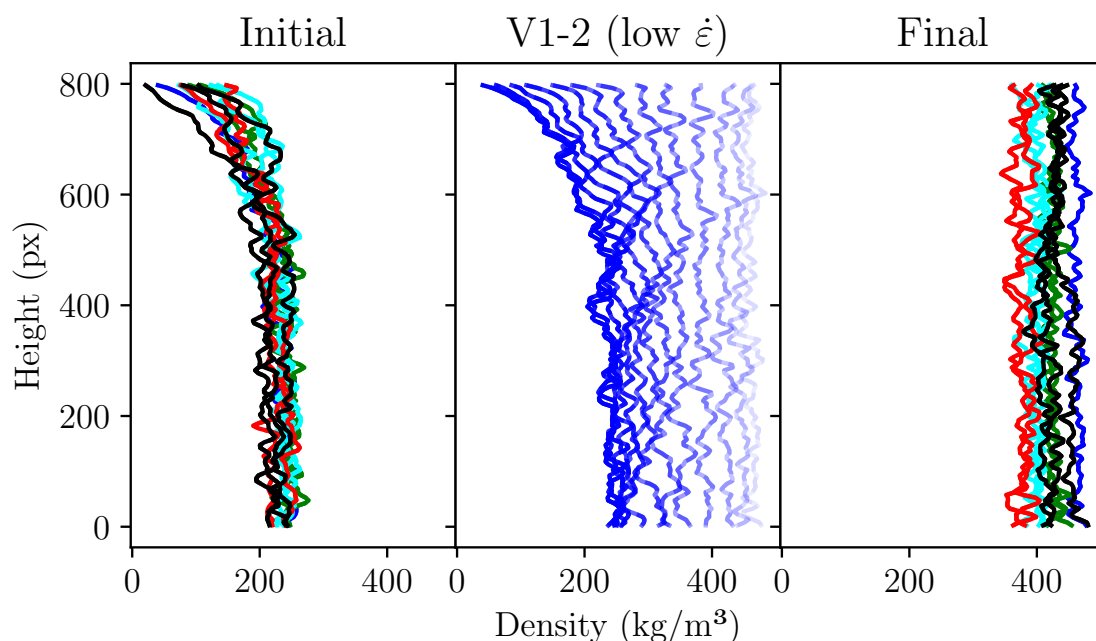


Figure 6.5 – Profils de masse volumique dans la direction verticale : à gauche, les profils obtenus pour les microstructures initiales ; au centre, les profils obtenus au cours du temps pour l'essai à faible vitesse de déformation V1-2 ; à droite, les profils pour les microstructures finales.

Surface spécifique. La surface spécifique décroît au cours de tous les essais (Figure 6.6). Initialement, la valeur moyenne mesurée est de $28.2 \pm 0.3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (resp. $28.3 \pm 0.4 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) pour les volumes de 800^3 vx (resp. 500^3 vx). Pour les essais à forte vitesse de déformation, la surface spécifique décroît d'environ 2% , et jusqu'à 17% pour l'essai le plus lent, et ce alors que les déformations finales sont relativement similaires. Pour une même déformation, la surface spécifique décroît plus pour les faibles vitesses de déformation. Ceci traduit vraisemblablement l'effet du métamorphisme. Toutefois, pour une même durée depuis le début de l'essai, on observe aussi que la surface spécifique décroît plus à haute vitesse de déformation qu'à faible vitesse de déformation.

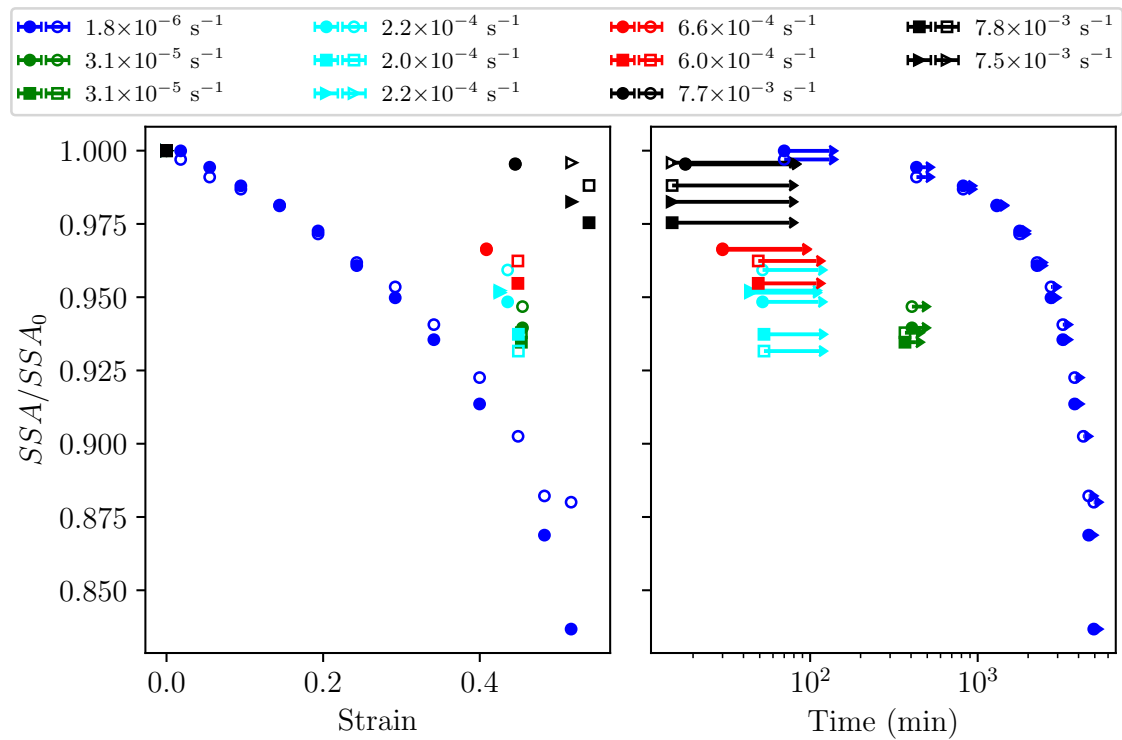


Figure 6.6 – Évolution relative de la surface spécifique en fonction de la déformation et du temps. Les flèches sur le graphique de droite représentent la durée des scans.

Caractéristique d'Euler χ . Pour l'ensemble des essais, la caractéristique d'Euler a diminué entre les microstructures initiales et finales (Figure 6.7). Avec une valeur initiale moyenne de $-69.5 \pm 7.6 \text{ mm}^{-3}$ pour les deux tailles de volumes (800^3 vx et 500^3 vx), χ vaut en moyenne après essai $-261.7 \pm 17.1 \text{ mm}^{-3}$ pour les volumes de 800^3 et $-312.7 \pm 40.8 \text{ mm}^{-3}$ pour les volumes de 500^3 . On constate donc une plus forte diminution de χ dans les volumes 500^3 que dans les volumes 800^3 . En considérant la dispersion des résultats, nous n'observons pas de différence majeure en fonction de la vitesse de déformation. Pour les volumes de 500^3 , plus petits et homogènes, les trois essais les plus rapides se distinguent par un diminution plus forte.

Distribution des longueurs de cordes et longueurs de persistance α . Les longueurs de persistance dans l'air α_{air} et dans la glace α_{ice} représentent la pente de la décroissance de la distribution des longueurs de cordes mesurées dans chacune des phases de notre milieu, c'est-à-dire, l'air et la glace (voir Figure 6.2). On les présente dans la Figure 6.8.

Pour l'ensemble des essais et les deux volumes d'intérêt considérés, α_{air} diminue fortement au cours de l'essai, de manière quasi-linéaire en fonction de la déformation. Initialement, dans les volumes de 800^3 vx , la longueur de persistance de l'air vaut

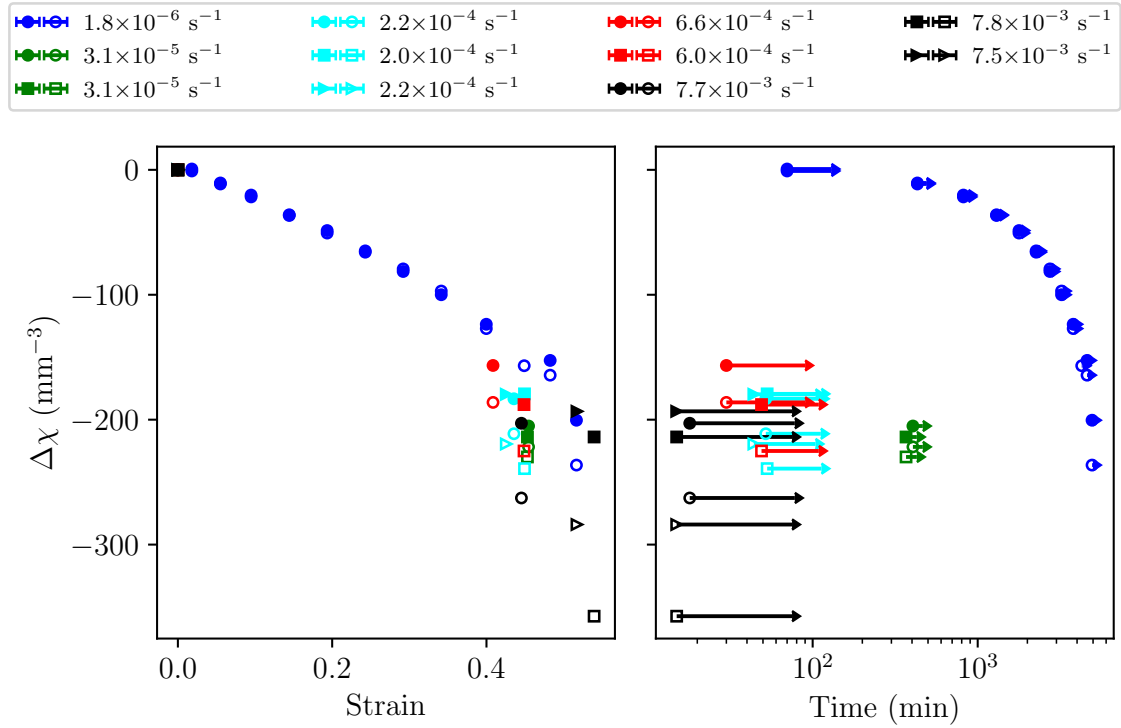


Figure 6.7 – Évolution de la caractéristique d'Euler $\Delta\chi = \chi - \chi_0$ en fonction de la déformation et du temps. Les flèches sur le graphe de droite représentent la durée des scans.

en moyenne 50.5 ± 2.6 vx. Elle passe à 22.9 ± 2.9 vx en moyenne à l'état final. Dans les volumes de 500^3 vx, la longueur de persistance de l'air passe de 43.7 ± 3.0 vx à 22.0 ± 2.6 vx en moyenne. On ne note pas d'influence notable de la vitesse de déformation sur cette quantité. La longueur de persistance dans la phase glace, α_{ice} ne présente pas de tendance clairement identifiable. En moyenne, α_{ice} vaut initialement 11.4 ± 0.8 vx, et 11.8 ± 0.7 vx en fin d'essai, sur les volumes 800^3 vx. Les valeurs sont sensiblement identiques sur les volumes de 500^3 vx. L'essai le plus lent montre toutefois une légère augmentation de α_{ice} , ce qui traduirait une augmentation de la taille des grains de glace. En revanche, les essais plus rapides sont caractérisés par une forte dispersion des résultats. Pour les essais les plus rapides, une légère diminution de α_{ice} suggère que le squelette de glace tend à se fragmenter.

Coupe minimum (« Minimum cut »). Pour l'ensemble des échantillons et des volumes d'intérêt considérés, la surface de coupe minimum (MC) croît avec la déformation (Figure 6.9). Sur l'essai le plus lent ($1.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), on peut noter une accélération de la croissance de MC avec la déformation. On observe aussi que plus la vitesse de déformation est importante, plus MC finale est faible. Pour mieux quantifier cette évolution, on s'intéresse d'un côté au nombre de ponts composant la coupe minimum (MC_b), et de l'autre à l'aire moyenne des ponts (MC_a).

On peut également observer une croissance de nombre de ponts avec l'augmentation

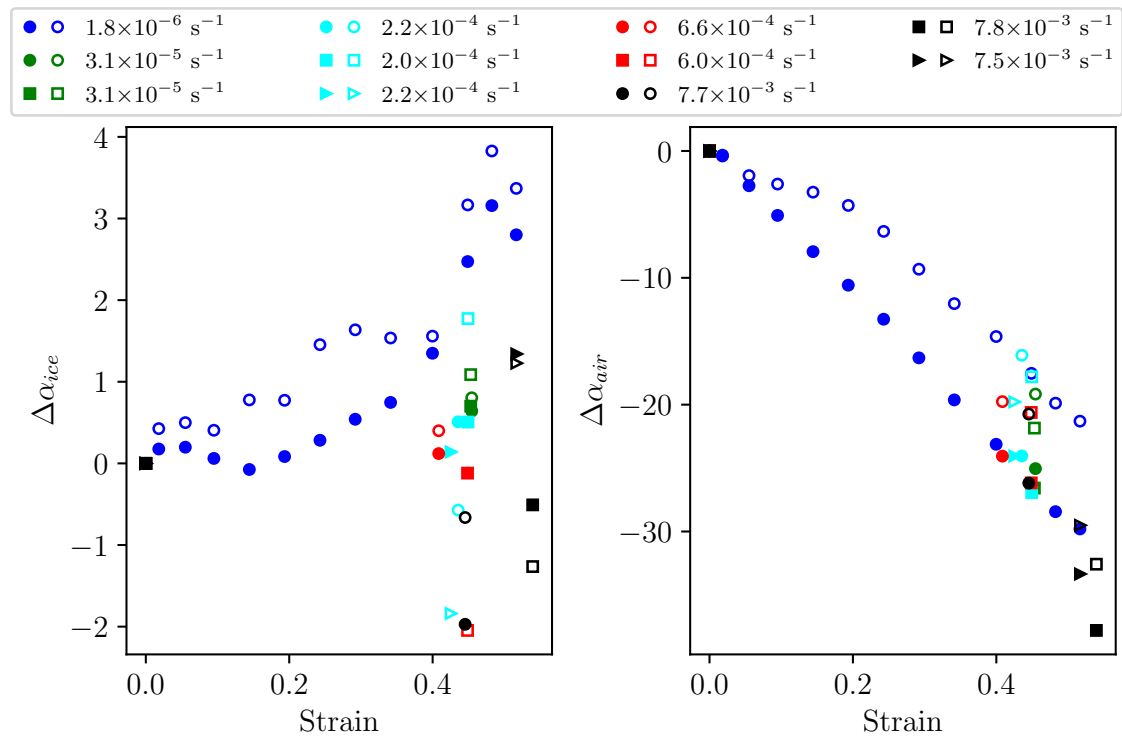


Figure 6.8 – Évolution des longueurs de persistance dans la glace et dans l’air en fonction de la déformation.

de la déformation. Sur l’essai le plus lent, on distingue un point d’inflexion pour une déformation de 0.25 environ : dans le cas des volumes de 800^3 vx la croissance s’accélère, tandis qu’elle stagne temporairement pour les volumes des 500^3 vx. Le nombre de ponts à la fin de l’essai est corrélé avec la déformation finale atteinte, et ne semble pas clairement dépendre de la vitesse de déformation.

La taille moyenne des ponts (MC_a) semble, elle, montrer des variations plus claires avec la vitesse de déformation. Aux plus fortes vitesses, la taille moyenne des ponts semble relativement constante, voire diminue légèrement avec la déformation. Aux vitesses intermédiaires, on n’observe pas de modification notable de MC_a , alors qu’aux vitesses les plus lentes, la taille moyenne des ponts augmente au cours de l’essai. Pour l’essai le plus lent, on observe sur les volumes 800^3 vx deux changements dans la dynamique de l’évolution, qui sont corrélés avec ceux observés dans l’évolution de la surface MC et du nombre de ponts MC_b . Sur les volumes 500^3 vx on distingue un seul changement de pente, à 0.25 environ. Toutefois, il faut noter que la dispersion des points est plus importante pour MC_a que pour MC_b et MC .

Anisotropie. Comme précédemment, le facteur d’anisotropie retenu est obtenu par différence-normalisée en utilisant l’Équation 4.2. L’évolution de ce facteur pour chacune des propriétés directionnelles est présentée dans la Figure 6.10.

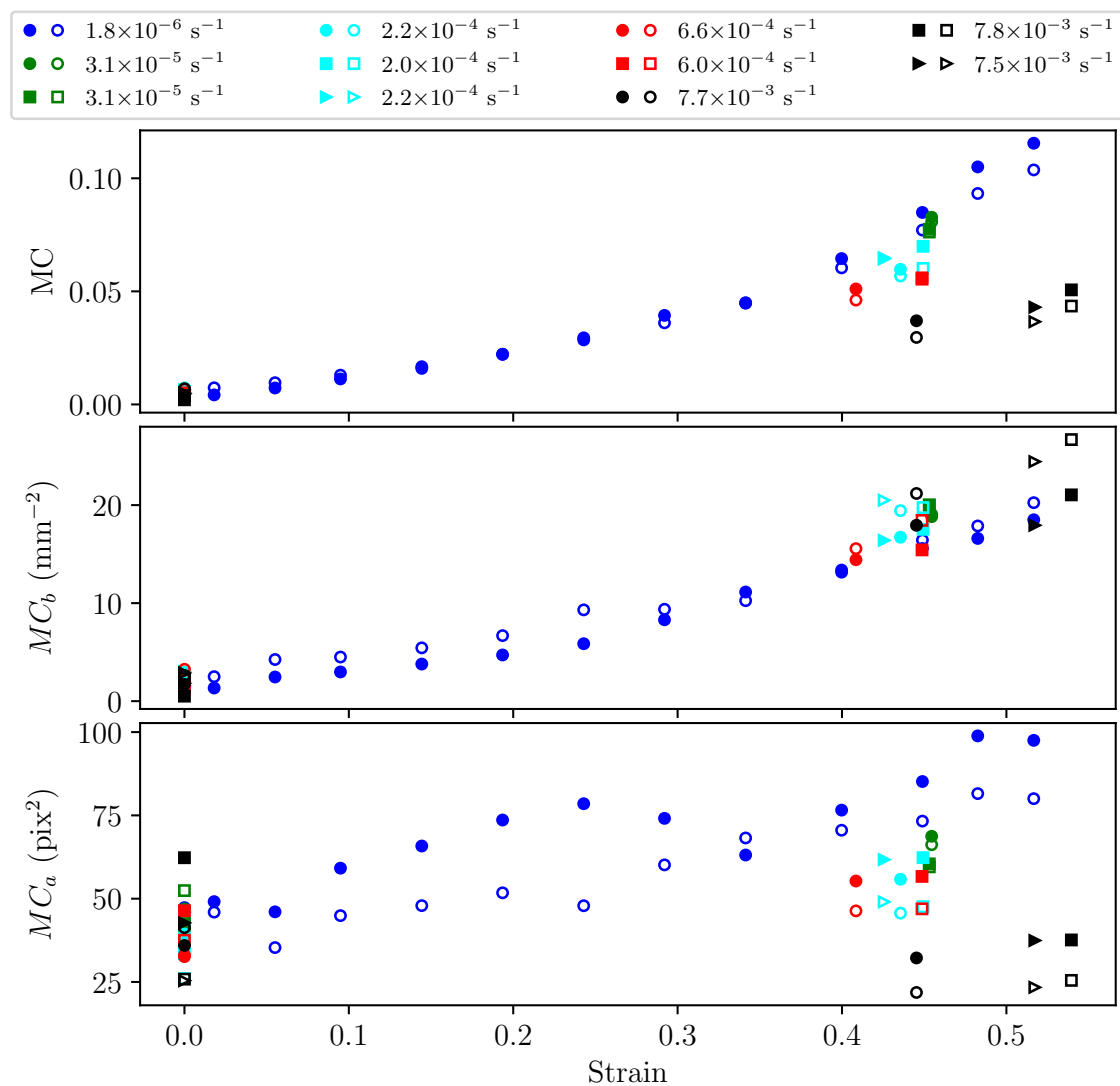


Figure 6.9 – Évolution de la surface de coupe minimum MC , du nombre de ponts MC_b et de la taille moyenne des ponts MC_a en fonction de la déformation. Les données présentées correspondent à la coupe minimum calculée dans la direction verticale z .

La surface spécifique directionnelle présente une anisotropie initiale dans l'axe vertical z , qui s'amplifie au cours de l'essai. La valeur du facteur d'anisotropie moyenne vaut 6×10^{-2} initialement et 1.28×10^{-1} en fin d'essai. Ainsi, la composante verticale z est 6.4 % plus élevée avant l'essai que les composantes horizontales x et y , et 13.7 % plus élevée en fin d'essai. Ces valeurs et la tendance sont similaires pour les deux volumes considérés (500^3 vx et 800^3 vx). La dispersion des valeurs est légèrement plus importante après l'essai, ainsi que sur les volumes de 500^3 vx.

Initialement, les surfaces de coupe-minimum sont plus faibles dans la direction verticale, avec un facteur d'anisotropie A_{MC} moyen valant -4.7×10^{-1} pour les volumes 800^3 vx (resp. -1.2×10^{-1} pour les volumes 500^3 vx). La dispersion des valeurs initiales est relativement grande, notamment pour les volumes 800^3 vx. Les valeurs de A_{MC} convergent ensuite rapidement et se stabilisent autour de 0, indiquant une isotropie, lorsque la déformation atteint 0.15 environ.

Le facteur d'anisotropie du nombre de ponts de la coupe-minimum A_{MC_b} présente globalement le même comportement que le facteur d'anisotropie de la coupe-minimum A_{MC} . Dans les volumes de 800^3 vx (resp. 500^3 vx), ce facteur vaut initialement 0.47 ± 0.20 (resp. 0.06 ± 0.22) et 0.04 ± 0.11 (resp. 0.004 ± 0.096) après la déformation. À nouveau, on constate une plus forte dispersion des valeurs à l'état initial et pour les volumes de 500^3 .

Le facteur d'anisotropie sur la taille des ponts A_{MC_a} montre des valeurs proches de l'isotropie dès le début des essais. Les valeurs initiales sont de -0.09 ± 0.18 pour les volumes de 800^3 vx et 0.08 ± 0.22 pour les volumes de 500^3 vx. En fin d'essai, les valeurs se rapprochent encore plus de 0 et la dispersion se réduit, avec respectivement -0.06 ± 0.07 et -0.04 ± 0.08 en moyenne pour les volumes de 800^3 vx et 500^3 vx.

Le facteur d'anisotropie des longueurs de persistance $A_{\alpha_{air}}$ présente une convergence claire vers l'isotropie entre le début et la fin de l'essai. Ainsi, les valeurs initiales valent 0.14 ± 0.02 pour les volumes 800^3 vx (resp. 0.07 ± 0.03 pour les volumes 500^3 vx), alors que les valeurs finales correspondantes valent 0.03 ± 0.03 (resp. 0.02 ± 0.03). On remarque toutefois que pour deux des trois essais à haute vitesse de déformation, les valeurs finales n'ont pas autant convergé vers une situation isotrope que pour le reste des essais.

Finalement, le facteur d'anisotropie de la glace $A_{\alpha_{ice}}$ augmente légèrement entre le début et la fin de l'essai. Pour les volumes de 800^3 vx (resp. 500^3 vx) il vaut initialement 0.15 ± 0.07 (resp. 0.17 ± 0.15) et termine à 0.19 ± 0.04 (resp. 0.23 ± 0.06). Sur l'essai le plus lent, il semble que l'évolution de ce facteur d'anisotropie ne soit pas complètement monotone avec la déformation.

6 Effet de la vitesse de compression sur l'évolution des microstructures de neige

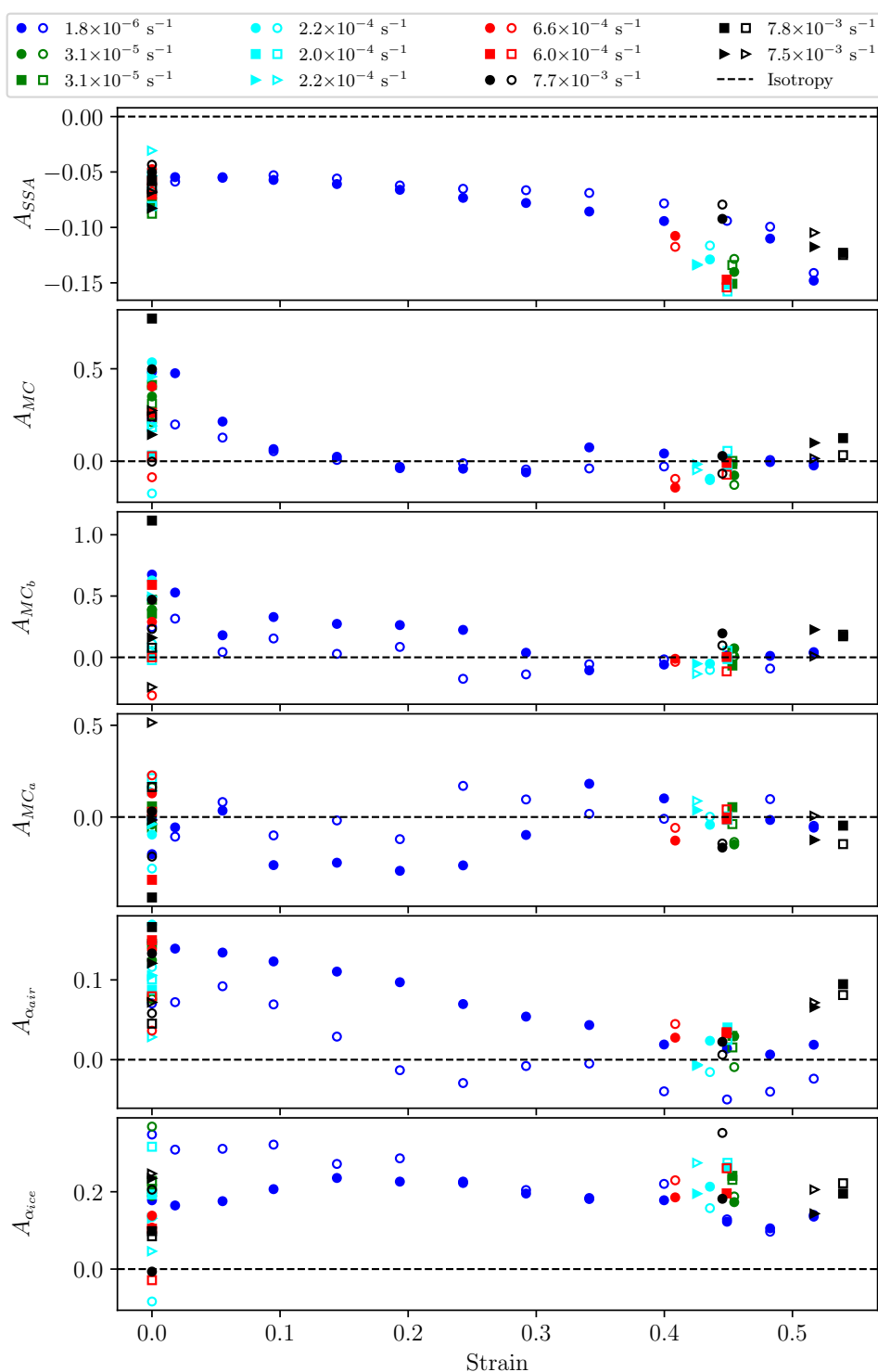


Figure 6.10 – Évolution des facteurs d’anisotropie pour la surface spécifique, la surface de la coupe minimum, le nombre de ponts de la coupe minimum, la taille moyenne des ponts de la coupe minimum, les longueurs de persistance dans l’air et dans la glace, en fonction de la déformation. Le facteur d’anisotropie est défini selon l’Équation 4.2. Le trait en pointillé noir correspond à la valeur de l’isotropie.

6.4 Discussion

Évolution des ponts de la microstructure de neige. Afin de caractériser l'évolution de la microstructure au cours de nos essais de compression à vitesse de déformation imposée, nous avons utilisé conjointement, comme dans notre étude précédente (voir Chapitre 5), la caractéristique d'Euler χ introduite par SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) ainsi que la coupe-minimum introduite par HAGENMULLER et al. (2014a). Ces métriques permettent de caractériser l'évolution du système de ponts de la microstructure au cours de la déformation (Figures 6.7 et 6.9). De manière générale, on s'attend à ce que la microstructure évolue sous les effets couplés du chargement mécanique (vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ et déformation ε) et de la thermodynamique (métamorphisme, lié au temps t).

Pour l'ensemble des échantillons testés, les résultats fournis par les métriques χ et MC_b indiquent que le nombre de ponts de la microstructure augmente avec la déformation. Par ailleurs que ce soit dans nos essais (gamme de vitesses de déformations $1.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ à $7.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) ou dans ceux de SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) ($3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ à $1.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), on constate qu'à déformation égale, le nombre de ponts est très légèrement plus important pour une vitesse de déformation plus grande. Cette légère différence pourrait s'expliquer par un ré-arrangement granulaire plus important à haute vitesse de déformation causant une augmentation plus importante du nombre de ponts pour les hautes vitesses. Néanmoins, les différences sont très faibles pour tirer des conclusions définitives.

La taille moyenne des ponts quant à elle, semble augmenter de manière plus prononcée pour des essais à faible vitesse de déformation. Nos essais montrent ainsi que le mécanisme dominant dans l'évolution de la taille des ponts est le métamorphisme d'isothermie. Ces résultats semblent être en accord avec les conclusions des travaux de WANG et BAKER (2013) qui, pour une vitesse de sollicitation de l'ordre de $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, montrent la prédominance du mécanisme de frittage par rapport à la rupture des ponts sur la réponse mécanique, cela pour différents types de neige (frittée, fraîche). En effet, si la rupture des ponts, qui est d'autant plus importante à haute vitesse de sollicitation, favorise l'augmentation du nombre de ponts, ces derniers n'ont pas le temps de croître suffisamment au cours de l'essai.

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans les essais de fluage à charge constante (voir Chapitre 5). Dans ces essais, la vitesse de déformation est maximale à l'application de la charge, puis diminue à mesure que la microstructure s'adapte à la reprise des efforts. On observait que le nombre de ponts tendait à augmenter lors de l'application de la charge, ce qui indique là-aussi la création de nouveaux contacts. Dans un second temps, lorsque la vitesse de déformation diminue, le nombre de ponts tend à décroître : les effets du métamorphisme deviennent alors prépondérants devant les effets mécaniques.

À température constante, le métamorphisme d'isothermie conduit à une diminution de

la SSA de la neige avec le temps, avec un ralentissement progressif. Ainsi, nous avons observé (voir Chapitre 5), pour une neige de masse volumique initiale $\sim 230 \text{ kg m}^{-3}$ et une SSA initiale de $\sim 29.5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, une décroissance de la SSA de $1.5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (soit 5 %) dans des conditions isothermales. Par ailleurs, l'application d'une charge constante ne semble pas avoir d'influence notable sur l'évolution de la SSA, par rapport à l'évolution sous isothermie seule (voir Chapitre 5 ; SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI, 2014). Un comportement différent est observé lors des essais de compression à vitesse de déformation imposée. Dans l'essai le plus lent, la SSA diminue de 2.5 % en 24 h et de 15 % en 3 jours. Cette décroissance de la SSA accélère à mesure que l'essai avance, tandis qu'elle ralentissait dans les essais de fluage. De plus, pour un temps donné, la vitesse de décroissance de la SSA est plus rapide lorsque la vitesse de déformation est plus importante. WANG et BAKER (2013) et SCHLEEF, LÖWE et SCHNEEBELI (2014) rapportent des observations similaires pour des microstructures différentes.

Notre interprétation est que cette dynamique de décroissance de la SSA est due à une rétroaction positive entre création de nouveaux ponts par densification et croissance de la taille des ponts par métamorphisme d'isothermie. Les ponts nouvellement créés, à priori initialement quasi-ponctuels, grandissent plus rapidement, à fortiori dans les zones concaves, ce qui se fait au détriment de l'interface air-glace et donc accélère la décroissance de la SSA.

Finalement, le nombre de ponts dans la microstructure (caractérisé par MC_b et χ) semble donc peu dépendant de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$, mais est essentiellement contrôlé par la déformation volumique ϵ . La taille des ponts dépend principalement du temps de frittage qui leur est laissé. Les nouveaux ponts créés lors de la compression sont, a priori, ponctuels et contiennent des zones de forte concavité qui peuvent être rapidement comblées par condensation solide de la vapeur d'eau (métamorphisme). Par conséquent, l'évolution de la taille moyenne des ponts (via MC_a) est influencée à la baisse par la compression qui engendre la formation de nouveaux petits ponts et à la hausse par le métamorphisme d'isothermie qui fait croître les ponts déjà existants. Ces processus se traduisent également dans l'évolution de la SSA. En effet, l'accroissement de l'aire des ponts se fait au détriment de la surface air-glace. Ainsi, pour un temps d'expérience donné, la SSA diminue d'autant plus que la vitesse de déformation est importante.

Évolution de l'anisotropie sous un chargement mécanique. La préparation des échantillons induit une anisotropie initiale entre la direction verticale z et les directions horizontales x, y (Figure 6.10). L'intensité de cette anisotropie et la direction préférentielle dépendent des quantités étudiées, mais reflètent globalement une plus grande proportion de surfaces orientées horizontalement que verticalement (i.e., la forme de grains « moyenne » est oblongue et ils sont déposés « à plat » lors de la préparation). Les évolutions de l'anisotropie au cours de la compression diffèrent ensuite selon la quantité d'intérêt. Ainsi, les métriques dérivées de la coupe-minimum MC, MC_b, MC_a évoluent pour se rapprocher rapidement de l'isotropie au cours de l'essai, ainsi que la longueur de persistance dans l'air α_{air} . À l'inverse, la longueur de

persistance de la glace α_{ice} reste anisotrope au cours de l'essai. La norme du facteur d'anisotropie de la SSA augmente, ce qui suggère que les nouveaux contacts sont plus importants horizontalement que verticalement, en nombre et en surface. Ces résultats contrastent avec ceux du Chapitre 5, lesquels ne présentent pas d'évolution de l'anisotropie au cours de l'essai, sous l'effet de la charge. Pour ces essais, les facteurs d'anisotropie mesurés sur la SSA, MC , MC_b et MC_a présentaient une anisotropie initiale qui n'évoluait plus après la phase d'isothermie.

Toutefois, l'évolution de l'anisotropie peut être dépendante de l'anisotropie initiale et des conditions de sollicitations. Il est donc nécessaire de vérifier ces observations avec des conditions de sollicitations et des anisotropies initiales variées.

Mécanisme de déformation dans la neige Lorsque la neige est comprimée, les grains de glace se rapprochent, la masse volumique augmente et la taille des pores diminue (LEHNING et al., 2002). Au cours de nos essais, l'évolution de la longueur de persistance de la phase air montre que la taille des pores diminue drastiquement (Figure 6.8). Ceci révèle que l'essentiel de la déformation de la neige a lieu par écrasement des pores. Cette décroissance de la taille des pores semble linéaire avec la déformation et n'est pas affectée par le métamorphisme d'isothermie. On peut supposer que cette observation resterait vraie jusqu'à une masse volumique critique à partir de laquelle l'absence de degré de liberté des grains de glace ne permet plus à la microstructure de se réorganiser. Cette masse volumique critique coïncide probablement avec la transition de la neige en névé, soit une valeur proche de 550 kg m^{-3} selon MORRIS, MONTGOMERY et MULVANEY (2021).

À l'inverse, la taille moyenne du squelette de glace, décrite à partir de la longueur de persistance correspondante, ne présente pas d'évolution notable comparée à celle des pores d'air. La croissance nette de cette longueur de persistance observée à faible vitesse de déformation reflète vraisemblablement une croissance des grains de glace attribuable au phénomène de métamorphisme d'isothermie.

6.5 Conclusion

Nous avons mené une campagne d'essai de compression confinée à vitesse de déformation imposée sur des échantillons de neige de masse volumique initiale d'environ 210 kg m^{-3} , et pour une large gamme de vitesses de déformation allant de 10^{-6} s^{-1} à 10^{-2} s^{-1} . Les déformations finales des échantillons varient de 0.45 à 0.55. Les microstructures avant et après essai sont imagées par tomographie à rayons-X. En complément, pour un essai à faible vitesse de déformation, nous avons pu réaliser des scans de la microstructure au cours de l'essai. Pour chaque essai, nous avons suivi l'évolution de la masse volumique, de la surface spécifique, de la distribution des longueurs de cordes et de descripteurs de connectivité tels que la coupe-minimum et la caractéristique d'Euler.

Des différences dans les réponses macroscopiques sont observées à l'aide des courbes contrainte-déformation $\sigma - \varepsilon$. À haute vitesse de déformation ($>10^{-3} \text{ s}^{-1}$), des chutes brutales de contraintes sont observées, signe d'un comportement fragile. On observe toutefois une hétérogénéité de la déformation, qui sera présentée dans le chapitre 7.

Nos résultats montrent que lors de la compaction d'un échantillon de neige, la glace se déforme peu et que la majorité de la déformation macroscopique correspond à une diminution du volume d'air contenu dans le milieu poreux (Figure 6.8). L'augmentation de la connectivité (mesurée via χ et MC_b) du squelette de glace est due principalement à la déformation mécanique de l'échantillon. Le métamorphisme d'isothermie pilote l'accroissement de l'aire des contacts entre les grains (mesurée via MC_a et SSA). Ces deux phénomènes combinés, conduisent à une diminution rapide de la SSA.

La réponse macroscopique fragile est observée pour les essais à haute vitesse de déformation. Ces essais sont caractérisés par une croissance de la taille des ponts (MC_a) qui est moins importante, voire négative, que dans les essais à plus faibles vitesses. Le squelette de glace tend à se fragmenter durant les essais les plus rapides, tandis qu'il se consolide pour les essais plus lents (voir évolution de α_{ice}). Au regard de la transition ductile-fragile, cela suggère que la fragilité observée macroscopiquement, s'observe aussi à l'échelle de la microstructure. De même, en régime ductile, le squelette de glace gagne en continuité.

Cette étude apporte de nouveaux éléments quant à l'évolution de la microstructure durant la déformation de la neige, et permet de mieux comprendre les influences relatives du métamorphisme d'isothermie et de la compaction mécanique. De plus, les observations suggèrent que la taille des ponts ainsi que leur nombre (mesurés via MC_a et MC_b) semblent être des indicateurs microstructuraux pertinents pour différencier un comportement ductile d'un comportement fragile. Ainsi, si le nombre de ponts augmente du fait de la compaction du squelette de glace, les mécanismes de ruptures amplifient cette augmentation, en particulier lors d'une déformation fragile.

Nous rappelons que ces résultats sont issus d'un nombre limité d'essais, dans des conditions expérimentales spécifiques. En particulier, il serait utile d'explorer plus finement la gamme des vitesses de déformations au voisinage de la transition ductile-fragile, afin d'identifier éventuellement différents régimes de fragilité YOSIDA et al., 1958 ; LÖWE et al., 2020. De manière générale, il conviendra également d'étendre l'étude à d'autres microstructures, masses volumiques initiales, et plages de températures.

7 Réponse macroscopique et hétérogénéités de déformation lors d'essais à vitesse imposée

7.1 Introduction

L'objectif du chapitre 6 était d'analyser l'évolution de la microstructure lors d'essais de compression à vitesse de déformation imposée. Une large gamme de vitesses de déformation a été explorée, ce qui permet d'observer des réponses macroscopiques ductiles et fragiles. Les microstructures initiales et finales sont obtenues à l'aide de tomographie à rayons-X. Nous avons constaté des évolutions microstructurelles différentes en fonction de la vitesse de déformation. En particulier, la création de nouveaux ponts (visible via la caractéristique d'Euler χ et le nombre de ponts de la coupe minimum MC_b) semble gouvernée par le chargement mécanique, alors que la croissance de la surface de ces ponts (visible via l'aire des ponts de la coupe minimum MC_a et la surface spécifique SSA) semble être principalement pilotée par le métamorphisme d'isothermie.

Dans ce chapitre, nous concentrons notre étude sur la réponse macroscopique des échantillons. Nous exploitons en particulier des séries de radiographies acquises au cours de la déformation durant tous les essais (en plus des microstructures initiales et finales). Nous commençons par une analyse plus fine des courbes contrainte-déformation en fonction de la vitesse de déformation, durant les phases de compression et de relaxation. Ensuite, à l'aide des radiographies acquises au cours de la déformation, nous mettons en relation la déformation et la réponse mécanique des échantillons. Nous nous concentrerons particulièrement sur les essais rapides, pour lesquels des hétérogénéités de déformations ont pu être mises en évidence en lien avec la réponse macroscopique intermittente.

7.2 Méthodes

Radiographies Le temps d'acquisition des scans tomographiques complets est de l'ordre de l'heure. Cette durée ne permet pas de réaliser des scans durant les essais

rapides. En effet, afin d'obtenir des volumes nets, il est nécessaire que l'échantillon dans le champ de vue n'évolue pas trop durant le scan. Pour obtenir malgré tout des informations sur la déformation des échantillons au cours des essais, nous avons acquis des radiographies de l'ensemble de l'échantillon ($1800 \times 1800 \text{ px}^2$) faites sous un seul angle de projection. Les caractéristiques de ces radiographies sont les suivantes : une taille de pixel de $12.5 \mu\text{m}$, un temps de pose et une fréquence d'acquisition de 5 Hz. Exceptionnellement, pour des raisons d'espace disque, dans le cas de l'essai le plus lent la fréquence d'acquisition était de $1/60 \text{ Hz}$, soit une radiographie par minute. On dispose ainsi pour chaque essai d'une série de radiographies. Sur chaque image, le niveau de gris d'un pixel représente l'absorption aux rayons X intégrée sur l'épaisseur de l'échantillon. Ainsi, les gris plus clairs correspondent à des zones moins denses ou moins épaisses et les gris plus foncés correspondent à des zones plus denses ou plus épaisses. Au centre de l'image, l'épaisseur de l'échantillon ne varie que très peu et le niveau de gris est donc un proxy direct de la masse volumique de la neige traversée. De plus, l'épaisseur de l'échantillon ne varie pas dans le temps. La concaténation de ces images en une vidéo permet d'observer d'éventuelles hétérogénéités de densité dans la hauteur des échantillons. Par ailleurs, un post-traitement de ces images nous permet de créer des diagrammes spatio-temporels illustrant les hétérogénéités sur un support en deux dimensions.

Diagrammes spatio-temporels L'objectif de ces diagrammes spatio-temporels, est de résumer l'information à trois dimensions (deux dimensions d'espace et une dimension de temps) dans une image à deux dimensions. Ces diagrammes représentent le temps t sur l'axe des abscisses et la hauteur dans l'échantillon h sur l'axe des ordonnées. La méthode de génération de ces diagrammes est illustrée sur la Figure 7.1.

Pour chaque radiographie acquise au cours du temps t , une colonne de 100 px de largeur située au centre de l'échantillon est extraite. Les intensités sont moyennées sur la largeur de ces colonnes, pour donner une colonne d'un seul pixel attribuée au temps t . Ce moyennage suppose que les hétérogénéités restent relativement faibles dans la largeur des échantillons. Enfin, pour mettre en évidence l'évolution des intensités d'absorption dans la hauteur avec le temps, on calcule la différence entre les temps t et $t + 1$, que l'on attribue au temps t .

Sur l'image finale, pour des temps situés avant et après le déplacement du piston, les colonnes sont grises et homogènes. Ceci signifie qu'entre deux instants successifs l'absorption ne varie pas, et donc que l'échantillon ne subit aucune déformation. Ce sera notre référence pour identifier les mouvements au cours de la déformation. Le déplacement du piston est clairement visible sur l'image (zone inclinée sombre en bas de l'image). Les stries noires et blanches parallèles au piston indiquent une déformation quasi-homogène dans l'échantillon. Pour un même temps t , il peut y avoir une zone grise homogène (i.e. pas de différence d'absorption et pas de déformation) et une zone présentant des stries noires et blanches (i.e. différence d'absorption et donc déformation). Autrement dit, à un même instant t , une partie de l'échantillon se

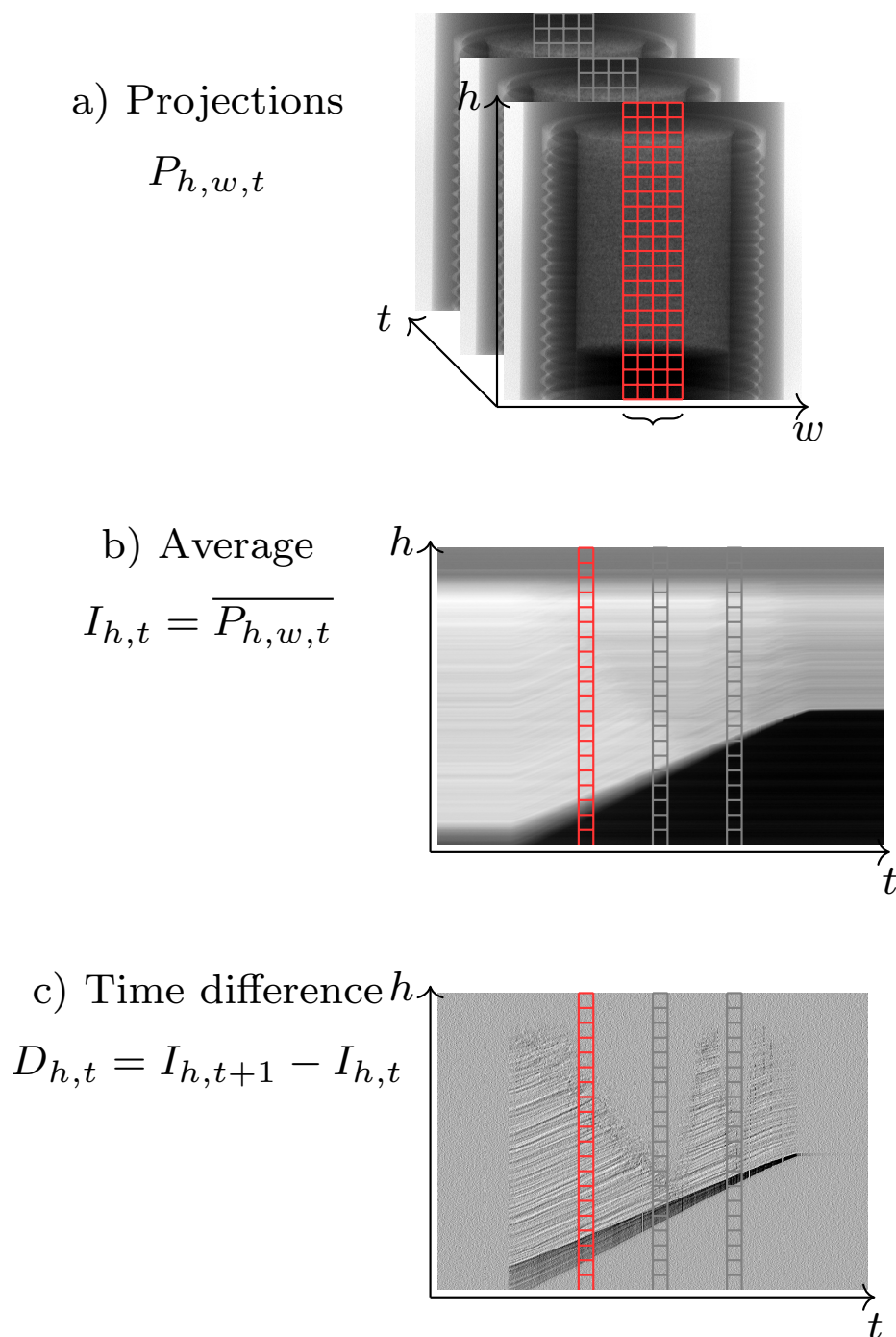


Figure 7.1 – Processus de post-traitement des radiographies pour obtenir les diagrammes spatio-temporels. a) Initialement, on dispose d’une série de projections (images 2D) prises consécutivement. b) On résume l’information dans la largeur de l’image w en la moyennant sur les niveaux de gris sur la largeur d’une colonne de 100 px. L’ensemble des colonnes ainsi obtenues sont mises côte à côte pour obtenir une série temporelle. Ainsi, la colonne rouge de plusieurs pixels de largeur dans la figure du haut est moyennée et ne représente plus qu’un pixel de largeur dans la figure du milieu. c) Finalement, pour mettre en exergue les variations d’intensité au cours de la déformation, on fait la différence entre deux pas de temps consécutifs.

déforme, pendant que l'autre partie ne se déforme pas. Ceci indique la présence d'un front de compaction au sein de l'échantillon. 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 présente une certaine épaisseur et/ou 2) la trop faible résolution spatiale et temporelle de nos projections tomographiques, 3) le flou lié au faisceau conique des rayons X.

Dans le cas des essais les plus lents, si les déformations entre deux pas de temps successifs sont trop faibles, la différence n'est pas identifiable entre deux radiographies. Pour remédier à ce problème, nous avons généré des diagrammes spatio-temporels à partir d'un sous-échantillon des radiographies (i.e., on diminue la fréquence d'acquisition des images, en sélectionnant 1 image sur 2, sur 5 ou sur 10). Ceci permet de rendre plus visibles les régimes de déformation dans l'image finale.

Comme indiqué précédemment, le temps de pose et l'intervalle entre chaque radiographie sont de 0.2s. Afin de construire les diagrammes spatio-temporels, il est nécessaire de disposer de datations précises de chacune des radiographies. Le logiciel d'acquisition n'enregistre pas ces informations dans les méta-données des images. Pour dater les images, on récupère alors l'heure de dernière modification du contenu du fichier *mtime*. Il est très important de faire cette étape avant tout transfert ou traitement des images, puisque le *mtime* est une méta-donnée du système de fichiers, variable d'un système à l'autre. Un fichier de méta-donné liant chaque radiographie et son horodatage est créé. La plupart des images sont effectivement correctement acquises avec un intervalle de 0.2s. Toutefois, nous avons parfois été confrontés à certains problèmes : 1) pas d'écriture d'images pendant une seconde, puis arrivée groupée de 5 images, avec un écart inférieur à 0.2s, 2) pas d'écriture d'images pendant un certain temps, sans rattrapage et 3) mauvais horodatage des images écrites. Dans tous les cas, les images sont présumées écrites dans l'ordre d'acquisition : nous n'avons pas constaté de cas contraire.

7.3 Résultats

Courbes σ - ε , phase de chargement. La Figure 7.2 présente l'ensemble des courbes $\sigma - \varepsilon$ obtenues pour les différents essais réalisés. Les vitesses de déformations couvrent la gamme de $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ à $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Comme décrit précédemment (Chapitre 6), on constate que la réponse mécanique, c'est-à-dire l'évolution de la contrainte, dépend fortement de la vitesse de déformation. À faible vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon} < 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), la contrainte présente une évolution lisse d'allure quasi-exponentielle. La vitesse de croissance de la contrainte *sigma* est plus élevée quand la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ augmente. Pour des vitesses de déformation intermédiaires ($10^{-4} \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon} < 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), l'évolution de la contrainte est toujours d'allure exponentielle mais les courbes sont moins lisses, avec des diminutions rapides de contrainte suivies d'augmentations plus progressives. La vitesse de croissance de la contrainte est plus élevée que pour les essais à faible vitesse, mais les différentes courbes obtenues dans ce régime semblent

confondues malgré un ordre de grandeur de différence dans la vitesse de déformation. À forte vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon} > 10^{-3} \text{s}^{-1}$), le signal de la contrainte présente une allure en dent de scie. On observe une succession de chutes de contrainte quasi-instantanées, jusqu'à un niveau proche de 0 kPa, suivies par des remontées rapides. Pour des déformations $\varepsilon < 0.3$, la contrainte moyenne reste faible et constante. Au-delà de $\varepsilon > 0.3$, la contrainte augmente rapidement, mais présente toujours des chutes brutales dont l'amplitude augmente également. Ces chutes de contrainte témoignent d'évènements de rupture fragile du squelette de glace. Le fait que la contrainte ne chute pas toujours complètement à 0 peut être dû à deux effets : 1) une fréquence d'acquisition (50 Hz) insuffisante pour capturer le passage à 0 du signal ou 2) une rupture de continuité partielle du squelette.

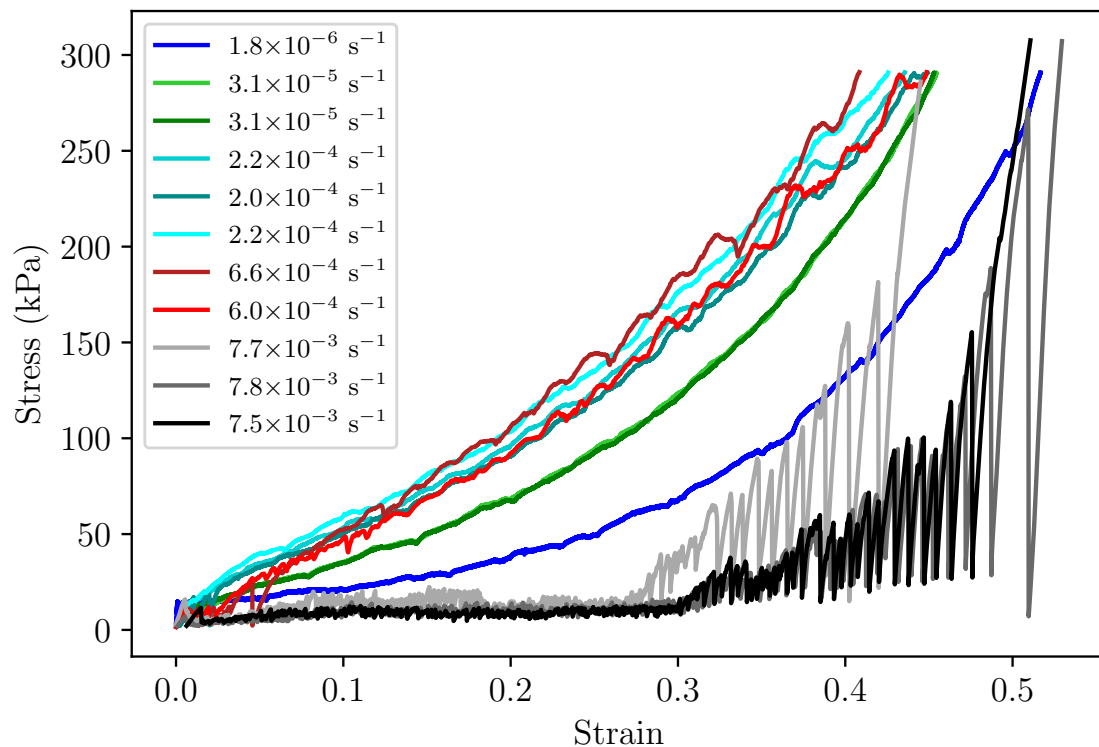


Figure 7.2 – Courbes contrainte-déformation pour les différentes vitesses de déformation testées (indiquées en légende).

Courbes σ - ε , phase de relaxation. Le moteur est arrêté lorsque la contrainte maximale est atteinte. Le piston est alors immobilisé dans sa position finale, et l'enregistrement des valeurs de contrainte continue. Les Figures 7.3 présentent la relaxation de la contrainte au cours du temps une fois cette déformation finale atteinte. On observe que les essais à grande vitesse de déformation sont caractérisés par une relaxation des contraintes plus rapide. Toutefois, pour les vitesses de déformation les plus élevées ($7.7 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$, $7.8 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ et $7.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$), l'ordonnancement de la vitesse de relaxation en fonction de la vitesse de déformation n'est pas respecté. Cela suggère une forte variabilité et une importance de la microstructure dans ce régime.

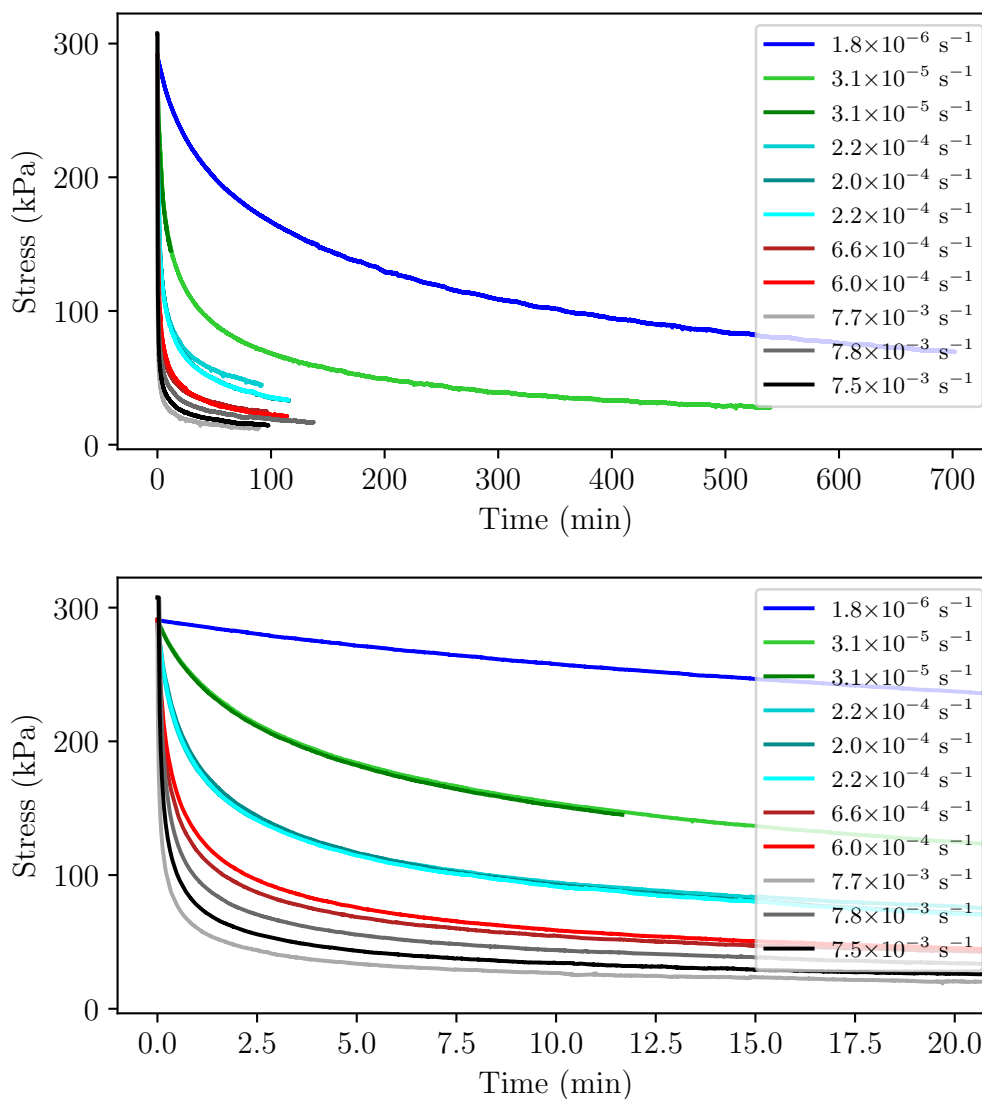


Figure 7.3 – Courbes de contrainte en fonction du temps durant la phase de relaxation, pour les différentes vitesses de déformation imposées durant la phase de compression. La figure du haut (resp. du bas) présente la totalité (resp. les 20 premières minutes) de la phase de relaxation.

Courbes σ - $\dot{\epsilon}$ La Figure 7.4 met en évidence l'évolution de la contrainte en fonction de la vitesse de déformation durant la phase de chargement. Les valeurs de contraintes sont relevées pour plusieurs valeurs de déformation. Dans la Figure 7.5, ces données sont normalisées par la contrainte maximale relevée pour chaque valeur de déformation. Cette normalisation réduit significativement la dispersion des points, qui semblent se regrouper sur une courbe maîtresse. On observe ainsi que jusqu'à une vitesse de $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, la contrainte croît avec la vitesse de déformation. Au contraire, au-delà de $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, la contrainte décroît avec la vitesse de déformation. Par ailleurs, il semble que la dispersion des résultats augmente pour des vitesses de déformation supérieures à $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

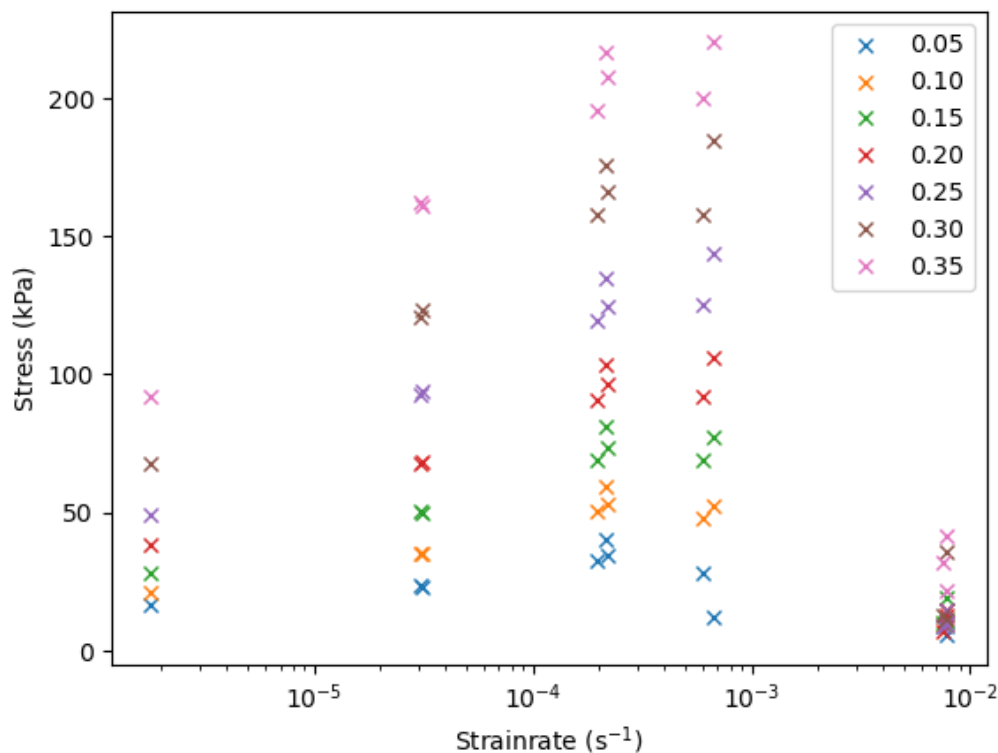


Figure 7.4 – Évolution de la contrainte à une déformation fixée, en fonction de la vitesse de déformation. Les différentes couleurs représentent les différentes déformations à laquelle la contrainte est relevée (voir légende).

Diagrammes spatio-temporels Les diagrammes spatio-temporels mettent en évidence des localisations de la déformation dans les échantillons lors des essais à forte vitesse de déformation ($\dot{\epsilon} > 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) (Figure 7.6). Comme déjà noté, on observe dans ces essais la propagation de fronts de compaction séparant une zone qui se déforme et une zone qui ne se déforme pas. Le front traverse plusieurs fois l'échantillon, du haut vers le bas et inversement, avec une vitesse qui semble augmenter à chaque changement de direction. À l'inverse, pour les vitesses de déformation faibles et intermédiaires ($\dot{\epsilon} < 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), il semble que la déformation reste homogène dans l'échantillon (Figures 7.7).

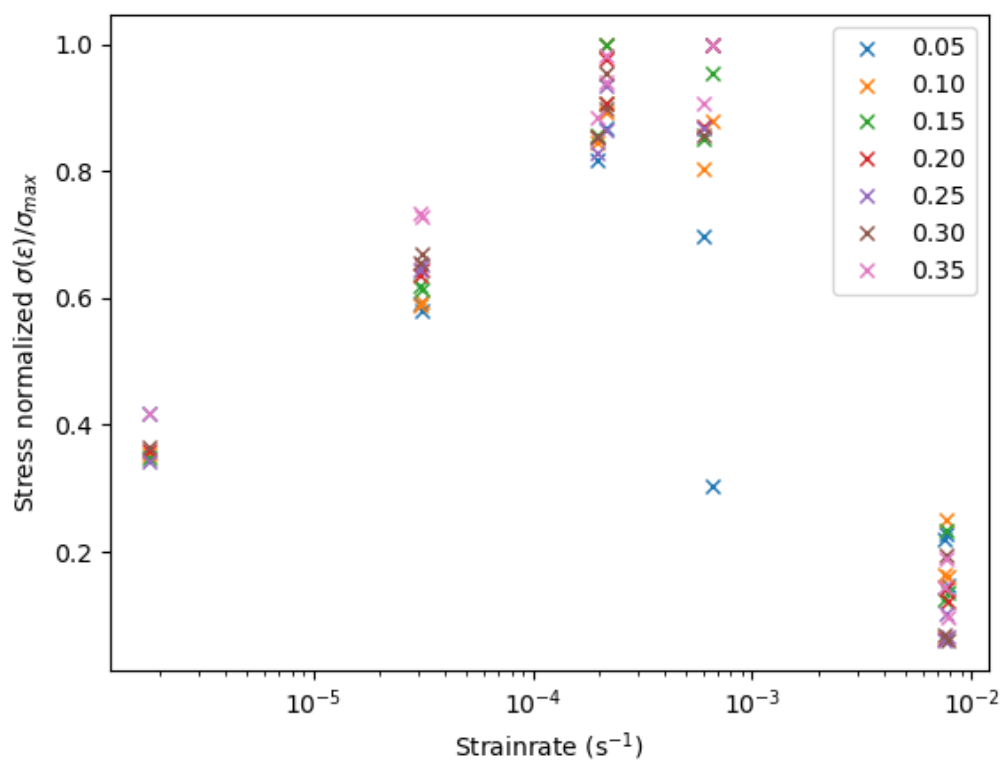


Figure 7.5 – Évolution de la contrainte normalisée à une déformation fixée, en fonction de la vitesse de déformation. La valeur de la contrainte est normalisée par la contrainte maximale relevée pour chaque valeur de déformation. La légende est identique à la Figure 7.4

La superposition des courbes de contrainte sur les diagrammes spatio-temporels fournit des informations très intéressantes concernant le lien entre la propagation des bandes de compaction et la réponse mécanique des échantillons. On décrit par la suite la Figure 7.6a. Au démarrage du moteur, on observe une petite augmentation de la contrainte. Au début de l'essai (18 s à 58 s), la contrainte moyenne reste faible, avec le comportement en dents de scie déjà décrit, caractérisé par de rapides chutes et hausses de la contrainte. Dans ce même intervalle de temps, on constate que le front de compaction parcourt une première fois toute la hauteur de l'échantillon. Dans l'intervalle 58 s à 66 s, un autre front de compaction se propage dans l'échantillon alors qu'on constate une augmentation de la moyenne et de l'amplitude des pics de contrainte. De même dans les intervalles 66 s à 75 s et 75 s à 82 s : chaque phase de propagation d'un front de compaction est associée à une amplification de la contrainte moyenne et des pics de contrainte. Le même comportement est observé dans les autres essais à haute vitesse de déformation (Figures 7.6b et 7.6c).

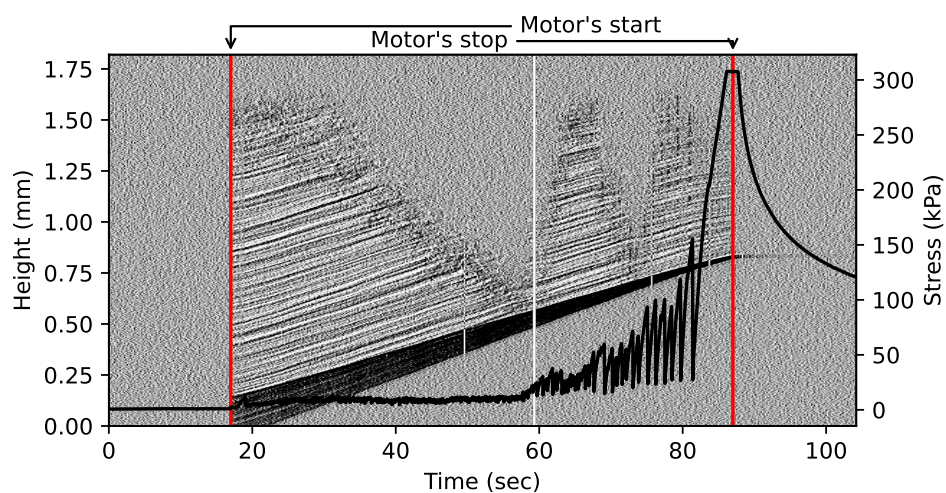
Pour l'essai à vitesse intermédiaire $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (Figure 7.7a), on observe au tout début de la compression des variations brutales de contrainte proche de 0 kPa. Ce comportement rappelle fortement celui observé sur les essais à haute vitesse. On pourrait supposer le démarrage d'un front de compaction en partie supérieure de l'échantillon ; toutefois, la résolution des images ne permet pas de statuer avec certitude. Enfin, rappelons que les fluctuations de contrainte observées sur l'essai à faible vitesse ($1.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) correspondent à des artefacts liés aux scans tomographiques (Figure 7.7c).

7.4 Discussion

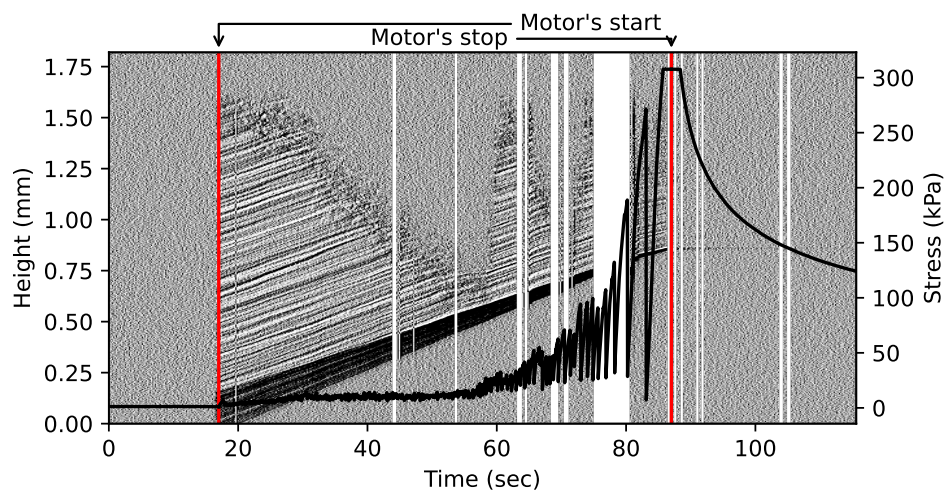
Influence de la vitesse de déformation sur la réponse macroscopique. La dépendance de la réponse mécanique à la vitesse de déformation a été caractérisée en traction (NARITA, 1984 ; NARITA, 1980), compression (GOLD, 1956 ; KINOSITA, 1967) et cisaillement (MONTMOLLIN, 1982 ; SCHWEIZER, 1998). En compression, conformément à ce que nous avons observé dans nos essais, l'évolution de la contrainte accélère avec la déformation pour les essais à une vitesse de déformation inférieure à 10^{-3} s^{-1} , typiquement. De plus, la vitesse de croissance semble dépendre de la vitesse de déformation.

Le comportement mécanique macroscopique observé est le reflet de la prépondérance de différents phénomènes à l'échelle microscopique : plasticité de la glace, frittage, ruptures fragiles de ponts. Il est probable que même dans le cas d'un comportement macroscopique ductile, la microstructure puisse connaître des ruptures fragiles locales, et ce d'autant plus que la vitesse de déformation est élevée. Toutefois, nous ne sommes pas parvenus pas à observer de tels événements fragiles sur les volumes imagés par tomographie à rayons-X. La résolution spatiale et temporelle de nos scans est probablement insuffisante pour les détecter.

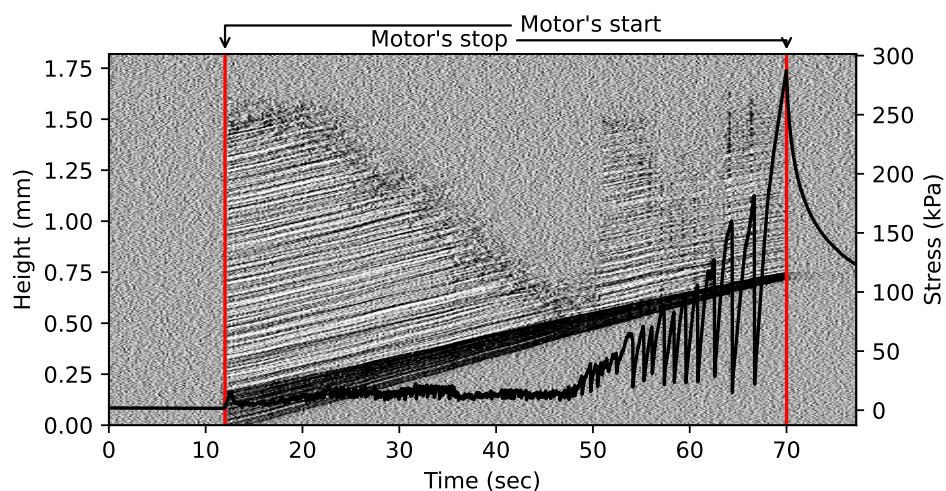
7 Réponse macroscopique et hétérogénéités de déformation lors d'essais à vitesse imposée



(a) $\dot{\epsilon} = 7.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



(b) $\dot{\epsilon} = 7.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, les bandes blanches correspondent à des données manquantes du fait de problèmes lors de l'acquisition ou liés à l'horodatage des radiographies.



(c) $\dot{\epsilon} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Figure 7.6 – Diagrammes spatio-temporels et évolution de la contrainte pour les essais à grande vitesse de déformation. Les traits verticaux rouges représentent le début et la fin de la compression de l'échantillon.

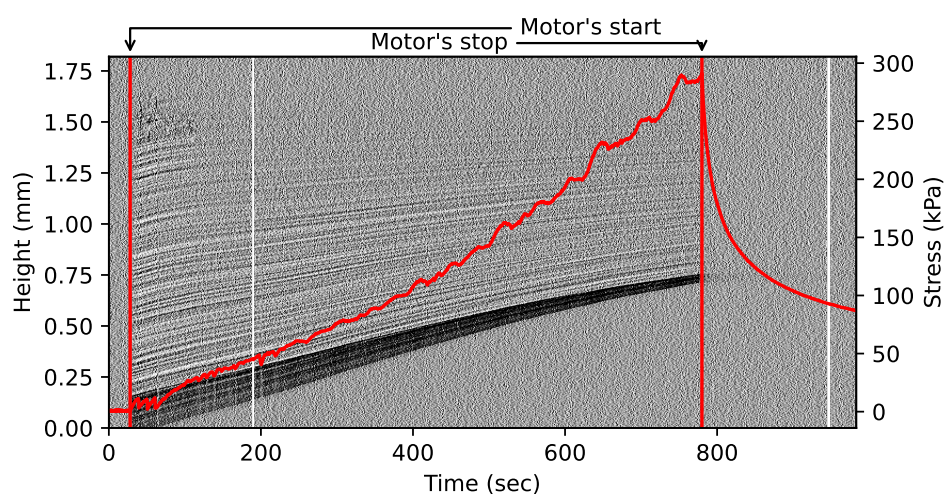
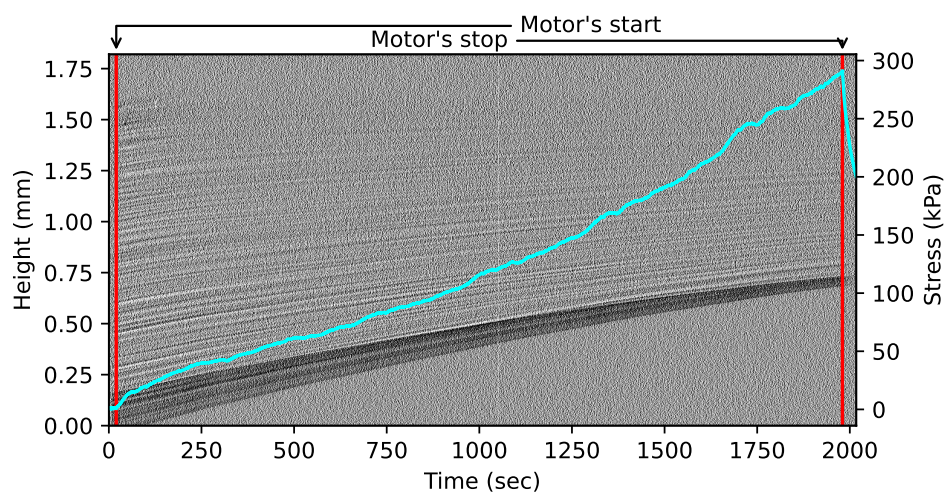
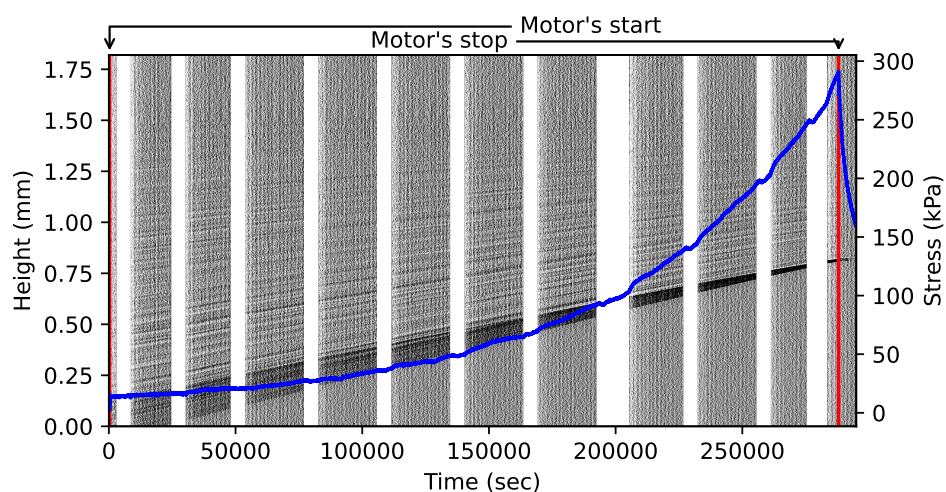
(a) $\dot{\epsilon} = 6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\epsilon} = 1.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, les bandes blanches correspondent aux moments des scans tomographiques complets.

Figure 7.7 – Diagrammes spatio-temporels et évolution de la contrainte pour les essais à vitesse de déformation intermédiaire et faible. Les traits verticaux rouges représentent le début et la fin de la compression de l'échantillon.

Au-delà d'un seuil en vitesse de déformation, la réponse mécanique change complètement. Contrairement à la transition ductile-fragile de la glace dont les mécanismes sont maintenant relativement bien compris (BATTO et SCHULSON, 1993), la transition dans la neige semble caractérisée par plusieurs phases, avec un « comportement fragile du premier et du second type » (YOSIDA et al., 1958). Un comportement fragile du premier type se caractérise par des chutes de contrainte fortes et suivies d'une élévation de la contrainte tout aussi forte. Le seconde type quant à lui est décrit comme une contrainte quasi-constante. Nous observons un comportement fragile du premier type lors des essais à haute vitesse. Comme décrit ci-dessus, la déformation de la neige résulte de la déformation plastique du squelette de glace et de micro-fissurations locales de ce squelette. Dans un régime ductile, le taux de ces micro-fissurations reste faible : l'échantillon se déforme, mais reprend toujours la charge. Dans un régime fragile au contraire, le taux de ces micro-fissurations est plus important : l'échantillon ne parvient plus à reprendre le chargement durant les épisodes de rupture.

Afin de modéliser les chutes de contrainte à grande vitesse de déformation, LÖWE et al. (2020) propose un modèle scalaire qui introduit la vitesse de déformation visco-plastique du squelette de glace et une vitesse caractéristique de création des nouveaux ponts. Les paramètres du modèle sont déterminés numériquement par l'ajustement aux données expérimentales. Globalement, ce modèle capture correctement les périodes, les amplitudes et la plage de vitesses de déformations sur laquelle les oscillations de contrainte sont observées. Plus généralement, les modèles de type « stick-slip » semblent pertinents pour représenter le comportement macroscopique de la neige à partir de sa microstructure.

Ainsi, à faible vitesse de déformation (régime ductile), le taux d'endommagement (ruptures au niveau des ponts entre les grains) de la microstructure est inférieur au taux de croissance de la résistance mécanique par création de nouveaux ponts et accroissement des ponts existants. Au contraire, à haute vitesse de déformation (régime fragile), le taux d'endommagement est plus important que l'accroissement de la résistance mécanique ; des événements de rupture fragile impliquant de nombreux ponts se produisent. Ces ruptures conduisent à la création de nouveaux ponts, lesquels permettent à l'échantillon de supporter de nouveau la charge jusqu'à la rupture suivante.

Les travaux de YOSIDA et al. (1956) et KINOSITA (1967) montrent qu'en compression, un optimum de la vitesse de croissance de la contrainte est atteint pour des vitesses de déformation correspondant à la transition entre un régime de déformation ductile et un régime de déformation fragile du 1er type. C'est également ce que nous observons dans nos essais : voir Figure 7.4. Cela nous permet, dans nos conditions, de situer la position de la transition ductile-fragile entre $2.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Dans des conditions d'essais et de microstructures proches, LÖWE et al. (2020) ont observé une augmentation des amplitudes des chutes de contraintes pour des vitesses de déformation entre $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et $6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Nous n'avons pas quantifié ces amplitudes dans notre étude, mais qualitativement nos résultats apparaissent

en accord avec ces observations. Il reste toutefois délicat de comparer directement les observations expérimentales de YOSIDA et al. (1956) et KINOSITA (1967) ou numériques (THEILE et al., 2020) faites sur des essais de compression non-confinée et des essais en conditions œdométriques. En particulier, en compression non-confinée, l'échantillon atteint un stade de ruine à partir duquel la contrainte n'augmente plus avec la déformation. En compression confinée, nous observons au contraire une augmentation rapide de la contrainte à partir du moment où l'échantillon est suffisamment compacté pour que les efforts soient repris par les bords.

Dans le cadre du déclenchement d'avalanches, le comportement en cisaillement joue également un rôle fondamental. PUZRIN, FAUG et EINAV (2019) ont compilé des données obtenues dans cette configuration et rapportent également une transition entre un régime de durcissement et un régime d'adoucissement de la contrainte en fonction de la vitesse de déformation. En cisaillement, la transition entre les deux régimes est observée entre $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ et $1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, soit un ordre de grandeur de moins qu'en compression.

Propagation d'un front de compaction. En régime fragile (essais à grande vitesse de déformation), nous avons pu observer la formation d'hétérogénéités au sein des échantillons lors de la compaction. Il y a propagation d'un front de compaction séparant deux zones au sein desquelles les masses volumiques sont différentes. Les zones déjà compactées étant plus résistantes, la déformation se propage progressivement dans les zones les moins denses de l'échantillon. Ces résultats confirment ceux de BARRACLOUGH et al., 2016, qui ont mis en évidence des bandes de compaction à partir de corrélations d'images numériques obtenues en 2D et par transparence. Dans nos essais, les bandes de compaction s'initient toujours à partir du haut de l'échantillon. A priori rien n'y oblige, et BARRACLOUGH et al. (2016) ont observé des fronts de propagation discontinus au cours de leurs essais. Dans notre cas, la préparation de l'échantillon génère une hétérogénéité en partie supérieure des échantillons (voir Figure 6.5). La résistance mécanique est donc plus faible dans cette zone, ce qui peut expliquer l'initiation du front de compaction depuis le haut.

L'augmentation de la contrainte moyenne à chaque fois que le front de compaction traverse l'échantillon s'explique par le fait que les couches sont progressivement renforcées par la densification. La résistance macroscopique mesurée de l'échantillon est la résistance de la plus faible couche. Les chutes successives de contrainte montrent que cette densification se produit via des mécanismes majoritairement fragiles. Des ruptures de ponts entre les grains se produisent pour permettre une réorganisation rapide de la microstructure. Cette hypothèse est corroborée par nos observations de l'augmentation du nombre de ponts, via la caractéristique d'Euler χ et le nombre de pont de la coupe-minimum MC_b . Le fait que la contrainte moyenne augmente progressivement, en conditions œdométriques, s'explique également par cette augmentation du nombre de contacts. Toutefois, si ces contacts sont plus nombreux, ils n'ont pas le temps de croître dans les essais à grande vitesse de déformation.

7 Réponse macroscopique et hétérogénéités de déformation lors d'essais à vitesse imposée

Pour approfondir cette analyse, il serait intéressant de confronter nos résultats à des modèles permettant de relier l'évolution de l'hétérogénéité de l'échantillon comprimé aux chutes des courbes $\sigma - \varepsilon$ (BARRACLOUGH et al., 2016 ; LÖWE et al., 2020).

8 Conclusion & perspectives

8.1 Conclusion

L'objectif de cette thèse a été d'explorer le comportement mécanique de la neige, et en particulier d'étudier la transition ductile-fragile. Ce travail s'est déroulé en trois temps : 1) la conception d'un dispositif expérimental innovant et adapté à notre problématique, 2) la réalisation d'une campagne expérimentale permettant l'acquisition d'images tomographiques à haute résolution sous plusieurs conditions de chargement et 3) l'analyse de l'évolution des microstructures de neige au cours de ces essais, à l'aide de métriques adaptées. Nous avons mené des essais de compression à charge imposée (fluage) et à vitesse de déformation imposée, à température constante.

8.1.1 Conception d'un dispositif expérimental

Pour la réalisation d'essais de compression in-situ dans l'enceinte d'une cabine de tomographie, nous avons conçu et réalisé une presse mécanique répondant à nos besoins expérimentaux et aux contraintes de l'environnement. Les températures négatives et l'encombrement réduit de la cabine de tomographie furent les deux contraintes majeures pour la conception de la presse. Préalablement aux essais exploitables, nous avons réalisé de nombreux tests en conditions réelles pour éprouver le dispositif. Ces tests ont permis de mettre en évidence certains problèmes (liés par exemple à rigidité du système) qui ont pu être résolus par des modifications successives de la presse. Ils ont également permis d'affiner l'ensemble des protocoles d'essais, depuis la préparation des échantillons, jusqu'au stockage des données finales. L'interface de pilotage de la presse a elle-aussi évolué et été débogué au fur et à mesure. La campagne d'essais en chambre froide, qui a duré plusieurs semaines, a permis d'aboutir aux résultats exploités dans ce travail et de faire évoluer la presse vers une version stable et robuste.

8.1.2 Évolution des microstructures sous l'effet de la compaction

Les données issues des scans tomographiques aux rayons X effectués au cours des essais mécaniques ont été analysées grâce à des métriques classiques (densité, SSA) et plus novatrices (taille et nombre de ponts, longueurs de cordes). Grâce à ces métriques, nous avons pu évaluer la part de déformation des deux phases (air et glace) et montrer que, dans nos conditions d'expérience, et pour les densités étudiées (autour de $200 - 300 \text{ kg m}^{-3}$) l'essentiel de la déformation avait lieu dans l'air. Nos résultats indiquent également que la déformation de la matrice de glace conduit à une augmentation du nombre de ponts, alors que le métamorphisme d'isothermie se traduit par une augmentation de la taille de ces ponts. Ces analyses ont été rendues possibles grâce à l'utilisation conjointe de deux métriques, la caractéristique d'Euler χ et la coupe-minimum MC . L'augmentation globale de la résistance mécanique au cours des essais peut donc être attribuée à l'augmentation conjointe du nombre de ponts, résultant de la compaction mécanique, et de leur taille, conséquence du métamorphisme d'isothermie. Le fait que la compaction influe sur la cinétique d'évolution de la SSA peut alors être interprété comme une rétroaction positive entre ces deux mécanismes, qui est d'autant plus visible que la vitesse de déformation est faible. Notons toutefois que cette rétroaction n'a été observée qu'à vitesse de déformation imposée, dans le régime ductile (ici à $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$). Les essais à contrainte imposée (2.1 et 4.7 kPa) semblent au contraire plutôt indiquer un découplage, dans le temps, entre les effets dus au tassement et ceux dus au métamorphisme sur l'évolution des microstructures. Ceci peut s'expliquer par les faibles niveaux de contrainte atteints dans ces essais. Dans ces conditions, la microstructure (SSA, taille des ponts) reste essentiellement contrôlée par le métamorphisme, et seul le nombre de ponts semble être influencé par le chargement en début de tassement.

8.1.3 Transition ductile-fragile et hétérogénéités de déformation

En régime ductile, à faible vitesse de déformation, on observe un durcissement de la réponse mécanique avec la vitesse. Au delà d'une certaine vitesse, la tendance s'inverse et la réponse mécanique s'adoucit avec la vitesse. Cette inversion correspond à la transition ductile-fragile qui se situe, dans le cas de nos essais, entre $2.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Les courbes de réponse mécanique mettent également en évidence un comportement intermédiaire au voisinage de cette transition. Dans ce régime, si l'échantillon parvient globalement à reprendre la charge, des sauts de contrainte sont néanmoins observés, attestant de ruptures localisées.

Les essais à haute vitesse de déformation ($> 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) sont caractérisés par des réponses macroscopiques de type « intermittentes », avec des sauts de contrainte qui attestent d'une perte de la résistance mécanique sur l'intégralité de l'échantillon.

L'observation des microstructures (diagrammes spatio-temporels) permet de mettre en évidence la présence de bandes de compaction traversant l'échantillon verticalement, de haut en bas, au cours de cette phase de réponse intermittente. Le matériau présente donc un comportement fragile, qui se caractérise par une réponse très certainement contrôlée par l'interaction de mécanismes de rupture et de cicatrisation dont les cinétiques relatives dépendent de la vitesse de sollicitation. Ce type de réponse n'est pas sans rappeler les comportements de type élasto-fragiles observés dans la glace de mer ou dans les failles (LADE, 2001).

8.2 Perspectives

L'ensemble des essais mécaniques que nous avons imagés constitue une base de données particulièrement bien résolue temporellement et spatialement. L'exploitation de ces données pourra être poursuivie. C'est pourquoi nous nous efforcerons d'assurer l'accès libre à ces données. L'accessibilité aux données est une première étape nécessaire mais non suffisante pour atteindre la reproductibilité des travaux scientifiques. Il faut en plus améliorer l'écriture, l'utilisation, l'archivage et le partage des codes informatiques et procédures utilisés dans l'acquisition et le traitement des résultats. Le travail de mise à disposition des données va faciliter l'application d'indicateurs ou de modèles déjà développés, permettant ainsi d'offrir des points de comparaison d'une étude à l'autre. La difficulté à décrire correctement la microstructure de matériaux complexes comme la neige avec un nombre de paramètres réduit est une limite majeure dans la compréhension des liens entre microstructure et réponse macroscopique.

Des méthodes de corrélation d'images 3D ont commencé à être exploitées sur nos données dans le cadre du stage de master de Mathilde Bonnetier. Les résultats semblent mettre en évidence des zones de localisation de la déformation sur quelques centaines de microns dans les essais de fluage se déformant très lentement, alors que la déformation semblait rester homogène à première vue. Cette méthode est donc très prometteuse et nos essais offrent une base de données très riche pour l'explorer. La corrélation d'images discrète (ou « particle tracking ») pourrait aussi présenter un grand intérêt. Cette méthode permet de suivre les déplacements des grains individuels (PEINKE et al., 2020), ce qui complète l'observation des champs de déplacement à une échelle plus large. Elle présente cependant l'inconvénient de nécessiter une segmentation en grains qui soit robuste.

La confrontation de nos données aux modèles existants développés pour l'étude du comportement mécanique de la neige, et plus spécifiquement de la transition ductile-fragile, est également une piste intéressante pour les futurs travaux de recherche. Pour cela, les modèles phénoménologiques développés par BARRACLOUGH et al. (2016) et LÖWE et al. (2020) semblent les mieux adaptés. Ces modèles permettent de reproduire les bandes de compaction et les réponses mécaniques intermittentes. Notre base de données permettra de compléter les observations déjà existantes en

élargissant la gamme de vitesse de sollicitation, de type de microstructure et de résolution des observations.

Pour finir, comme nous l'avons souligné dans l'introduction, la neige peut présenter des résistances mécaniques variant sur plusieurs ordres de grandeurs, pour des caractéristiques mesurables (masse volumique, surface spécifique, etc) pourtant similaires. Ainsi, les essais réalisés devront être complétés à la fois en termes de caractéristiques de la neige (type de neige, temps de frittage initial, masse volumique, surface spécifique, etc). et pour différentes conditions d'essais (température, vitesse de déformation, type de sollicitation). A titre d'exemple, les différences de vitesse de tassement observées sur le terrain entre une neige à grains fins et un givre de profondeur sont très marquées. Ces différences ne sont pour l'instant pas bien expliquées par les modèles (physiques, phénoménologiques ou numériques) existants, sans doute en raison d'un déficit de compréhension des mécanismes sous-jacents. Les dispositifs d'essais et protocoles de mesure développés au cours de cette thèse vont offrir la possibilité de caractériser très finement les types de neige qui ont été peu étudiés jusqu'à présent.

Bibliographie

- AGRAWAL, K. et R. MITTAL (jan. 1995). « Influence of Microstructure on Mechanical Properties of Snow ». In : *Defence Science Journal* 45.2, p. 93-105. DOI : 10.14429/dsj.45.4108.
- ARAKAWA, H., K. IZUMI, K. KAWASHIMA et T. KAWAMURA (nov. 2009). « Study on quantitative classification of seasonal snow using specific surface area and intrinsic permeability ». In : *Cold Regions Science and Technology* 59.2-3, p. 163-168. DOI : 10.1016/j.coldregions.2009.07.004.
- BALLARD, G. E. H. et E. D. FELDT (1966). « A Theoretical Consideration of the Strength of Snow ». In : *Journal of Glaciology* 6.43, p. 159-170. DOI : 10.3189/s0022143000019146.
- BARNETT, T. P., J. C. ADAM et D. P. LETTENMAIER (2005). « Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions ». In : *Nature* 438.7066, p. 303-309. ISSN : 0028-0836. DOI : 10.1038/nature04141.
- BARRACLOUGH, T. W., J. R. BLACKFORD, S. LIEBENSTEIN, S. SANDFELD, T. J. STRATFORD, G. WEINLÄNDER et M. ZAISER (nov. 2016). « Propagating compaction bands in confined compression of snow ». In : *Nature Physics* 13.3, p. 272-275. DOI : 10.1038/nphys3966.
- BARTELT, P. et M. V. MOOS (2000). « Triaxial tests to determine a microstructure-based snow viscosity law ». In : *Annals of Glaciology* 31, p. 457-462. DOI : 10.3189/172756400781819761.
- BATTO, R. et E. SCHULSON (juill. 1993). « On the ductile-to-brittle transition in ice under compression ». In : *Acta Metallurgica et Materialia* 41.7, p. 2219-2225. DOI : 10.1016/0956-7151(93)90391-5.
- BEARE, R., B. LOWEKAMP et Z. YANIV (2018). « Image segmentation, registration and characterization in r with simpleitk ». In : *Journal of Statistical Software* 86.8. DOI : 10.18637/jss.v086.i08.
- BERNARD, A., P. HAGENMULLER, M. MONTAGNAT et G. CHAMBON (déc. 2022). « Disentangling creep and isothermal metamorphism during snow settlement with X-ray tomography ». In : *Journal of Glaciology*, p. 1-12. DOI : 10.1017/jog.2022.109.
- BLACKFORD, J. R. (oct. 2007). « Sintering and microstructure of ice : a review ». In : *Journal of Physics D : Applied Physics* 40.21, R355-R385. DOI : 10.1088/0022-3727/40/21/r02.
- BOYKOV, Y. et G. FUNKA-LEA (nov. 2006). « Graph Cuts and Efficient N-D Image Segmentation ». In : *International Journal of Computer Vision* 70.2, p. 109-131. DOI : 10.1007/s11263-006-7934-5.

- BROWN, R. L. et M. Q. EDENS (1991). « On the relationship between neck length and bond radius during compression of snow ». In : *Journal of Glaciology* 37.126, p. 203-208. DOI : 10.3189/s0022143000007218.
- BRUN, E., E. MARTIN, V. SIMON, C. GENDRE et C. COLEOU (1989). « An Energy and Mass Model of Snow Cover Suitable for Operational Avalanche Forecasting ». In : *Journal of Glaciology* 35.121, p. 333-342. DOI : 10.3189/S0022143000009254.
- BRZOSKA, J.-b., C. COLÉOU et B. LESAFFRE (1998). « Thin-sectioning of wet snow after flash-freezing ». In : *Journal of Glaciology* 44.146, p. 54-62. DOI : 10.3189/s0022143000002343.
- CALONNE, N., F. FLIN, C. GEINDREAU, B. LESAFFRE et S. R. D. ROSCOAT (déc. 2014). « Study of a temperature gradient metamorphism of snow from 3-D images : time evolution of microstructures, physical properties and their associated anisotropy ». In : *The Cryosphere* 8.6, p. 2255-2274. DOI : 10.5194/tc-8-2255-2014.
- CAPELLI, A., I. REIWEGER et J. SCHWEIZER (juill. 2020). « Studying Snow Failure With Fiber Bundle Models ». In : *Frontiers in Physics* 8. DOI : 10.3389/fphy.2020.00236.
- CHEN, W. W. (2013). « FFT-Based Methods for Contact Mechanics ». In : *Encyclopedia of Tribology*. Springer US, p. 1076-1080. DOI : 10.1007/978-0-387-92897-5_516.
- CICHOCKI, P. et M. KILARSKI (nov. 2010). « On “Eskimo Words for Snow” : The life cycle of a linguistic misconception ». In : *Historiographia Linguistica* 37.3, p. 341-377. DOI : 10.1075/hl.37.3.03cic.
- COLBECK, S. C. (déc. 1997). *A Review of Sintering in Seasonal Snow*. Rapp. tech. December. Hanover : U.S. Army Cold Regions Research et Engineering Laboratory. DOI : 10.21236/ada335556.
- COLBECK, S. (1982). « An Overview of Seasonal Snow Metamorphism ». In : *Reviews of Geophysics* 20.1, p. 45-61. DOI : 10.1029/RG020i001p00045.
- COLÉOU, C., B. LESAFFRE, J.-b. BRZOSKA, W. LUDWIG et E. BOLLER (2001). « Three-dimensional snow images by X-ray microtomography ». In : *Annals of Glaciology* 32, p. 75-81. DOI : 10.3189/172756401781819418.
- COLÉOU, C. et S. MORIN (2018). « Vingt-cinq ans de prévision du risque d'avalanche à Météo-France ». In : *La Météorologie* 100 Spécial Anniversaire 25 ans, p. 79. DOI : 10.4267/2042/65147.
- CUI, S., J. FU, S. CEN, H. R. THOMAS et C. LI (oct. 2021). « The correlation between statistical descriptors of heterogeneous materials ». In : *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 384, p. 113948. DOI : 10.1016/j.cma.2021.113948.
- DEBEER, C. M. et J. W. POMEROY (2017). « Influence of snowpack and melt energy heterogeneity on snow cover depletion and snowmelt runoff simulation in a cold mountain environment ». In : *Journal of Hydrology* 553, p. 199-213. ISSN : 0022-1694. DOI : 10.1016/j.jhydro.2017.07.051.
- DELMAS, L. (2013). « Influence of snow type and temperature on snow viscosity ». In : *Journal of Glaciology* 59.213, p. 87-92. DOI : 10.3189/2013jog11j231.
- DUMONT, M., F. FLIN, A. MALINKA, O. BRISSAUD, P. HAGENMULLER, P. LAPALUS, B. LESAFFRE, A. DUFOUR, N. CALONNE, S. R. D. ROSCOAT et E. ANDO (août

- 2021). « Experimental and model-based investigation of the links between snow bidirectional reflectance and snow microstructure ». In : *The Cryosphere* 15.8, p. 3921-3948. DOI : 10.5194/tc-15-3921-2021.
- EDENS, M. Q. et R. L. BROWN (1991). « Changes in microstructure of snow under large deformations ». In : *Journal of Glaciology* 37.126, p. 193-202. DOI : 10.3189/s0022143000007206.
- EPPANAPELLI, L., F. FORSBERG, J. CASSELGREN et H. LYCKSAM (mars 2019). « 3D Analysis of Deformation and Porosity of Dry Natural Snow during Compaction ». In : *Materials* 12.6, p. 850. DOI : 10.3390/ma12060850.
- ESTILOW, T. W., A. H. YOUNG et D. A. ROBINSON (2015). « A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring ». In : *Earth System Science Data* 7.1, p. 137-142. ISSN : 1866-3516. DOI : 10.5194/essd-7-137-2015.
- FIERZ, C., R. L. ARMSTRONG, Y. DURAND, P. ETCHEVERS, E. GREENE, D. M. MCCLUNG, K. NISHIMURA, P. K. SATYAWALI et S. A. SOKRATOV (2009). *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*. T. 5. UNESCO/IHP.
- FLANNER, M. G., X. LIU, C. ZHOU, J. E. PENNER et C. JIAO (2012). « Enhanced solar energy absorption by internally-mixed black carbon in snow grains ». In : *Atmospheric Chemistry and Physics* 12.10, p. 4699-4721. DOI : 10.5194/acp-12-4699-2012.
- FLANNER, M. G., K. M. SHELL, M. BARLAGE, D. K. PEROVICH et M. A. TSCHUDI (2011). « Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008 ». In : *Nature Geoscience* 4.3, p. 151-155. ISSN : 1752-0894. DOI : 10.1038/ngeo1062.
- FLANNER, M. G. et C. S. ZENDER (2006). « Linking snowpack microphysics and albedo evolution ». In : *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 111.12, p. D12208. ISSN : 0148-0227. DOI : 10.1029/2005JD006834.
- FLIN, F., J.-b. BRZOSKA, D. COEURJOLLY, R. PIERITZ, B. LESAFFRE, C. COLEOU, P. LAMBOLEY, O. TEYTAUD, G. VIGNOLES et J.-f. DELESSE (mai 2005). « Adaptive estimation of normals and surface area for discrete 3-D objects : application to snow binary data from X-ray tomography ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 14.5, p. 585-596. DOI : 10.1109/tip.2005.846021.
- FLIN, F., J.-b. BRZOSKA, B. LESAFFRE, C. COLÉOU et R. A. PIERITZ (2004). « Three-dimensional geometric measurements of snow microstructural evolution under isothermal conditions ». In : *Annals of Glaciology* 38, p. 39-44. DOI : 10.3189/172756404781814942.
- FLIN, F., B. LESAFFRE, A. DUFOUR, L. GILLIBERT, A. HASAN, S. Rolland du ROSCOAT, S. CABANES et P. PUGLIESE (2011). « On the Computations of Specific Surface Area and Specific Grain Contact Area from Snow 3D Images ». In : *Physics and Chemistry of Ice*. Sous la dir. d'Y FURUKAWA. Sapporo, Japan : Hokkaido University Press, p. 321-328.
- FLIN, F., J.-B. BRZOSKA, B. LESAFFRE, C. COLÉOU et R. A. PIERITZ (avr. 2003). « Full three-dimensional modelling of curvature-dependent snow metamorphism : first results and comparison with experimental tomographic data ». In : *Journal of Physics D : Applied Physics* 36.10A, A49-A54. DOI : 10.1088/0022-3727/36/10a/310.

- FOURTEAU, K., F. DOMINE et P. HAGENMULLER (2021). « Macroscopic water vapor diffusion is not enhanced in snow ». In : *The Cryosphere* 15.1, p. 389-406. DOI : 10.5194/tc-15-389-2021.
- FUKUE, M. (1979). « Mechanical performance of snow under loading ». Thèse de doct. McGill University, Department of Civil Engineering et Applied Mechanics.
- GARRETT, T. J., C. FALLGATTER, K. SHKURKO et D. HOWLETT (2012). « Fall speed measurement and high-resolution multi-angle photography of hydrometeors in free fall ». In : *Atmospheric Measurement Techniques* 5.11, p. 2625-2633. ISSN : 1867-1381. DOI : 10.5194/amt-5-2625-2012.
- GAUME, J., G. CHAMBON, N. ECKERT et M. NAAIM (2013). « Influence of weak-layer heterogeneity on snow slab avalanche release : application to the evaluation of avalanche release depths ». In : *Journal of Glaciology* 59.215, p. 423-437. DOI : 10.3189/2013jog12j161.
- GERLING, B., H. LÖWE et A. V. HERWIJNEN (nov. 2017). « Measuring the Elastic Modulus of Snow ». In : *Geophysical Research Letters* 44.21. DOI : 10.1002/2017gl075110.
- GOLD, L. W. (1956). « The Strength of Snow in Compression ». In : *Journal of Glaciology* 2.20, p. 719-725. DOI : 10.3189/s0022143000024953.
- GOUJON, C., J.-m. BARNOLA et C. RITZ (déc. 2003). « Modeling the densification of polar firn including heat diffusion : Application to close-off characteristics and gas isotopic fractionation for Antarctica and Greenland sites ». In : *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 108.D24, n/a-n/a. ISSN : 0148-0227. DOI : 10.1029/2002JD003319.
- GUILLARD, F., P. GOLSHAN, L. SHEN, J. R. VALDES et I. EINAV (août 2015). « Dynamic patterns of compaction in brittle porous media ». In : *Nature Physics* 11.10, p. 835-838. DOI : 10.1038/nphys3424.
- HAGENMULLER, P., G. CHAMBON et M. NAAIM (oct. 2015). « Microstructure-based modeling of snow mechanics : a discrete element approach ». In : *The Cryosphere* 9.5, p. 1969-1982. DOI : 10.5194/tc-9-1969-2015.
- HAGENMULLER, P., N. CALONNE, G. CHAMBON, F. FLIN, C. GEINDREAU et M. NAAIM (déc. 2014a). « Characterization of the snow microstructural bonding system through the minimum cut density ». In : *Cold Regions Science and Technology* 108, p. 72-79. DOI : 10.1016/j.coldregions.2014.09.002.
- HAGENMULLER, P., G. CHAMBON, F. FLIN, S. MORIN et M. NAAIM (mai 2014b). « Snow as a granular material : assessment of a new grain segmentation algorithm ». In : *Granular Matter* 16.4, p. 421-432. DOI : 10.1007/s10035-014-0503-7.
- HAGENMULLER, P., G. CHAMBON, B. LESAFFRE, F. FLIN et M. NAAIM (2013). « Energy-based binary segmentation of snow microtomographic images ». In : *Journal of Glaciology* 59.217, p. 859-873. DOI : 10.3189/2013jog13j035.
- HAGENMULLER, P., F. FLIN, M. DUMONT, F. TUZET, I. PEINKE, P. LAPALUS, A. DUFOUR, J. ROULLE, L. PÉZARD, D. VOISIN, E. ANDO, S. R. D. ROSCOAT et P. CHARRIER (sept. 2019). « Motion of dust particles in dry snow under temperature gradient metamorphism ». In : *The Cryosphere* 13.9, p. 2345-2359. DOI : 10.5194/tc-13-2345-2019.
- HAGENMULLER, P., M. MATZL, G. CHAMBON et M. SCHNEEBELI (mai 2016). « Sensitivity of snow density and specific surface area measured by microtomography

- to different image processing algorithms ». In : *The Cryosphere* 10.3, p. 1039-1054. DOI : 10.5194/tc-10-1039-2016.
- HAGENMULLER, P., T. C. THEILE et M. SCHNEEBELI (jan. 2014). « Numerical simulation of microstructural damage and tensile strength of snow ». In : *Geophysical Research Letters* 41.1, p. 86-89. DOI : 10.1002/2013g1058078.
- HANSEN, A. et R. BROWN (nov. 1988). « An internal state variable approach to constitutive theories for granular materials with snow as an example ». In : *Mechanics of Materials* 7.2, p. 109-119. DOI : 10.1016/0167-6636(88)90009-9.
- HEGLI, M., E. FREI et M. SCHNEEBELI (2009). « Snow replica method for three-dimensional X-ray microtomographic imaging ». In : *Journal of Glaciology* 55.192, p. 631-639. DOI : 10.3189/002214309789470932.
- HERRON, M. M. et C. C. LANGWAY (1980). « Firn Densification : An Empirical Model ». In : *Journal of Glaciology* 25.93, p. 373-385. DOI : 10.3189/s0022143000015239.
- HERZBERG, J., C. KEHRT et F. TORMA, éd. (oct. 2018). *Ice and Snow in the Cold War*. Berghahn Books. DOI : 10.2307/j.ctvw048zz.
- IASSONOV, P., T. GEBRENEGUS et M. TULLER (sept. 2009). « Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials : A crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures ». In : *Water Resources Research* 45.9. DOI : 10.1029/2009wr008087.
- IGNAT, M. et H. J. FROST (mars 1987). « Grain boundary sliding in ice ». In : *Le Journal de Physique Colloques* 48.C1, p. C1-189-C1-195. DOI : 10.1051/jphyscol:1987127.
- JOHNSON, J. B. et M. A. HOPKINS (2005). « Identifying microstructural deformation mechanisms in snow using discrete-element modeling ». In : *Journal of Glaciology* 51.174, p. 432-442. DOI : 10.3189/172756505781829188.
- KAEMPFER, T. U. et M. SCHNEEBELI (déc. 2007). « Observation of isothermal metamorphism of new snow and interpretation as a sintering process ». In : *Journal of Geophysical Research* 112.D24. DOI : 10.1029/2007jd009047.
- KAEMPFER, T. U., M. SCHNEEBELI et S. A. SOKRATOV (2005). « A microstructural approach to model heat transfer in snow ». In : *Geophysical Research Letters* 32.21, p. 1-5. ISSN : 0094-8276. DOI : 10.1029/2005g1023873.
- KINOSITA, S. (1967). « Compression of snow at constant speed ». In : *Physics of Snow and Ice : proceedings* 1.2, p. 911-927.
- KIRCHNER, H. O. K., G. MICHOT et H. NARIT (sept. 2001). « Snow as a foam of ice : plasticity, fracture and the brittle-to-ductile transition ». In : *Philosophical Magazine A* 81.9, p. 2161-2181. DOI : 10.1080/01418610010029043.
- KOJIMA, K. (1967). « Densification of seasonal snow cover ». In : *Physics of Snow and Ice : proceedings* 1.2, p. 929-952.
- KRY, P. R. (1975a). « Quantitative Stereological Analysis of Grain Bonds in Snow ». In : *Journal of Glaciology* 14.72, p. 467-477. DOI : 10.3189/s0022143000021973.
- (1975b). « The Relationship between the Visco-Elastic and Structural Properties of Fine-Grained Snow ». In : *Journal of Glaciology* 14.72, p. 479-500. DOI : 10.3189/s0022143000021985.

- LADE, P. V. (2001). « Modeling Sea Ice as an Elasto-Plastic Frictional Material ». In : *IUTAM Symposium on Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics*. Springer Netherlands, p. 227-238. DOI : 10.1007/978-94-015-9735-7_20.
- LE ROUX, E., G. EVIN, N. ECKERT, J. BLANCHET et S. MORIN (2020). « Non-stationary extreme value analysis of ground snow loads in the French Alps : a comparison with building standards ». In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20.11, p. 2961-2977. ISSN : 1684-9981. DOI : 10.5194/nhess-20-2961-2020.
- LEGAGNEUX, L. et F. DOMINE (nov. 2005). « A mean field model of the decrease of the specific surface area of dry snow during isothermal metamorphism ». In : *Journal of Geophysical Research : Earth Surface* 110.F4, n/a-n/a. DOI : 10.1029/2004jf000181.
- LEHNING, M., P. BARTELT, B. BROWN, C. FIERZ et P. SATYAWALI (nov. 2002). « A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning ». In : *Cold Regions Science and Technology* 35.3, p. 147-167. DOI : 10.1016/s0165-232x(02)00073-3.
- LEINSS, S., H. LÖWE, M. PROKSCH et A. KONTU (jan. 2020). « Modeling the evolution of the structural anisotropy of snow ». In : *Cryosphere* 14.1, p. 51-75. ISSN : 1994-0424. DOI : 10.5194/tc-14-51-2020.
- LEINSS, S., H. LÖWE, M. PROKSCH, J. LEMMETYINEN, A. WIESMANN et I. HAJNSEK (août 2016). « Anisotropy of seasonal snow measured by polarimetric phase differences in radar time series ». In : *The Cryosphere* 10.4, p. 1771-1797. DOI : 10.5194/tc-10-1771-2016.
- LIBBRECHT, K. G. (2012). *Toward a Comprehensive Model of Snow Crystal Growth Dynamics : 1. Overarching Features and Physical Origins*. DOI : 10.48550/ARXIV.1211.5555.
- LIN, P. P., I. PEINKE, P. HAGENMULLER, M. WÄCHTER, M. R. RAHIMI TABAR et J. PEINKE (2022). « Stochastic analysis of micro-cone penetration tests in snow ». In : *The Cryosphere* 16.12, p. 4811-4822. ISSN : 1994-0424. DOI : 10.5194/tc-16-4811-2022.
- LOMBARDO, M., M. SCHNEEBELI et H. LÖWE (avr. 2021). « A casting method using contrast-enhanced diethylphthalate for micro-computed tomography of snow ». In : *Journal of Glaciology* 67.265, p. 847-861. DOI : 10.1017/jog.2021.35.
- LUCARINI, S., M. V. UPADHYAY et J. SEGURADO (déc. 2021). « FFT based approaches in micromechanics : fundamentals, methods and applications ». In : *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 30.2, p. 023002. DOI : 10.1088/1361-651x/ac34e1.
- LUNDY, C. C., M. Q. EDENS et R. L. BROWN (2002). « Measurement of snow density and microstructure using computed tomography ». In : *Journal of Glaciology* 48.161, p. 312-316. DOI : 10.3189/172756502781831485.
- LÖWE, H., F. RICHE et M. SCHNEEBELI (sept. 2013). « A general treatment of snow microstructure exemplified by an improved relation for thermal conductivity ». In : *The Cryosphere* 7.5, p. 1473-1480. DOI : 10.5194/tc-7-1473-2013.
- LÖWE, H., J. SPIEGEL et M. SCHNEEBELI (juin 2011). « Interfacial and structural relaxations of snow under isothermal conditions ». In : *Journal of Glaciology* 57.203, p. 499-510. ISSN : 0022-1430. DOI : 10.3189/002214311796905569.

- LÖWE, H., M. ZAISER, S. MÖSINGER et S. SCHLEEF (fév. 2020). « Snow Mechanics Near the Ductile-Brittle Transition : Compressive Stick-Slip and Snow Microquakes ». In : *Geophysical Research Letters* 47.4. DOI : 10.1029/2019g1085491.
- MAENO, N. et T. EBINUMA (oct. 1983). « Pressure sintering of ice and its implication to the densification of snow at polar glaciers and ice sheets ». In : *The Journal of Physical Chemistry* 87.21, p. 4103-4110. DOI : 10.1021/j100244a023.
- MAYO, S. C., A. W. STEVENSON et S. W. WILKINS (mai 2012). « In-Line Phase-Contrast X-ray Imaging and Tomography for Materials Science ». In : *Materials* 5.12, p. 937-965. DOI : 10.3390/ma5050937.
- MELLOR, M. (1974). *A review of basic snow mechanics*. US Army Cold Regions Research et Engineering Laboratory Hanover, NH.
- MICHELSSEN, K., H. D. RAEDT et J. D. HOSSON (2003). « Aspects of mathematical morphology ». In : *Advances in Imaging and Electron Physics*. Elsevier, p. 119-194. DOI : 10.1016/s1076-5670(02)80016-7.
- MONTMOLLIN, V. D. (1982). « Shear Test on Snow Explained by Fast Metamorphism ». In : *Journal of Glaciology* 28.98, p. 187-198. DOI : 10.3189/s0022143000011898.
- MORRIS, E. M., L. N. MONTGOMERY et R. MULVANEY (sept. 2021). « Modeling the transition from grain-boundary sliding to power-law creep in dry snow densification ». In : p. 1-14. DOI : 10.1017/jog.2021.95.
- NARITA, H. (1980). « Mechanical behaviour and structure of snow under uniaxial tensile stress ». In : *Journal of Glaciology* 26.94, p. 275-282. DOI : 10.3189/s0022143000010819.
- (mars 1984). « An Experimental Study on Tensile Fracture of Snow ». In : *Contributions from the Institute of Low Temperature Science* A32, p. 1-37.
- ODDERSHEDE, J., S. SCHMIDT, H. F. POULSEN, H. O. SØRENSEN, J. WRIGHT et W. REIMERS (avr. 2010). « Determining grain resolved stresses in polycrystalline materials using three-dimensional X-ray diffraction ». In : *Journal of Applied Crystallography* 43.3, p. 539-549. DOI : 10.1107/s0021889810012963.
- ODGAARD, A. et H. GUNDERSEN (mars 1993). « Quantification of connectivity in cancellous bone, with special emphasis on 3-D reconstructions ». In : *Bone* 14.2, p. 173-182. DOI : 10.1016/8756-3282(93)90245-6.
- PARK, S. C., M. K. PARK et M. G. KANG (mai 2003). « Super-resolution image reconstruction : a technical overview ». In : *IEEE Signal Processing Magazine* 20.3, p. 21-36. DOI : 10.1109/msp.2003.1203207.
- PEINKE, I., P. HAGENMULLER, E. ANDÒ, G. CHAMBON, F. FLIN et J. ROULLE (mars 2020). « Experimental Study of Cone Penetration in Snow Using X-Ray Tomography ». In : *Frontiers in Earth Science* 8. DOI : 10.3389/feart.2020.00063.
- PIELMEIER, C. et M. SCHNEEBELI (nov. 2003). « Stratigraphy and changes in hardness of snow measured by hand, ramsonde and snow micro penetrometer : a comparison with planar sections ». In : *Cold Regions Science and Technology* 37.3, p. 393-405. DOI : 10.1016/s0165-232x(03)00079-x.
- PODOLSKIY, E., G. CHAMBON, M. NAAIM et J. GAUME (2013). « A review of finite-element modelling in snow mechanics ». In : *Journal of Glaciology* 59.218, p. 1189-1201. DOI : 10.3189/2013jog13j121.

- PROKSCH, M., H. LÖWE et M. SCHNEEBELI (fév. 2015). « Density, specific surface area, and correlation length of snow measured by high-resolution penetrometry ». In : *Journal of Geophysical Research : Earth Surface* 120.2, p. 346-362. DOI : 10.1002/2014jf003266.
- PUZRIN, A. M., T. FAUG et I. EINAV (juill. 2019). « The mechanism of delayed release in earthquake-induced avalanches ». In : *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 475.2227, p. 20190092. DOI : 10.1098/rspa.2019.0092.
- REIWEGER, I., J. SCHWEIZER, J. DUAL et H. J. HERRMANN (2009). « Modelling snow failure with a fibre bundle model ». In : *Journal of Glaciology* 55.194, p. 997-1002. DOI : 10.3189/002214309790794869.
- ROSCOAT, S. R. D., A. KING, A. PHILIP, P. REISCHIG, W. LUDWIG, F. FLIN et J. MEYSSONNIER (déc. 2010). « Analysis of Snow Microstructure by Means of X-Ray Diffraction Contrast Tomography ». In : *Advanced Engineering Materials* 13.3, p. 128-135. DOI : 10.1002/adem.201000221.
- SALM, B. (1982). « Mechanical properties of snow ». In : *Reviews of Geophysics* 20.1, p. 1. DOI : 10.1029/rg020i001p00001.
- SALVO, L., P. CLOETENS, E. MAIRE, S. ZABLER, J. BLANDIN, J. BUFFIÈRE, W. LUDWIG, E. BOLLER, D. BELLET et C. JOSSEROND (jan. 2003). « X-ray microtomography an attractive characterisation technique in materials science ». In : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms* 200, p. 273-286. DOI : 10.1016/s0168-583x(02)01689-0.
- SCAPOZZA, C. et P. A. BARTELT (2003). « The influence of temperature on the small-strain viscous deformation mechanics of snow : a comparison with polycrystalline ice ». In : *Annals of Glaciology* 37, p. 90-96. DOI : 10.3189/172756403781815410.
- SCHLEEF, S., H. LÖWE et M. SCHNEEBELI (oct. 2014). « Influence of stress, temperature and crystal morphology on isothermal densification and specific surface area decrease of new snow ». In : *The Cryosphere* 8.5, p. 1825-1838. DOI : 10.5194/tc-8-1825-2014.
- SCHLEEF, S. et H. LÖWE (2013). « X-ray microtomography analysis of isothermal densification of new snow under external mechanical stress ». In : *Journal of Glaciology* 59.214, p. 233-243. DOI : 10.3189/2013jog12j076.
- SCHLEEF, S., H. LÖWE et M. SCHNEEBELI (juin 2014). « Hot-pressure sintering of low-density snow analyzed by X-ray microtomography and in situ microcompression ». In : *Acta Materialia* 71, p. 185-194. ISSN : 1359-6454. DOI : 10.1016/j.actamat.2014.03.004.
- SCHNEEBELI, M. (2004). « Numerical simulation of elastic stress in the microstructure of snow ». In : *Annals of Glaciology* 38, p. 339-342. DOI : 10.3189/172756404781815284.
- SCHREIER, H., J.-j. ORTEU et M. A. SUTTON (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer US. DOI : 10.1007/978-0-387-78747-3.
- SCHWEIZER, J. (1998). « Laboratory experiments on shear failure of snow ». In : *Annals of Glaciology* 26, p. 97-102. DOI : 10.3189/1998aog26-1-97-102.

- SCHWEIZER, J., B. REUTER, A. VAN HERWIJNEN et J. GAUME (2016). « Avalanche release 101 ». In : *Proceedings ISSW*, p. 1-11.
- SCHWEIZER, J. (2003). « Snow avalanche formation ». In : *Reviews of Geophysics* 41.4. DOI : 10.1029/2002rg000123.
- SHAPIRO, L. H., J. B. JOHNSON, M. STURM et G. L. BLAISDELL (1997). « Snow mechanics : review of the state of knowledge and applications ». In.
- SHENVI, M. N., C. SANDU et C. UNTAROIU (avr. 2022). « Review of compressed snow mechanics : Testing methods ». In : *Journal of Terramechanics* 100, p. 25-37. DOI : 10.1016/j.jterra.2021.11.006.
- SHOOP, S., P. RICHMOND et J. LACOMBE (jan. 2006). « Overview of cold regions mobility modeling at CRREL ». In : *Journal of Terramechanics* 43.1, p. 1-26. ISSN : 00224898. DOI : 10.1016/j.jterra.2004.08.004.
- SPANDRE, P., H. FRANÇOIS, D. VERFAILLIE, M. LAFAYASSE, M. DÉQUÉ, N. ECKERT, E. GEORGE et S. MORIN (2019). « Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts ». In : *Scientific Reports* 9.1, p. 8043. ISSN : 2045-2322. DOI : 10.1038/s41598-019-44068-8.
- SPANDRE, P., H. FRANÇOIS, E. GEORGE-MARCELPOIL et S. MORIN (2016). « Panel based assessment of snow management operations in French ski resorts ». In : *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* 16.September, p. 24-36. ISSN : 22130780. DOI : 10.1016/j.jort.2016.09.002.
- SRIVASTAVA, P. K., C. CHANDEL, P. MAHAJAN et P. PANKAJ (mai 2016). « Prediction of anisotropic elastic properties of snow from its microstructure ». In : *Cold Regions Science and Technology* 125, p. 85-100. DOI : 10.1016/j.coldregions.2016.02.002.
- STAMATI, O., E. ANDÒ, E. ROUBIN, R. CAILLETAUD, M. WIEBICKE, G. PINZON, C. COUTURE, R. HURLEY, R. CAULK, D. CAILLERIE, T. MATSUSHIMA, P. BÉSUELLE, F. BERTONI, T. ARNAUD, A. LABORIN, R. RORATO, Y. SUN, A. TENGATTINI, O. OKUBADEJO, J.-b. COLLIAT, M. SAADATFAR, F. GARCIA, C. PAPAZOGLU, I. VEGO, S. BRISARD, J. DIJKSTRA et G. BIRMPILIS (juill. 2020). « spam : Software for Practical Analysis of Materials ». In : *Journal of Open Source Software* 5.51, p. 2286. ISSN : 2475-9066. DOI : 10.21105/joss.02286.
- SZABO, D. et M. SCHNEEBELI (avr. 2007). « Subsecond sintering of ice ». In : *Applied Physics Letters* 90.15, p. 151916. DOI : 10.1063/1.2721391.
- TAILLANDIER, A.-s., F. DOMINE, W. R. SIMPSON, M. STURM et T. A. DOUGLAS (juill. 2007). « Rate of decrease of the specific surface area of dry snow : Isothermal and temperature gradient conditions ». In : *Journal of Geophysical Research* 112.F3, p. 1-13. DOI : 10.1029/2006jf000514.
- TECHEL, F., F. JARRY, G. KRONTHALER, S. MITTERER, P. NAIRZ, M. PAVŠEK, M. VALT et G. DARMS (2016). « Avalanche fatalities in the European Alps : long-term trends and statistics ». In : *Geographica Helvetica* 71.2, p. 147-159. ISSN : 2194-8798. DOI : 10.5194/gh-71-147-2016.
- THEILE, T., H. LÖWE, T. THEILE et M. SCHNEEBELI (oct. 2011). « Simulating creep of snow based on microstructure and the anisotropic deformation of ice ». In : *Acta Materialia* 59.18, p. 7104-7113. DOI : 10.1016/j.actamat.2011.07.065.

- THEILE, T., D. SZABO, C. WILLIBALD et M. SCHNEEBELI (juill. 2020). « Discrete element model for high strain rate deformations of snow ». In : arXiv : 2007.01694v1 [physics.geo-ph].
- TORQUATO, S. et B. LU (avr. 1993). « Chord-length distribution function for two-phase random media ». In : *Physical Review E* 47.4, p. 2950-2953. DOI : 10.1103/physreve.47.2950.
- VÁSÁRHELYI, L., Z. KÓNYA, Á. KUKOVECZ et R. VAJTAI (déc. 2020). « Microcomputed tomography-based characterization of advanced materials : a review ». In : *Materials Today Advances* 8, p. 100084. DOI : 10.1016/j.mtadv.2020.100084.
- VÁZQUEZ-MARTÍN, S., T. KUHN et S. ELIASSON (2020). « Shape Dependence of Falling Snow Crystals' Microphysical Properties Using an Updated Shape Classification ». In : *Applied Sciences* 10.3, p. 1163. ISSN : 2076-3417. DOI : 10.3390/app10031163.
- VIONNET, V., E. BRUN, S. MORIN, A. BOONE, S. FAROUX, P. LE MOIGNE, E. MARTIN et J.-m WILLEMET (2012). « Model Development The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7 . 2 ». In : *Geoscientific Model Development* 5, p. 773-791. DOI : 10.5194/gmd-5-773-2012.
- VOITKOVSKY, K., A. BOZHINSKY, V. GOLUBEV, M. LAPTEV et A. ZHIGULSKY (1975). « Creep-induced changes in structure and density of snow ». In : *Snow Mechanics Symposium*.
- WAKAHAMA, G. (1967). « Compression of Thin Section of Snow : A motion Picture ». In : *Physics of Snow and Ice : proceedings* 1.2, p. 909-909.
- WANG, E., X. FU, H. HAN, X. LIU, Y. XIAO et Y. LENG (fév. 2021). « Study on the mechanical properties of compacted snow under uniaxial compression and analysis of influencing factors ». In : *Cold Regions Science and Technology* 182, p. 103215. DOI : 10.1016/j.coldregions.2020.103215.
- WANG, G., J. C. YE et B. D. MAN (déc. 2020). « Deep learning for tomographic image reconstruction ». In : *Nature Machine Intelligence* 2.12, p. 737-748. DOI : 10.1038/s42256-020-00273-z.
- WANG, X. et I. BAKER (nov. 2013). « Observation of the microstructural evolution of snow under uniaxial compression using X-ray computed microtomography ». In : *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 118.22, p. 12,371-12,382. DOI : 10.1002/2013jd020352.
- WAUTIER, A., C. GEINDREAU et F. FLIN (oct. 2015). « Linking snow microstructure to its macroscopic elastic stiffness tensor : A numerical homogenization method and its application to 3-D images from X-ray tomography ». In : *Geophysical Research Letters* 42.19, p. 8031-8041. DOI : 10.1002/2015g1065227.
- WAUTIER, A., C. GEINDREAU et F. FLIN (juin 2017). « Numerical homogenization of the viscoplastic behavior of snow based on X-ray tomography images ». In : *The Cryosphere* 11.3, p. 1465-1485. DOI : 10.5194/tc-11-1465-2017.
- WIESE, M. et M. SCHNEEBELI (juill. 2017a). « Early-stage interaction between settlement and temperature-gradient metamorphism ». In : *Journal of Glaciology* 63.240, p. 652-662. DOI : 10.1017/jog.2017.31.
- (fév. 2017b). « Snowbreeder 5 : a Micro-CT device for measuring the snow-microstructure evolution under the simultaneous influence of a temperature gra-

- dient and compaction ». In : *Journal of Glaciology* 63.238, p. 355-360. DOI : 10.1017/jog.2016.143.
- XIONG, C. et J. SHI (2014). « Simulating polarized light scattering in terrestrial snow based on bicontinuous random medium and Monte Carlo ray tracing ». In : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 133, p. 177-189. ISSN : 0022-4073. DOI : 10.1016/j.jqsrt.2013.07.026.
- YOSIDA, Z., H. OURA, D. KUROIWA, T. HUZIOKA, K. KOJIMA et S. KINOSHITA (juin 1958). « Physical Studies on Deposited Snow. IV. ; Mechanical Properties. (3) ». In : *Contributions from the Institute of Low Temperature Science* 13, p. 55-100.
- YOSIDA, Z., H. OURA, D. KUROIWA, T. HUZIOKA, K. KOJIMA, S. AOKI et S. KINOSHITA (1956). « Physical Studies on Deposited Snow. II. ; Mechanical Properties.(1) ». In : *Contributions from the Institute of Low Temperature Science* 9, p. 1-81.
- ZHANG, T, T. E. OSTERKAMP et K STAMNES (1996). « Influence of the Depth Hoar Layer of the Seasonal Snow Cover on the Ground Thermal Regime ». In : *Water Resources Research* 32.7, p. 2075-2086. ISSN : 00431397. DOI : 10.1029/96WR00996.
- ZUANON, N. (2013). « IceCube, a portable and reliable instruments for snow specific surface area measurement in the field ». In : *International Snow Science Workshop Grenoble-Chamonix Mont-Blance-2013 proceedings*, p. 1020-1023.

A Appendix of I

A.1 Fiche technique du moteur

La fiche technique du moteur est disponible en ligne [ici](#) ou à la suite de cette annexe.

NanoPZ

Ultra-High Resolution Actuators



NEW
FROM NEWPORT

PZA12 Actuator

Our NanoPZ ultra-high resolution actuators provide exceptional nanometer-scale remote control for manual-positioning stages and opto-mechanical components over large distances, in hard to reach spaces and in hazardous hands-off applications - like high-power laser experiments. NanoPZ's non-rotating tip helps prevent contact surface wear and allows for direct load attachments. Newport's exclusive design and the innovative piezo stepping motor allows a range of motion and stability that ensures 30 nm of motion sensitivity with no loss of position when power is removed. And unlike some other piezo based devices, the NanoPZ design does not rely on varying static and dynamic friction forces which can provide inconsistent performance and premature failure. The NanoPZ incorporates an exclusive piezo micro-stepping motor and ergonomic controls which provide consistent results, superior reliability and unmatched ease-of-use. With all this, plus >0.2 mm/s speed, 50 N load capacity and more quiet operation, it's easy to see why Newport's NanoPZ outperforms the rest.

NanoPZ is compatible with an array of Newport products including: Ultima series optical mounts, GON series goniometers, and ULTRAlign series of linear stages.

PZA12 Design Details

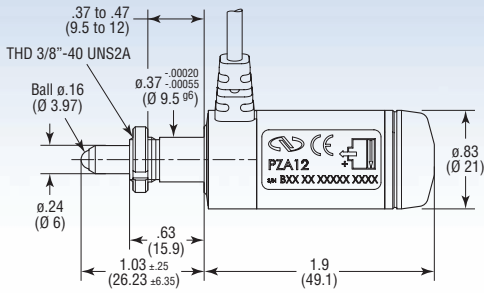
Base Material	Aluminum
Drive Mechanism	Direct-drive non-rotating lead screw, no gear
Feedback	Open loop, no encoder
Limit Switches	Fixed, jam-nut proof hard stops limit max./min. travel
Origin	None
Motor	Non-resonant piezo micro-stepping motor
Average full-step size	Approx. 160 nm depending on load, speed and other parameters, 16 micro-steps per full-step
Cable Length	3 m
Weight [lb (kg)]	0.29 (0.13)

Preliminary information.
Product to be available
September 2005. All specifications, drawings and information are still subject of change. For most current information please visit the "New products" section on our website, or contact Newport's technical support group or your Newport representative

Key Features

- Highly reliable operation with 30 nm motion sensitivity over 12.7 mm travel
- 10x faster speed (> 0.2 mm/s) and 2x higher load capacity (50 N) than other piezo motor devices
- Non-rotating tip prevents wear and allows for direct load attachments
- User-friendly and highly compatible
- No loss of position with removal of power – ideal for set-and-forget applications


Newport
Experience | Solutions



PZA12 Specifications

Travel Range [in. (mm)]	0.5 (12.7)
Sensitivity	30 nm
Repeatability/Accuracy	Varies depending on application and feedback method
Maximum Speed	0.2 mm/s at full load; Higher speeds possible at lower load
Axial Load Capacity	50 N

PZC200 Controller

Our PZC200 controller provides convenient and ergonomic one-hand speed-control, and easy to use push button channel control for the PZC-SB switchbox. It comes equipped with a serial RS-485 computer link for computer control of up to 256 units in parallel (RS-485 accessed by using RS-485 to RS-232 converter NSC-CB-485-232-1 plugged into your PC's RS-232 port. For USB use optional SMC-USB RS-232 to USB converter).

PZC200 Specifications

Number of controlled axes	1 without PZC-SB switchbox 8 with PZC-SB switchbox
Operating modes	1. Local (manual) control mode 2. Remote (computer) control mode
Controls, Local (manual) mode	Rotate knob to adjust speed Select active switchbox channel Toggle between local and remote mode Set current position to zero
Controls, Remote (computer) mode	ASCII commands I/O via RS-485 port
Motion commands	Micro-steps, 1 micro-step equals approx. 10 nm of linear motion of a PZA12 depending on load, speed and other parameters Important: Step size is not repeatable
Mechanical Dimensions (W x D x H) [in. (mm)]	2" x 6" x 2" (50 x 150 x 50)
Weight [lb (kg)]	0.55 (0.250)



PZC200 controller features ergonomic one-hand speed control, up-down buttons for selecting active switchbox channel, RS-485 communication link, and push-button remote control/computer control swap.

PZC-SB Switchbox

Controls up to 8 NanoPZ actuators from the same PZC200 controller. LEDs indicate which actuator is active, inactive, connected or disabled and two buttons on the PZC200 controller allow you to select the active actuator. (PZC-SB is controllable by PC by using the same RS-485/RS-232 interface of the PZC200).

PZC-SB Specifications

Actuator output channels	8 (one channel active at a time)
Channel status indication	One tri-color LED per channel
Case dimensions (H x W x D) [in. (mm)]	1.4" x 7.2" x 5.9" (35 x 182 x 151)



PZC-SB switchbox allows control of up to 8 actuators with one PZC200 controller.

Ordering Information

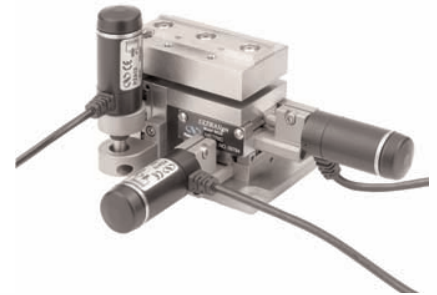
Model	Description
PZA12	NanoPZ actuator, 12.5 mm travel
PZC200	Hand-held controller for PZA12
NSC-PS25	AC power supply for PZC200
NSC-PSC1	1 meter (3 ft) power supply output cable
NSC-PSC3	3 meter (10 ft) power supply output cable
NSC-485-232-I	RS-485-to-RS-232 converter
USB-232	RS-232-to-USB converter
NSC-JB	Junction box to split 1 RS-485 channel into to 5 channels
NSC-CB1	1 meter (3 ft) RS-485 cable
NSC-CB3	3 meter (10 ft) RS-485 cable
PZC200-KT	Kit including 1 x PZA12 actuator, 1 x PZC200 controller, 1 x NSC-PS25 power supply, and 1 x NSC-PSC3 power supply cable
PZC-SB	Switchbox allowing one PZC200 to drive up to 8 actuators. Included cables: P/N 41791-01 1.8 m (6 ft) power cable to controller P/N 15769-02 1.8 m (6 ft) driver cable to controller P/N NSC-CB2 1.8 m (6 ft) RS-485 cable to controller



M-RS65 rotation stage equipped with a PZA12 actuator.



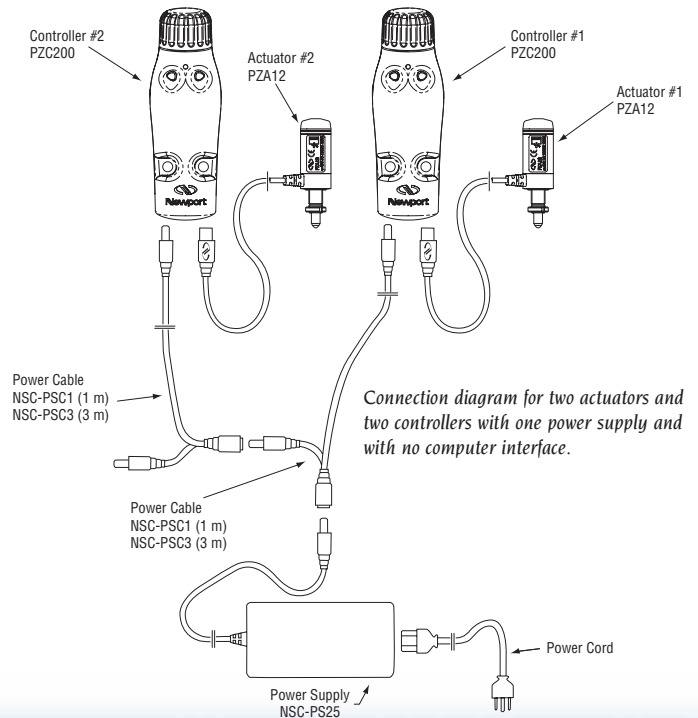
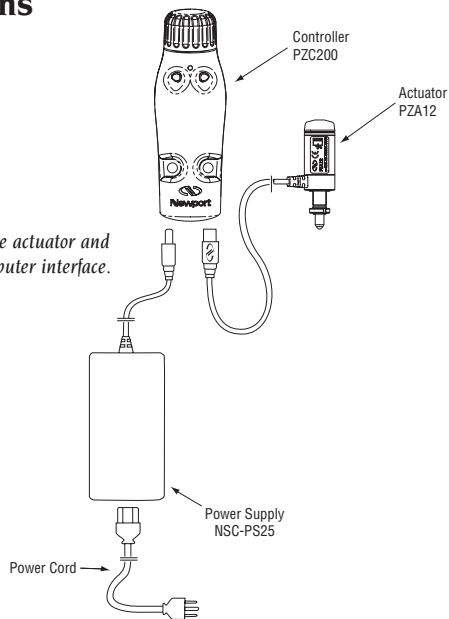
ULTIMA optical mount equipped with PZA12 actuators.



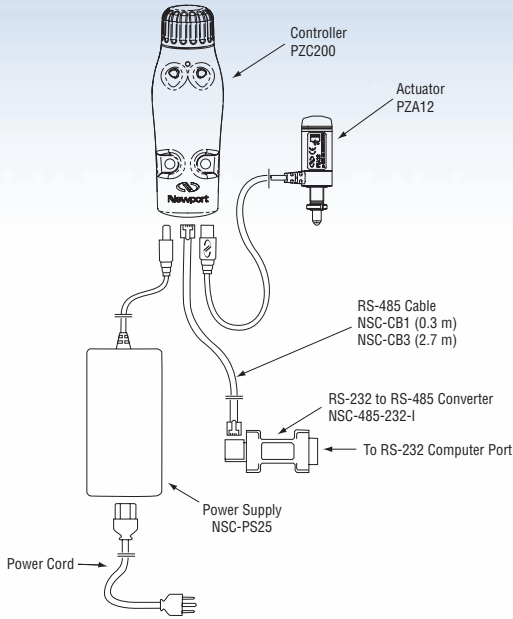
561D-XYZ ULTRAlign™ precision linear stage equipped with PZA12 actuators.

Configurations

Connection diagram for one actuator and one controller with no computer interface.

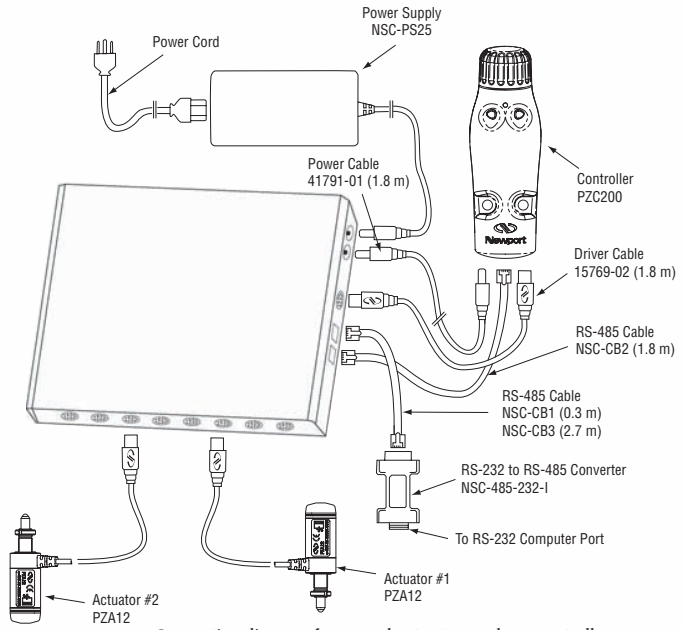
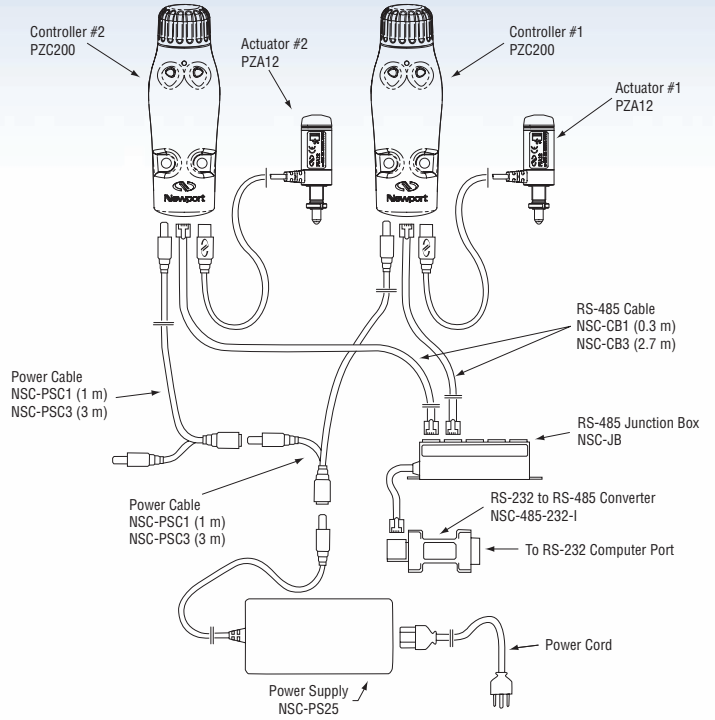


Connection diagram for two actuators and two controllers with one power supply and with no computer interface.



Connection diagram for one actuator and one controller with computer interface.

Connection diagram for two actuators and two controllers with computer interface.



Connection diagram for several actuators and one controller with switchbox and with computer interface.



ISO 9001
FM 27207

Newport Corporation, Irvine, California, has been certified compliant with ISO 9001 by the British Standards Institution.



Belgium
Newport B.V.
Tel.: +32-(0)1 6402927
Fax: +32-(0)1 6402227
belgium@newport-de.com

Netherlands
Newport B.V.
Tel.: +31-(0)30 6592111
Fax: +31-(0)30 6592120
netherlands@newport-de.com

France
MICRO-CONTROLE
Tel.: +33-(0)1-60-91-68-68
Fax: +33-(0)1-60-91-68-69
france@newport-fr.com

United Kingdom/Ireland
Newport Ltd.
Tel.: +44-(0)1635 521757
Fax: +44-(0)1635 521348
uk@newport.com

Germany/Austria
Newport GmbH
Tel.: +49 (0) 61 51 / 708 -0
Fax: +49 (0) 61 51 / 708 -954
verkauf@newport-de.com

USA
Newport Corporation
Tel.: +1-949-863-3144
Fax: +1-949-253-1680
sales@newport.com

Italy
Newport/Micro-Controle Italia
Tel.: +39-(0)2-929-0921
Fax: +39-(0)2-923-2448
newport@tin.it



A.2 Méta-données

Le format *yaml* a été choisi, car c'est un format lisible par un humain et compatible avec les outils informatiques modernes.

```
# General information
Author: Name of the meta-data author
Researcher: Name of the researcher doing the experiment
Contact: Contact information (preferably e-mail)
Location: Location of the experiment
Project: Name of the experiment
Description: Short description of the experiment and data
DateData: Date of the data
DateMetaData: Date of the metadata
# Specific information
Device: Device use to acquire the data (if possible, include link)
Software: Software used to acquire the data (if possible, include link)
Sample:
  name: Name of the sample
  status: Status of the sample (can be OK, NOTOK, FAILED)
  date: Date of the beginning of the recording
  description: Description of this specific sample.
SampleHolder:
  name: Name of the sample holder used.
  file: Link to the sample holder information.
  area: Surface area of the sample holder.
Characteristic:
  h_ini: Initial height in mm.
  h_fin: Final height in mm.
  start: Date of the start of the compression.
  end: Date of the end of the compression.
  comment: Explanation specific to the 'Characteristic' part.
DataFile: Path to the data file.
Image:
  ImageDirectory: Path to the tomographic scan directory.
  RadioStartIndex: Radio number at which compression begin.
  Method: Explanation to method used specific to the 'Image' part.
Motor:
  name: Name of the motor used.
Sensor: # list of sensors used
Strength:
  name: Name of the strength sensor.
  id : Unique identifier of the sensor.
  low_V: Parameters
  low_M: used
  high_V: for
```



```
    high_M: calibration
Temperature:
    name: Name of the temperature sensor.
Tomograph: Name of tomograph used
MotherData: Kind of data (raw, curated, ...)
Comments: Any commentary useful to better understand
Status: OK
# Fields can be added at your convenience
XXX: aaa
YYY:
    ZZZ: ccc
```

Listing 1 – Description des champs de méta-données utilisés pour les expériences.