

Proposition de Sujet de thèse 2016

Laboratoire (et n° de l'unité) dans lequel se déroulera la thèse :
CNRM-GAME UMR 3589 / Centre d'Études de la Neige (CEN), Grenoble
1441 rue de la piscine, 38400 Saint Martin d'Hères

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

Nom et statut (PR, DR, MCf, CR, \bar{o}) du (des) responsable(s) de thèse (préciser si HDR) :
[Frédéric Flin](#), CR1 du MEDDE, CEN/CNRM-GAME UMR 3589
[Christian Geindreau](#), Professeur (HDR), Laboratoire 3SR UMR 5521

Coordonnées (téléphone et e-mail) du (des) responsable(s) de thèse :
04 76 63 79 17, frederic.flin@meteo.fr
04 76 82 70 77, christian.geindreau@3sr-grenoble.fr

Résumé du sujet de la thèse

Contexte de l'étude : Ce sujet s'inscrit dans le cadre des études menées sur le manteau neigeux et la prévision du risque d'avalanche telles que mentionnées dans le document «Stratégie Scientifique de Météo-France 2013-2020» (p. 29). Plus particulièrement, il concerne l'étude de la microstructure de la neige et vise à développer les connaissances et la modélisation du matériau neige (évolution de la morphologie, phénomènes thermodynamiques, propriétés) à petite échelle afin de guider l'amélioration des modèles de manteau neigeux.

Les propriétés de la neige et leur évolution au cours de ses métamorphoses sont principalement gouvernées par la géométrie des interfaces air-glace en présence. Cette géométrie est intrinsèquement tridimensionnelle (3D), de même que les paramètres de surface (courbures et surface spécifique) ou de volume (connectivité et propriétés de percolation) aptes à les décrire. Pour cette raison, le CEN a, depuis une quinzaine d'années, recours à la microtomographie par rayons X, technique permettant d'obtenir des images tridimensionnelles de structures de neige de l'ordre du cm^3 .

La mise au point d'algorithmes d'analyse d'image adaptés (courbures, normales et surfaces (Flin et al, 2005)) a permis de développer les connaissances sur la microphysique de la neige, notamment par le biais de modèles numériques simples, permettant de modéliser en 3D certaines évolutions de la microstructure de la neige au cours du temps (Flin et al, 2003). D'autre part, l'application de méthodes d'homogénéisation (Auriault et al, 2009) à la neige (Calonne et al, 2014a) a montré comment la connaissance des lois physiques et des microstructures 3D permettait d'obtenir des informations importantes (Calonne et al, 2011 ; 2012 ; 2014b), pour la modélisation du manteau neigeux à macro-échelle.

Une amélioration des connaissances actuelles passe maintenant par une extension des modèles de métamorphose à des cas plus complexes (métamorphoses de gradient de température, par exemple), et leur validation expérimentale quantitative afin d'en déduire les mécanismes physiques réellement impliqués à micro-échelle.

Objectifs : Des modèles numériques de métamorphoses ainsi que de nouvelles techniques expérimentales de suivi des métamorphoses (Calonne et al, 2015) sont en cours de développement 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 thèse s'appuiera sur les derniers développements en cours afin de valider les modèles développés et d'améliorer la compréhension des mécanismes physiques impliqués dans les métamorphoses de neige.

Méthodologie : Le travail consistera tout d'abord à prendre en main les codes de métamorphose, puis à les valider quantitativement à micro-échelle. Pour cela, on s'appuiera sur la tomographie par rayons X, technique pour laquelle le Laboratoire 3SR et le CEN collaborent depuis plusieurs années. Ces observations pourront éventuellement être associées à de la Diffraction Contrast Tomography (Ludwig et al, 2009 ; Rolland du Roscoat et al, 2011) à l'ESRF afin d'initialiser les modèles en termes d'orientations cristallines. Les résultats obtenus à l'échelle de quelques cm^3 permettront d'en déduire les mécanismes impliqués dans les métamorphoses de la neige en fonction des conditions imposées (température, gradient de température), puis d'extrapoler, par simulation, l'évolution morphologique de la microstructure au cours du temps pour un large panel de conditions expérimentales.

Cette évolution pourra être décrite en termes de propriétés géométriques (porosité, surface spécifique, distribution de courbures) ou physiques (conductivité, perméabilité) de manière à fournir, par homogénéisation, des informations directement utilisables pour la modélisation macroscopique du manteau neigeux.

Nature du travail attendu et compétences souhaitées

Des compétences théoriques, numériques et expérimentales seront mises en œuvre dans cette thèse ; elles s'appuient principalement sur des savoir-faire et des équipements du CEN ou de ses partenaires habituels (3SR, LAMA et LIRIS principalement) :

- Imagerie par rayons X (tomographe du laboratoire 3SR) et DCT (ESRF).
- Mathématiques appliquées et modélisation numérique (ICJ, LAMA, LJK).
- Modélisation à l'échelle microscopique des métamorphoses de neige (Flin et al, 2003).
- Analyse quantitative des microstructures : algorithmes développés (Flin et al, 2005 ; Rolland du Roscoat et al, 2007) et logiciels dédiés.
- Simulation numérique des propriétés effectives 3D (Calonne et al, 2011 ; 2012 ; 2014b).
- Expérimentation sur la neige (CEN) : mesures macroscopiques, cellules cryogéniques adaptées à la tomographie de la neige (Calonne et al, 2014b; 2015), chambres froides et sites de mesures.
- Modélisation numérique du manteau neigeux à macro-échelle (CEN).

Références bibliographiques

- Auriault, J.-L.; Boutin, C.; Geindreau, C. Homogenization of coupled phenomena in heterogenous media ; Wiley-ISTE, London, 2009.
- Calonne, N., F. Flin, S. Morin, B. Lesaffre, S. Rolland du Roscoat, C. Geindreau. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23501, doi: 10.1029/2011GL049234, 2011.
- Calonne, N., C. Geindreau, F. Flin, S. Morin, B. Lesaffre, S. Rolland du Roscoat, P. Charrier. 3-D image-based numerical computations of snow permeability : links to specific surface area, density, and microstructural anisotropy, *The Cryosphere*, 6, 939-951, doi: 10.5194/tc-6-939-2012, 2012.
- Calonne, N., F. Flin, B. Lesaffre, A. Dufour, J. Roule, P. Puglièse, A. Philip, F. Lahoucine, C. Geindreau, J.-M. Panel, S. Rolland du Roscoat, and P. Charrier, 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, 2015.
- Calonne, N., C. Geindreau, F. Flin. Macroscopic modeling for heat and water vapor transfer in dry snow by homogenization, *J. Chem. Phys.*, 118 (47), 13393. 13403, doi: 10.1021/jp5052535, 2014a.
- Calonne, N., F. Flin, C. Geindreau, B. Lesaffre and S. Rolland du Roscoat. 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, 2014b.
- Flin, F., J.-B. Brzoska, B. Lesaffre, C. Coléou and R. A. Pieritz, 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, 2003.
- Flin, F., J.-B. Brzoska, D. Coeurjolly, R. A. Pieritz, B. Lesaffre, C. Coléou, P. Lamboley, O. Teytaud, G. L. Vignoles and J.-F. Delesse. Adaptive estimation of normals and surface area for discrete 3-D objects: application to snow binary data from X-ray tomography, *IEEE Trans. Image Process.*, 14(5), 585-596, doi: 10.1109/TIP.2005.846021, 2005.
- Ludwig, W., P. Reischig, A. King, M. Herbig, E. M. Lauridsen, G. Johnson, T. J. Marrow, J. Y. Buffière. Three-dimensional grain mapping by X-ray diffraction contrast tomography and the use of Friedel pairs in diffraction data analysis, *Review of Scientific Instruments*, 80, 033905, 2009.
- Rolland du Roscoat S, Decain M., Thibault X, Geindreau C, Bloch J.-F. Estimation of microstructural properties from synchrotron X-ray microtomography and determination of the REV in paper materials, *Acta Mater.*, 55, 2841-2850, 2007.
- Rolland du Roscoat, S., A. King, A. Philip, P. Reischig, W. Ludwig, F. Flin and J. Meyssonier. Analysis of snow microstructure by means of X-ray Diffraction Contrast Tomography, *Adv. Eng. Mater.*, 13(3), 128-135, doi: 10.1002/adem.201000221, 2011.