

## MÉMOIRE D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : **Ingénierie, Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production**

Présenté par

**Dr. Pascal HAGENMULLER**

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

## Snow mechanics: from snow microstructure to avalanche formation

Soutenu publiquement le **6 Septembre 2022**, devant le jury composé de :

**Prof. Dr. Ilka WEIKUSAT**

Professeur, Alfred Wegener Institute - Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Allemagne, Rapporteur

**Prof. Dr. Christophe MARTIN**

Directeur de recherche CNRS, Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, SIMaP, Grenoble, France, Rapporteur

**Prof. Dr. Jürg SCHWEIZER**

Professeur, WSL - Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos, Suisse, Rapporteur

**Prof. Dr. Ian BAKER**

Professeur, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, NH, USA, Examineur

**Prof. Dr. Christian GEINDREAU**

Professeur, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, Grenoble, France, Examineur

**Dr. Guillaume CHAMBON**

Directeur de recherche, Univ. Grenoble Alpes, Inrae, UR ETNA, Grenoble, France, Invité



---

## Abstract

Snow is a fascinating material. Its composition is relatively simple, mainly air and ice, but the arrangement of these components in three dimensions is extremely diverse. This diversity of microstructure, often reduced to discrete snow types, originates from different snowflake growth mechanisms in the atmosphere and the continuous evolution of snow on the ground. Indeed, snow is a hot material with a temperature close to its melting point. This thermal state, combined with high porosity, promotes fast structural changes under gravitational compaction, local phase changes, and mass transport through vapor diffusion or liquid water percolation. The geometrical arrangement of ice and air is not only a source of fascination but also fully controls the effective material properties of snow, such as its mechanical strength, thermal conductivity, and electromagnetic reflectance. However, this control remains poorly understood because of yet-incomplete microstructural characterization and natural snow variability. The snowpack structure is even more complex: stratified into numerous layers with contrasted microstructural patterns. The snowpack behavior under given boundary conditions will depend on the complex interactions between its different layers, e.g., avalanche formation is related to the combination of a weak layer and a slab with specific mechanical properties. Better understanding and characterizing snow as material and the snowpack as an essential medium between atmosphere and ground would benefit various applications such as avalanche forecasting or estimating our planet's surface energy and mass budget.

This document synthesizes my contribution to snow science and, in particular, to snow mechanics at different scales. This uneasy paragraph reduces eight years of research to a few lines. Understanding snow mechanics is intimately related to a detailed characterization of the snow microstructure, which is now possible at a micron resolution and in three dimensions thanks to tomography. I contributed to setting an X-ray tomograph in a cold room and developing dedicated image processing tools. Computational models can exploit the wealth of tomographic data and reproduce snow properties based on the idea that snow is just a porous ice structure. Amongst others, I worked on implementing this approach into discrete and finite element models, which led to a better understanding and quantification of snow brittle failure. The combination of tomography and computational models seems key to deciphering the link between snow microstructure and its effective properties. However, this strategy is not suited to characterize, in practice, the entire snowpack. To bridge the gap between microstructure and field tests, I worked on understanding the cone penetration test in snow and its interpretation into microstructure proxies. Given the spatial variability of the snow cover, characterizing the snowpack profiles in detail may sound like looking for a needle in a haystack. However, I developed a matching algorithm between snow profiles that can effectively track tiny snow layers across mountain slopes. Besides, this snow stratigraphy controls whether an avalanche is likely to release on a slope. Fundamental knowledge in avalanche formation and this control increased considerably over the past decades, but its implementation into tools for avalanche forecasting lacks behind. I contributed to modeling snow conditions in the French Alps and assessing the snowpack stability and associated avalanche danger based on snow physics and machine learning.

Future work will focus on finalizing ongoing projects and exploring new but related scientific questions in snow science. Some of the work is already ongoing, and some might remain utopic. In my work and in general, tomography characterizes snow in lab experiments. One of my objectives is to bring tomography to the field and monitor seasonal snowpack evolution at a resolution never reached before, which would constitute the basis for developing a new generation of snowpack models. In parallel, I plan to use the developed computational models

and the extensive collected tomographic data to build a library of effective properties of snow as a function of snow microstructure. The goal is to go beyond a qualitative understanding of snow physics and mechanics and provide quantitative relations to be used by the community in large-scale models. My focus on snow mechanics was on the brittle deformation regime, which is limited to high strain rates and does not apply to many applications such as snow settlement. I aim to explore snow mechanics at low strain rates where other mechanisms, such as sintering, ice visco-plasticity, and concomitant metamorphism, play a role. This project will require new dedicated computational models and the tomographic measurement of time series of snow evolution under controlled temperature and stress conditions. Last, mountains and, in particular, their cryospheric components are strongly affected by climate change. I will use the developed modeling tools to evaluate the evolution of avalanche hazards with global warming and provide some guidelines for risk mitigation in mountain territories.

---

## Résumé

La neige est un matériau fascinant. Sa composition est assez simple, principalement de l'air et de la glace, mais l'agencement de ces composants en trois dimensions est extrêmement varié. Cette diversité de microstructure, souvent réduite à des types de neige discrets, provient des différents mécanismes de croissance des flocons dans l'atmosphère et de l'évolution continue de la neige au sol. En effet, la neige est un matériau chaud avec une température proche de son point de fusion. Cet état thermique, combiné à une porosité élevée, favorise des changements structuraux rapides sous l'effet de la compaction sous gravité, des changements de phase localisés et du transport de masse par diffusion de vapeur ou percolation d'eau liquide. L'arrangement géométrique de la glace et de l'air n'est pas seulement source de fascination mais il contrôle aussi les propriétés matérielles effectives de la neige, telles que sa résistance mécanique, sa conductivité thermique ou encore sa réflectance électromagnétique. Cependant, ce contrôle reste mal compris en raison d'une caractérisation microstructurale encore incomplète et de la variabilité naturelle de la neige. La structure du manteau neigeux est encore plus complexe : stratifiée en de nombreuses couches aux motifs microstructuraux distincts. Le comportement du manteau neigeux dépend des interactions complexes entre ses différentes couches. Par exemple, la formation d'une avalanche est liée à la combinaison d'une couche fragile et d'une plaque aux propriétés mécaniques spécifiques. Une meilleure compréhension et caractérisation de la neige en tant que matériau et du manteau neigeux en tant qu'interface entre l'atmosphère et le sol est critique pour de nombreuses applications telles que la prévision des avalanches ou l'estimation du bilan d'énergie et de masse de la surface de notre planète.

Ce document synthétise ma contribution à l'étude de la neige et, en particulier, à la mécanique de la neige à différentes échelles. Ce paragraphe réduit huit années de recherche à quelques lignes. La compréhension de la mécanique de la neige est intimement liée à une caractérisation détaillée de sa microstructure. Cette caractérisation est aujourd'hui possible à une résolution micrométrique et en trois dimensions grâce à la tomographie. J'ai contribué à l'installation d'un tomographe à rayons X dans une chambre froide et au développement d'outils de traitement d'images dédiés. Des modèles de calcul peuvent exploiter la richesse des données tomographiques et reproduire les propriétés de la neige en partant de l'idée que la neige n'est qu'une structure de glace poreuse. J'ai notamment travaillé à la mise en œuvre de cette approche dans des modèles par éléments finis et discrets, ce qui a permis de mieux comprendre et quantifier la rupture fragile de la neige. La combinaison de la tomographie et des modèles de calcul semble essentielle pour déchiffrer le lien entre la microstructure de la neige et ses propriétés effectives. Cependant, cette stratégie n'est pas adaptée pour caractériser, en pratique, l'ensemble du manteau neigeux. Pour combler le fossé entre la microstructure et les tests de terrain, j'ai travaillé sur la compréhension du test de pénétration du cône dans la neige et son interprétation en indicateurs de la microstructure. Étant donné la variabilité spatiale de la couverture neigeuse, la caractérisation détaillée des profils du manteau neigeux peut sembler vaine. Cependant, j'ai développé un algorithme de correspondance entre les profils de neige qui permet de suivre efficacement des minuscules couches de neige au travers d'un pan de montagne. En outre, la stratigraphie du manteau neigeux détermine si une avalanche est susceptible de se déclencher sur une pente. Les connaissances fondamentales sur la formation des avalanches et ce contrôle ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies, mais leur mise en œuvre dans des outils de prévision des avalanches reste en retrait. J'ai contribué à la modélisation des conditions nivologiques dans les Alpes françaises et à l'évaluation de la stabilité du manteau neigeux et du danger d'avalanche associé, en me basant sur la physique de la neige et l'apprentissage automatique

Mes travaux futurs se concentreront sur la finalisation des projets en cours et sur l'exploration de questions scientifiques nouvelles mais connexes dans le domaine de la neige. Certains de ces travaux sont déjà en cours, d'autres pourraient rester utopiques. Dans mon travail et en général, la tomographie caractérise la neige dans des expériences de laboratoire. L'un de mes objectifs est d'amener la tomographie sur le terrain et de suivre l'évolution saisonnière du manteau neigeux à une résolution jamais atteinte auparavant, ce qui constituerait la base du développement d'une nouvelle génération de modèles de manteau neigeux. En parallèle, je prévois d'utiliser les modèles de calcul développés et les nombreuses données tomographiques recueillies pour constituer une bibliothèque des propriétés effectives de la neige en fonction de sa microstructure. L'objectif est d'aller au-delà d'une compréhension qualitative de la physique et de la mécanique de la neige et de fournir des relations quantitatives qui seront utilisées par la communauté dans des modèles à grande échelle. Mon intérêt pour la mécanique de la neige s'est concentré sur le régime de déformation fragile, qui est limité aux taux de déformation élevés et ne s'applique pas à de nombreuses applications telles que le tassement de la neige. Je souhaite explorer la mécanique de la neige à de faibles taux de déformation où d'autres mécanismes, tels que le frittage, la visco-plasticité de la glace et le métamorphisme, jouent un rôle. Ce projet nécessitera de nouveaux modèles de calcul spécialisés et la mesure tomographique de séries temporelles de l'évolution de la neige dans des conditions de température et de contrainte contrôlées. Enfin, les montagnes et, en particulier, leurs composantes cryosphériques sont fortement affectés par le changement climatique. J'utiliserai les outils de modélisation développés pour évaluer l'évolution des risques d'avalanche en fonction du réchauffement climatique et fournir des lignes directrices pour l'atténuation des risques dans les territoires de montagne.

# Contents

Abstract . . . . .	i
Résumé . . . . .	iii
<b>1 Introduction</b>	<b>3</b>
1.1 Context of my research . . . . .	3
1.1.1 Professional context . . . . .	3
1.1.2 Role as research supervisor . . . . .	5
1.2 Short introduction to snow mechanics . . . . .	9
1.2.1 Definition of snow mechanics . . . . .	9
1.2.2 Importance of snow mechanics . . . . .	10
1.2.3 Snow microstructure diversity . . . . .	11
1.2.4 Deformation regimes . . . . .	13
1.2.5 Scientific challenges . . . . .	15
<b>2 Snow microstructure, a key to understanding snow mechanics and physics</b>	<b>17</b>
2.1 Snow tomography . . . . .	18
2.1.1 Tomography of frozen materials . . . . .	18
2.1.2 Image processing . . . . .	19
2.1.3 Database . . . . .	22
2.2 Snow mechanical properties . . . . .	22
2.2.1 Homogenization of elastic properties . . . . .	22
2.2.2 Finite element modeling of brittle properties . . . . .	26
2.2.3 Modelling snow as a granular material . . . . .	28
2.2.4 Weak layer collapse under mixed-mode loading . . . . .	28
2.3 Snow microstructure evolution . . . . .	29
2.3.1 Heat and vapor transport in snow . . . . .	31
2.3.2 Snow settlement . . . . .	32
2.4 Ongoing and future work . . . . .	33
2.4.1 In-situ tomography . . . . .	33
2.4.2 Brittle to ductile . . . . .	36
2.4.3 Coupling between mechanics and thermodynamics . . . . .	39
<b>3 Snowpack stratigraphy</b>	<b>41</b>
3.1 Cone penetration test in snow . . . . .	43
3.1.1 Ramsonde, Avatech Snow Probe 2, and Snow Micro-Penetrrometer . . . . .	43
3.1.2 Measurement of the 3D displacement around the cone . . . . .	44
3.1.3 Statistical model of the cone penetration process . . . . .	46
3.2 Heated needle probe . . . . .	49
3.3 Matching of snow profiles . . . . .	52
3.3.1 Main principles . . . . .	52
3.3.2 Application to measured penetration profiles . . . . .	54
3.3.3 Application to snowpack simulations . . . . .	54
3.4 Ongoing and future work . . . . .	58
3.4.1 Numerical cone penetration tests . . . . .	58

---

3.4.2	Matching in support of snowpack modeling . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Avalanche formation</b>	<b>61</b>
4.1	Snow stability modeling . . . . .	61
4.1.1	S2M: a tool to assess avalanche conditions . . . . .	61
4.1.2	Review of stability models . . . . .	64
4.2	Machine learning of avalanche activity . . . . .	66
4.2.1	Prediction of natural avalanche activity . . . . .	67
4.2.2	Assessment of avalanche danger . . . . .	69
4.3	Ongoing and future work . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Conclusion and perspectives</b>	<b>73</b>
5.1	Snow tomography . . . . .	73
5.2	Computational microscale modelling . . . . .	74
5.3	Detailed snow stratigraphy . . . . .	74
5.4	Larger spatial and temporal scales: avalanche and climate change . . . . .	74
	<b>Bibliography</b>	<b>77</b>
	<b>List of acronyms</b>	<b>103</b>