

CONGÉLATION ARTIFICIELLE DES SOLS : CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT COUPLÉ THERMO-HYDROMÉCANIQUE – UNE SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

ARTIFICIAL GROUND FREEZING: CHARACTERIZATION OF THE THERMO-HYDROMECHANICAL BEHAVIOR OF SOIL – A REVIEW

Zeina JOUDIEH^{1,2}, Olivier CUISINIER¹, Adel ABDALLAH¹, Louis DELMAS², Farimah MASROURI¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

² Bouygues Travaux Publics, Guyancourt, France

RÉSUMÉ – La congélation artificielle du sol (AGF), renforce le sol, mais elle pourrait engendrer des problèmes liés aux déplacements associés aux phases de gel et / ou de dégel. La contrainte verticale joue un rôle essentiel dans la manifestation de ces phénomènes. Cette revue bibliographique examine l'influence de la contrainte sur le comportement mécanique, hydrique et thermique de différents types de sols. Elle s'intéresse également à des essais et à des modèles pour évaluer l'impact de la contrainte sur le gel et les déformations du sol.

ABSTRACT – Artificial ground freezing (AGF) enhances soil strength for construction, but it can lead to concerns like frost heave and thaw-induced displacements. Vertical stress, a crucial aspect of AGF, dictates heave generation. This review paper delves into the influence of stress on the mechanical, hydraulic, and thermal behavior of different soil types. It also investigates laboratory tests and models to understand the impact of stress on soil freezing and deformations.

1. Introduction

L'utilisation de l'AGF en tant que technique d'amélioration temporaire des sols remonte à 1862, lorsque elle a été employée pour la construction de puits de mines dans le sud du Pays de Galles (Harris, 1995). L'AGF renforce la résistance du sol lors de la solidification de l'eau interstitielle et réduit donc sa perméabilité. Cependant, le gel de l'eau dans le sol provoque une dilatation de son volume et la formation de lentilles de glace dans les sols sensibles au gel. Cette expansion entraîne une ségrégation (ouverture) de la matrice granulaire et un soulèvement plus ou moins important à l'échelle macroscopique, en fonction de la contrainte verticale due au poids du sol sus-jacent. Des études menées par Beskow (1935); Arvidson & Morgenstern (1977); Penner & Walton (1979); Konrad & Morgenstern (1982); Konrad (2005) et Azmatch (2013) ont mis en évidence le lien entre la contrainte appliquée et divers processus tels que la migration de l'eau, le développement de la succion cryogénique, la réduction de la perméabilité et la température de ségrégation (T_s) (la température à laquelle les lentilles de glace se forment) des sols soumis à la congélation. Cette revue bibliographique présente un aperçu synthétique de l'évolution des déformations de surface, de la migration de l'eau et de la perméabilité du sol sous l'influence de la pression, discute du développement de modèles qui prennent en compte ces effets et met en lumière la nécessité de recherches plus approfondies.

2. La congélation du sol : processus, mécanismes et conséquences

Lors de la phase de congélation, le sol devient un matériau complexe à quatre phases, composé de particules de sol, de cristaux de glace, de bulles d'air et d'eau non gelée. Des

études menées par Lunardini (1981); Tornaghi (1982); Andersland & Ladanyi (1994); Rempel et al. (2004) et d'autres ont montré que l'eau liquide peut encore exister à des températures très basses et que le point de congélation du sol ne commence pas systématiquement à 0°C. Dans un sol gelé ($T < T_s$), l'eau non gelée persiste dans les micropores sous forme de minces films adsorbés sur les surfaces des particules du sol en équilibre avec la glace interstitielle.

Selon Rempel et al., (2004) et Wettlaufer & Worster, (2006) sur le plan thermique, deux mécanismes peuvent expliquer ce phénomène :

- le mécanisme de pré-fusion induit par la courbure à l'interface entre les cristaux et l'eau, dans lequel l'eau interstitielle est surfondue en raison d'effets de Gibbs-Thomson ;
- le mécanisme de pré-fusion interfaciale qui stipule que l'énergie superficielle entre l'eau-sol et l'eau-glace est inférieure à celle de l'interface entre l'eau et la glace.

D'un point de vue hydraulique, l'équation de Clausius-Clapeyron décrit la force de succion qui se développe à l'interface glace-eau pendant le gel.

$$P_w = \frac{L}{V_w T_o} \ln \frac{T_s}{T_o} + \frac{V_i}{V_w} P_e \quad (1)$$

Où P_w est la pression d'eau négative dans le film d'eau (succion), L est la chaleur latente de fusion de l'eau, V_i et V_w sont les volumes molaires de la glace et de l'eau liquide respectivement, T_s est la température de la ségrégation (K), T_o est la température de congélation de l'eau (K), et P_e est la pression appliquée de l'extérieur.

Le processus de gel dépend de plusieurs paramètres, tels que le type de sol, la disponibilité en eau, le taux de gel, les conditions thermiques (gradient de température, taux), les conditions initiales du sol, etc.

La nature interdépendante de ces paramètres rend l'AGF un processus thermo-hydro-chimio-mécanique complexe avec un double effet : renforcement de la résistance du sol et la réduction de sa perméabilité, mais aussi le soulèvement et la déformation du sol (Andersland and Ladanyi, 1994; Dysli, 1991; Vitel, 2015).

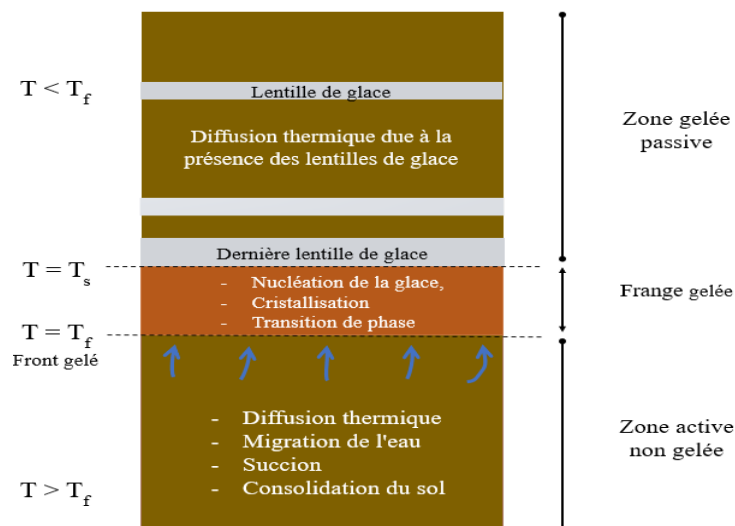


Figure 1: Résumé d'un profil de sol gelé et des processus liés à la congélation - avec T_f : température de congélation de l'eau ; T_s : température de congélation par ségrégation (à la base de la lentille de glace)

Trois zones distinctes existent lors de la congélation du sol (Figure 1) :

- La zone gelée passive : diffusion thermique par la présence des grains de sol, des lentilles de glace et de la glace interstitielle ;

- La frange gelée : processus complexes de nucléation de la glace, de cristallisation et de transition de phase ;
- La zone active non gelée : diffusion thermique, migration de l'eau, succion et consolidation du sol.

La déformation globale du sol lors de la congélation est alors la somme de l'expansion dans la zone gelée, du tassement provoqué par la consolidation dans la zone non gelée et du bilan de migration du volume d'eau hors et vers les différentes zones de sol.

3. Soulèvement du gel sous l'effet de la pression appliquée

La pression des terres sus-jacentes contrôle et modifie les soulèvements induits par gel en affectant divers processus clés, notamment la migration de l'eau, l'augmentation de la succion, la modification de la température de ségrégation et l'évolution de la perméabilité. Zhang et al. (2017) ont mené une expérience au cours de laquelle des échantillons d'argile silteuse saturée ont été soumis à différentes contraintes de surcharge (50, 150, 300 et 500 kPa) dans des conditions de température identiques. Leurs conclusions ont révélé qu'à mesure que la contrainte augmentait, le taux d'absorption d'eau diminuait, atténuant ainsi les déformations due au soulèvement par le gel. Cette observation est en accord avec des recherches antérieures indiquant une réduction de l'absorption d'eau externe avec l'augmentation de pression (Loch and Kay, 1978; Lu et al., 2021; Ming et al., 2016).

La contrainte exerce une influence significative sur la température de ségrégation des lentilles de glace et l'épaisseur de la frange gelée. Cette relation a été étudiée par diverses études (e.g. Ji et al., 2022; Konrad and Morgenstern, 1982) qui ont démontré qu'une augmentation de la contrainte entraîne une frange gelée plus épaisse et une diminution du gradient hydraulique à travers la frange, réduisant le taux de migration de l'eau vers la lentille de glace. Xia (2005) a également confirmé expérimentalement cette corrélation, montrant qu'une charge plus élevée entraîne une frange gelée plus épaisse en raison du chemin d'écoulement plus long pour la migration de l'eau.

La température de ségrégation est déterminée par des facteurs comme la puissance de refroidissement, le type de sol et la contrainte appliquée (Konrad, 2005, 1989). Trois études distinctes, menées par Konrad (1980), Azmatch (2012), et Ji et al. (2022), ont examiné l'impact de la contrainte sur la température de ségrégation des lentilles de glace. Konrad (1980) et Azmatch (2012) ont travaillé sur le limon de Devon, utilisant l'équation généralisée de Clausius-Clapeyron et la courbe caractéristique de congélation du sol (SFCC), respectivement, pour déterminer la température de ségrégation sous des pressions appliquées allant de 0 à 500 kPa. Ji et al. (2022) ont mis en place une approche numérique pour évaluer l'effet de la charge sur la température de ségrégation d'une argile. Les résultats de ces études ont montré systématiquement que la température de ségrégation diminue avec l'augmentation de la charge appliquée. Konrad (1980) et Azmatch (2012) ont observé des valeurs de température de ségrégation similaires pour les expériences menées à des taux de refroidissement comparables. Ji et al. (2022) ont constaté que la température la plus élevée de la lentille de glace diminuait à mesure que la pression augmentait, ce qui s'aligne avec les résultats de Konrad (1980) et d'Azmatch et al. (2012).

Les études sur l'influence de la contrainte sur la perméabilité des sols partiellement gelés ont abouti à des résultats contradictoires. Des études antérieures (e.g. Konrad & Morgenstern, 1982), montrent que la perméabilité diminue avec l'augmentation de la pression appliquée, attribuant cette diminution à la réduction de la conductivité hydraulique de la frange gelée. Cependant, l'étude plus récentes de Azmatch 2013 a remis en question cette hypothèse, suggérant que la perméabilité peut augmenter lorsque la pression augmente, entraînant une redistribution du volume des pores, une diminution du volume des macropores et une augmentation du volume des micropores et capillaires, où les

phénomènes de capillarité jouent un rôle prédominant. Ce changement porosimétrique permet une plus grande capacité de migration de l'eau vers les lentilles de glace. Le rôle des fissures dans le sol pourrait également expliquer ces résultats contradictoires. Xia et al. (2005) ont mis en évidence la formation de fractures lors du gel, soulignant leur influence sur la perméabilité des sols partiellement gelés. Azmatch (2013) a incorporé ces fissures dans son modèle à double porosité, tenant compte de leur impact sur la conductivité hydraulique. Son analyse a révélé que les fissures augmentent considérablement la perméabilité de la frange gelée, avec des valeurs pouvant atteindre trois ordres de grandeur supérieures à celles observées dans les sols non fissurés.

La synthèse des informations existantes sur l'effet de la contrainte appliquée sur le gel du sol permet de proposer le schéma présenté en Figure 2. La Figure 2 permet de comparer visuellement deux colonnes de sol gelé avec et sans contrainte appliquée. En résumé, la contrainte appliquée semble augmenter l'épaisseur de la frange gelée, réduire la migration de l'eau vers le front de gel, diminuer la température de ségrégation et conduire à une réduction globale des soulèvements liés au gel.

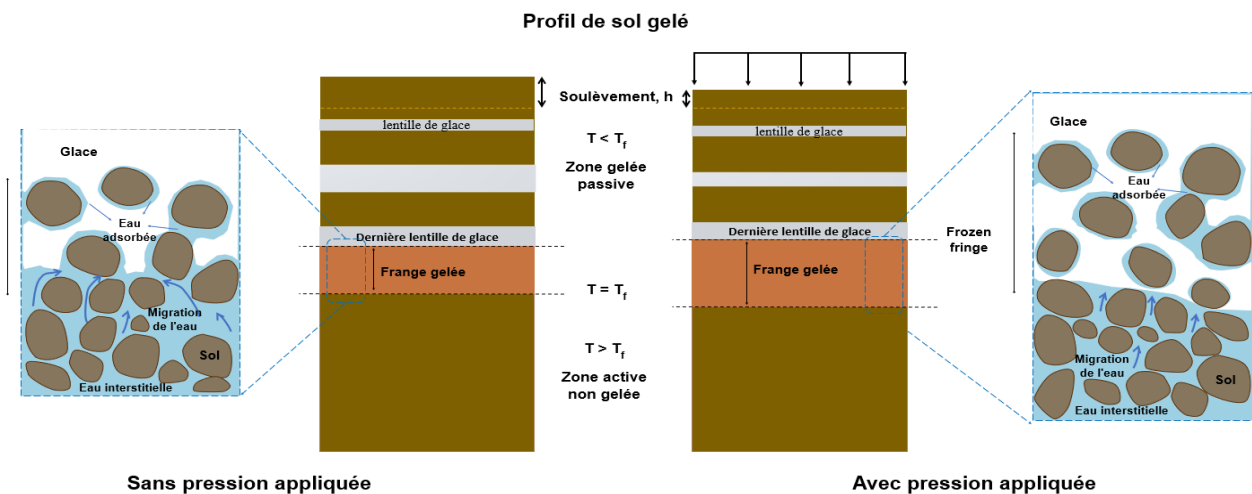


Figure 2: Diagramme schématique du profil de sol gelé avec et sans contrainte appliquée

4. Les dispositifs d'essais en laboratoire

La compréhension approfondie des caractéristiques du comportement des sols gelés a conduit au développement d'un éventail d'installations expérimentales spécifiques telles que des essais triaxiaux avancés, des œdomètres à température contrôlée mais aussi différentes formes d'essais de gonflement au gel. Les essais triaxiaux à température contrôlée évaluent la résistance au cisaillement, le comportement contrainte-déformation et le fluage des sols gelés dans différentes situations (e.g. (Li et al., 2017; Ren, 2019; Shastri et al., 2021). Les œdomètres servent à examiner la compressibilité des sols sous des sollicitations du type gel-dégel (e.g. Viggiani & Casini, 2015; Fortin et al., 2019; Viglianti et al., 2023). Les essais de gonflement permettent d'évaluer les déformations du sol pendant un ou plusieurs cycles de gel-dégel sous différentes conditions de température et de disponibilité en eau (Azmatch, 2013; Chhun et al., 2021; Jin et al., 2019). Les essais de gonflement sous pression appliquée impliquent des dispositifs équipés de capteurs de mesure précis, permettant d'enregistrer la déformation du sol au cours du temps. L'éprouvette est placée dans un moule conçu pour permettre son expansion, tandis qu'un système de contrôle de la température régule les gradients thermiques à l'intérieur de l'appareil. L'eau est également fournie au sol pour favoriser la formation de lentilles de glace. Il faut, toutefois, souligner que la disponibilité des données expérimentales concernant le gel du sol sous une pression appliquée est notablement limitée, les contraintes dépassant rarement 500 kPa lorsqu'elles sont appliquées.

5. Les modèles de soulèvement du gel avec la prise en compte de pression

Dans la pratique, un des modèles les plus reconnus est le modèle empirique introduit par Konrad & Morgenstern (1980), appelé modèle du potentiel de ségrégation. Selon ce modèle empirique, le taux de migration de l'eau au niveau de la lentille de glace finale (v_0) est proportionnel au gradient de température, ce qui permet d'établir la formule

$$v_0 = SP_0 \text{ grad}T \quad (2)$$

Où SP_0 est une constante déterminée grâce à des essais de gonflement. Le modèle permet le calcul du soulèvement dû au gel dans des conditions de température connues. Il est possible d'intégrer l'effet de la pression externe à ce modèle empirique en utilisant l'équation 3 où SP_0 est la valeur de SP obtenue pour une contrainte appliquée nulle, P_e est la contrainte appliquée, et α est une constante du sol.

$$SP = SP_0 e^{-\alpha P_e} \quad (3)$$

La modélisation du soulèvement par le gel requiert des modèles multi-couplés intégrant les variations de température, d'eau et de pression. Pour ce faire, les équations régissant le modèle doivent s'appuyer sur des principes physiques fondamentaux et tenir compte des interactions entre les processus thermiques, hydrauliques et mécaniques dans les sols gelés. Ming et al. (2016) ont proposé un modèle qui inclut l'effet de la pression de recouvrement sur les conditions d'initiation des lentilles de glace. Le modèle a été mis en œuvre dans un code de calcul aux éléments finis tenant compte des changements de phase, des transferts d'eau, des déformations du sol et de la formation de lentilles de glace. Le développement des critères de lentilles de glace du modèle a été inspiré par la théorie de Gilpin (1979, 1980). Ainsi, une nouvelle lentille de glace ne peut se former que lorsque la pression de disjonction (pression de la couche liquide à l'interface glace-eau) dépasse la somme de la charge en place et de la résistance à la traction du sol. Cette étude montre que la formation de lentilles de glace devient plus difficile avec une augmentation de la charge et que l'épaisseur des lentilles est contrôlée par la migration de l'eau.

Nishimura et al. (2009) ont étendu la relation constitutive à deux variables de contrainte du Barcelona Basic Model (BBM) (Alonso et al., 1990) développé initialement pour les sols non saturés pour décrire les caractéristiques essentielles du comportement gelé et non gelé. L'équilibre entre les phases d'eau liquide et de glace est décrit par l'équation de Clausius-Clapeyron (eq. 1). Pour relier le degré de saturation en liquide aux propriétés thermodynamiques du sol, une fonction caractéristique de comportement de sol au gel est utilisée, en tenant compte de la distribution de la taille des pores du sol et des forces de tension qui se développent le long de l'interface glace/liquide. Le modèle a incorporé la dépendance de la résistance au cisaillement à la porosité, comme le modèle de Cam-Clay pour les sols non gelés, et l'augmentation de la résistance au cisaillement avec la teneur en glace à mesure que la succion augmente. Le travail de Nishimura et al. (2009) a fourni un cadre complet pour l'analyse des processus de congélation et de décongélation dans les sols saturés. Leur approche tient compte des interactions entre les processus thermiques, hydriques et mécaniques et saisit les principales caractéristiques du comportement des sols gelés. Cependant, d'autres développements sont nécessaires pour répondre à certaines limitations et incorporer des caractéristiques supplémentaires dépendant du temps ou cycliques.

En s'appuyant sur les travaux de Nishimura et al. (2009), Casini et al. (2016) ont proposé une approche de modélisation pour étudier les processus THM induits par la congélation artificielle de sol (AGF). Le modèle a été testé et calibré à l'aide d'éprouvettes naturelles de cendres volcaniques (Pouzzolane) obtenus lors de la construction du métro de Naples, où l'AGF a été utilisé pour stabiliser temporairement le sol et réguler les eaux souterraines.

Selon le modèle, l'augmentation de la succion renforce le sol et augmente la contrainte de pré-consolidation. Cette augmentation de la résistance est attribuée à l'expansion de la surface élastique avec l'augmentation de la succion.

Plus récemment, Shastri et al. (2021) ont proposé un modèle élasto-plastique pour les sols gelés qui tient compte de l'impact de la température et de la succion cryogénique sur les paramètres critiques liés au comportement des sols gelés, tels que l'augmentation de la pression de pré-consolidation, de la rigidité et de la résistance avec la baisse de la température. Le modèle se base sur le modèle Cam-Clay Modifié pour prendre en compte les variations de température et la succion cryogénique dans les sols. Les équations constitutives du modèle utilisent une surface de rupture hiérarchique unique (HiSS) et la contrainte nette et la succion cryogénique comme deux variables de contrainte pour décrire le comportement du sol gelé. Le modèle d'état critique a été étendu aux sols gelés en augmentant la taille de la surface élastique lorsque la température diminue. Le modèle est capable de capturer le comportement volumétrique du sol à différentes températures et pressions de confinement. La Figure 3 montre une vue 3D du modèle dans l'espace p-q-T (espace contrainte nette-contrainte déviatorique-température).

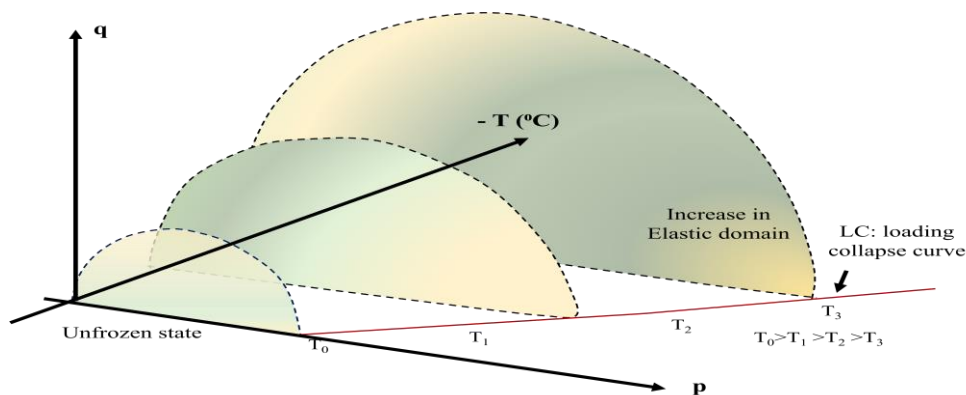


Figure 3: Représentation 3D des limites d'élasticité dans l'espace p - q - T pour les sols gelés

Les études récentes ont mis en évidence l'effet des pressions dans la modélisation du soulèvement dû au gel, qui ont un impact significatif sur le gel du sol et la migration de l'eau. Plusieurs modèles, tels que ceux proposés par Nishimura et al. (2009), Ming et al. (2016), Casini et al. (2016), et Shastri et al. (2021) ont contribué à la compréhension de la façon dont la pression appliquée influence la congélation du sol et le soulèvement dû au gel. Ces modèles intègrent le comportement mécanique, la température et le transfert de masse pour fournir une perspective sur la rupture et la déformation dans la congélation des sols. Ils prennent en compte des facteurs tels que la pression de recouvrement, les gradients de température, le potentiel de ségrégation et le changement de phase, ce qui permet de mieux comprendre la formation des lentilles de glace, le soulèvement dû au gel et les interactions complexes entre l'eau, la glace et la matrice du sol.

6. Conclusion

Cet article aborde l'influence de la pression sur les déformations due à la congélation artificielle par son effet sur la migration de l'eau, la succion, la perméabilité et la température de ségrégation. En combinant les essais en laboratoire et les modèles numériques, l'étude a montré que : (i) la présence d'une contrainte altère le profil du sol en prolongeant la frange gelée et en réduisant la force motrice de la migration de l'eau. (ii) Elle diminue la succion au front de gel et la température de ségrégation nécessaire à la formation de lentilles de glace. Ces modifications entraînent une baisse de la production de soulèvement sous l'application de charges plus importantes.

Cette recherche ouvre des perspectives importantes pour approfondir la compréhension des interactions complexes entre les contraintes, les processus thermiques, hydrauliques et mécaniques sous-jacentes au soulèvement par le gel. De plus, ces résultats suggèrent la nécessité d'explorer davantage les effets à long terme de la pression sur les propriétés du sol et d'évaluer l'efficacité de stratégies de mitigation adaptées aux différentes conditions de sol. Les travaux en cours ont pour objectif de mieux comprendre l'impact de la contrainte appliquée sur l'AGF tout en prenant en considération l'aspect essentiel des projets AGF, à savoir le gradient de température naturel entre le liquide de refroidissement en dessous de zéro circulant dans les tuyaux et les températures positives du terrain environnant. Il est indispensable de saisir cette interaction complexe entre la pression, la direction de propagation du froid, et le gradient de température afin de prédire correctement les déformations provoquées par l'AGF en prenant en compte les conditions spécifiques du site. Dans ce cadre, des essais de gel-dégel sont réalisés sous différentes contraintes, en prenant en compte l'effet d'un gradient de température, afin de mettre en évidence l'impact de la pression sur l'AGF.

7. Références bibliographiques

- Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40, 405–430. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405>
- Andersland, O.B., Ladanyi, B., 1994. *Frozen Ground Engineering Second Edition*, second. ed. John Wiley & Sons Canada, Ltd.
- Arvidson, W.D., Morgenstern, N., 1977. Water flow induced by soil freezing. *Can. Geotech. J.* <https://doi.org/10.1139/T77-024>
- Azmatch, T.F., 2013. *Frost Heave: New Ice Lens Initiation Condition and Hydraulic Conductivity Prediction (PhD Thesis)*. University of Alberta, Edmonton, Alberta.
- Azmatch, T.F., Segoo, D.C., Arenson, L.U., Biggar, K.W., 2012. New ice lens initiation condition for frost heave in fine-grained soils. *Cold Regions Science and Technology* 82, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.003>
- Beskow, G., 1935. *Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads*. Swedish Geological Society, C 26, 145. <https://doi.org/10.1097/00010694-194804000-00015>
- Casini, F., Gens, A., Olivella, S., Viggiani, G.M.B., 2016. Artificial ground freezing of a volcanic ash: laboratory tests and modelling. *Environmental Geotechnics* 3, 141–154. <https://doi.org/10.1680/envgeo.14.00004>
- Chhun, K.T., Jun, K.-J., Yune, C.-Y., 2021. Development of a Frost-Heave Testing Apparatus with a Triple Cell. *Int J Civ Eng* 19, 1299–1312. <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00633-9>
- Dysli, M., 1991. *LE GEL et son action sur les sols et les fondations*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).
- Fortin, J., Fortier, R., Gatién, A., 2019. New Machining Method of Ice-Rich Permafrost Samples for Large Strain Thaw Consolidation Tests in an Oedometer, in: *Cold Regions Engineering 2019*. Presented at the 18th International Conference on Cold Regions Engineering and 8th Canadian Permafrost Conference, American Society of Civil Engineers, Quebec City, Quebec, Canada, pp. 46–54. <https://doi.org/10.1061/9780784482599.006>
- Gilpin, R.R., 1980. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils. *Water Resources Research* 16, 918–930. <https://doi.org/10.1029/WR016i005p00918>
- Gilpin, R.R., 1979. A model of the “liquid-like” layer between ice and a substrate with applications to wire regelation and particle migration. *Journal of Colloid and Interface Science* 68, 235–251. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(79\)90277-7](https://doi.org/10.1016/0021-9797(79)90277-7)
- Harris, J.S., 1995. *Ground freezing in practice*. Thomas Telford, London, New York, NY.
- Ji, Y., Zhou, G., Hall, M.R., Vandeginste, V., Zhao, X., 2022. Thermal-Hydraulic-Mechanical Coupling Research on Overburden Pressure Mitigated Ice Lens Growth in the Freezing Soil. *KSCE J Civ Eng* 26, 1606–1617. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0603-6>
- Jin, H.W., Lee, J., Ryu, B.H., Akagawa, S., 2019. Simple frost heave testing method using a temperature-controllable cell. *Cold Regions Science and Technology* 157, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.011>

- Konrad, J.-M., 2005. Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils. *Can. Geotech. J.* 42, 38–50. <https://doi.org/10.1139/t04-080>
- Konrad, J.-M., 1989. Influence of cooling rate on the temperature of ice lens formation in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology* 16, 25–36. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(89\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0165-232X(89)90004-9)
- Konrad, J.M., 1980. Frost heave mechanics (PhD Thesis). University of Alberta, Edmonton, Alberta.
- Konrad, J.-M., Morgenstern, N.R., 1982. Effects of applied pressure on freezing soils. *Can. Geotech. J.* 19, 494–505. <https://doi.org/10.1139/t82-053>
- Konrad, J.-M., Morgenstern, N.R., 1980. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. *Can. Geotech. J.* 17, 473–486. <https://doi.org/10.1139/t80-056>
- Li, D., Yang, X., Chen, J., 2017. A study of Triaxial creep test and yield criterion of artificial frozen soil under unloading stress paths. *Cold Regions Science and Technology* 141, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.06.009>
- Loch, J.P.G., Kay, B.D., 1978. Water Redistribution in Partially Frozen, Saturated Silt Under Several Temperature Gradients and Overburden Loads. *Soil Science Society of America Journal* 42, 400–406. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030005x>
- Lu, X., Zhang, F., Qin, W., Zheng, H., Feng, D., 2021. Experimental investigation on frost heave characteristics of saturated clay soil under different stress levels and temperature gradients. *Cold Regions Science and Technology* 192, 103379. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103379>
- Lunardini, V.J., 1981. Heat transfer in cold climates, 1st Edition. ed. Van Nostrand Reinhold Co, New York.
- Ming, F., Zhang, Y., Li, D., 2016. Experimental and theoretical investigations into the formation of ice lenses in deformable porous media. *Geosci J* 20, 667–679. <https://doi.org/10.1007/s12303-016-0005-1>
- Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S., Jardine, R.J., 2009. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Géotechnique* 59, 159–171. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.159>
- Penner, E., Walton, T., 1979. Effects of temperature and pressure on frost heaving. *Engineering Geology, Ground Freezing* 13, 29–39. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(79\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0013-7952(79)90018-8)
- Rempel, A.W., Wettlaufer, J.S., Worster, M.G., 2004. Premelting dynamics in a continuum model of frost heave. *Journal of Fluid Mechanics* 498, 227–244. <https://doi.org/10.1017/S0022112003006761>
- Ren, J., 2019. Interpretation of the Frozen Soils Behavior Extending the Mechanics of Unsaturated Soils. Université d'Ottawa / University of Ottawa.
- Shastri, A., Sánchez, M., Gai, X., Lee, M.Y., Dewers, T., 2021. Mechanical behavior of frozen soils: Experimental investigation and numerical modeling. *Computers and Geotechnics* 138, 104361. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104361>
- Tornaghi, R., 1982. La congélation des sols. *Rev. Fr. Geotech.* 5–29. <https://doi.org/10.1051/geotech/1982021005>
- Viggiani, G.M.B., Casini, F., 2015. Artificial Ground Freezing: from applications and case studies to fundamental research. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, Conference Proceedings* 1–7, 65–92. <https://doi.org/10.1680/ecsmge.60678.vol1.004>
- Viglianti, A., Guida, G., Casini, F., 2023. Freezing-thawing response of sand-kaolin mixtures in oedometric conditions, in: 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (ISDCG2023). Presented at the IS-Porto 2023, Portugal.
- Vitel, M., 2015. Modélisation thermo-hydraulique de la congélation artificielle des terrains. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Wettlaufer, J.S., Worster, M.G., 2006. Premelting Dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics* 38, 427–452. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.37.061903.175758>
- Xia, D., 2005. Frost heave studies using digital photographic technique. (MSc Thesis). University of Alberta, Alberta, Canada.
- Zhang, X., Zhang, M., Lu, J., Pei, W., Yan, Z., 2017. Effect of hydro-thermal behavior on the frost heave of a saturated silty clay under different applied pressures. *Applied Thermal Engineering* 117, 462–467. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.069>

