

Titre : Les métamorphoses de la neige : expérimentation et simulation micro-échelle pour une meilleure compréhension des mécanismes impliqués

Laboratoire de rattachement : CEN/CNRM-GAME, Grenoble

Encadrant : Frédéric Flin (CR MEDDE), 04 76 63 79 17, frederic.flin@meteo.fr

Co-Encadrant : Christian Geindreau (Prof. 3SR), 04 76 82 70 77, christian.geindreau@3sr-grenoble.fr

Mots clés : neige, métamorphoses, images 3D, microstructure, modélisation, expérimentation

Contexte et objectifs de la mission de stage (max 2000 caractères) :

Une fois déposée au sol, la neige forme un milieu poreux complexe, principalement constitué d'air et de glace, dont la microstructure ne cesse de se transformer au cours du temps. Ces évolutions microstructurales de la neige impactent fortement l'évolution temporelle de ses propriétés macroscopiques (e.g. Calonne et al, 2014) et doivent donc être prises en compte pour une bonne modélisation du manteau neigeux.

Dans le but de mieux comprendre les métamorphoses de la neige, des modèles numériques permettant de simuler, à partir d'images tomographiques, des métamorphoses en trois dimensions ont été développés (Flin et al, 2003 ; Kämpfer and Plapp, 2009 ; Barret et al, 2012) mais ne décrivent qu'imparfaitement les observations expérimentales, étant donné la complexité des mécanismes à prendre en compte (couplages thermo-mécaniques, facetage dépendant de l'orientation cristalline de chacun des grains de glace constituant la neige...).

Récemment, de nouveaux modèles numériques ainsi que des techniques expérimentales adaptées au suivi des métamorphoses (Calonne et al, 2015) ont été mis au point dans le cadre du projet DigitalSnow, projet ANR piloté par le LIRIS (D. Coeurjolly), et faisant intervenir plusieurs laboratoires rhône-alpins (CEN, ICJ, LAMA, LIRIS, LJK et 3SR). Le sujet de stage s'appuiera sur les derniers développements en cours afin de valider les modèles mis au point et d'améliorer la compréhension des mécanismes physiques impliqués dans les métamorphoses de neige.

Le travail consistera tout d'abord à prendre en main les codes de métamorphose, puis à les valider quantitativement à micro-échelle à l'aide de séries d'images obtenues par tomographie par rayons X. Les résultats permettront d'en déduire les mécanismes impliqués dans les métamorphoses de neige en fonction des conditions imposées (température, gradient de température).

Le stage requiert de bonnes bases en physique, des compétences en programmation (C/C++, python), un goût prononcé pour le traitement informatique des données ainsi qu'un vif intérêt pour l'expérimentation.

Bibliographie :

- Barret, J. W., H. Garcke and R. Nürnberg, 2012. Numerical computations of faceted pattern formation in snow crystal growth, *Phys. Rev. E*, 86, 011604, doi: [10.1103/PhysRevE.86.011604](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.86.011604).
- Calonne, N., F. Flin, C. Geindreau, B. Lesaffre and S. Rolland du Roscoat, 2014. Study of a temperature gradient metamorphism of snow from 3-D images: time evolution of microstructures, physical properties and their associated anisotropy, *The Cryosphere*, 8, 2255-2274, doi: [10.5194/tc-8-2255-2014](https://doi.org/10.5194/tc-8-2255-2014).
- Calonne, N., F. Flin, B. Lesaffre, A. Dufour, J. Roulle, P. Puglièse, A. Philip, F. Lahoucine, C. Geindreau, J.-M. Panel, S. Rolland du Roscoat, and P. Charrier (2015), CellDyM: A room temperature operating cryogenic cell for the dynamic monitoring of snow metamorphism by time-lapse X-ray microtomography, *Geophysical Research Letters*, 42 (10), 3911-3918, doi:[10.1002/2015GL063541](https://doi.org/10.1002/2015GL063541).
- Flin, F., J.-B. Brzoska, B. Lesaffre, C. Coléou and R. A. Pieritz, 2003. Full three-dimensional modelling of curvature-dependent snow metamorphism : first results and comparison with experimental tomographic data, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 36, A49-A54, doi: [10.1088/0022-3727/36/10A/310](https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/10A/310).
- Kämpfer, T. U. and Plapp, M., 2009. Phase-field modeling of dry snow metamorphism, *Phys. Rev. E*, 79(3), 031502, doi: [10.1103/PhysRevE.79.031502](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.031502).

Intérêt scientifique : Ce stage a pour but une meilleure modélisation des métamorphoses de neige à petite échelle afin de guider l'amélioration des modèles de manteau neigeux.

→ *Poursuite en thèse possible sur un sujet connexe*