

**Sujet de thèse :**  
**Étude théorique, expérimentale et numérique des transferts d'eau et d'énergie dans les couches organiques superficielles des pergélisols**



**Laboratoires :**

Géosciences Environnement Toulouse (GET)  
Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT)

**Encadrants :**

Laurent Orgogozo (GET, [laurent.orgogozo@get.omp.eu](mailto:laurent.orgogozo@get.omp.eu))  
Michel Quintard (IMFT)

**Autres collaborations :**

Yohan Davit (IMFT)  
Manuel Marcoux (IMFT)  
Oleg Pokrovsky (GET)  
Christophe Grenier (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE)

Les pergélisols couvrent près du quart des terres émergées de l'hémisphère nord, et ils modifient profondément les dynamiques hydro-bio-géochimiques des régions où ils sont présents. De plus, ils sont situés dans les régions les plus sensibles aux changements climatiques, les régions boréales. Les régimes hydrologiques des surfaces continentales occupées par ces pergélisols sont donc susceptibles d'être affectés par des changements rapides, avec des conséquences potentiellement importantes pour les cycles naturels (eau, carbone, ...) comme pour les activités humaines (adduction en eau, stabilité des infrastructures, ...). Le développement d'outils de modélisation adéquats est donc plus que jamais nécessaire pour anticiper ces changements. Une des difficultés majeures associées est la quantification des transferts dans les couches superficielles organiques qui couvrent la surface de vastes étendues dans les régions boréales (e.g. : tourbe dans les plaines de Russie Européenne Arctique ou de Sibérie Occidentale, couche de mousse et de lichens dans la Taïga de Sibérie Centrale). Ces couvertures jouent un rôle d'isolants thermiques et de drains hydrologiques déterminant pour la dynamique des couches actives des pergélisols, et donc pour toute la dynamique biogéochimique des écosystèmes de ces régions, et aussi pour les réponses de

ces écosystèmes aux perturbations anthropiques. Du fait des structures complexes et hautement poreuses de ces milieux, la quantification de leurs propriétés thermiques et hydriques pour toutes la gamme des conditions de teneur en eau (milieux variablement saturés) et de température (gel/dégel de l'eau porale) rencontrée sur les surfaces continentales boréales est un défi à la fois sur le plan théorique et sur le plan expérimental.

Cette proposition de thèse s'attache ainsi à quantifier les transferts d'eau et d'énergie dans les couches organiques superficielles des régions boréales via une approche théorique par changement d'échelle et une approche expérimentale en conditions cryogéniques contrôlées sur échantillons naturels prélevés dans divers sites de suivi à long terme de la dynamique thermo-hydrologique des pergélisols (notamment Khanimey en Sibérie Occidentale et Kulingdakan en Sibérie Centrale). La caractérisation par tomographie 3D des échantillons permettra, d'une part, d'obtenir les informations géométriques pertinentes sur les milieux étudiés pour l'exploitation numérique des résultats de l'étude théorique par changement d'échelle et, d'autre part, d'aider à l'interprétation de mesures directes de propriétés thermo-hydriques des échantillons. Les résultats de cette étude théorique et expérimentale des propriétés thermo-hydriques des couches organiques superficielles des milieux boréaux seront ensuite utilisés comme paramétrisation pour des modélisations mécanistes des transferts sur les sites d'étude à l'aide de permaFoam, un outil de modélisation en calcul à hautes performances des transferts d'eau et d'énergie dans les milieux poreux variablement saturés avec gel/dégel de l'eau porale développé à Toulouse (Orgogozo *et al.*, 2016, 2017, in prep). Les phénomènes de transferts considérés sont fortement non linéaires et couplés, leur résolution numérique est donc particulièrement difficile et nécessite le recours au calcul intensif (mésocentre CALMIP). Ce travail de modélisation s'appuiera notamment sur la base de données de terrain très complète acquises dans le cadre du Programme GDRI CAR-WET-SIB depuis 2010.

Les deux objectifs principaux de cette thèse consisteront donc à :

- i. quantifier théoriquement et expérimentalement les propriétés de transferts thermiques et hydriques à l'échelle de Darcy des couches organiques superficielles des régions boréales à différentes teneur en eau et à différentes températures, en se basant sur les processus de transferts à l'échelle du pore ;
- ii. quantifier sur cette base les transferts thermiques et hydriques lors des cycles saisonniers de gel/dégel de la couche active de sol surmontant les pergélisols des divers sites d'étude à l'aide de modélisation à l'échelle de Darcy réalisées avec permaFoam.

Le doctorant devra donc prendre en main et appliquer la méthode de prise de moyenne volumique, effectuer un travail expérimental d'observation d'échantillon par tomographie en conditions cryogéniques contrôlées, puis intégrer les résultats obtenus dans des simulations de transferts dans l'environnement de mécanique des fluides numérique OpenFOAM<sup>®</sup>, dans lequel est développé permaFoam. L'analyse comparative des résultats de modélisation avec permaFoam et des observations de terrains disponibles au sein du GDRI CAR WET SIB sera enfin exploitée en vue d'approfondir la compréhension des processus qui gouvernent les flux d'eau et d'énergie en milieux boréaux.

Le doctorant devra avoir une solide formation en mathématiques appliquées à la physique et en méthodes de résolution numérique des équations aux dérivés partielles. Des connaissances en transferts en milieux poreux et/ou en programmation seraient également les bienvenues, de même qu'un intérêt prononcé pour les travaux expérimentaux.

Pour candidater, envoyer à l'adresse électronique ci-dessus un curriculum vitae et une lettre de motivation, accompagnés du relevé des notes obtenues lors de l'année scolaire 2016-2017.