

Congélation artificielle des sols : caractérisation et modélisation du comportement thermo-hydrromécanique

La congélation artificielle est une méthode d'amélioration temporaire de sol de plus en plus utilisée notamment pour la réalisation d'enceinte périphérique étanche lors des travaux de creusement de tunnels. Son domaine d'utilisation concerne les sols et massifs rocheux tendres ou fortement altérés, dans les cas où les autres méthodes de consolidation temporaires ne seraient pas convenables, suffisamment sûres ou techniquement réalisables. Les avantages des sols gelés sont nombreux, ils ont une forte résistance en compression, une excellente capacité portante et une faible perméabilité. La glace contenue dans les pores lie en effet les particules minérales les unes aux autres, comme le ciment dans le béton (Vitel, 2015). Contrairement à d'autres méthodes d'amélioration des sols comme l'injection de ciments ou produits chimiques, la congélation a peu d'impact sur l'environnement, le liquide réfrigérant étant distribué via des tuyaux et évacué ou remis en circulation sans contaminer les eaux souterraines (Casini et al., 2014; Greenwood et al., 2014).

Dans ce domaine, une question importante est de prévoir avec une précision suffisante lors d'un cycle de gel-dégel, les déformations volumiques (gonflement et tassement) du sol en surface (Joudieh et al., 2023,2024). Dans ce domaine, l'effet de l'épaisseur du sol de recouvrement a été étudié pour savoir si le gonflement peut être supprimé ou négligé à partir d'une certaine contrainte appliquée due au poids des sols et les structures existantes. Dans le domaine des exigences de l'ingénierie, l'aptitude au service est le facteur limitatif de la conception et, par conséquent, le stade primaire du fluage est la principale considération. Le fluage des sols gelés sous l'effet de la pression de glace, ainsi que leur sensibilité par rapport aux pressions mécaniques externes appliquées est donc à prendre en compte. L'étude détaillée de la vitesse de gonflement et du comportement au fluage est un des principaux points à considérer.

Différents modèles et approches intéressants ont été proposés pour la modélisation numérique de la congélation des sols. La modélisation des processus THM couplés et fortement non linéaires reste complexe (Nishimura et al. 2009). La nature du sol, les températures de congélation imposées, la durée de congélation, le contexte hydrogéologique du site, les contraintes mécaniques externes liées au site et aux ouvrages adjacents, la salinité de l'eau et du sol sont des paramètres à prendre en compte. Des verrous restent à lever concernant la détermination et l'optimisation des paramètres de ces modèles. Des validations de modèles basés sur des essais en laboratoire dans un contexte similaire à celui du terrain et/ou in situ sont à faire avant l'intégration des paramètres dans les processus prédictifs de dimensionnement des ouvrages. Une étude complète devrait prendre en considération la modélisation de l'ensemble sol-ouvrage pour un cycle complet de gel/dégel. Le couplage thermo-hydrromécanique (THM) est donc à considérer dans les modélisations numériques appliquées aux situations réelles de congélation artificielle des sols.

Objectifs et méthodologie de la thèse

Une campagne expérimentale sera menée pour évaluer la déformation volumique (gonflement et tassement) des sols lors d'un cycle gel-dégel. Une spécificité de ce travail de thèse sera d'analyser en parallèle les bases de données issues des chantiers de congélation des sols gelés. Cette stratégie permettra la comparaison de résultats de laboratoire et comportement des sols in situ. Elle permettra aussi d'obtenir une image objective de l'état des ouvrages en sols gelés, qui servira de référence dans la conception des nouveaux ouvrages.

Le travail de la thèse sera organisé selon plusieurs axes complémentaires qui seront poursuivis tout au long de la thèse.

Une synthèse bibliographique permettra d'analyser et de classer les nombreux articles scientifiques sur les sols gelés. Cette étude bibliographique devra balayer différents aspects complémentaires. Elle inclura les éléments de bases sur la congélation, tant du point de vue hydrique que mécanique. Les aspects concernant l'impact des sollicitations environnementales seront développés. Par ailleurs, un état de l'art complémentaire sera réalisé sur les différents modèles et les méthodes de dimensionnement des ouvrages en sols gelés, en mettant l'accent sur les approches THM.

Dispositifs expérimentaux des essais en laboratoire. Les méthodes de mécanique des sols saturés et non saturés seront mises à profit pour étudier de manière objective l'impact d'un cycle de gel-dégel sur le comportement hydromécanique des sols. Une approche multi échelles sera entreprise pour caractériser ces matériaux, avant et après sollicitations (porosimétrie par intrusion de mercure, tomographie de rayons X, etc.).

Modélisation du comportement des sols gelés et proposition de méthode de dimensionnement. Pour cette partie du travail, la thèse s'appuiera sur l'expertise du LEMTA dans la modélisation du comportement couplé THM des sols non saturés (Mrad et al. 2005, 2006, 2007 ; Nowamooz et al. 2008 et 2009) et sur le transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux (Boukelia 2016). Les processus initiés par la congélation des sols comprennent le transfert de la chaleur et la migration de l'eau interstitielle par modification du potentiel hydrique (suction) avec un changement de phase. Le gonflement induit par ces processus introduit des effets mécaniques avec notamment un phénomène de consolidation et une modification de la résistance au cisaillement. Les approches les plus récentes de la modélisation dans le domaine du gel-dégel des sols, se basent sur les lois de comportement des milieux poly-phasiques qui sont à la base de la mécanique et de l'hydrodynamique des sols non saturés seront abordées.

Le candidat retenu s'engagera dans une recherche interdisciplinaire et contribuera aux travaux de recherche du LEMTA. Les travaux seront de nature expérimentale et/ou numérique et s'appuieront sur les équipements de laboratoire de pointe et les ressources de modélisation numérique du LEMTA. Le doctorant bénéficiera également de collaborations avec les partenaires du programme de recherche **UPGRADE**, financé par l'UE, avec la possibilité d'un séjour de recherche à long terme (1-2 mois).

Les travaux de thèse doivent débuter au plus tard le 1^{er} octobre 2025. Les candidats doivent être titulaires, au moment de l'entrée en fonction, d'un diplôme de Master (M2) en Génie Civil, Géotechnique ou Géologie de l'Ingénieur, et avoir un intérêt fort pour la mécanique des géomatériaux.

Conditions

Date du début de la thèse : 1^{er} octobre 2025

Durée : 36 mois, (contrat à durée déterminée)

Salaire brut : 2 200 € par mois

Institution: LEMTA (http://lemta.univ-lorraine.fr/comp_thmc_sols.html)

Université de Lorraine (www.univ-lorraine.fr)

Comment postuler ?

Envoyer par e-mail avant le 30 avril 2025 : un CV (2 pages maximum), le rapport de Master (un résumé, seulement si c'est en cours), et les coordonnées d'une personne de référence, aux deux co-directeurs de thèse :

Prof. Olivier Cuisinier

Olivier.Cuisinier@univ-lorraine.fr

Phone: (+33) (0)3 72 74 43 45

Prof. Farimah Masrouri

Farimah.Masrouri@univ-lorraine.fr

Phone: (+33) (0)3 72 74 43 41

Références

- Boukelia A. (2016) - Modélisation physique et numérique des géo-structures énergétiques. Thèse de doctorat – Univ. de Lorraine.
- Casini F. Gens A., Olivella S. (2014). Artificial ground freezing of a volcanic ash: laboratory tests and modelling. Institution of civil engineers.
- Greenwood, W., Green, C., Partenio, M. (2014). ground-freezing implementation-in-the-field. www.geoengineer.org:https://www.geoengineer.org/education/web-class-projects/cee-542-soil-site-improve-winter-2014/assignments/ground-freezing#implementation-in-the-field
- Joudieh, Z., Cuisinier, O., Abdallah, A., Masrouri, F. (2023). AGF: A review of the effect of applied stress on the soil freezing. 11th International Symposium on Ground Freezing – London. UK.
- Joudieh, Z., Cuisinier, O., Abdallah, A., Masrouri, F. (2024) Artificial Ground Freezing – on the soil deformations during freeze-thaw cycles, *Geotechnics* 2024, 4(3), 718-741, <https://doi.org/10.3390/geotechnics4030038>
- Mrad, M., Abdallah, A., Masrouri, F. (2007). Modélisation numérique du comportement d'un sol gonflant chargé soumis à des variations hydriques. *Revue Française de Géotechnique*, n° 120- 121, pp. 121-130.
- Mrad, M., Abdallah, A., Masrouri, F., Vaunat, J. (2006). Finite-element implementation of BExM elastoplastic model for swelling unsaturated soils. In *Geotechnical Special Publication*. [https://doi.org/10.1061/40802\(189\)163](https://doi.org/10.1061/40802(189)163)
- Mrad, M., Cuisinier, O., Abdallah, A., Masrouri, F. (2005). Modelling of the hydromechanical behaviour of unsaturated swelling soils under high suctions | Modelisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés sous fortes suctions. In *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnology in Harmony with the Global Environment (Vol. 2)*, Osaka, Japan, 12th-16th September
- Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S., Jardine, R. J. (2009). *Géotechnique* 59, No. 3, 159–171 [doi: 10.1680/geot.2009.59.3.159] : THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application.
- Nowamooz, H., Mrad, M., Abdallah, A., Masrouri, F. (2008). Experimental and numerical studies of the hydromechanical behaviour of a natural unsaturated swelling soil. In *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering - Proceedings of the 1st European Conference on Unsaturated Soils, E-UNSAT 2008*.
- Nowamooz, H., Mrad, M., Abdallah, A., Masrouri, F. (2009). Experimental and numerical studies of the hydromechanical behavior of a natural unsaturated swelling soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(4): 393-410, doi: 10.1139/T08-127, ISSN:1208-6010.
- Vitel M. (2015). Modélisation thermo-hydraulique de la congélation artificielle des terrains. Géosciences, ressources naturelles et environnement. Thèse de l'école nationale supérieure des mines de Paris.