

Analyse expérimentale des déformations induites par un cycle gel-dégel dans le cadre de la congélation artificielle des sols

Insights into soil behavior during and after a freeze–thaw cycle in the context of artificial ground freezing

Zeina JOUDIEH^{1,2*}, Olivier CUISINIER², Adel ABDALLAH², Farimah MASROURI²

1 Bouygues Travaux Publics, France

2 Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, France

**z.joudieh@bouygues-construction.com*

RESUME : La congélation artificielle des sols (AGF) est une méthode d'amélioration des sols couramment utilisée pour la construction d'ouvrages souterrains en milieux aquifères ou faiblement cohérents. Toutefois, le cycle gel–dégel associé induit des interactions thermo-hydro-mécaniques (THM) susceptibles de modifier durablement la structure interne des sols. En particulier, l'influence de la masse volumique initiale sur les déformations induites par le gel et sur le comportement mécanique post-dégel demeure encore peu quantifiée. Dans ce travail, un sable silteux représentatif des formations de la région parisienne a été soumis à un cycle gel–dégel dans un œdomètre à température contrôlée, sous une contrainte verticale de 30 kPa. Trois masses volumiques initiales (1,7 – 1,8 – 1,9 Mg/m³) ont été étudiées afin d'analyser l'effet de la compacité sur le soulèvement au gel et sur la réponse mécanique après dégel. Les déformations ont été mesurées en continu et complétées par des essais de compression unidimensionnelle sur les éprouvettes dégelées. Les résultats mettent en évidence l'effet déterminant de la masse volumique initiale : les échantillons les plus compacts développent un soulèvement plus important en raison d'une succion cryogénique plus intense, tandis que le dégel induit une reconsolidation marquée dans les états lâches et un relâchement structurel pour les états plus denses. Toutefois, l'analyse mécanique post-dégel révèle un enseignement majeur : quelle que soit la masse volumique initiale ou l'évolution volumique pendant le cycle, le gel–dégel entraîne systématiquement une perte de rigidité et une augmentation de la compressibilité. Ainsi, sous faible contrainte verticale, le gel–dégel agit comme un mécanisme de déstructuration microstructurale, dont les effets persistent même lorsque le volume initial est restitué. Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer l'état interne du matériau, et non seulement les déformations mesurées, dans l'évaluation de la stabilité post-dégel des ouvrages réalisés par AGF.

ABSTRACT: Artificial Ground Freezing (AGF) is a widely used temporary ground improvement technique in underground construction, particularly in soft or water-bearing soils. By transforming pore-water into ice, it creates a continuous, watertight, and mechanically stable barrier that ensures ground stability and hydraulic confinement during excavation. However, the freeze–thaw (FT) process involves complex thermo-hydro-mechanical (THM) interactions that can induce delayed deformations and alter the soil's mechanical behavior after thawing.

While the behavior of frozen soil has been extensively studied, post-thaw mechanical properties remain insufficiently understood, especially regarding the influence of the initial density. This parameter controls both water migration during freezing and the rearrangement of the soil skeleton during thawing, yet its impact on mechanical recovery and stiffness remains poorly quantified.

The present work addresses this issue through an experimental investigation of a silty sand subjected to a controlled FT cycle under vertical loading. Tests were performed using a temperature-controlled oedometer capable of imposing an upward thermal gradient and continuously monitoring vertical deformations during freezing, thawing, and post-thaw compression stages.

The results highlight the key role of initial density in governing FT-induced deformations and post-thaw behavior. Under low applied stress, the FT cycle acts as a degradation mechanism of the soil structure. Loose specimens densify but lose stiffness, whereas denser specimens recover their initial volume while undergoing microstructural weakening. These findings demonstrate that, beyond volumetric recovery, the long-term performance of artificially frozen soils is strongly dependent on the preservation of their internal structure, emphasizing the need to account for post-thaw mechanical degradation in design practices.

Mots-clés : Congélation artificielle des sols ; Cycle gel–dégel ; Comportement thermo-hydro-mécanique ; Comportement post-dégel

1 INTRODUCTION

La congélation artificielle des sols (AGF) est une méthode d'amélioration des sols largement utilisée pour le creusement d'ouvrages souterrains en terrains saturés ou peu cohérents. En abaissant la température du sol, l'eau interstitielle gèle et confère au massif une résistance mécanique et une étanchéité suffisante pour assurer le confinement durant les phases d'excavation (Sturk & Stille 2008; Wang et al. 2019; Hu et al. 2019). Bien que maîtrisée sur le plan opérationnel, cette méthode met en jeu des processus thermo-hydro-mécaniques dont les effets, notamment au dégel, demeurent encore l'objet de nombreuses interrogations.

En effet, le gel induit simultanément l'expansion volumique de l'eau et la mise en place de gradients de succion cryogénique capables de mobiliser l'eau non gelée vers le front de congélation. Dans les sols fins, ces mécanismes favorisent la croissance de lentilles de glace, responsables de soulèvements parfois importants (Taber 1929; Beskow 1935; Dash et al. 2006). Lors du dégel, la fonte de ces structures relâche brutalement l'eau piégée, entraînant des tassements qui peuvent excéder le soulèvement initial (Chamberlain & Blouin 1977). Ces variations volumétriques s'accompagnent d'une réorganisation du squelette granulaire : modification de la porosité, redistribution des contacts intergranulaires, affaiblissement local de la structure (Nixon & Morgenstern 1973; Eigenbrod 1996; Viklander 1997; Qi et al. 2008; Adeli Ghareh Viran & Binal 2018; Joudieh et al. 2024).

La compréhension du comportement mécanique après dégel demeure largement incomplète. En particulier, plusieurs travaux suggèrent que la structure initiale, et notamment la masse volumique, joue un rôle déterminant dans la manière dont le matériau gèle, se déforme, puis se reconsolide. Les sols lâches tendraient à se densifier après dégel, tandis que les sols initialement denses pourraient, au contraire, se déstructurer du fait d'une reconsolidation incomplète (Chamberlain & Gow 1979; Johansson 2009; Zhang et al. 2015). Toutefois, ces observations restent encore fragmentaires et souvent obtenues sous des conditions expérimentales éloignées des contraintes réellement appliquées en chantier.

Dans ce contexte, cette étude vise à approfondir l'analyse du rôle de la masse volumique initiale sur les déformations induites par un cycle gel-dégel et sur le comportement mécanique post-dégel d'un sable limoneux typique des formations rencontrées dans les

travaux souterrains parisiens. Pour cela, un dispositif œdométrique à température contrôlée a été mis en œuvre, permettant d'imposer un gradient thermique ascendant représentatif des configurations d'AGF et d'enregistrer en continu les déformations au cours des phases de gel, de dégel et de chargement post-dégel.

L'objectif est double : (i) caractériser l'évolution volumique du sol en fonction de sa masse volumique initiale, et (ii) déterminer dans quelle mesure le cycle gel-dégel modifie durablement sa réponse mécanique. Au-delà de la description des comportements observés, l'étude discute les mécanismes susceptibles d'expliquer les différences entre états lâches et états denses, et met en lumière les implications de ces transformations microstructurales pour la conception et l'interprétation des ouvrages reposant sur la congélation artificielle.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1 Appareillage

Les essais de gel-dégel ont été réalisés à l'aide d'un œdomètre à température contrôlée, spécialement conçu pour reproduire en laboratoire les sollicitations thermo-hydro-mécaniques (THM) caractéristiques de la congélation artificielle des sols. Cet appareil permet d'imposer un gradient thermique dirigé, de maintenir une alimentation en eau favorisant la migration cryogénique, et d'appliquer une contrainte verticale représentative de la profondeur considérée dans le projet (Figure 1).

L'appareil se compose d'un bâti de chargement permettant d'appliquer des contraintes verticales jusqu'à 5000 kPa, d'une enceinte thermostatée assurant une stabilité thermique de $\pm 0,02$ °C, et d'un capteur de déplacement haute résolution garantissant un suivi continu et précis des déformations verticales (Joudieh et al. 2025).

La cellule œdométrique (diamètre interne 71,4 mm, hauteur 20 mm) a été modifiée afin de permettre un gel ascendant maîtrisé. Le refroidissement est assuré par une plaque métallique réfrigérée en partie inférieure, tandis que la température en tête d'échantillon est régulée à +3 °C au moyen d'un circuit d'eau tempérée. Ce dispositif permet d'imposer un gradient thermique vertical bien défini, typiquement compris entre -10 °C à la base et +3 °C au sommet, représentatif des conditions rencontrées lors de la mise en œuvre de l'AGF en milieu souterrain.

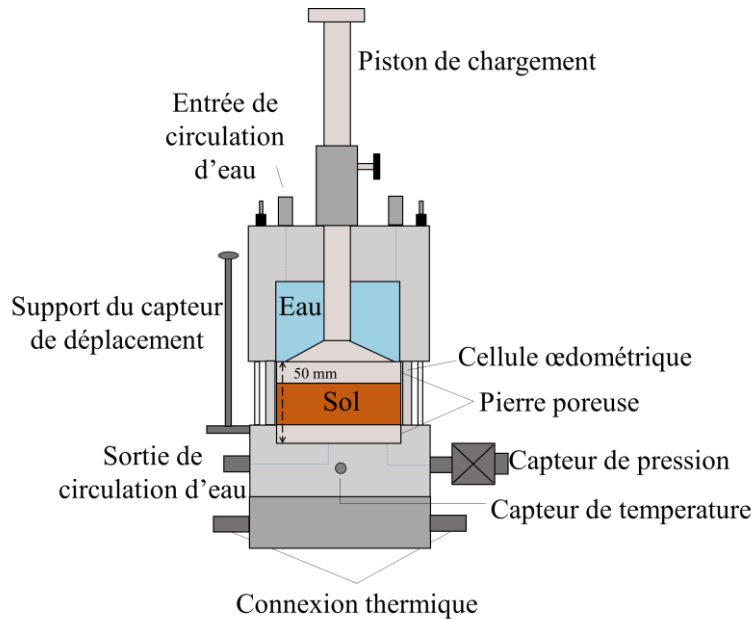


Figure 1. Dispositif œdométrique à température contrôlée.

2.2 Matériau et préparation des éprouvettes

Le sol étudié est un sable limoneux provenant de la formation des *Sables de Beauchamp*, rencontrée lors de travaux souterrains au sud de Paris. Fréquemment saturée, cette formation présente une stabilité réduite en excavation, ce qui rend nécessaire l'utilisation de techniques de renforcement, notamment la congélation artificielle, pour assurer la tenue du terrain.

La granulométrie du matériau se compose en moyenne de 44 % de sable, 54 % de limon et 2 % d'argile. Les limites d'Atterberg obtenues ($LL = 24,4\%$, $LP = 17,3\%$, $IP = 7,1$) correspondent à un sol faiblement plastique, classé SM selon le système USCS (ASTM D2487-17, 2020).

Avant préparation, le sol a été séché à l'air, tamisé à 2 mm et homogénéisé. Les éprouvettes ont été reconstituées avec une teneur en eau de $16,5 \pm 0,5\%$, valeur représentative de celle mesurée in situ. Trois masses volumiques sèches cibles ont été retenues : 1,7 – 1,8 – 1,9 Mg/m^3 , couvrant la plage généralement observée sur le terrain.

Le compactage a été réalisé par voie statique directement dans les anneaux œdométriques, à vitesse contrôlée, jusqu'à obtenir une hauteur finale de $20 \pm 0,1$ mm, assurant une reproductibilité satisfaisante entre éprouvettes.

2.3 Protocole expérimental

L'objectif du programme expérimental est d'examiner l'influence de la masse volumique initiale sur le

comportement d'un sable limoneux soumis à un cycle gel-dégel, ainsi que sur l'évolution de ses propriétés mécaniques après dégel.

Les essais ont été effectués en conditions drainées, dans une salle climatisée (22 ± 1 °C), avec un enregistrement continu des déplacements, permettant de suivre l'évolution des déformations au cours des différentes phases du cycle.

Les éprouvettes compactées aux trois masses volumiques sèches cibles ont d'abord été chargées à 30 kPa, puis saturées à 3 ± 1 °C pendant environ 65 heures afin d'atteindre un degré de saturation supérieur à 98 %.

Après consolidation, un gradient thermique vertical ascendant a été imposé en maintenant la température de la base de l'échantillon à -10 °C tandis que la partie supérieure était stabilisée à $+3$ °C, soit un gradient moyen d'environ $0,65$ °C/mm.

La phase de gel a été maintenue durant 48 heures, suivie d'une phase de dégel de 24 heures, durant laquelle la température de la base a été progressivement ramenée à $+3$ °C jusqu'à homogénéisation thermique.

À l'issue du dégel, chaque éprouvette a été soumise à un essai œdométrique de chargement-déchargement, afin de caractériser son comportement mécanique post-dégel et d'évaluer les éventuelles modifications de compressibilité ou de rigidité (Figure 2).

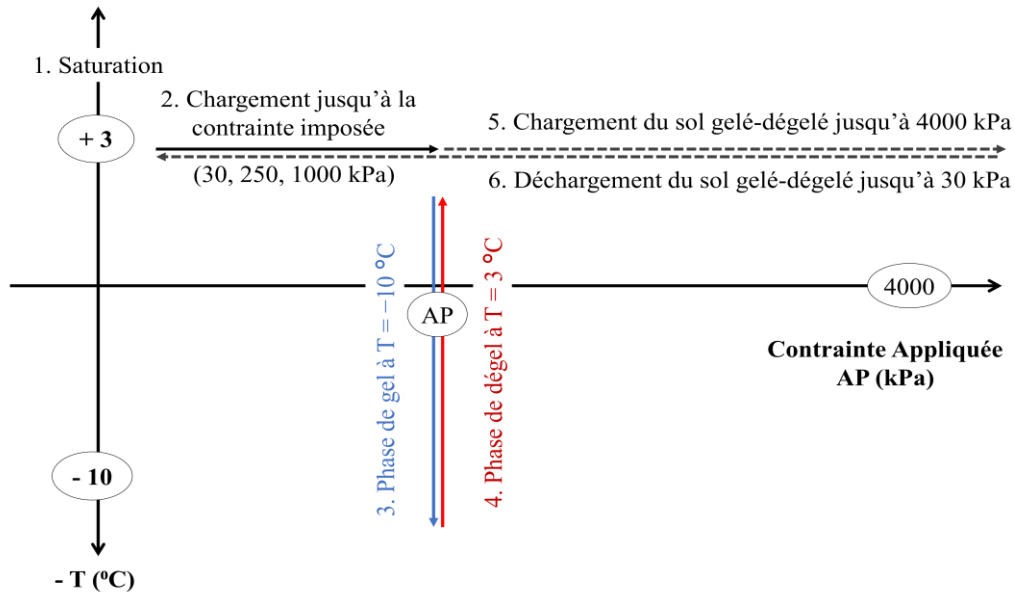


Figure 2. Chemin de chargement THM des éprouvettes (AP = pression appliquée ; T = température).

3 RESULTATS ET INTERPRETATION

3.1 Comportement pendant le cycle gel-dégel

L'influence de la masse volumique initiale sur les déformations induites par le cycle gel-dégel a été étudiée sous une contrainte verticale de 30 kPa. Bien que la campagne expérimentale présentée ici ne comporte qu'un seul essai par masse volumique, la répétabilité du protocole a été préalablement vérifiée au moyen de deux essais réalisés dans des conditions strictement identiques (même procédure de saturation, même gradient thermique et mêmes durées de gel et de dégel). Ces essais complémentaires ont montré une excellente reproductibilité, avec un écart inférieur à 5 % entre les déformations verticales mesurées.

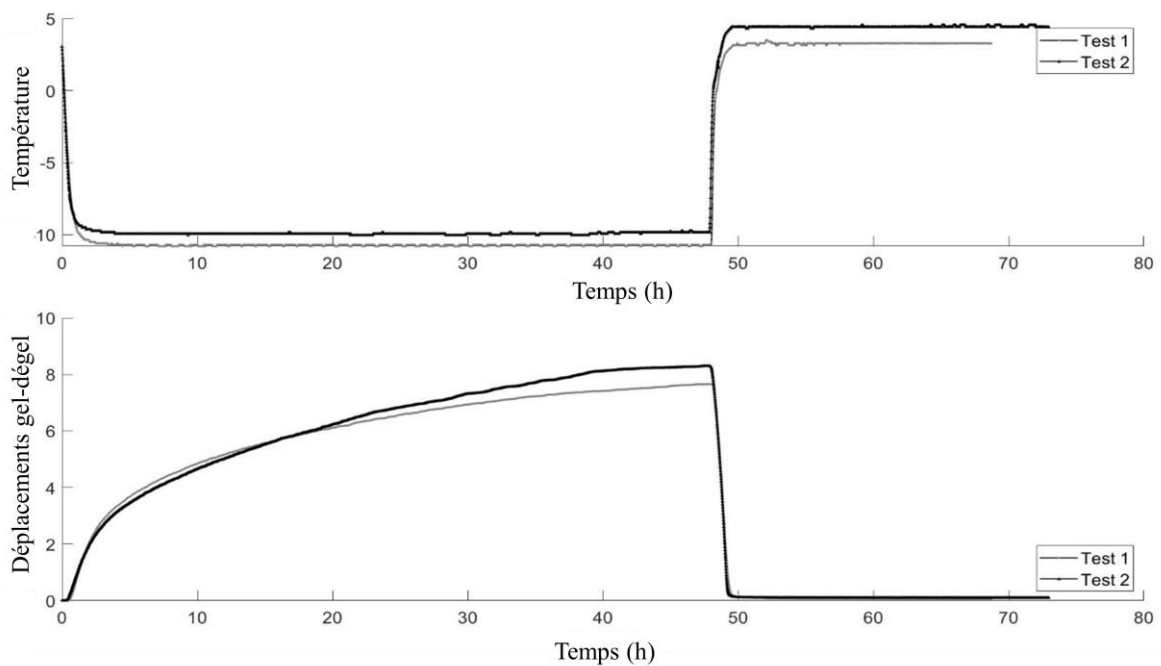


Figure 3. Essais de répétabilité réalisés avec l'œdomètre à température contrôlée ($\rho_{di} = 1,8 \text{ Mg/m}^3$).

La Figure 4 présente l'évolution des déplacements verticaux au cours du cycle pour les éprouvettes compactées à 1,7, 1,8 et 1,9 Mg/m³.

Les résultats montrent une augmentation progressive du soulèvement avec la masse volumique : 6,78 mm pour l'éprouvette compactée à 1,7 Mg/m³, 7,66 mm pour celle à 1,8 Mg/m³ et 8,12 mm pour celle à 1,9 Mg/m³. Cette tendance peut paraître contre-intuitive ; on pourrait en effet s'attendre à ce qu'un matériau plus dense, donc moins perméable, limite la migration d'eau vers le front de gel et, par conséquent, la formation de lentilles de glace.

Ce comportement paradoxal peut s'expliquer par l'interaction entre la distribution des tailles de pores et l'efficacité de la succion cryogénique. Dans les échantillons les plus lâches, le réseau de macropores interconnectés favorise un gel relativement homogène, mais limite les gradients capillaires. À l'inverse, les sols plus compacts présentent une structure mixte, composée de macro- et micropores ; les plus gros permettent la migration de l'eau, tandis que les plus fins restent partiellement non gelés, générant des pressions capillaires plus fortes et une succion plus efficace, propices à la croissance de lentilles de glace. Les profils gelés après 48 heures (Figure 5) confirment cette interprétation, l'échantillon le plus dense (1,8 Mg/m³) présente une lentille de glace nettement plus épaisse que celle observée dans le sol à 1,7 Mg/m³.

Lors du dégel, la fonte des lentilles de glace entraîne un réarrangement du squelette granulaire, dont l'amplitude dépend de la masse volumique initiale. Pour le sol le plus lâche (1,7 Mg/m³), le tassement final dépasse le soulèvement initial (-2,7%), traduisant une densification importante liée à

une reconsolidation post-dégel (Tableau 1). À 1,8 Mg/m³, le bilan volumétrique est quasi nul (+0,35%), suggérant qu'à cette masse volumique, le cycle de gel-dégel n'affecte pas significativement la compacité ni la structure du matériau. En revanche, pour la masse volumique la plus élevée (1,9 Mg/m³), un soulèvement résiduel de +2,09% est observé après dégel, indiquant cette fois un relâchement structural ; la forte compacité initiale empêche une reconsolidation complète, conduisant à un matériau légèrement plus lâche qu'avant le gel.

Ce double effet du gel-dégel sur la masse volumique a été rapporté dans plusieurs études antérieures. Chamberlain et Gow (1979) ainsi que Eigenbrod (1996) ont montré que les cycles de gel-dégel tendent à compacter les sols normalement consolidés mous, tandis que les sols initialement denses subissent un accroissement de l'indice des vides. Viklander (1998) a confirmé ce comportement sur des tills fins, qui se densifient lorsqu'ils sont lâches, mais se déstructurent lorsqu'ils sont compacts.

Les résultats obtenus ici conduisent à identifier une masse volumique critique autour de 1,8 Mg/m³, pour laquelle le sol de cette étude semble ne subir aucune déformation permanente. En dessous de ce seuil, le dégel provoque une densification nette ; au-delà, le sol tend au contraire à se délier légèrement. Ainsi, sous faible contrainte, l'état final du matériau après un cycle de gel-dégel dépend principalement de sa structure initiale, davantage que du gradient thermique ou de la durée d'exposition.

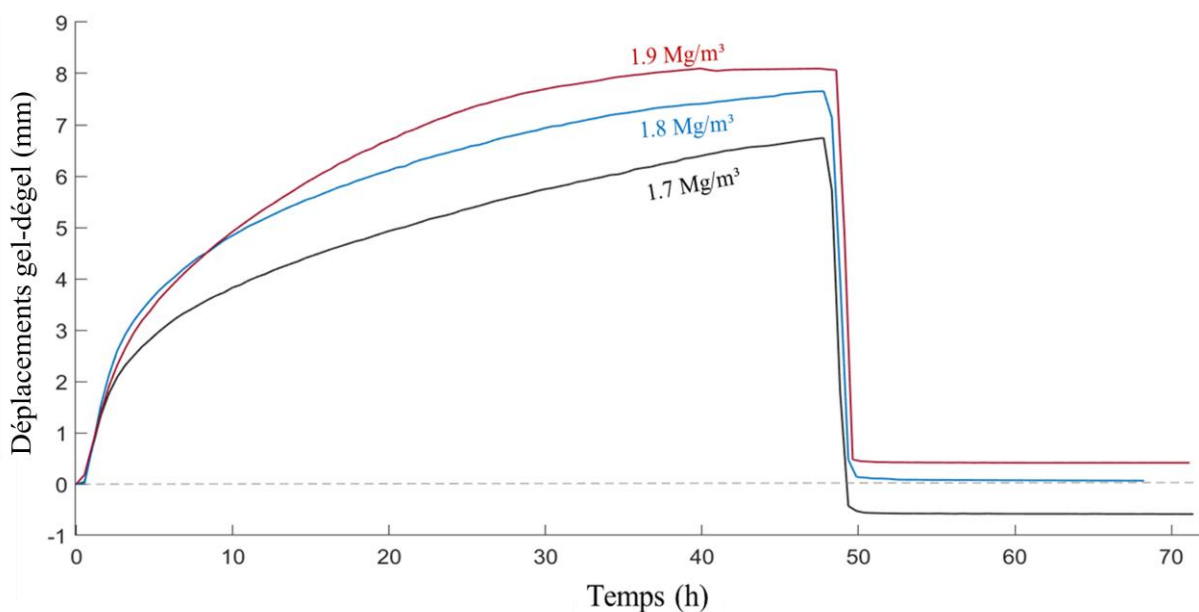


Figure 4. Déformations des éprouvettes de masses volumiques initiales de 1,7, 1,8 et 1,9 Mg/m³ au cours d'un cycle gel-dégel sous une contrainte de 30 kPa.

Tableau 1. Évolution des déformations au cours du cycle gel-dégel pour différentes masses volumiques initiales.

État initial		Phase de gel		Phase de dégel		État final	
ρ_d (Mg/m ³)	e (-)	$\Delta H/H$ (%)	$\Delta H/H$ (%)	Déformations résiduelles (%)	ρ_d (Mg/m ³)	e (-)	
1,7	0,58	+33,90	-36,60	-2,70	1,75	0,54	
1,8	0,50	+38,22	-37,87	+0,35	1,79	0,50	
1,9	0,42	+40,46	-38,42	+2,09	1,86	0,45	

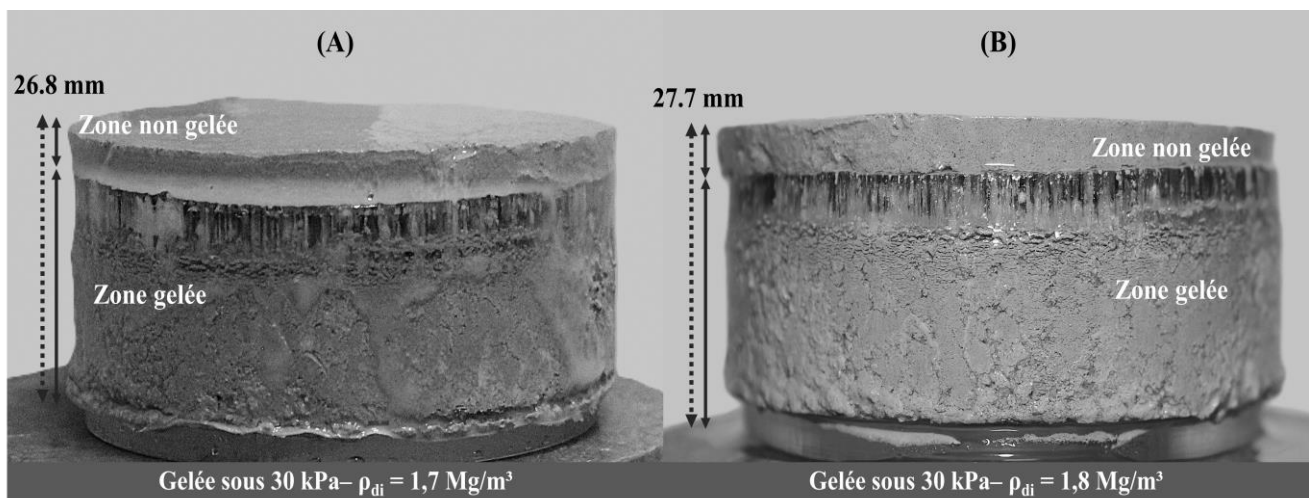


Figure 5. Représentation visuelle des éprouvettes gelées après 48 heures de congélation. (A) sol de masse volumique initiale $\rho_{di} = 1,7 \text{ Mg/m}^3$, (B) sol de masse volumique initiale $\rho_{di} = 1,8 \text{ Mg/m}^3$.

3.2 Comportement mécanique post-dégel

À l'issue du cycle thermique, les éprouvettes ont été soumises à un essai œdométrique de chargement-déchargement afin d'évaluer l'impact du gel-dégel sur les propriétés mécaniques du sol. Les résultats, présentés Figure 6, sont comparés à la courbe de référence obtenue sur un sol n'ayant pas été soumis au gel.

Pour l'échantillon le plus lâche ($\rho_{di} = 1,7 \text{ Mg/m}^3$), la diminution de l'indice des vides de 0,58 à 0,54 traduit une densification notable induite par la reconsolidation post-dégel (Tableau 1). Toutefois, malgré cette compaction, la courbe de compression post-dégel s'écarte nettement de la référence : la pente est plus marquée dès les faibles niveaux de contrainte, signe d'une compressibilité accrue et d'une réduction de la rigidité. L'éprouvette atteint le domaine plastique pour une contrainte seuil d'environ 30 kPa, alors que la pression de préconsolidation initiale est de l'ordre de 55 kPa. Le matériau, bien que plus dense, présente

donc un squelette fragilisé dont le raideur est diminuée.

Pour l'échantillon plus dense ($\rho_{di} = 1,8 \text{ Mg/m}^3$), l'indice des vides après dégel retrouve sa valeur initiale ($e = 0,50$), suggérant l'absence apparente de déformation volumique résiduelle. Toutefois, l'examen de la courbe de compression montre que le comportement mécanique reste profondément modifié, le passage en déformation plastique intervient pour des contraintes bien inférieures à la pression de préconsolidation initiale (30 kPa contre $\sigma'_p \approx 125 \text{ kPa}$). Ainsi, malgré la restitution du volume initial, le sol présente une rigidité réduite et un domaine pseudo-élastique restreint, signe d'une dégradation microstructurale non détectable à partir des seuls paramètres géométriques.

Ainsi, qu'il y ait densification ou augmentation volumique au dégel, l'ensemble des éprouvettes présente un affaiblissement mécanique après le gel-dégel. Le cycle thermique agit comme un mécanisme de destructuration ; il modifie l'arrangement interne des grains et réduit la rigidité, indépendamment de

l'évolution volumique observée pendant le cycle. Cette dissociation entre la réponse volumique et le comportement mécanique confirme que la

récupération du volume initial ne garantit en aucun cas la récupération des propriétés mécaniques.

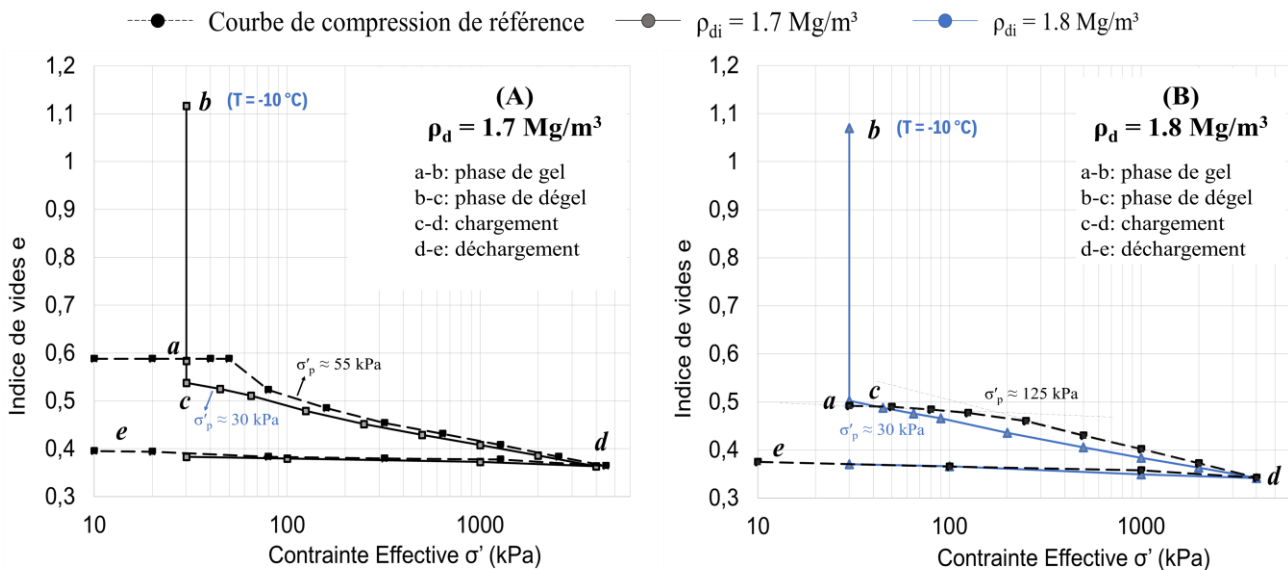


Figure 6. Évolution de l'indice des vides en fonction de la contrainte verticale pour les éprouvettes soumises à un cycle gel-dégel sous 30 kPa. (A) Éprouvette compactées à $\rho_{di} = 1,7 \text{ Mg/m}^3$; (B) Éprouvette compactées à $\rho_{di} = 1,8 \text{ Mg/m}^3$.

4 CONCLUSION

Les essais menés sous une contrainte verticale de 30 kPa ont permis d'analyser de manière détaillée l'influence de la masse volumique initiale sur le comportement d'un sable limoneux soumis à un cycle gel-dégel, ainsi que sur ses propriétés mécaniques après dégel.

Les résultats montrent que la masse volumique initiale gouverne à la fois l'amplitude des déformations pendant le cycle thermique et l'état final du matériau. Au cours du gel, l'augmentation du soulèvement observée avec la compacité s'explique par une succion cryogénique plus efficace dans les échantillons denses, où la coexistence de macro- et de micropores favorise la migration de l'eau et la formation de lentilles de glace plus marquées.

Lors du dégel, la fonte de ces lentilles induit un réarrangement du squelette granulaire dont la nature dépend de la masse volumique initiale : les sols lâches se densifient sous l'effet d'une reconsolidation importante, tandis que les sols plus compacts présentent un relâchement structurel lié à une reconsolidation incomplète.

L'analyse mécanique post-dégel révèle cependant que, quelle que soit la masse volumique initiale ou l'évolution volumique pendant le cycle, les éprouvettes subissent une dégradation nette de leurs propriétés mécaniques. Le comportement

œdométrique après dégel met en évidence une perte d'élasticité, une augmentation de la compressibilité et un passage prématuré en déformation plastique, traduisant une modification irréversible de la microstructure.

Ainsi, même lorsque le volume initial est restitué, le matériau ne retrouve pas sa rigidité d'origine, le gel-dégel agit comme un mécanisme de déstructuration, altérant durablement la réponse mécanique du sol. Cette distinction est essentielle dans le cadre de la congélation artificielle des sols. La stabilité post-dégel ne dépend pas uniquement du retour à l'état géométrique initial, mais de l'intégrité interne du squelette granulaire, susceptible d'être affaibli par les cycles thermiques successifs.

Ces résultats offrent ainsi un cadre interprétatif utile pour intégrer les effets microstructuraux du gel-dégel dans les démarches de conception et d'analyse. Ils fournissent des repères opérationnels sur l'influence de la compacité initiale et sur les conséquences mécaniques après dégel, tout en appelant, pour consolider et étendre ces tendances, à des séries complémentaires incluant des répétitions par condition et un élargissement de la plage de paramètres (gradients thermiques, niveaux de contrainte, historiques de chargement). Dans cette perspective, la démarche expérimentale présentée constitue une base solide pour affiner les critères de performance et de durabilité des sols dégelés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM D2487-17, 2020. ASTM D2487-17, “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 10.1520/D2487-17.
- Adeli Ghareh Viran P, Binal A (2018) Effects of repeated freeze–thaw cycles on physico-mechanical properties of cohesive soils. *Arab J Geosci* 11(11):250.
- Beskow G (1935) Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads. *Swedish Geological Society* 26:145.
- Chamberlain EJ, Blouin SE (1977) *Freeze-thaw enhancement of the drainage and consolidation of fine-grained dredged material in confined disposal areas: final report* (Dept. of Defense, Dept. of the Army, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Environmental Effects Laboratory, Vicksburg, Miss.).
- Chamberlain EJ, Gow AJ (1979) Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils. *Developments in Geotechnical Engineering* (Elsevier), 73–92.
- Dash JG, Rempel AW, Wettlaufer JS (2006) The physics of premelted ice and its geophysical consequences. *Rev. Mod. Phys.* 78(3):695–741.
- Eigenbrod KD (1996) Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-gained soils. *Can. Geotech. J.* 33(4):529–537.
- Hu X, Wu Y, Guo W (2019) Forensic Investigation of a Water Inrush Accident during Ground Freezing Recovery Work. *J. Perform. Constr. Facil.* 33(2):04019017.
- Johansson T (2009) *Artificial ground freezing in clayey soils Laboratory and field studies of Deformations during thawing at the Bothnia line*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Joudieh Z, Cuisinier O, Abdallah A, Masrouri F (2024) Artificial Ground Freezing—On the Soil Deformations during Freeze–Thaw Cycles. *Geotechnics* 4(3):718–741.
- Joudieh Z, Cuisinier O, Abdallah A, Masrouri F (2025) Impact of overburden pressure on the thermo-hydro-mechanical behavior of silty sand during a freeze-thaw cycle in the context of artificial ground freezing. *Engineering Geology* 350:107992.
- Nixon JF, Morgenstern NR (1973) The Residual Stress in Thawing Soils. *Canadian Geotechnical Journal* 10(4):571–580.
- Qi J, Ma W, Song C (2008) Influence of freeze–thaw on engineering properties of a silty soil. *Cold Regions Science and Technology* 53(3):397–404.
- Sturk R, Stille B (2008) Advanced Ground Freezing at the Hallandsås Project, Sweden. *Geomechanics and Tunneling* 1(5):512–517.
- Taber S (1929) Frost Heaving. *The Journal of Geology* 37(5):428–461.
- Viklander P (1997) *Compaction and thaw deformation of frozen soil: permeability and structural effects due to freezing and thawing*. Ph.D., Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- Viklander P (1998) Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw. *Can. Geotech. J.* 35(3):471–477.
- Wang B, Rong C xin, Lin J, Cheng H, Cai H bing (2019) Study on the Formation Law of the Freezing Temperature Field of Freezing Shaft Sinking under the Action of Large-Flow-Rate Groundwater. *Advances in Materials Science and Engineering* 2019:1670820.
- Zhang Ze, Pendin VV, Feng W, Zhang ZhongQiong (2015) The influence of freeze-thaw cycles on the granulometric composition of Moscow morainic clay. *Sci Cold Arid Reg* 7(3):0199–0205.