

Proposition de stage de Master 2 — printemps 2027

Cartographie 3D des orientations cristallines de polycristaux poreux par tomographie de contraste de diffraction en laboratoire (LabDCT) — application à la neige

Centre d'études de la Neige, CNRM, Météo-France - CNRS, Grenoble
Simap, Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Grenoble

Mots-clés : polycristaux poreux · neige · glace · diffraction des rayons X · tomographie · plasticité cristalline · Python

Contexte scientifique

Les polycristaux poreux comme les poudres métalliques frittées, les mousses, le combustible nucléaire, ou la neige, ont un comportement mécanique contrôlé par l'interaction entre leur structure géométrique (réseau solide et pores) et leur structure cristalline (orientation du réseau dans chaque cristal). La microtomographie à rayons X permet d'imager la première de manière non destructive, mais elle est aveugle à la seconde : orientations cristallines et joints de grains au sein de la matrice solide lui échappent.

Or cette information cristalline est déterminante. Des simulations récentes de plasticité cristalline en champ complet sur polycristaux poreux montrent que la réponse viscoplastique effective dépend fortement de la répartition des orientations et de l'hétérogénéité des contraintes dans la matrice solide (Védrine et Hagenmuller, 2026). La neige en est un cas d'école : polycristal de glace très poreux et proche de son point de fusion, elle se déforme presque exclusivement par glissement basal, avec une anisotropie viscoplastique marquée de chaque cristal. Ces simulations doivent aujourd'hui *postuler* les orientations cristallines, faute de pouvoir les mesurer en 3D sur les microstructures tomographiées. Le même verrou limite l'étude du métamorphisme de la neige (croissance cristalline par sublimation–diffusion–condensation, dépendante des faces cristallines exposées).

La tomographie de contraste de diffraction (DCT) lève ce verrou : elle fournit une cartographie 3D des grains et de leurs orientations cristallines, sans détruire l'échantillon. Longtemps réservée au synchrotron (accès limité, créneaux courts), elle a récemment été implémentée sur un tomographe de laboratoire conventionnel au laboratoire SIMaP (Grenoble), avec une chaîne de reconstruction open source validée contre une mesure synchrotron (Fang et al., 2023). Le Centre d'Études de la Neige (CEN) dispose quant à lui d'un tomographe opérable en chambre

froide. La combinaison des deux permettrait de faire de la DCT sur des polycristaux poreux à moindre coût, sans contrainte de temps de faisceau — et notamment sur la neige, à terme en suivi temporel (time-lapse).

Objectif du stage

Adapter et généraliser la chaîne LabDCT développée au SIMaP (code de reconstruction *GrainRecon*, MATLAB/GPU) et en faire la démonstration expérimentale, du polycristal métallique modèle jusqu'à la neige. La démarche est progressive, avec des jalons permettant de valider chaque étape :

1. **Prise en main sur données existantes.** Portage du code MATLAB vers Python (assisté par IA), compréhension de l'algorithme (indexation par complétude, croissance de régions), et test de non-régression sur un jeu de données déjà acquis et reconstruit (échantillon AlCu de référence).
2. **Création de nos propres données — validation instrumentale.** Acquisition et reconstruction d'un échantillon d'aluminium simple (quelques grains) sur le tomographe du SIMaP, puis reproduction de la mesure sur le tomographe du CEN (géométrie, sténopé, beamstop, calibration).
3. **Transposition à la glace.** Mesure d'un monocristal de glace en conditions froides : adaptation à la structure hexagonale de la glace Ih, choix de la tension de source et des familles de plans $\{hkl\}$, gestion des contraintes thermiques (sublimation, tenue de l'échantillon).
4. **Démonstration sur la neige.** Reconstruction d'un échantillon de neige à gros grains (faible nombre de cristaux), confrontation à la microstructure géométrique issue de la tomographie d'absorption.

Selon l'avancement, une réflexion sera menée sur la généricité et l'efficacité numérique du code Python en vue de sa réutilisation sur d'autres polycristaux poreux et d'autres projets instrumentaux du laboratoire.

Profil recherché

Étudiant·e en M2 (ou dernière année d'école d'ingénieur) en physique, science des matériaux, mécanique ou instrumentation. Goût pour le travail à l'interface entre expérimentation (tomographie, manipulations en chambre froide) et développement numérique (Python indispensable ; MATLAB et GPU appréciés). Des notions de cristallographie et de diffraction des rayons X sont un plus, mais pourront être acquises pendant le stage.

Encadrement et conditions pratiques

- **Encadrement** : Pascal Hagenmuller (CEN, CNRM, Météo-France/CNRS, Grenoble), et Pierre Lhuissier (SIMaP, Univ. Grenoble Alpes/CNRS), avec l'appui de Pierre Piault (ingénieur de recherche SIMaP/3SR) et de B. Laurent (technicien instrumentation CEN).
- **Lieu** : Grenoble — Centre d'Études de la Neige, avec des séquences expérimentales au Simap et en chambre froide au CEN.
- **Durée** : 5 à 6 mois, début au printemps 2027 (dates ajustables selon le calendrier du master). Gratification réglementaire de stage.
- **Contact** : pascal.hagenmuller@meteo.fr ; candidature avec CV, relevés de notes et quelques lignes de motivation.

Références

- Fang H., Ludwig W., Lhuissier P. (2022). Reconstruction algorithms for grain mapping by laboratory X-ray diffraction contrast tomography. **Journal of Applied Crystallography**, 55, 1652–1663. doi:10.1107/S1600576722010214
- Fang H., Ludwig W., Lhuissier P. (2023). Implementation of grain mapping by diffraction contrast tomography on a conventional laboratory tomography setup with various detectors. **Journal of Applied Crystallography**, 56, 810–824. doi:10.1107/S1600576723003874 — Code : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/TomoX_SIMaP/GrainRecon
- Védérine L., Hagenmuller P. (2026). A constitutive model of porous polycrystals viscoplasticity. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 215, 106696. doi:10.1016/j.jmps.2026.106696