

Modélisation numérique des pergélisols : transferts couplés thermiques et hydriques en milieu poreux variablement saturé avec gel/dégel.

Laurent ORGOGOZO^{1*}, Christophe GRENIER², Michel QUINTARD³, Oleg S. POKROVSKY¹, Yves GODDÉRIS¹, Jérôme VIERS¹, David LABAT¹, Stéphane AUDRY¹, Anatoly S. PROKUSHKIN⁴

¹Géosciences Environnement Toulouse

14, avenue Edouard Belin – 31400 Toulouse, France

²Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

Ormes-des-Merisiers – 91191 Gif sur Yvette

³Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

2, allée du professeur Camille Soula – 31400 Toulouse, France

⁴V.N. Sukachev Institute of Forest

SB RAS – Krasnoyarsk, Fédération de Russie

* (auteur correspondant : laurent.orgogozo@get.obs-mip.fr)

Résumé - PermaFoam est un solveur OpenFOAM[®] dédié au problème de transferts couplés hydriques et thermiques dans un sol avec gel/dégel de la phase aqueuse. Il a été développé pour l'étude de la dynamique thermo-hydrrique des pergélisols dans un contexte de changement climatique, l'objectif étant de contribuer à la quantification des flux élémentaires des surfaces continentales boréales vers les océans. L'utilisation d'OpenFOAM[®] permet de bénéficier d'excellentes performances parallèles, ce qui est indispensable pour traiter les échelles d'intérêts (e.g. : bassin versant expérimental, > 1 km²).

Nomenclature

C_H champ de capacité capillaire, m^{-1}
 $C_{T,eq}$ champ de capacité calorifique apparente du milieu poreux, $kg.m^{-1}.s^{-2}.K^{-1}$
 $C_{T,liquid}$ capacité calorifique de l'eau liquide, $kg.m^{-1}.s^{-2}.K^{-1}$
 h champ de pression de l'eau, m
 $K_{freezing}$ champ de conductivité hydraulique relative associée au gel de l'eau porale
 K_H champ de conductivité hydraulique apparente du milieu poreux, $m.s^{-1}$
 K_{rel} champ de conductivité hydraulique relative associée à la saturation en eau du milieu poreux
 K_s champ de conductivité hydraulique du milieu poreux saturé en eau liquide, $m.s^{-1}$
 $K_{T,eq}$ champ de conductivité thermique apparente du milieu poreux, $kg.m.s^{-3}.K^{-1}$

L chaleur latente de fusion de la glace, $kg.m^{-1}.s^{-2}$
 Q_{AET} champ de taux volumique d'évapotranspiration réelle, s^{-1}
 t coordonnée temporelle, s
 T champ de température, K
 T_{freeze} champ de température de début de solidification de l'eau porale, K
 \mathbf{v} champ de vitesse de Darcy, $m.s^{-1}$
 w champ de paramètre de calage pour la fonction de gel, K
 z coordonnée verticale ascendante, m

Symboles grecs

θ champ de teneur volumétrique en eau
 θ_{ice} champ de teneur volumétrique en glace
 θ_{liquid} champ de teneur volumétrique en eau liquide

1. Introduction

Ce travail présente un solveur numérique du problème multi-physique de transferts couplés hydriques et thermiques en milieu poreux variablement saturé avec gel/dégel de la phase

aqueuse. L'application attendue consiste en l'étude de la dynamique thermo-hydrigue des pergélisols (sols gelés en profondeur tout au long de l'année, présentant une zone superficielle dégelée en été – présents sur 20 % des surfaces continentales, soit ~25 millions de km²). La perspective à moyen terme de cet effort de développement numérique est de contribuer à quantifier les effets des changements climatiques globaux sur les flux d'altérations vers les océans en provenance des régions boréales (e.g. : [1]).

La physique considérée est fortement couplée et non-linéaire, et la résolution numérique de ce type de problème connaît un fort regain d'intérêt ces dernières années (e.g. : [2]). C'est dans ce contexte qu'un module spécifique, permaFoam [3], a été développé dans le cadre de la boîte à outil de mécanique des fluides numérique libre de droit OpenFOAM[®]. Ce module permet la résolution couplée d'une équation de Richards modifiée pour prendre en compte la chute de perméabilité induite par un gel de l'eau poral et d'une équation d'advection – conduction incluant un terme de changement de phase. L'utilisation d'OpenFOAM[®] permet de bénéficier d'excellentes performances parallèles (e.g. : [4]). Ce dernier point est capital compte tenu du fait que les fortes non linéarités et les fronts raides rencontrés dans ce type de problèmes peuvent induire des temps de calculs très importants.

Après une brève introduction des équations traitées et des méthodes numériques utilisées, des validations analytiques et par inter-comparaison de codes effectuées dans le cadre du benchmark international Interfrost [2] seront proposées. Finalement, un exemple d'application en milieu naturel (en Sibérie Centrale) sera brièvement présenté.

2. Equations et méthodes numériques

2.1. Formulation équationnelle

La mise en équation du problème de transferts d'eau et de chaleur dans un sol avec gel/dégel a fait l'objet d'une abondante littérature (e.g. : [5], [6], [7]). Le développement de permaFoam a été effectué selon une approche reposant sur des hypothèses et des paramétrisations classiques et simples. L'objectif est de trouver un compromis entre la finesse de description des phénomènes physiques et la capacité à traiter des problèmes à grandes échelles de temps et d'espace, et donc à pouvoir effectuer des résolutions numériques robustes et rapides. Ainsi les variations de masse volumique de l'eau en fonction de son état solide ou liquide sont négligées, et la matrice solide est supposée parfaitement rigide : on ne considère donc pas d'évolution mécanique du sol (e.g. : cryoturbation). On fait également l'approximation que la température de début de solidification de l'eau porale ne dépend pas de la saturation en eau du milieu poreux (pas de prise en compte de la dépression de la température de solidification en milieu non saturé - voir [8] pour un exemple de formulation tenant compte de ce phénomène). Enfin on se place dans le cadre de l'hypothèse d'équilibre thermique local en tout point du milieu poreux considéré. Le problème est ainsi décrit par un jeu de deux équations couplées : une équation de Richards modifiée qui inclue un terme source représentant l'évapotranspiration réelle (Éq. (1)), et une équation de transfert de chaleur en milieu poreux incluant un terme d'échange de chaleur latente (Éq. (2)).

Equation de Richards modifiée [9] :

$$C_H(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(K_H(h, T) \nabla(h+z)) + Q_{AET}(h, T) \quad (1)$$

Equation de transfert de la chaleur avec terme de chaleur latente :

$$\frac{\partial(C_{T,eq}(h, T)T)}{\partial t} + \nabla(\mathbf{v}(h, T)C_{T,liquid}T) = \nabla(K_{T,eq}(h, T)\nabla T) + L\frac{\partial\theta_{ice}(h, T)}{\partial t} \quad (2)$$

On utilise les paramétrisations suivantes pour ces deux équations.

Vitesse de Darcy :

$$\mathbf{v}(h, T) = -K_H(h, T)\nabla(h + z) \quad (3)$$

Conductivité hydraulique apparente, compte tenu de la variation de saturation en eau et du gel/dégel de l'eau porale :

$$K_H(h, T) = K_s K_{rel}(h) K_{freezing}(T) \quad (4)$$

Loi de gel de l'eau porale dans le milieu poreux - paramétrisation exponentielle (e.g. : [10]) :

$$\theta_{liquid}(h, T) = \begin{cases} \theta(h) & \text{si } T > T_{freeze} \\ \theta_r + (\theta(h) - \theta_r)e^{-((T - T_{freeze})/w)^2} & \text{si } T < T_{freeze} \end{cases} \quad (11)$$

$$\theta_{ice}(h, T) = \theta(h) - \theta_{liquid}(h, T) \quad (12)$$

Par ailleurs, on utilise une paramétrisation de Mualem-vanGenuchten pour la courbe de rétention $\theta(h)$, la capacité capillaire C_H et la conductivité hydraulique relative du milieu variablement saturé K_{rel} [11], une paramétrisation en loi puissance pour la conductivité hydraulique relative du milieu variablement gelé $K_{freezing}$ [10], une estimation de l'évapotranspiration réelle Q_{AET} basée sur l'évapotranspiration potentielle et la géométrie de la zone racinaire [9], une évaluation de la conductivité thermique équivalente du milieu poreux variablement saturé et variablement gelé $K_{T,eq}$ par moyenne géométrique des conductivité thermique de chaque phase (e.g. : [7]) et une évaluation de la capacité calorifique équivalente du milieu poreux variablement saturé et variablement gelé $C_{T,eq}$ par moyenne arithmétique des capacités calorifique de chaque phase (e.g. : [7]). Il convient de noter que dans cette formulation, on résout une équation de Richards (Éq. (1)) gouvernant une pression h définie pour la phase eau totale (liquide + glace). L'obstruction du milieu par le gel est représentée par la conductivité hydraulique relative du milieu variablement gelé (Éq. (4)). On retrouve par exemple une approche similaire dans Weismüller *et al.*, 2011 [12].

2.2. Méthodes numériques

La nécessité de recourir au calcul massivement parallèle pour l'étude de la dynamique thermo-hydrigue des pergélisols est reconnue dans la littérature (e.g. : [13]). Afin de bénéficier de bonnes performances parallèles [4] et de travailler dans un environnement de mécanique des fluides numérique généraliste et libre de droit, nous avons choisi de développer le solveur permaFoam [3] dans le cadre d'OpenFOAM® [14, 15, 16]. La méthode de discrétisation utilisée est celle des volumes finis. On résout le système couplé avec une approche par séparation d'opérateur séquentielle. Les non linéarités sont traitées par la méthode de Picard, avec une boucle de linéarisation par équation. Les systèmes linéaires issus de la linéarisation de l'équation de Richards (Éq. (1)) sont résolus par une méthode de gradient conjugué préconditionné, alors que les systèmes linéaires issus de la linéarisation de l'équation de transfert thermique (Éq. (2)) sont inversés avec une méthode de bi-gradient conjugué préconditionné. Une procédure de pas de temps adaptatifs empirique (e.g. : [17]) basée sur les convergences des boucles de Picard hydrique et thermique a été implémentée. La

mise en œuvre d'une procédure de pas de temps adaptatif est ici très importante du fait des fortes non-linéarités du système d'équations considéré.

3. Validations analytiques et numériques

La validation de permaFoam a été effectuée dans le cadre du benchmark international Interfrost [2]. Ce projet implique 14 équipes de recherche d'Europe et d'Amérique du Nord, qui ont engagé un exercice d'inter-comparaison de leurs résultats sur un ensemble de cas tests de complexités variables [18]. Nous présenterons ici deux validations analytiques de permaFoam, et une inter-comparaison de résultats numériques.

3.1. Validations analytiques

Les deux problèmes considérés sont deux problèmes monodimensionnels simplifiés : le problème de Lunardini purement diffusif [11] – T1 dans la terminologie d'Interfrost – et le problème de Lunardini avec transfert advectif [19] – TH1 dans la terminologie d'Interfrost. Lunardini a proposé une solution analytique pour chacun de ces problèmes. On trouvera les détails de chacun de ces cas test sur le site web d'Interfrost [18]. On peut voir en Figure 1 les comparaisons entre les résultats de permaFoam et les solutions analytiques de T1 et TH1.

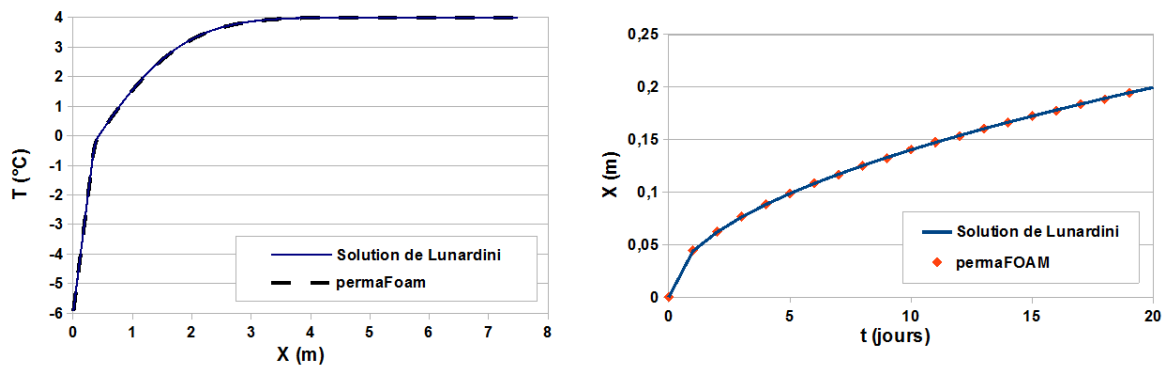


Figure 1 : Comparaison des résultats numériques obtenus avec permaFoam et des solutions analytiques de Lunardini pour T1 (à gauche) et TH1 (à droite). A gauche, T1 : le profil de température dans la colonne de sol au bout de trois jours de fonte pour une plage de température de dégel de 1°C, et à droite, TH1 : la position du front de dégel dans la colonne de sol au cours du temps pour une vitesse d'écoulement de 10 mètres par an. Plus de détails sur le site web d'Interfrost [18].

On constate un bon accord entre les résultats numériques et les solutions analytiques. Ces tests de validation de permaFoam sont donc réussis.

3.2. Inter-comparaisons de codes

Dans le cas général, il n'y a pas de solution analytique connue au problème couplé de transferts thermiques et hydriques en milieu poreux avec gel/dégel. Afin de permettre d'évaluer la robustesse et l'efficacité des approches numériques développées pour résoudre ce type de problème dans des cas plus complexes que les cas monodimensionnels évoqués au paragraphe précédent, la seule voie et le recours à l'inter-comparaison de code. Cette approche est actuellement mise en œuvre dans le cadre du benchmark Interfrost, pour plusieurs cas tests bidimensionnels. Ici on présentera simplement une comparaison des évolutions temporelles des valeurs minimales de températures dans le domaine de résolution calculées par les différents codes participants au benchmark pour le cas test TH2 (avec un gradient hydraulique de 3% ; voir [18] pour plus de détails sur ce cas test).

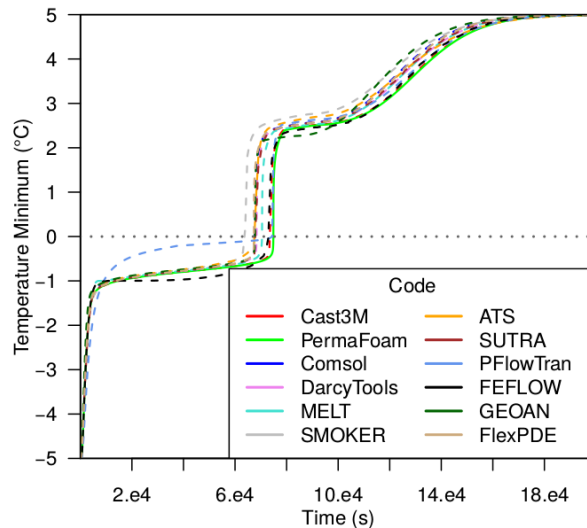


Figure 2 : Inter-comparaison de résultats numériques obtenus avec différent code de transferts couplés (permaFoam en continue, les autres codes participants en pointillée) – cas test TH2 du benchmark Interfrost, gradient hydraulique 3%. Plus de détails sur le site web d'Interfrost [18].

On peut remarquer qu'on a un assez bon accord entre les résultats des différents participants. En particulier, on a une très bonne correspondance entre les résultats obtenus avec permaFoam et ceux obtenus avec Cast3M [20].

4. Application au bassin versant de Kulingdakan

Cette section présente brièvement des résultats préliminaires associés à la modélisation de la dynamique thermo-hydrigue de la couche active du pergélisol de Kulingdakan (64°17'N, 100°11'E), un bassin versant expérimental de Sibérie Centrale suivi depuis plus d'une décennie pour l'étude des transferts de matière sur les surfaces continentales boréales (e.g. : [21], [22], [23], [24], [25]). Sur ce petit bassin versant (~ 40 km²), le couvert lithologique et le couvert végétal sont plus ou moins homogènes (roche mère basaltique – trapps du Putorana, forêt de mélèze - taïga). La principale variabilité observable dans le paysage est liée à l'exposition des versants, et au contraste d'apport d'énergie radiative associé. Les sols présents sur le bassin versant sont constitués d'un horizon minéral et d'un horizon organique sus-jacent, l'ensemble étant recouvert d'une couche de mousse et de lichen. Les épaisseurs de ces couches varient en fonction de l'exposition de la parcelle considérée (couche de mousses et horizons organiques plus épais sur les versants nord). Le but de l'effort de modélisation engagé sur ce bassin versant est à terme d'étudier l'effet de ces variabilités (expositions, épaisseurs des horizons) sur la dynamique thermo-hydrigue de la couche active du pergélisol, en conditions actuelles et sous changement climatique. Ici on présente simplement un exemple de comparaison entre données de terrain et résultats numériques (variables considérées : températures de sol à différentes profondeurs) en conditions actuelles, pour les versants d'exposition nord.

Les données météorologiques (pluie, températures de l'air et de la surface de l'horizon organique du sol, évapotranspiration) utilisées comme données d'entrées de la modélisation sont présentées sur la Figure 3. Ce sont des moyennes inter-annuelles de valeurs mensuelles calculées à partir de chroniques de suivi du bassin versant acquises de 2006 à 2012 (A.S. Prokushkin, communication personnelle).

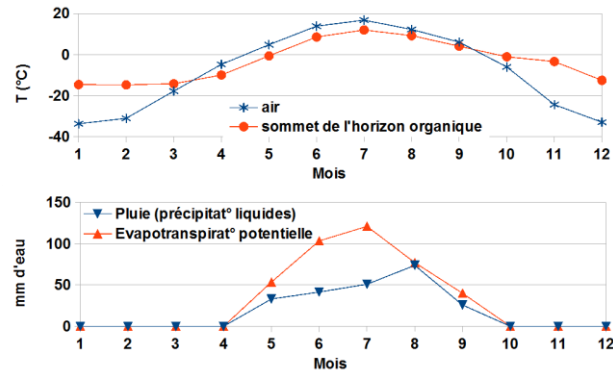


Figure 3 : Forçages météorologiques mensuels moyens en conditions actuelles sur le bassin versant de Kulingdakan (A.S. Prokushkin, communication personnelle).

On constate un fort contraste saisonnier thermique et hydrique : les hivers sont très froids, et il n’y a pas de précipitation liquide (uniquement de la neige), alors que de mai à septembre on a des températures atmosphériques au dessus de zéro et des précipitations liquides non négligeables. La différence importante entre les températures hivernales de l’air et du sommet de l’horizon organique s’explique notamment par les propriétés isolantes du manteau neigeux et de la couche de mousse se développant à la surface du sol. La Figure 4 présente une comparaison entre résultats de modélisations numériques (permaFoam) et observations (A.S. Prokushkin, communication personnelle) pour les évolutions temporelles annuelles de températures du pergélisol de face nord du bassin versant à différentes profondeurs (au sommet, à 10cm et à 20cm de profondeur de l’horizon minéral). Les résultats de modélisation sont obtenus avec une approche 2D hétérogène représentant les dimensions caractéristiques des pentes nord du bassin versant ainsi qu’une représentation au premier ordre de leurs différents horizons (organique et minéral). Considérer une géométrie 2D permet de prendre en compte les transferts latéraux. Cette démarche conduit à un domaine de 2,5 km de long, de 10 m d’épaisseur et de 20% d’inclinaison. Les résultats numériques présentés ici sont des relevés à mi pente. Le milieu est discrétisé spatialement par un maillage d’environ 630 000 éléments. Les calculs ont été faits sur EOS, le supercalculateur de CALMIP, avec des requêtes de réservations de ressources CPU allant de 1 à 5 nœuds (i.e. de 20 à 100 CPU). Le total des heures de calculs utilisées pour la réalisation de la Figure 4 est d’environ 3000 heures CPU.

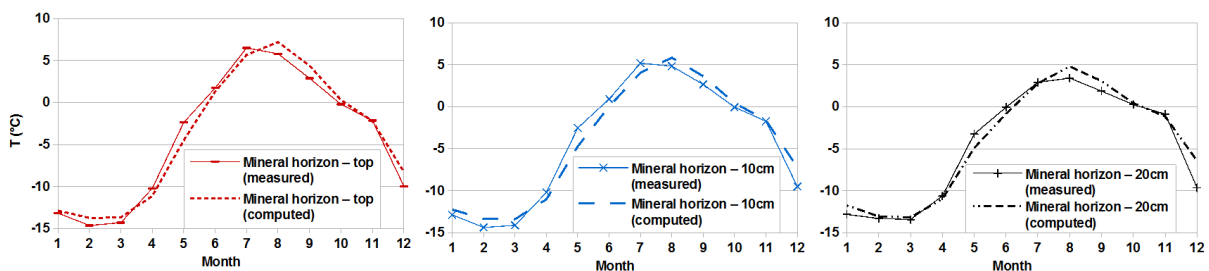


Figure 4 : Comparaisons entre résultats numériques (permaFoam) et observations (A.S. Prokushkin, communication personnelle) de température de sol de face nord du bassin versant de Kulingdakan – gauche : sommet de l’horizon minéral – centre : 10cm de profondeur dans l’horizon minéral – droite : 20cm de profondeur dans l’horizon minéral.

Les ordres de grandeurs des extrema et la dynamique saisonnière observés sont bien restitués par la modélisation. On constate un retard du réchauffement de la couche active modélisé d’environ deux semaines par rapport aux observations. Cela pourrait être expliqué par l’existence de macropores (fentes de dessiccation, de cryoturbation, ...) non pris en compte à l’heure actuelle dans la modélisation. Cependant il s’agit uniquement de résultats préliminaires (calculs à plus hautes résolutions spatio-temporelles en cours).

5. Conclusion

PermaFoam a été développé pour modéliser la dynamique thermo-hydrrique d'un pergélisol hétérogène en tenant compte de l'infiltration de l'eau de pluie et de l'évapotranspiration, avec une approche de discrétisation d'équations aux dérivées partielles issues de la mécanique des milieux continus. L'utilisation d'OpenFOAM permet de recourir efficacement aux calculs hautes performances, pour pouvoir traiter les échelles d'intérêts pour l'étude des bassins versants expérimentaux. PermaFoam a été validé avec succès dans le cadre du benchmark Interfrost. Une première application à un bassin versant expérimental de Sibérie Centrale est en cours. Les perspectives associées pour l'étude des transferts de matières en milieux boréaux sont nombreuses (e.g. : modélisation de l'altération en milieux boréaux, [26], [27]).

Références

- [1] O. S. Pokrovsky, R. M. Manasyrov, S. Loiko, L. S. Shirokova, I. A. Krivtsov, B. G. Pokrovsky, L. G. Kolesnichenko, S. G. Kopysov, V. A. Zemtsov, S. P. Kulizhsky, S. N. Vorobiev, and S. N. Kirpotin, Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers, *Biogeosciences Discuss.*, 12 (2015), 10621–10677.
- [2] C. Grenier, N. Roux, H. Anbergen, N. Collier, F. Costard, M. Ferry, A. Frampton, J. Frederick, J. Holmen, A. Jost, S. Kokh, B. Kurylyk, J. McKenzie, J. Molson, L. Orgogozo, A. Rivière, W. Rühaak, J.-O. Selroos, R. Therrien, P. Vidstrand, The InterFrost benchmark of Thermo-Hydraulic codes for cold regions hydrology – first inter-comparison results, *Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2015*, 17 (2015), EGU2015-9723.
- [3] L. Orgogozo, O.S. Pokrovsky, Y. Goddérès, C. Grenier, J. Viers, D. Labat, S. Audry, A. Prokushkin, Thermo-hydrologic modelling of permafrost with OpenFOAM®: perspectives of applications to the study of weathering in boreal areas. *Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2015*, 17 (2015), EGU2015-9775-1.
- [4] L. Orgogozo, N. Renon, C. Soulaïne, F. Hénon, S.K. Tomer, D. Labat, O.S. Pokrovsky, M. Sekhar, R. Ababou, M. Quintard, An OpenFOAM massively parallel solver for Richards Equation : mechanistic modelling of water fluxes at the watershed scale, *Computer Physics Communications*, 185 (2014), 3358-3371.
- [5] G.L. Guymon, J.N. Luthin, A coupled Heat and Moisture Transport Model for Arctic Soils, *Water Resources Research*, 30 (5) (1974), 995-1001.
- [6] V.E. Romanovsky, T.E. Osterkamp, N.S. Duxbury, An evaluation of three numerical models used in simulations of the active layer and permafrost temperature regimes, *Cold Regions Science and Technology*, 26 (1997), 195-203.
- [7] B.L.Kurylyk, K. Watanabe, The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils, *Advances in Water Resources*, 60 (2013), 160-177.
- [8] M. Dall'Amico, S. Endrizzi, S. Gruber, R. Rigon, A robust and energy-conserving model of freezing variably-saturated soil. *The Cryosphere*, 5 (2011), 469-484.
- [9] L. Orgogozo, RichardsFoam2: A new version of RichardsFoam devoted to the modeling of the vadose zone, *Computer Physics Communications*, 196 (2015), 619-620.
- [10] J.M. McKenzie, C.I. Voss, D.I. Siegel, Groundwater flow with energy and water-ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs, *Advances in Water Resources*, 30 (2007), 966-983.
- [11] M.Th. van Genuchten, A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *SSSAJ*. 44(5) (1980) 892
- [12] J. Weismüller, U. Wollschläger, J. Boike, X. Pan, Q. Yu, K. Roth, Modeling the thermal dynamics of the active layer at two contrasting permafrost sites on Svalbard and on the Tibetan Plateau, *The Cryosphere*, 5 (2011), 741-757.

- [13] S.L. Painter, J.D. Moulton, C.J. Wilson, Modeling challenges for predicting hydrologic response to degrading permafrost, *Hydrogeology Journal*, 21 (2013), 221-224.
- [14] H. Jasak. Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows. *Ph.D. thesis of the Imperial College of Science, Technology and Medicine, London* (1996)
- [15] H.G. Weller, G. Tabor, J. Jasak, C. Fureby. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computer in Physics*, 12(6) (1998) 620
- [16] <http://www.openfoam.com>
- [17] G.A. Williams, C.T. Miller, An evaluation of temporally adaptive transformation approaches for solving Richards' equation, *Advances in Water Resources*, 22(8) (1999), 831
- [18] <https://wiki.lsce.ipsl.fr/interfrost/doku.php>
- [19] B. L. Kurylyk, J. M. McKenzie, K.T.B. MacQuarrie, C.I. Voss, Analytical solutions for benchmarking cold regions subsurface water flow and energy transport models: One-dimensional soil thaw with conduction and advection, *Advances in Water Resources*, 70 (2014), 171-184.
- [20] C. Grenier, D. Régnier, E. Mouche, H. Benabderrahmane, F. Costard, P. Davy, Impact of permafrost development on groundwater flow patterns : a numerical study considering freezing cycles on a two-dimensional vertical cut through a generic river-plain system, *Hydrogeology Journal*, 21 (1) (2013), 257-270.
- [21] A.S. Prokushkin, T. Kajimoto, S.G. Prokushkin, W.H. McDowell, A.P. Abaimov, Y. Matsura, Climatic factors influencing fluxes of dissolved organic carbon from the forest floor in a continuous-permafrost Siberian watershed, *Can. J. For. Res.*, 35 (2005), 2130-2140.
- [22] A.S. Prokushkin, G. Gleixner, W.H. McDowell, S. Ruehlow, E.-D. Schulze, Source- and substrate-specific export of dissolved organic matter from permafrost-dominated watershed in central Siberia, *Global Biogeochemical Cycles*, 21 (2007), doi: 10.1029/2007GB002938
- [23] M.L. Bagard, A.-D. Schmitt, F. Chabaux, O.S. Pokrovsky, J. Viers, P. Stille, F. Labolle, A.S. Prokushkin, Biogeochemistry of stable Ca and radiogenic Sr isotopes in a larch-covered permafrost-dominated watershed of Central Siberia, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 114 (2013), 169-187.
- [24] V. Mavromatis, A.S. Prokushkin, O.S. Pokrovsky, J. Viers, M.A. Korets, Magnesium isotopes in permafrost-dominated Central Siberian larch forest watersheds, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 147 (2014), 76-89.
- [25] J. Viers, A.S. Prokushkin, O.S. Pokrovsky, A.V. Kirdeyanov, C. Zouiten, J. Chmeleff, M. Méheut, F. Chabaux, P. Oliva, B. Dupré, Zn isotope fractionation in a pristine larch forest on permafrost-dominated soils in Central Siberia, *Geochemical Transactions*, 16(3) (2015), doi: 10.1186/s12932-015-0018-0
- [26] E. Beaulieu, Y. Goddérès, Y. Donnadiéu, D. Labat, C. Roelandt, High sensitivity of the continental-weathering carbon dioxide sink to future climate change, *Nature Climate Change*, 2 (2012), 346-349.
- [27] Y. Goddérès, S.L. Brantley, L.M. François, J. Schott, D. Pollard, M. Déqué, M. Dury, Rates of consumption of atmospheric CO₂ through the next 100 yr of climate change, *Biogeosciences*, 10 (2013), 135-148.

Remerciements

Ce travail a été effectué grâce à l'accès aux ressources HPC du mésocentre de calcul CALMIP (projet p12166).