

Création d'un montage expérimental pour l'application des
cycles de gel-dégel sous confinement
pour les mélanges sol-ciment

Par

Farouk ABOUD

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 26 OCTOBRE 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. François Duhaime, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Sébastien Dubé, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Yannic A. Éthier, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Perraton, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 9 OCTOBRE 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie sincèrement mon directeur et mon co-directeur de recherche, François Duhaime et Jean-Sébastien Dubé, pour leurs conseils, leur encouragement et surtout leur support technique et matériel. Ils m'ont donné toujours la confiance de réaliser ce projet, je les remercie pour le temps qu'ils m'ont donné durant toute la période de la recherche.

Je remercie également les techniciens de l'application technologique de l'ETS, Sébastien Ménard et Alexis Vadeboncoeur, pour leur soutien technique et pratique, leur disponibilité et leurs conseils.

J'exprime mes gratitude à mes parents qui ont attendu avec patience la réalisation de ce projet, ils étaient toujours avec moi avec leur encouragement surtout durant les périodes difficiles.

CRÉATION D'UN MONTAGE EXPÉRIMENTAL POUR L'APPLICATION DE CYCLES DE GEL-DÉGEL SOUS CONFINEMENT POUR LES MÉLANGES SOL-CIMENT

Farouk ABOUD

RÉSUMÉ

Dans un climat comme celui du Canada, la résistance aux cycles de gel-dégel est un aspect important de la durabilité des matériaux. Le développement d'une procédure expérimentale réaliste pour la simulation de ce phénomène revêt une grande importance. Plusieurs normes permettent de déterminer la résistance des matériaux aux cycles de gel dégel (p.ex., ASTM C666 et D560). Ces normes ne prévoient toutefois pas de contrainte de confinement. Très peu d'études ont été réalisées sur l'influence de cette contrainte sur la résistance.

L'objectif principal du projet est de développer un dispositif expérimental permettant de reproduire en laboratoire l'impact des cycles de gel-dégel pour des mélanges sol-ciment soumis à une contrainte de confinement.

Les performances hydrauliques et mécaniques de deux mélanges sable-ciment (5 et 12 % de ciment par rapport au poids sec du sol) ont été évaluées avant et après l'exposition à des cycles de gel-dégel sans confinement suivant la norme ASTM D560. Les résultats montrent un changement de la conductivité hydraulique en fonction du nombre de cycles de gel-dégel dont la tendance varie d'un mélange à l'autre. La résistance à la compression des éprouvettes des deux mélanges tend à diminuer après les premiers cycles de gel-dégel, mais elle commence à augmenter après 12 cycles.

L'influence de la pression de confinement pendant les cycles de gel-dégel sur les propriétés hydrauliques et mécaniques des éprouvettes contenant 5 % de ciment a été vérifiée avec une cellule triaxiale modifiée pour ce projet. Les essais de perméabilité ne montrent pas d'interaction entre l'effet des cycles de gel-dégel et la pression de confinement. La pression de confinement semble affecter le comportement contrainte-déformation des éprouvettes sable-ciment par un léger décalage du pic de résistance à la rupture par rapport à la déformation axial à la rupture des éprouvettes de contrôle et des éprouvettes exposées aux cycles de gel-dégel standard. Il semble que les recettes de mélanges sable-ciment qui ont été utilisées n'étaient pas suffisamment susceptibles aux cycles de gel-dégel pour permettre d'évaluer l'influence de confinement. L'hydratation du ciment peut aussi améliorer les performances des éprouvettes sable-ciment au moment des cycles de gel-dégel et donc annuler l'effet du confinement.

Des essais de tomographie aux rayons x ont été réalisés sur les éprouvettes de deux mélanges pour vérifier l'influence des cycles de gel-dégel et de la pression de confinement sur la microstructure des mélanges sol-ciment. Les tomographies réalisées avant et après les cycles de gel-dégel avec et sans confinement ne permettent pas de montrer des changements majeurs dans la distribution de la taille des pores, ce qui tend à montrer que la plupart des variations de

VIII

conductivité hydraulique observées lors des essais de perméabilité sont dues à la fissuration, ou bien à l'inter-variabilité des éprouvettes.

Mots clés : mélange sable-ciment, cycles de gel-dégel, pression de confinement, conductivité hydraulique, cellule triaxiale modifiée, résistance à la compression, comportement contrainte-déformation, tomographie aux rayons x.

CREATION OF AN EXPERIMENTAL ASSEMBLY FOR THE APPLICATION OF FREEZE-THAW CYCLES UNDER CONFINING PRESSURE FOR SOIL-CEMENT MIXTURE

Farouk ABOUD

ABSTRACT

Resistance to freeze-thaw cycles in Canada's climate is an important aspect of material durability. The development of a realistic experimental procedure for the simulation of this phenomenon is of great importance. Several standards are used to determine the resistance of materials to freeze-thaw cycles (ASTM C666 and D560). However, these standards do not provide confining pressure. Very few studies have been done on the influence of this parameter on resistance.

The main objective of the project is to develop an experimental device to reproduce in the laboratory the impact of freeze-thaw cycles for soil-cement mixtures subjected to a confining pressure.

The hydraulic and mechanical performance of two sand-cement mixtures (5 and 12% cement based on the dry weight of the soil) were evaluated before and after exposure to freeze-thaw cycles without confining pressure according to ASTM D560. The results show a change in hydraulic conductivity as a function of the number of freeze-thaw cycles whose tendency varies from one mixture to another. The compressive strength of the specimens of both mixtures tends to decrease after the first freeze-thaw cycles, but begins to increase after 12 cycles.

The influence of the confining pressure during the freeze-thaw cycles on the hydraulic and mechanical properties of the specimens containing 5% cement was verified with a modified triaxial cell for this project. The permeability tests do not show any interaction between the effect of the freeze-thaw cycles and the confining pressure. The confining pressure appears to affect the stress-strain behavior of sand-cement specimens by a slight shift of the deformation at peak resistance compared with the axial deformation at peak of control specimens and specimens exposed to standard freeze-thaw cycles. It appears that the sand-cement mixture recipes that were used were not sufficiently susceptible to freeze-thaw cycles to assess the influence of confining pressure. Cement hydration can also improve the performance of sand-cement specimens during freeze-thaw cycles and thus eliminate the effect of confining pressure.

X-ray tomography tests were performed on the specimens of two mixtures to verify the influence of freeze-thaw cycles and confining pressure on the microstructure of soil-cement mixtures. Tomograms performed before and after freeze-thaw cycles with and without confining do not show any major changes in the pore size distribution, which tends to show

that most of the hydraulic conductivity variations observed during tests permeability are due to cracking, or to the inter-variability of the specimens.

Key words: sand-cement mixture, freeze-thaw cycles, confining pressure, permeability, modified triaxial cell, compressive strength, stress-strain behavior, x-ray tomography.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Rappels sur les contraintes dans les sols	3
1.2 Effet des cycles de gel-dégel sur les sols	4
1.2.1 Mécanisme de gel-dégel	4
1.2.2 Facteurs qui contrôlent la susceptibilité des sols aux cycles de gel-dégel..	9
1.2.2.1 Granulométrie	10
1.2.2.2 Conductivité hydraulique	11
1.2.2.3 Température du sol	12
1.2.2.4 Alimentation en eau	12
1.2.2.5 Contrainte de confinement	12
1.2.3 Effet des cycles de gel-dégel sur les propriétés des sols	14
1.2.3.1 Altération de la conductivité hydraulique	14
1.2.3.2 Changement de la microstructure	15
1.2.3.3 Changement des propriétés mécaniques	16
1.3 Effet des cycles de gel-dégel sur le béton	22
1.4 Effet des cycles de gel-dégel sur les mélanges sol-ciment	25
1.5 Dispositifs expérimentaux pour la simulation des cycles de gel-dégel	28
1.5.1 Montages de gel-dégel sans pression de confinement	29
1.5.2 Montage de gel-dégel sous une pression de confinement	33
1.5.2.1 Chargement 1D à déformation latérale empêchée	33
1.5.2.2 Montage de gel-dégel avec confinement isotrope	37
1.6 Objectifs	40
CHAPITRE 2 MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIE	41
2.1 Plan expérimental	41
2.2 Matériaux	43
2.2.1 Sol	43
2.2.2 Ciment	45
2.2.3 Eau	45
2.2.4 Préparation des mélanges	45
2.3 Essai de gel-dégel suivant la norme ASTM D560	46
2.4 Essai de perméabilité et essai de cisaillement triaxial	47
2.4.1 Préparation des éprouvettes pour la cellule triaxiale	49
2.5 Essai tomographie aux rayons X	54
2.6 Essai de gel-dégel sous confinement	56
2.6.1 Principe de l'essai	57
2.6.2 Appareillage	57
2.6.3 Procédure de l'essai	60
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	61
3.1 Comportement du mélange 1 sable-ciment lors des cycles de gel-dégel	61

3.1.1	Conductivité hydraulique.....	61
3.1.2	Propriétés mécaniques	63
3.1.2.1	Comportement contrainte-déformation.....	64
3.1.2.2	Résistance à la compression.....	65
3.1.2.3	Mode de la rupture	66
3.1.3	Microstructure.....	67
3.2	Évaluation de la durabilité au gel-dégel de mélange 2 sable-ciment.....	70
3.2.1	Conductivité hydraulique.....	70
3.2.2	Propriétés mécaniques	71
3.2.3	La microstructure.....	73
3.3	Évaluation de l'interaction entre les cycles de gel-dégel et la pression de confinement pour le deuxième mélange sable-ciment.....	74
3.3.1	La conductivité hydraulique	74
3.3.2	Les propriétés mécaniques.....	75
3.3.3	La microstructure.....	79
3.4	Évaluation de la maturation des spécimens en fonction du temps.....	80
CONCLUSION.....		85
RECOMMANDATIONS		87
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		88

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1	Facteurs qui contrôlent le mécanisme de soulèvement au gel8
Tableau 1-2	Classification de la gélivité des sols10
Tableau 1-3	Classification de la susceptibilité au gel des sols saturés selon le critère de perméabilité11
Tableau 1-4	Comparaison entre les procédures de gel-dégel de la norme ASTM D560.....30
Tableau 2-1	Types des mélanges et caractéristiques de la méthode de préparation et des essais de gel-dégel42
Tableau 2-2	Caractéristiques du Sable 'Bomix'.....44
Tableau 2-3	Propriétés du ciment (GU).....45
Tableau 3-1	Conductivité hydraulique en fonction des cycles de gel-dégel.....62

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1	Présentation schématique de contraintes dans le sol.....3
Figure 1-2	Gel du sol dans un système fermé.....6
Figure 1-3	Représentation schématique des sols gélifs et non gélifs6
Figure 1-4	Effet des cycles de gel-dégel sur la conductivité13
Figure 1-5	Changement de la microstructure des sols fins sous l'effet de gel-dégel...16
Figure 1-6	Modèle de comportement des argiles lors des cycles17
Figure 1-7	Changement de la résistance au cisaillement.....19
Figure 1-8	Courbes contrainte-déformation en fonction20
Figure 1-9	Courbes contrainte-déformation en fonction21
Figure 1-10	Changement de la résistance à la rupture de sable silteux22
Figure 1-11	Écaillage de la surface de béton.....23
Figure 1-12	Trésaillure dans les chaussées en béton24
Figure 1-13	Influence de la teneur en ciment (ciment/sol) sur26
Figure 1-14	Influence du nombre de cycles de gel-dégel sur27
Figure 1-15	Changement de la conductivité hydraulique après 3 cycles28
Figure 1-16	Spécimen dans le récipient de gel-dégel de la norme ASTM C126232
Figure 1-17	Montage de gel-dégel de la norme ASTM D5918.....33
Figure 1-18	Présentation schématique de l'appareil LTU34
Figure 1-19	Dispositif d'essai de gel-dégel en Suisse.....35
Figure 1-20	Appareil de gel-dégel.....36
Figure 1-21	Montage de gel-dégel.....37
Figure 1-22	Cellule triaxiale pour la réalisation de cycles de gel-dégel.....38

Figure 1-23	Cellule triaxiale pour l'essai de gel-dégel avec pression	39
Figure 2-1	Courbe Proctor standard du deuxième mélange sol-ciment	42
Figure 2-2	Courbe granulométrique du sable Bomix	43
Figure 2-3	Procédure de caractérisation du sable	44
Figure 2-4	Matériel de préparation des éprouvettes (a) et malaxage à la main (b)	46
Figure 2-5	Marteau de compactage	46
Figure 2-6	Éprouvettes dans la chambre de refroidissement (a)	47
Figure 2-7	Matériel utilisé pour désaérer l'eau et pour contrôler	48
Figure 2-8	Équipement nécessaire pour la mise en place	49
Figure 2-9	Éprouvette placée sur la base de	50
Figure 2-10	Relation entre la contrepression et les degrés	51
Figure 2-11	Burettes pour les essais de perméabilité	52
Figure 2-12	Appareil triaxial (Duhaime & Ethier, 2017)	53
Figure 2-13	Schématisation du principe de la tomographie rayons X	54
Figure 2-14	Nikon XT H 225 pour la tomographie aux rayons X	55
Figure 2-15	Essai tomographie rayons x sur un éprouvette	56
Figure 2-16	Présentation schématique du montage de gel-dégel	57
Figure 2-17	Composantes du montage de gel-dégel	58
Figure 2-18	Système d'alimentation de la pression	58
Figure 2-19	Afficheur de la température	59
Figure 2-20	Réservoirs d'eau et de fluide de confinement	60
Figure 2-21	Cellule de gel placée dans le congélateur	60
Figure 3-1	Changement de la conductivité hydraulique du premier mélange	63
Figure 3-2	Courbes contraintes-déformations du premier mélange sable-ciment	65

Figure 3-3	Résistance à la compression en fonction du nombre	66
Figure 3-4	Mode de rupture des éprouvettes du premier mélange sable-ciment.....	67
Figure 3-5	Microstructure de l'éprouvette de contrôle.....	67
Figure 3-6	Microstructure après 12 cycles de gel-dégel.....	68
Figure 3-7	Détérioration à la base de spécimen.....	68
Figure 3-8	Dégradation de la surface du spécimen	69
Figure 3-9	Changement de conductivité hydraulique de deuxième mélange.....	70
Figure 3-10	Courbes contrainte-déformation du deuxième mélange sable-ciment.....	72
Figure 3-11	Résistance à la compression en fonction des cycles	72
Figure 3-12	Mode de rupture des spécimens du deuxième mélange.....	73
Figure 3-13	Microstructure de l'éprouvette de contrôle.....	73
Figure 3-14	Microstructure après 12 cycles de gel-dégel.....	74
Figure 3-15	Effet de la pression de confinement sur le changement de la conductivité hydraulique sous des conditions de gel-dégel.....	75
Figure 3-16	Effet du confinement sur la résistance à la compression	76
Figure 3-17	Interaction entre l'effet de gel-dégel et la pression de confinement sur la résistance au cisaillement après 3 cycles de gel-dégel.....	77
Figure 3-18	Interaction entre l'effet des cycles de gel-dégel et la pression de confinement sur la résistance au cisaillement après 12 cycles de gel-dégel.....	78
Figure 3-19	Effet du confinement sur la résistance à la compression	78
Figure 3-20	Mode de rupture après des cycles	79
Figure 3-21	Photos Ct-scan d'un spécimen confiné dans une cellule triaxiale.....	80
Figure 3-22	Évaluation de l'effet du temps du cure sur la conductivité hydraulique de deuxième mélange sable-ciment	81
Figure 3-23	Évaluation de l'effet du temps de cure sur le comportement contrainte-déformation du deuxième mélange sable-ciment	82

Figure 3-24	Évaluation de l'effet du temps de cure sur la résistance.....	82
-------------	---	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CCP	Pression de confinement constant
CD	Essai consolidé et drainé
CRREL	Cold Regions Research and Engineering Laboratory
C/S	Rapport ciment/sol
E/C	Rapport eau/ciment
UCS	Résistance à la compression uniaxiale
USCS	Système de classification unifiée des sols
SSS	État saturé à surface sèche
VCP	Pression de confinement variable

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

°C	Degré Celsius
cm/s	Centimètre/seconde
CH	Argile de grande plasticité
GC	Gravier argileux
GF	Gravier silteux
CL	Argile silteuse de faible plasticité
GP	Gravier mal gradué
GU	Ciment à usage général
GW	Gravier bien gradué
SC	Sable argileux
SF	Sable avec des grains fins
SP	Sable mal gradué
SW	Sable bien gradué
h	Heure
kPa	Kilopascal
kV	Kilovolt
K_{sat}	Perméabilité saturée
mm	Millimètre
min	Minute
MPa	Mégapascal
MH	Silt de grande plasticité
ML	Silt de faible plasticité

OH	Argile organique plasticité moyenne à grande
OL	Silt organique de faible plasticité
m/s	Mètre/seconde
μm	Mcromètre
%	Pourcentage
1D	1 Dimension
2D	2 Dimension
3D	3 Dimension

INTRODUCTION

Les cycles de gel-dégel affectent souvent la stabilité des ouvrages (bâtiments, barrages) et détériorent les structures routières suite à la dégradation de l'infrastructure et la perte de la performance mécanique.

Dans les régions froides, les problèmes associés aux cycles de gel-dégel sont nombreux et peuvent être classés en différentes catégories telles que les problèmes liés à la résistance des sols et le soulèvement au gel. L'étude de ces cycles a donc un intérêt général.

L'approfondissement des connaissances sur les effets du gel sur les comportements des ouvrages et des sols permet le développement de bâtiments et d'ouvrages durables. Le développement d'une procédure expérimentale réaliste pour la simulation de cycles de gel-dégel revêt donc une grande importance, surtout dans un climat froid comme celui du Canada où la résistance aux cycles de gel-dégel est un aspect important de la durabilité des matériaux.

La résistance des matériaux aux cycles de gel-dégel est souvent déterminée suivant des essais standardisés tel que ceux des normes ASTM. Cependant ces essais ne prévoient pas de contrainte de confinement.

Bien que plusieurs chercheurs aient effectués des essais de gel-dégel sous confinement sur différents types de sol (Bilodeau, Doré, & Schwarz, 2011; Létourneau, 2012; Poupart, 2013; Schwarz, 2009; Simonsen & Isacsson, 2001; Yu, Chen, Li, Zhou, & Cai, 2015), très peu d'études ont été réalisées sur l'influence de ce paramètre sur la résistance au gel-dégel. Par exemple, Simonsen & Isacsson (2001) ont évalué la résistance au gel-dégel de trois types de sol sous une pression de confinement variable et une pression de confinement constante. Les résultats montrent que l'impact de confinement peut être significatif sur les propriétés mécaniques des sols durant les cycles de gel-dégel.

La simulation de la résistance des matériaux aux cycles de gel-dégel sous confinement est plus réaliste que les procédures décrites dans les normes ASTM. Le fait de réaliser des essais au laboratoire dans des conditions proches des conditions naturelles des sols permet d'avoir des résultats plus concrets, surtout lorsque les recherches visent à définir des critères de conception des matériaux résistants au gel.

L'objectif principal de cette recherche est le développement d'un montage expérimental capable de simuler le gel-dégel sous confinement. Les objectifs secondaires correspondent à montrer l'effet du confinement sur la microstructure et les caractéristiques hydrauliques et mécaniques des mélanges sol-ciment. Le renforcement des sols par le ciment est une technique souvent utilisée dans le domaine de la géotechnique routière et la géotechnique environnementale (stabilisation des sols contaminés). Elle vise à améliorer les performances mécaniques des sols en augmentant sa résistance et en diminuant sa conductivité hydraulique.

Ce mémoire se subdivise en trois chapitres, le premier chapitre correspond à la revue de la littérature sur le mécanisme de gel-dégel dans les sols, l'influence des cycles de gel-dégel sur les sols, le béton et les mélanges sol-ciment et les principaux montages expérimentaux de gel-dégel utilisés dans les recherches précédentes. Le deuxième chapitre présente le matériel de la recherche et la méthodologie alors que le dernier chapitre détaille l'interprétation des résultats.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre trace un portrait de l'influence des cycles de gel-dégel sur les sols, le béton et les mélanges sol-ciment. Le chapitre débute avec une définition des notions de contraintes qui peuvent être appliquées sur un sol, puis une présentation des travaux de recherche sur les sols et le béton en raison du grand nombre de projets de recherche qui ont été réalisés sur ces matériaux. Les facteurs qui contrôlent la susceptibilité aux cycles de gel-dégel et l'influence de ces cycles sur les propriétés mécaniques, hydrodynamiques et physico-chimiques des matériaux sont présentés. Les résultats propres aux mélanges sol-ciment sont ensuite recensés. Un bref sommaire des dispositifs expérimentaux et des procédures utilisées pour simuler les cycles de gel-dégel sont finalement présentés à la fin de ce chapitre.

1.1 Rappels sur les contraintes dans les sols

On considère une éprouvette de sol sur laquelle s'exercent des forces (figure 1-1).

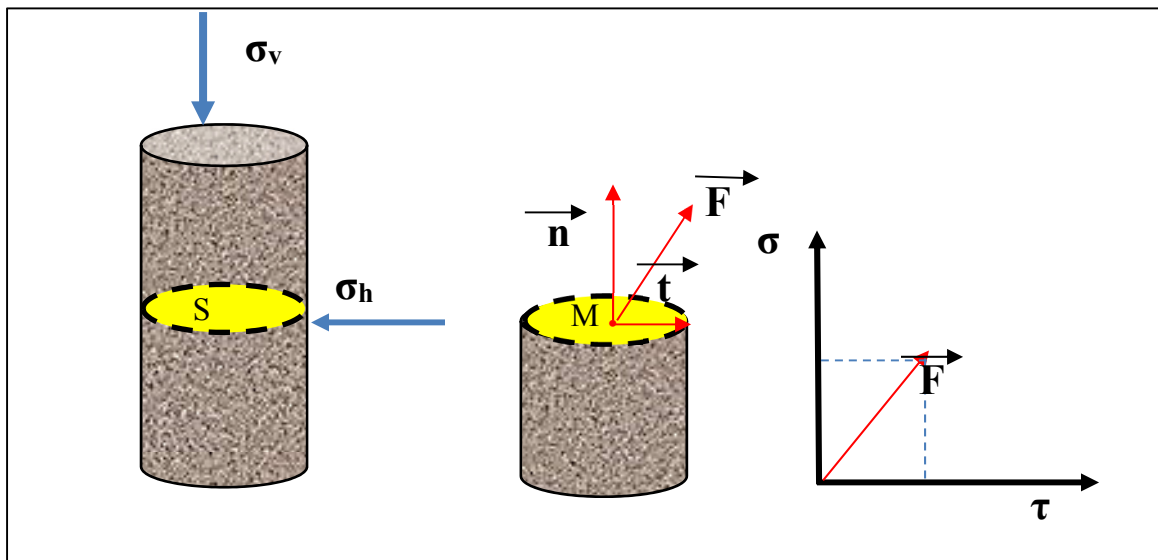


Figure 1-1 Présentation schématique de contraintes dans le sol

On choisit une section de l'éprouvette de surface S qui est soumise à une force F . La contrainte au point M est définie par le rapport entre la force F et la surface S . cette contrainte se décompose en une contrainte normale σ et une contrainte tangentielle τ . Pour déterminer l'état de contrainte au point M , il suffit de connaître les composantes des forces s'exerçant sur les faces d'un cube centré autour du point M . Parmi l'ensemble des facettes qui peuvent être définies autour du point M , il existe 3 plans pour lesquels la composante tangentielle de la force est nulle. Ces plans sont appelés plans principaux et les contraintes correspondantes sont les contraintes principales notées, σ_1 = contrainte principale majeure, σ_2 = contrainte principale intermédiaire et σ_3 = contrainte principale mineure. Dans le contexte de l'essai triaxial, on définit la contrainte de confinement qui correspond à σ_3 et on définit aussi la contrainte déviatorique qui correspond à $(\sigma_1 - \sigma_3)$ et qui présente la contrainte appliquée par le piston de surcharge.

1.2 Effet des cycles de gel-dégel sur les sols

1.2.1 Mécanisme de gel-dégel

Les sols peuvent être classés en deux familles selon leur comportement au gel (Nguyen, 2015) :

- (i) les sols non gélifs qui présentent un léger gonflement suite au gel sans variation de leur structure et de leur teneur en eau. Le degré de gonflement de cette classe est directement proportionnel à la saturation initiale du sol.
- (ii) les sols gélifs qui se caractérisent par un gonflement de grande ampleur suite au gel (phénomène de géligonflement).

Le phénomène de soulèvement varie selon la nature des sols. Les petites aiguilles de glace qui se forment dans les sols meubles et secs se développent considérablement dans les sols humides pour entraîner un soulèvement important n'est pas observé dans le premier cas.

La formation des lentilles des glaces permet un changement de la structure des sols gelés. Les lentilles des glaces formées sont alimentées par l'eau qui se déplace vers le front de gel. Ce phénomène est souvent appelé la succion cryogénique. Un gradient de succion cryogénique se

forme donc dans les sols gélifs. Ce gradient facilite la migration de l'eau vers le front de gel, et favorise la formation des lentilles de glace séparées et non continues.

Ce phénomène a été confirmé par une étude expérimentale de Henin (1957). En effet, deux types de sol ont été évalués dans des conditions de gel : un sol de limon constitué de 18 % d'argile et 3 % de matière organique et un sol calcaire de 15 % d'argile et 10 % de carbonate de calcium. Les résultats obtenus montrent un changement d'humidité dans les parties supérieures de deux sols. Ces résultats confirment donc que le mécanisme de gel se traduit par un mouvement ascendant d'eau. Le phénomène est plus accentué lorsque la nappe d'eau est proche de la surface du sol.

La figure 1-2 schématise les mécanismes qui se produisent dans le sol durant le gel lorsque la température à la surface du sol est inférieure à celle plus en profondeur. Un phénomène d'extraction de chaleur se produit. Un plan de gel se développe à la profondeur où la température est de 0 °C. Une zone de sol partiellement gelé nommée la frange gelée sépare les parties gelée et non gelée du sol. Des processus thermodynamiques dans la frange gelée permettent la génération de forces de succion de l'eau dans les pores. Ces succions produisent un gradient hydraulique qui permet à l'eau de migrer de la partie non gelée vers le sol gelé. La migration de l'eau change la distribution des teneurs en eau dans le sol.

Padilla & Villeneuve (1989) définissent le sol gélif comme un sol susceptible de changer son volume sous l'effet du gel. Ce changement de volume est souvent accompagné par une perte de la capacité portante de sol durant la phase de dégel.

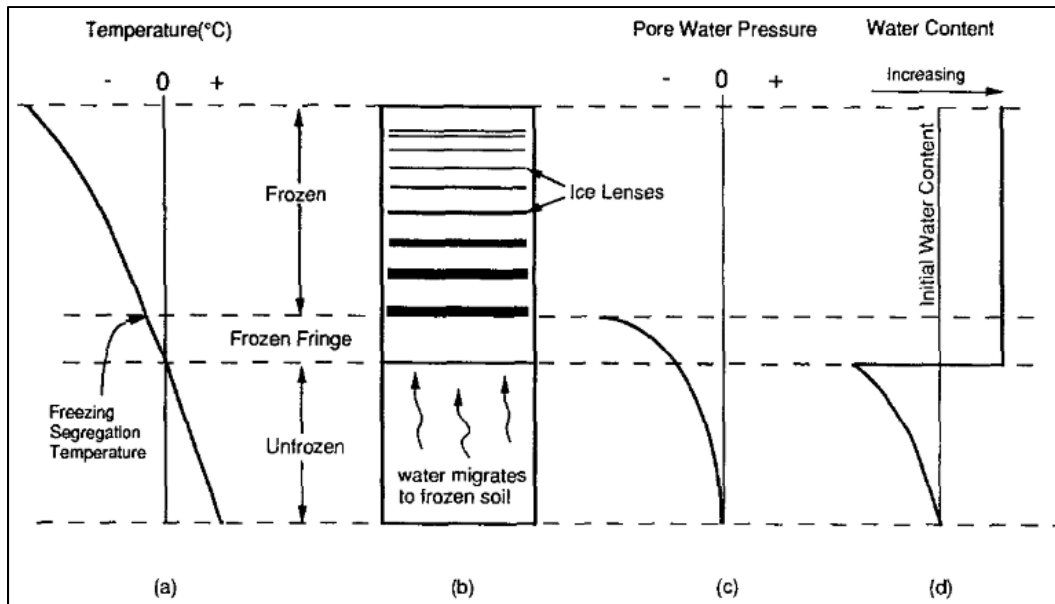


Figure 1-2 Gel du sol dans un système fermé
Tirée de Benson & Othman (1993)

La figure 1-3 schématise les différents comportements des sols face au gel. Il est clair que les sols gélifs sont plus influencés par le gel et présentent divers mécanismes tel que la succion d'eau, le développement des lentilles de glace ainsi que le gonflement et le changement de la structure.

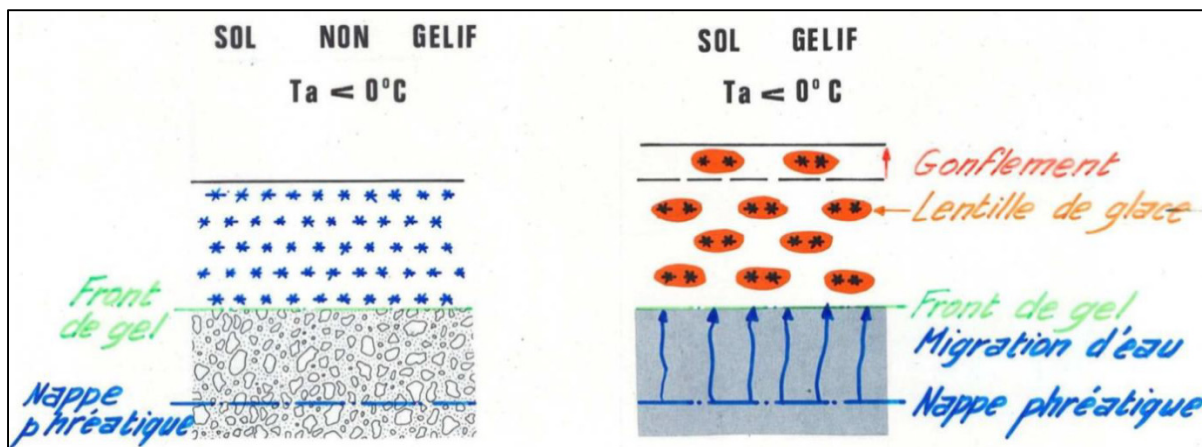


Figure 1-3 Représentation schématique des sols gélifs et non gélifs
Tirée de Livet (1981)

Après plusieurs cycles de gel-dégel, les liaisons intergranulaires des particules des sols se détruisent (gélifraction). Cette détérioration est due en partie à l'augmentation de volume suite à la congélation de l'eau. Deux phénomènes majeurs expliquent alors la détérioration des sols sous des conditions climatiques froides : (i) L'augmentation du volume du sol à cause de la solidification de l'eau dans les pores surtout pour les sols saturés où la glace permet le gonflement de l'échantillon jusqu'à 9 % de son volume (Létourneau, 2012), et (ii) la circulation de l'eau non gelée dans les pores interconnectés (Fabbri, 2006).

Le soulèvement au gel se traduit par l'apparition de lentilles de glace dans le sol qui favorisent une augmentation de volume (Anderson & Morgenstern, 1973; Chamberlain, 1981a; Marion, 1995). Trois conditions permettent le développement de ce phénomène : (i) une température sous le point de congélation qui se prolonge dans le temps, (ii) un sol susceptible au gel, et (iii) une source d'alimentation en eau. Ces trois conditions vont être discutées plus en détail dans les prochaines sections.

Différents modèles ont été développés afin d'expliquer le mécanisme de soulèvement au gel (Black & Hardenberg, 1991; Chamberlain, 1981a; Horiguchi, 1987; Nakano, 1990). Les modèles les plus utilisés sont le modèle de soulèvement capillaire, le modèle de soulèvement secondaire et le modèle de potentiel de ségrégation (SP).

Les différents modèles sont basés sur les mêmes facteurs qui contrôlent le mécanisme de soulèvement (Chamberlain, 1981a; Marion, 1995). Le tableau 1.1 résume les facteurs pris en considération durant le développement des différents modèles.

Tableau 1-1 Facteurs qui contrôlent le mécanisme de soulèvement au gel
Modifié de Marion (1995)

<i>Facteurs de soulèvement au gel</i>	<i>Effet sur le soulèvement</i>
Texture de sol	Les textures fines sont plus susceptibles au soulèvement au gel (Silt > Argile > Sable).
Dimension des pores	Le diamètre des pores contrôle la conductivité hydraulique, le soulèvement capillaire et la succion du sol et par conséquent la migration d'eau vers le front de gel.
Taux d'élimination de la chaleur	Un taux intermédiaire favorise un taux maximal de soulèvement au gel.
Gradient de température	Ce gradient contrôle la perméabilité et l'épaisseur de la frange de gel.
Saturation	Les sols saturés sont plus susceptibles au gel.
La contrainte de surcharge	Le soulèvement est inversement proportionnel à la surcharge.

Les essais de gel-dégel peuvent être simulés dans deux systèmes différents (système fermé et système ouvert). Le choix du système dépend des conditions *in situ* du sol dont on veut évaluer le comportement au gel. Le système fermé ne reçoit pas de flux d'eau supplémentaire. Le volume d'eau initial dans l'éprouvette reste donc constant. Ce système reproduit le scénario d'un sol où le niveau de la nappe phréatique est très profond par rapport à la tranche de sol gelée. Dans ce type de sol, les cristaux de glace se forment entre les grains et permettent la cimentation de ces éléments granulaires. Suite à une redistribution des molécules d'eau, la teneur en eau du sol augmente et la masse volumique sèche diminue dans la partie proche du front de gel. Le système ouvert est toujours alimenté en eau à travers une source extérieure. Donc des lames de glace se forment. Ce système est l'équivalent d'un sol où la nappe

phréatique est proche de la zone gelée et l'eau converge vers le front de gel ce qui permet la formation de lentilles de glace.

1.2.2 Facteurs qui contrôlent la susceptibilité des sols aux cycles de gel-dégel

L'étude de la susceptibilité des sols au gel est de grande importance surtout pour les problèmes de soulèvement au gel dans les travaux d'ingénierie. En fait, la stabilité des bâtiments, des routes, des tunnels et des pipelines dans les régions froides dépend de la susceptibilité des sols d'infrastructure au gel.

Les facteurs responsables de la sensibilité des sols au gel-dégel peuvent être classés en deux familles : 1) les facteurs liés aux propriétés du sol qui définissent sa gélivité et sa vulnérabilité aux variations de température. (p. ex. granulométrie et perméabilité), et 2) les facteurs externes (p. ex. température extérieure et alimentation en eau). L'absence de l'une de ces familles de facteurs peut contribuer à une diminution de l'effet du gel.

Plusieurs chercheurs ont tenté de définir les propriétés des sols et les facteurs externes qui contrôlent la susceptibilité au gel (p.ex. Chamberlain, 1981a; Kaplar, 1974). Au niveau des propriétés du sol, les travaux de ces chercheurs ont porté principalement sur la granulométrie, la conductivité hydraulique, la minéralogie, la limite de liquidité, la teneur en eau non gelée et les propriétés physico-chimiques de l'eau interstitielle. Les facteurs dominants sont la granulométrie et la conductivité hydraulique. Les principaux facteurs externes qui contrôlent la sensibilité des sols au gel sont la température, l'alimentation en eau et la contrainte de confinement (Chamberlain, 1981a). L'influence de ces facteurs sera discutée dans les prochaines sections.

1.2.2.1 Granulométrie

Les sols fins sont généralement plus susceptibles aux cycles de gel-dégel que les sols grossiers. Les sols à grains fins favorisent la formation des lentilles de glace au contact avec le front de gel. Le développement des lentilles de glace engendre le soulèvement des sols et la détérioration des structures sus-jacentes (Létourneau, 2012). Un sol gélif se caractérise donc par une granulométrie assez fine capable de développer des suctions capillaires.

La classification de la gélivité des sols a été étudiée par plusieurs chercheurs. Différentes classifications ont été proposées en fonction de la granulométrie des particules de sol. Cependant, cette classification ne permet pas de quantifier la susceptibilité au gel. La classification de Casagrande (1948) présentée dans le tableau 1-2 a été établie en fonction du système de classification unifié des sols (USCS). Cette classification donne des indices sur le comportement au gel, mais elle reste peu utile pour la conception.

Tableau 1-2 Classification de la gélivité des sols
Modifié de Casagrande (1948)

Type de sol	Symbole	Effet potentiel de gel
Gravier bien gradué, mélange gravier-sable, pas de grains fins	GW	Aucun à très léger
Mélange gravier-sable bien gradué, avec argile	GC	Moyen
Gravier mal gradué	GP	Aucun à très léger
Gravier avec des grains fins, gravier silteux	GF	Léger à moyen
Sable bien gradué, pas de grains fins	SW	Aucun à très léger
Sable bien gradué, avec argile	SC	Moyen
Sable mal gradué, peu de grains fins	SP	Aucun à très léger
Sable avec des grains fins	SF	Léger à élevé
Silts avec sable très fin	ML	Moyen à très élevé

Tableau 1-2 (Suite)

Type de sol	Symbole	Effet potentiel de gel
Argile silteuse de faible plasticité	GL	Moyen à élevé
Silt organique, mélange silt-argile organique	OL	Moyen à élevé
Silt inorganique et sable très fin	MH	Moyen à très élevé
Argile inorganique de grande plasticité	CH	Moyen
Argile organique de moyenne plasticité	OH	Moyen

1.2.2.2 Conductivité hydraulique

Selon Dysli (1991), la migration de l'eau vers le front de gel est fonction de la succion et de la conductivité hydraulique des sols. L'étude de Önalp (1970) propose plutôt un critère de perméabilité des sols saturés pour évaluer leur susceptibilité au gel. Ainsi, dans un sol gélif, une plus grande conductivité hydraulique empêche le transport de l'eau vers les cristaux de glace par succion capillaire (tableau 1-3).

Tableau 1-3 Classification de la susceptibilité au gel des sols saturés selon la conductivité hydraulique
Tiré de Önalp (1970), cité par Nguyen (2015)

Sensibilité au gel	K_{sat} (m/s)
Très gélif	$1 \times 10^{-9} < K_{sat} < 1.3 \times 10^{-9}$
Gélif	$1.3 \times 10^{-9} < K_{sat} < 1.7 \times 10^{-6}$
Peu gélif	$1.7 \times 10^{-6} < K_{sat} < 1 \times 10^{-5}$
Non gélif	$K_{sat} > 10^{-5}$

1.2.2.3 Température du sol

La formation de lentilles de glace dans un sol nécessite une température sous le point de congélation. Le gel pénètre alors progressivement selon une vitesse qui dépend des températures en surface, de la température de l'air ambiant, de la teneur en eau et des propriétés thermiques du sol (Létourneau, 2012). La différence de température entre la surface de sol et sa structure interne entraîne un transport de chaleur du bas du sol vers sa surface. Ce phénomène permet la progression du front de gel en profondeur (Létourneau, 2012).

1.2.2.4 Alimentation en eau

L'alimentation en eau est un facteur important dans le mécanisme de gel des sols. La présence d'une nappe phréatique proche de la surface favorise la formation des lentilles de glace dans le sol dans des conditions climatiques froides. Une alimentation en eau permet l'accroissement des lentilles au front de ségrégation. Le transport du flux d'eau se manifeste par une succion importante qui se forme à la base de la lentille de glace.

Le système eau-glace-sol peut être considéré comme un tube capillaire. Donc, la succion à la base de la lentille de glace augmente avec la diminution de volume des pores, le film de l'eau non gelée (eau libre) devient de plus en plus réduit avec la diminution de la température (Létourneau, 2012).

1.2.2.5 Contrainte de confinement

Les résultats de Chamberlain & Gow (1979) montrent que l'effet de gel-dégel sur l'indice des vides et sur la conductivité hydraulique des sols dépend de la contrainte effective appliquée durant l'essai de gel-dégel. Le degré d'influence de la contrainte effective change aussi en fonction des propriétés de sol.

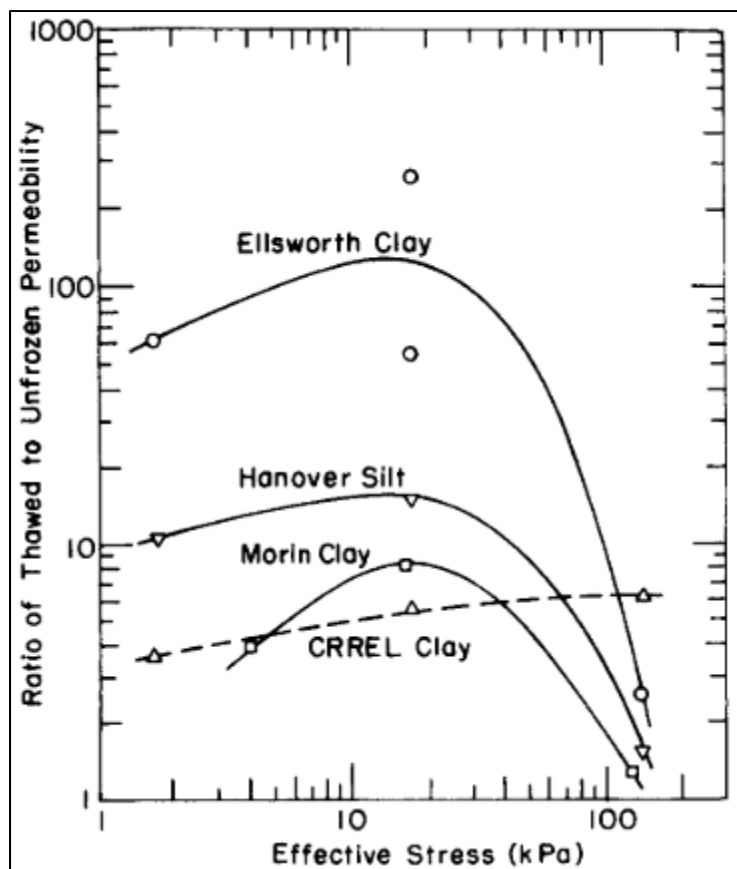


Figure 1-4 Effet des cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique en fonction de la contrainte effective
Tirée de Chamberlain & Gow (1979)

La figure 1-4 montre le rapport entre les valeurs de conductivité hydraulique avant et après une série de cycles de gel-dégel. On remarque que la conductivité hydraulique des argiles d'Ellsworth augmente considérablement suite à des cycles de gel-dégel pour des contraintes effectives inférieures à 20 kPa. L'augmentation est beaucoup plus faible quand la contrainte effective est supérieure à 100 kPa. La même tendance est observée pour les silts de Hanover et l'argile de Morin mais avec une augmentation plus faible que l'argile d'Ellsworth. La conductivité hydraulique de l'argile CRREL continue à augmenter en fonction des contraintes effectives.

L'analyse microscopique de la microstructure de l'argile de Morin montre que l'épaisseur des lentilles de glace et le diamètre des polygones de fissuration diminuent à des contraintes

effectives élevées. Par contre la fréquence d'apparition des petites lentilles augmente. À des contraintes d'environ 128 à 140 kPa, la fissuration disparaît totalement pour les argiles de Morin et Ellsworth.

L'article de Konrad & Morgenstern (1982) résume les recherches qui ont évalué l'effet de la pression sur le mécanisme de gel-dégel dans les sols (p. ex. Arvidson & Morgenstern, 1977; Hill, 1977). Cet article présente les résultats de l'essai de gel unidimensionnel en fonction de la surcharge appliquée afin de mettre en évidence l'effet de la surcharge sur les caractéristiques de la frange gelée (potentiel de ségrégation, température de ségrégation et perméabilité). Lorsqu'une surcharge est appliquée sur un échantillon en condition de gel et sous un système ouvert, le soulèvement au gel est inhibé. L'effet de la surcharge sur le potentiel de ségrégation se manifeste par la réduction de la perméabilité et un abaissement de la température de ségrégation dans la frange de gel. Cet article montre l'existence d'une pression d'arrêt qui rend impossible tout écoulement d'eau vers le front de gel et par conséquent empêche la formation des lentilles de glace.

1.2.3 Effet des cycles de gel-dégel sur les propriétés des sols

L'effet des cycles de gel-dégel sur les propriétés mécaniques, hydrauliques et structurales des sols a été évalué par plusieurs auteurs. Chamberlain & Gow (1979), Konrad & Samson (2000) et Leroueil et al. (1991) ont travaillé sur les changements de la microstructure des sols suite aux cycles de gel-dégel. Graham & Au (1985) ont évalué la perte de résistance des argiles sous l'effet des cycles de gel-dégel. Benson & Othman (1993), Konrad (1989) et Wong & Haug (1991) ont évalué l'altération de la conductivité hydraulique sous l'effet des cycles de gel-dégel.

1.2.3.1 Altération de la conductivité hydraulique

Chamberlain & Gow (1979) ont évalué la conductivité hydraulique sous des conditions de gel-dégel pour quatre sols à grains fins dont l'indice de plasticité varie entre 0 et 20. Les résultats montrent que la conductivité hydraulique augmente en fonction du nombre de cycles de gel-

dégel, surtout pour les sols qui ont un indice de plasticité élevé. L'augmentation de la conductivité hydraulique des sols à fraction argileuse élevée est expliquée par la formation des fissures verticales. Pour les sols à grains grossiers, Chamberlain & Gow (1979) explique l'augmentation de la perméabilité par une diminution du volume des agrégats de particules argileuses qui occupent les vides entre les plus grosses particules. Le changement de phase eau-glace permet aussi l'augmentation du volume initial des pores et par conséquent l'augmentation de la vitesse d'écoulement d'eau.

Benson & Othman (1993) ont évalué la conductivité hydraulique des argiles glaciaires caractérisées par une limite de liquidité et un indice de plasticité d'environ 32 et 14 respectivement. Les essais de conductivité hydraulique sont appliqués sur le terrain ainsi qu'au laboratoire après des cycles de gel-dégel dans le but de comparer les résultats. Une augmentation de la conductivité hydraulique d'environ deux ordres de magnitude est observée à la surface des spécimens et environ 150 mm sous le plan de gel. L'augmentation de la conductivité hydraulique à la surface est attribuée à l'apparition des fractures verticales et horizontales. En dessous de la zone gelée, la dessiccation provoquée par la redistribution de l'eau est responsable de l'augmentation observée de la conductivité hydraulique.

La conductivité hydraulique peut augmenter jusqu'à 100 fois chez les sols argileux. Cette augmentation est souvent fonction du nombre de cycles de gel-dégel. Par contre les sols qui se caractérisent par une conductivité hydraulique initiale élevée ne présentent pas un changement considérable (Eigenbrod, 1996).

1.2.3.2 Changement de la microstructure

L'effet des cycles de gel-dégel sur la microstructure des sols dépend de leur nature. Les sols friables et lâches deviennent plus denses alors que les sols denses deviennent plus lâches (Chamberlain & Gow, 1979; Eigenbrod, 1996; Konrad, 1989; Qi, Vermeer, & Cheng, 2006). Selon Chamberlain and Gow (1979), le rôle des particules argileuses est crucial dans le changement de la microstructure après plusieurs cycles de gel-dégel. Durant le gel, l'épaisseur

de la couche d'eau qui entoure les particules argileuses diminue, ce qui permet la fissuration et l'augmentation de la conductivité hydraulique du sol. Suite au réarrangement, les particules argileuses (figure 1.5) occupent moins d'espace et laissent des vides favorisant l'augmentation de la conductivité hydrauliques (Chamberlain & Gow, 1979).

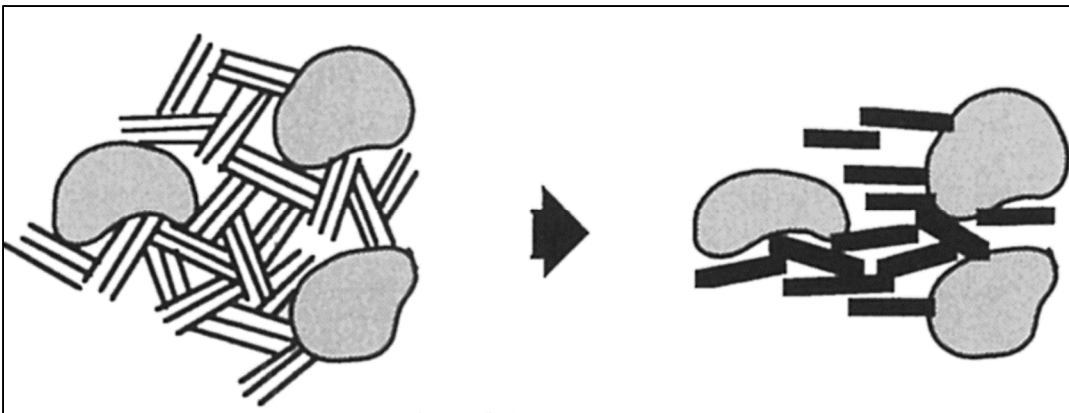


Figure 1-5 Changement de la microstructure des sols fins sous l'effet de gel-dégel
Tirée de Chamberlain and Gow (1979)

Chamberlain and Gow (1979) ont montré aussi que les succions provoquées par les cycles de gel-dégel contribuent au changement de la structure du sol ainsi que l'apparition de fissures verticales dans les sols.

1.2.3.3 Changement des propriétés mécaniques

La résistance du sol après les cycles répétitifs de gel-dégel peut augmenter ou diminuer selon la nature du sol et son état initial. Les cycles de gel-dégel changent souvent la configuration des particules des sols ce qui amène un changement des performances mécaniques (Wang et al., 2005).

Graham & Au (1985) et Leroueil et al. (1991) ont montré que la résistance au cisaillement des sols argileux naturels en condition non drainée diminue après un certain nombre des cycles de gel-dégel. Alkire & Morrison (1983) ont trouvé les mêmes résultats pour du limon faiblement compacté.

La figure 1-6 montre un modèle de comportement mécanique des argiles élaboré par Chamberlain & Gow (1979). Le modèle explique la compression de l'argile lors des cycles de gel-dégel. Au départ, le sol est normalement consolidé (point a). Le changement du volume d'eau associé au passage de l'état liquide à l'état solide et le changement de volume dû aux suctions dans la zone de ségrégation permettent l'expansion du sol marquée sur la figure par une augmentation de l'indice des vides (a vers b). La suction qui contribue au développement des lentilles de glace augmente la contrainte effective dans le sol. Les bandes discrètes d'argile et de glace qui se forment au moment de propagation du front de gel vont être surconsolidées engendrant l'affaissement du sol marqué sur la courbe par une diminution de l'indice de vide (b vers a vers b').

La fonte du gel expulse une grande quantité d'eau capable de décharger l'argile (b' vers c) et diminue son indice de vide à une valeur inférieure à sa valeur initiale. Ce modèle est capable d'expliquer la consolidation des sols argileux durant le gel ainsi que les tassements durant le dégel.

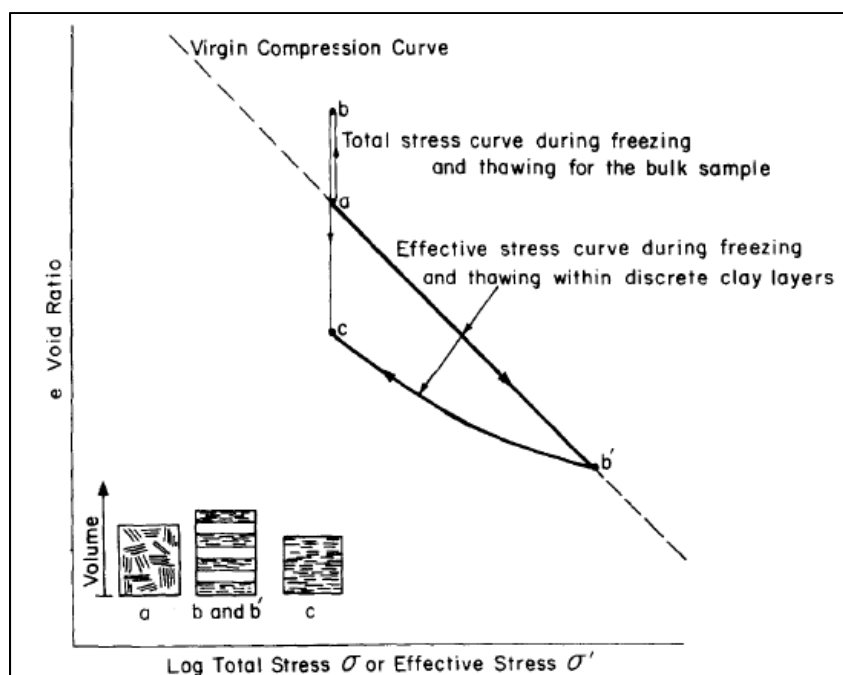


Figure 1-6 Modèle de comportement des argiles lors des cycles de gel-dégel
Tirée de Chamberlain & Gow (1979)

Simonsen et al. (2002) ont montré que le module réversible diminue de 25% à 60% en fonction du nombre des particules argileuses suite à des cycles successifs de gel-dégel. Le module réversible M_R est défini comme le rapport entre la contrainte déviatorique σ_d et la déformation réversible ξ_r . Généralement il est utilisé dans le contexte de la géotechnique routière. Plus la fraction argileuse est importante plus la diminution du module réversible est élevée.

Les travaux de Lee, Bohra, Altschaeffl, & White (1995) et Simonsen, Janoo, & Isacsson, (2002) montrent que les sols argileux se caractérisent par un changement de la rigidité sous l'effet des cycles de gel-dégel, ce changement se manifeste par une diminution de module résilient.

La figure 1-7 est le résultat des travaux de Roy, La Rochelle, Leroueil, Konrad, & Bergeron (1995) sur les argiles de St-Alban. La figure montre la variation de la résistance au cisaillement des argiles de St-Alban en fonction de nombre des cycles de gel-dégel. La résistance des argiles intactes tend à augmenter jusqu'à 40 kPa suite aux trois premiers cycles et jusqu'à 50 kPa après huit cycles. À l'état remanié, l'augmentation est d'environ 10 kPa après 3 cycles et 15 kPa après 8 cycles.

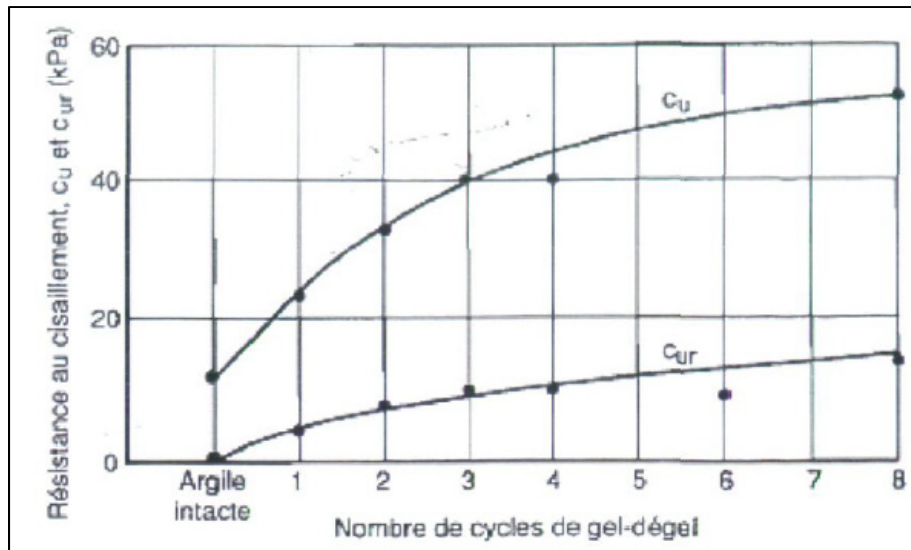


Figure 1-7 Changement de la résistance au cisaillement
des argiles St-Alban
Tirée de Roy et al. (1995)

La figure 1-8 présente le comportement contrainte-déformation des argiles intactes de St-Alban évaluées par Roy et al. (1995) après différents nombres de cycles de gel-dégel (de C1, 1 cycle, jusqu'à C8, 8 cycles). Lorsque l'argile n'a jamais gelé, elle est fortement influencée par les premiers cycles de gel-dégel. Cependant, après un certain nombre de cycles de gel-dégel, elle atteint une structure résistante qui est peu affectée par les cycles subséquents.

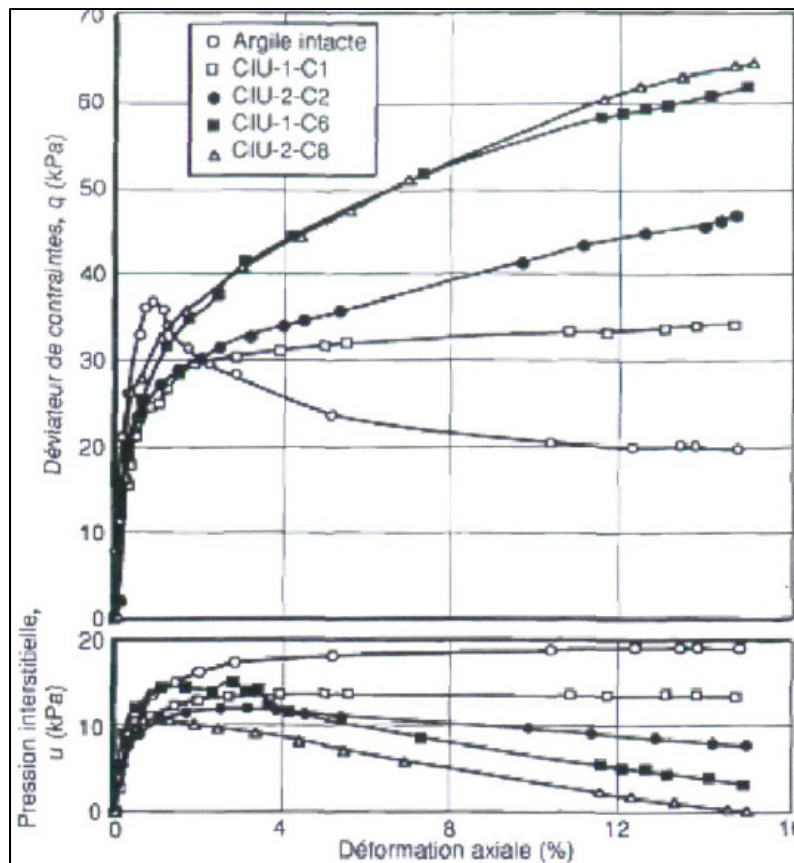


Figure 1-8 Courbes contrainte-déformation en fonction de nombre de cycles de gel-dégel pour l'argile de St-Alban
Tirée de Roy et al. (1995)

L'évaluation des propriétés mécaniques de sable silteux sous des conditions de gel-dégel élaborée récemment par Liu et al. (2016) montre que le nombre des cycles de gel-dégel affectent principalement le comportement contrainte-déformation et la résistance à la rupture des spécimens exposés au gel-dégel. La figure 1-9 montre l'influence des cycles de gel-dégel sur le comportement contrainte-déformation du sol sous une température de congélation d'environ -5°C et une pression de confinement d'environ 100 kPa pendant le cisaillement. La figure montre un changement de comportement mécanique du sol et le passage de la courbe contrainte-déformation d'une déformation faible à ramollissement à un comportement de durcissement en fonction de nombre des cycles de gel-dégel.

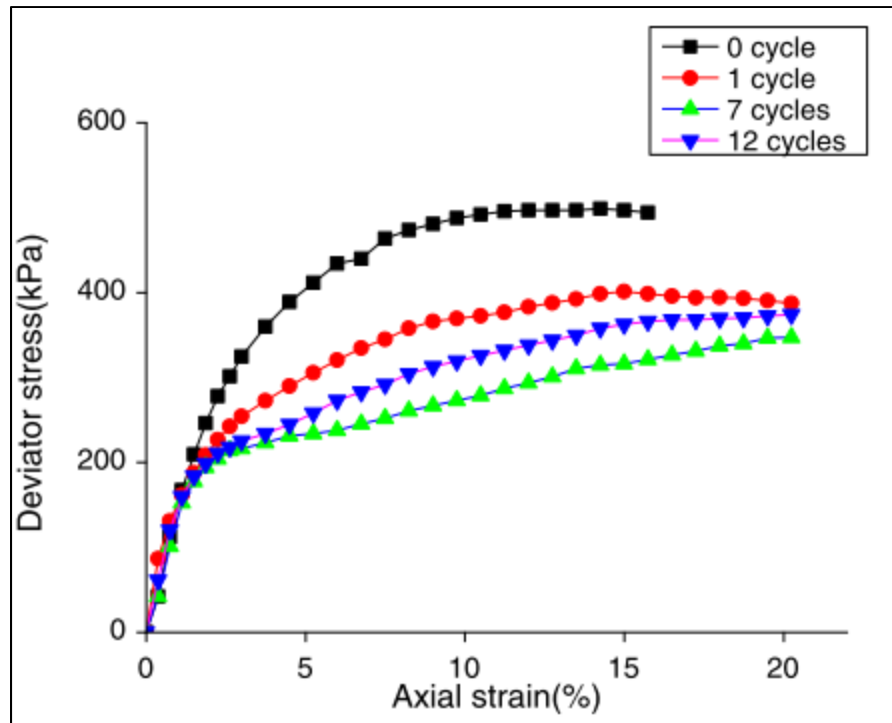


Figure 1-9 Courbes contrainte-déformation en fonction du nombre de cycles de gel-dégel pour du sable silteux
Tirée de Liu et al. (2016)

Contrairement à ces résultats les travaux de Wang, Ma, Niu, Chang, & Wen (2007) sur des argiles montrent que la forme de la courbe contrainte-déformation ne change pas en fonction du nombre de cycles de gel-dégel.

L'effet des cycles de gel-dégel sur le comportement contrainte-déformation des sols dépend généralement du type de sol, du cheminement de contrainte et des conditions de drainage (Liu et al., 2016).

La résistance à la rupture du sable silteux évaluée aussi par Liu et al. (2016) en fonction des cycles de gel-dégel sous une contrainte de confinement d'environ 100 kPa et une température de congélation égale à -15°C (figure 1-10) montre une diminution progressive suite aux premiers cycles, suivie d'une augmentation vers le neuvième cycle de gel-dégel.

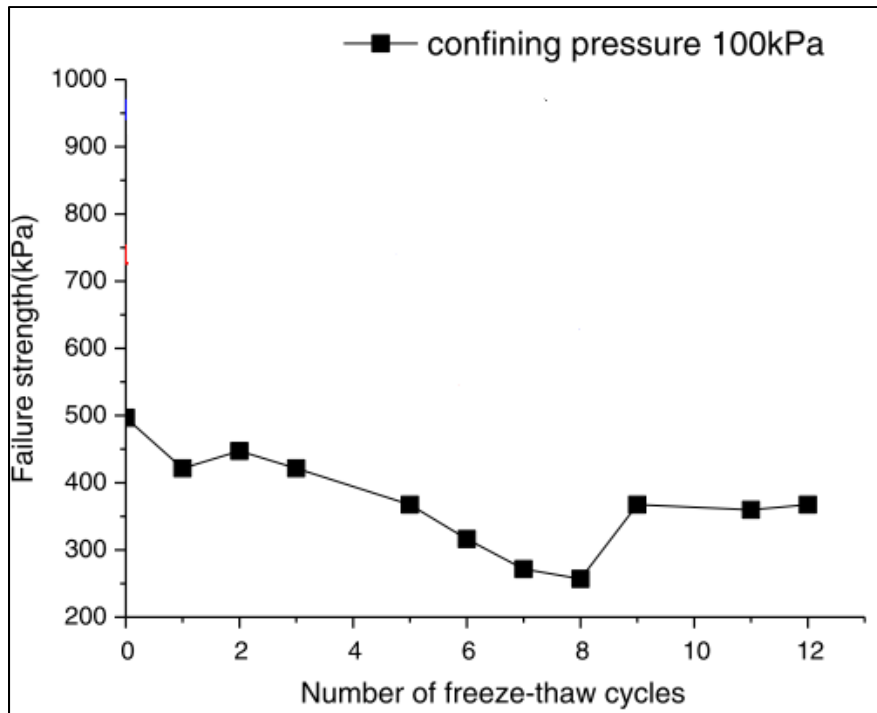


Figure 1-10 Changement de la résistance à la rupture de sable silteux en fonction des cycles de gel-dégel sous une température d'environ -15°C
Modifiée de (Liu et al., 2016)

1.3 Effet des cycles de gel-dégel sur le béton

D'autres milieux poreux que les sols naturels sont susceptibles au gel, incluant le béton et les mélanges sol-ciment (Watanabe, 1999). Comme pour les sols, la susceptibilité aux cycles de gel-dégel du béton dépend à la fois des propriétés du matériau et de paramètres externes. Les principaux paramètres de la formulation et les principales propriétés du béton qui contrôlent la résistance au gel sont le rapport eau/ciment (E/C) et les caractéristiques du réseau d'air (pourcentage et espacement). Les conditions de cure qui favorisent l'hydratation du ciment ont aussi un impact sur la résistance au gel. Les facteurs externes importants sont la température minimale de congélation, le taux de changement de température, l'alimentation en eau et le nombre de cycles de gel-dégel.

Trois principales théories permettent d'expliquer les mécanismes de détérioration du béton par le gel (Pigeon & Pleau, 1995). La théorie de Powers associe les pressions hydrauliques générées lors de déplacement de l'eau dans la pâte de ciment durant le gel à des efforts de tension. La théorie des pressions osmotiques explique aussi le mécanisme de détérioration de béton sous l'effet de gel. L'eau dans les grands pores capillaires commence à geler avant l'eau des petits pores, ce qui forme une différence de concentration entre la solution résiduelle des grands pores et celle des petits pores qui n'ont pas gelé. Cette différence de concentration cause une pression osmotique. L'eau des petits pores va être attirée par les grands pores. La théorie de Litvan suppose que l'eau capillaire ne peut pas geler in situ. À cause des différences de pression vapeur entre la glace et l'eau surrefroidie, l'eau doit se déplacer vers les bulles d'air ou bien vers la surface de béton pendant le gel. Si le déplacement de l'eau ne se fait pas d'une manière ordonnée, la fissuration de la pâte de ciment peut se reproduire.

Il existe deux modes de détérioration de béton sous l'effet des cycles de gel-dégel (Pigeon & Pleau, 1995) :

- (1) L'écaillage de la surface (*surface scaling*) est la forme de détérioration la plus fréquente (figure 1-11). L'écaillage correspond au détachement des petites particules de la surface de la structure en béton.



Figure 1-11 Écaillage de la surface de béton
Tirée de PCA (2018)

- 2) Le deuxième type de détérioration concerne la fissuration de tout le corps d'une structure en béton souvent saturée en eau. Cette fissuration est due aux pressions générées par la glace dans la pâte de ciment ou/et dans les agrégats. Ce phénomène est rarement observé parce que la majorité des structures en béton sont protégées du gel par un réseau d'air entraîné. Parmi les formes de détérioration souvent observées, on note la trésaillure (*D-line cracking*). Comme le montre la figure 1-12, cette fissuration est par exemple observée le long des joints des chaussées.



Figure 1-12 Trésaillure dans les chaussées en béton
Tirée de Pigeon & Pleau (1995)

La résistance de béton aux cycles de gel-dégel est souvent déterminée selon la norme ASTM C666. Elle correspond à un essai rapide appliqué sur des prismes rectangulaires. L'évaluation de la susceptibilité de béton au gel par des essais répétitifs de gel-dégel peut être suivie par des essais de perméabilité et des essais de résistance à la compression pour quantifier le degré de changement des propriétés de béton. Cependant, il faut prendre en considération l'influence de l'hydratation de ciment qui peut diminuer la perméabilité de ciment. L'hydratation continue de ciment n'est pas le seul phénomène qui explique ce changement des propriétés hydrauliques de béton, l'imperméabilisation causée par la dissolution et la recristallisation des hydrates ainsi

que la fermeture des fissures peuvent aussi réduire la valeur initiale de la perméabilité (Hearn, 1998).

1.4 Effet des cycles de gel-dégel sur les mélanges sol-ciment

Les travaux de recherche sur l'effet des cycles de gel-dégel sur les mélanges sol-ciment sont peu nombreux. Une étude des mécanismes de dégradation due aux cycles de gel-dégel est nécessaire, surtout dans les pays nordiques où la durabilité à long terme des sols traités est importante dans l'évaluation des performances des méthodes de traitement.

Les mélanges sols-ciment ont des caractéristiques intermédiaires entre le béton et le sol naturel. Généralement un monolithe sol-ciment doit posséder une faible perméabilité capable d'empêcher l'écoulement de l'eau pour éviter la formation des lentilles de glaces dans des conditions climatiques froides (Al-Mala Yousif, 2015).

Le pourcentage de ciment dans le mélange peut aussi être un facteur déterminant pour la susceptibilité au gel-dégel. Guthrie, Lay, & Birdsall (2007) ont montré que l'ajout d'une quantité insuffisante du ciment à un sol silteux peut accentuer le soulèvement au gel par rapport à un sol non stabilisé (figure 1-13), alors que l'ajout d'une proportion du ciment élevée peut causer la fracturation du monolithe et la détérioration de la structure.

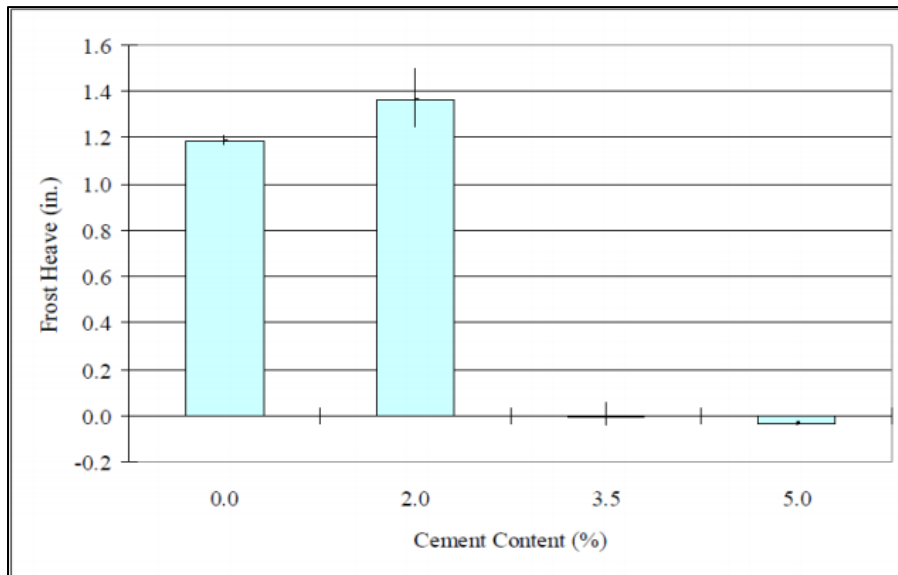


Figure 1-13 Influence de la teneur en ciment (ciment/sol) sur le soulèvement au gel des mélanges sol-ciment
Tirée de Guthrie et al. (2007)

L'effet des cycles de gel-dégel sur les sols stabilisés peut être évalué à court terme avant la maturation du système ou bien à long terme (Jamshidi, Lake, & Barnes, 2014). Différents facteurs influencent le degré de perturbation de la conductivité hydraulique et la résistance à la compression des sols stabilisés dans des conditions de gel-dégel : le nombre de cycles, la température de congélation et le temps de cure avant l'exposition aux conditions climatiques, sont des paramètres qui sont souvent évalués (Jamshidi et al., 2014).

Shihata & Baghdadi (2001) ont montré que le gel-dégel détériore la résistance à la compression des mélanges sol-ciment. Il existe une certaine corrélation entre la perte de masse des échantillons exposés au gel-dégel et la diminution de la résistance à la compression. Les sols stabilisés par ciment perdent souvent leur intégrité à cause de la détérioration de la matrice cimentaire et la sursaturation de sol après le dégel (Dempsey & Thompson, 1973). Une augmentation de la conductivité hydraulique et une dégradation de la performance mécanique peuvent être observés suite à plusieurs cycles de gel-dégel. Ce changement est dû à des forces expansives créées par le gel de l'eau (Dempsey & Thompson, 1973).

Jamshidi, Lake, Barnes, Hills, & Gunning (2011) ont évalué la conductivité hydraulique et la résistance à la compression de mélanges sol silteux avec 10 % de ciment sous des conditions de gel-dégel (figure 1-14). Après 4 cycles de gel-dégel, la conductivité hydraulique a augmenté d'environ deux ordres de grandeur.

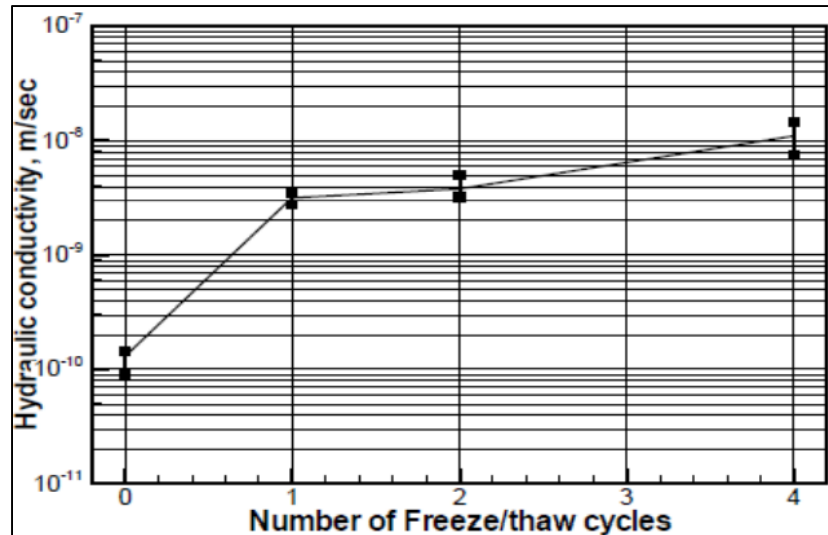


Figure 1-14 Influence du nombre de cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique de mélanges sol-ciment
Tiré de Jamshidi et al. (2011)

La figure 1-15 présente les résultats des travaux de Jamshidi, Lake, Gunning, & Hills (2016). Elle montre un changement de la conductivité hydraulique après 3 cycles de gel-dégel pour deux mélanges de sable silteux-ciment. Les deux mélanges sont préparés à deux rapports eau/ciment E/C différents (1.2 et 2.1). D'autres paramètres sont évalués tels que la maturation des spécimens (immature = 16 jours de cure et mature = 110 jours de cure) et le type d'essai de gel-dégel (1D ou 3D). Le mélange SIII (1.2) montre une augmentation de la conductivité hydraulique d'environ un ordre de grandeur pour les spécimens matures et une très légère réduction pour les spécimens immatures. Dans les mêmes conditions d'essai (3D), les spécimens matures et immatures de deuxième mélange SIII (2.1) montrent une augmentation d'environ 220 et 12 fois de la conductivité hydraulique, respectivement.

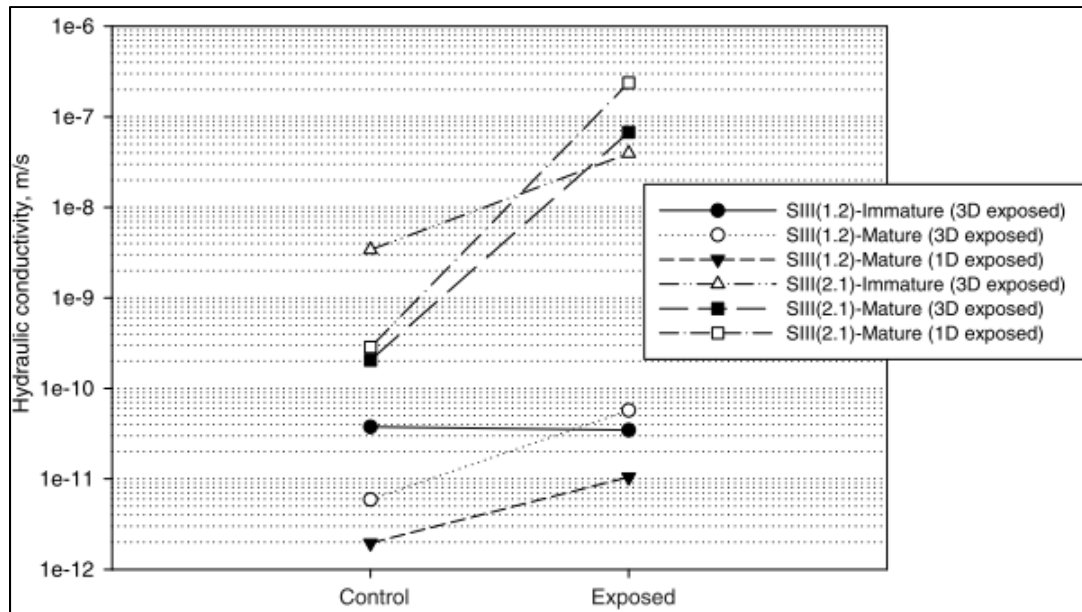


Figure 1-15 Changement de la conductivité hydraulique après 3 cycles de gel-dégel de mélange sable silteux-ciment
Tirée de Jamshidi, Lake, & Barnes (2016)

1.5 Dispositifs expérimentaux pour la simulation des cycles de gel-dégel

Des essais au laboratoire doivent être effectués afin de comprendre l'effet des cycles de gel-dégel sur le comportement des sols, du béton et des mélanges sol-ciment à court et à long terme.

Certains montages et protocoles expérimentaux pour simuler les cycles de gel-dégel sont standardisés par des normes, telles que les normes ASTM D560 et C666. Ces normes ne représentent habituellement pas les conditions réelles de terrain. Elles négligent certains paramètres, tels que les pressions interstitielles, le degré de saturation des spécimens, l'état de contrainte, etc. Ces limitations ont amené certains chercheurs à créer leurs propres dispositifs expérimentaux pour s'approcher des conditions *in situ*.

Les montages de gel-dégel présentés dans la littérature sont souvent basés sur les mêmes principes. La ressemblance entre les dispositifs se manifeste au niveau de la forme cylindrique des spécimens, le refroidissement unidirectionnel et l'isolation latérale des spécimens. Les

principales différences sont liées à la dimension des spécimens, le gradient de température, le fonctionnement du système de refroidissement, les conditions de saturation en eau et les contraintes appliquées sur les spécimens au moment des cycles de gel-dégel.

Les systèmes de refroidissement sont classés en deux catégories :

- Circulation d'air froid au sommet du spécimen et d'eau chaude à la base. Durant le gel, l'air froid retire la chaleur de spécimen alors que durant le dégel, la surface du spécimen extrait la chaleur de l'air.
- Circulation du fluide de refroidissement au sommet et à la base du spécimen par l'intermédiaire des unités de refroidissement (p. ex. bain thermique).

Quel que soit la nature du système utilisé, il doit être conservé dans une chambre froide de température constante pour éviter la perte de chaleur sous l'effet de la température ambiante.

La saturation des spécimens distingue aussi les différents types d'essais de gel-dégel. Dans certains essais, le spécimen est totalement saturé et le niveau de l'eau est maintenu au-dessus de la surface du spécimen (p. ex. Konrad, 1980). Certains chercheurs maintiennent le niveau de l'eau à la base de spécimen. Aussi dans certains cas, des spécimens non saturés ont été utilisés (p. ex. Kujala, 1991, cité par Zeinali et al., 2016).

Il existe deux types d'essais de gel-dégel qui diffèrent par leur mode de refroidissement de l'échantillon. Le premier essai consiste à conserver des températures constantes à la base et à la tête du spécimen durant tout l'essai. Ce type d'essai est nommé « essai de gel échelon ». Le deuxième type d'essai s'appelle « essai de gel à taux de refroidissement constant ». Il consiste à changer progressivement la température du spécimen durant l'essai.

1.5.1 Montages de gel-dégel sans pression de confinement

La norme ASTM D560 « *Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures* » détermine la résistance au gel-dégel des mélanges sol-ciment. La norme

présente deux procédures qui dépendent de la granulométrie du sol (tableau 1-4). Le gel du spécimen s'effectue dans une chambre de congélation dont la température est environ constante à -23 °C. Le spécimen est placé sur un géotextile qui est saturé avant les périodes de gel pour faciliter l'absorption de l'eau par capillarité.

Le dégel se fait dans une chambre humide de température constante d'environ 23 °C en gardant la source d'eau à la base du spécimen. De l'eau en surplus doit être présente autour du géotextile pour qu'il se sature.

Tableau 1-4 Comparaison entre les procédures de gel-dégel
de la norme ASTM D560

	Méthode A	Méthode B
Granulométrie de sol	100 % passe le tamis 4.75 mm	Une partie de sol est retenue au tamis 4.75 mm 30 % de sol est retenue au tamis 19.0 mm
Diamètre de l'échantillon	100 mm	
Nombre de cycle	12 cycles de gel dégel	
Températures de cycle	-23 °C de gel pour 24 h et 21°C de dégel pour 23 h	
Paramètres calculés	Changement de volume de l'échantillon Changement de teneur en eau Perte de masse (en %)	

La norme ASTM C666 « *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing* » est utilisée pour déterminer la résistance des spécimens de béton aux cycles de gel-dégel. La norme C666 exige un diamètre du spécimen entre 75 et 125 mm et une hauteur entre 275 et 405 mm. La norme présente deux procédures :

- gel-dégel rapide dans l'eau (méthode A);
- gel rapide dans l'air et dégel dans l'eau (méthode B).

Les deux méthodes peuvent être utilisées pour voir l'effet de la variation des propriétés du béton suite aux cycles de gel-dégel.

Pour les deux procédures, la température des spécimens varie de 4 °C jusqu'à -18 °C durant le gel et de -18 °C jusqu'à 4 °C durant le dégel. La durée totale d'un cycle de gel-dégel doit être supérieure à 2 heures, mais inférieure à 5 heures. Pour la méthode A, un minimum de 25% de la durée totale doit être consacré au dégel. Pour la méthode B, au moins 20 % de la durée totale de chaque cycle doit être consacrée au dégel.

Durant un essai complet, le spécimen doit subir 300 cycles de gel-dégel ou bien un nombre suffisant de cycles pour que le module dynamique d'élasticité atteigne 60 % de sa valeur initiale. Durant chaque cycle, le diamètre, la hauteur et la fréquence fondamentale transversale de spécimen doivent être notés. Les données récoltées permettent la détermination du module dynamique relatif d'élasticité, du facteur de durabilité et du pourcentage de changement de hauteur.

La norme ASTM D4842 « *Standard Test Method for Determining the Resistance of Solid Wastes to Freezing and Thawing* », retirée en 2006, vise à évaluer la résistance aux conditions de gel-dégel des déchets solides stabilisés et solidifiés. Elle sert aussi à comparer la résistance aux cycles de gel-dégel de différents déchets solides en termes de pourcentage de perte de masse. La procédure nécessite un cabinet de gel capable de garder une température de $-20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ et une chambre humide dont la température est de $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ et l'humidité relative de 95 % pour conditionner et dégeler les spécimens. Aussi, un réfrigérateur à 4 °C sert à contrôler la température autour du cabinet de gel. Le gel de l'échantillon dure 24 h à -20 °C.

La norme C1262 « *Standard Test Method for Evaluating the Freeze-Thaw Durability of Dry-Cast Segmental Retaining Wall Units and Related Concrete Units* » s'applique plutôt aux éléments de béton préfabriqués utilisés pour la construction de murs de soutènement. La procédure décrite dans la norme vise à évaluer la résistance aux cycles de gel-dégel dans une eau potable ou dans une solution qui contient 3 % de sel en fonction de l'utilisation prévue de

l'unité (figure 1-16). Les cycles de gel-dégel se déroulent dans une chambre de refroidissement où la base du spécimen est en contact avec une source d'eau durant tous les cycles.

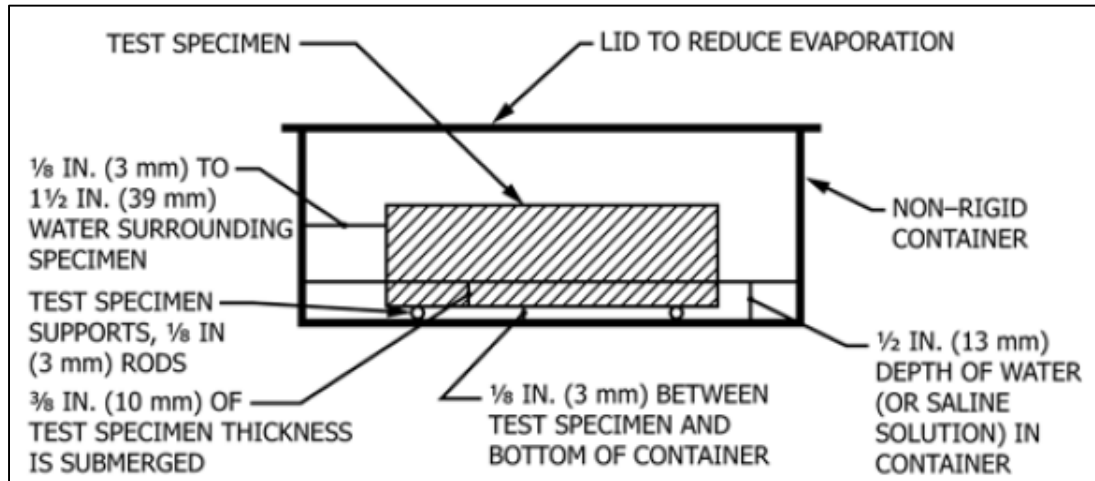


Figure 1-16 Spécimen dans le récipient de gel-dégel de la norme ASTM C1262
Tirée d'ASTM International (2016)

Selon la norme, les caractéristiques de la chambre de gel-dégel sont les suivantes :

- Circulation forcée d'air ;
- Contrôleur programmable de la température de l'air capable d'effectuer au moins deux cycles de gel-dégel durant 24 h ;
- Intervalle de température de -25 °C à 40 °C ;
- Capacité de maintenir une température uniforme dans toute la chambre durant l'essai.

Shihata & Baghdadi (2001) ont utilisé une méthode expérimentale simple qui ressemble à celle des normes ASTM pour évaluer la durabilité d'un mélange sol-ciment qui subit des cycles répétitifs de gel-dégel. L'évaluation a été basée sur la résistance à la compression de spécimen. La préparation du spécimen est suivie d'une période de cure d'environ 7 jours. Le spécimen saturé est mis dans un réfrigérateur dont la température maximale est d'environ -10 °C durant 22 heures. Le spécimen est placé ensuite dans une chambre humide durant 22 heures. Après 12 cycles de gel-dégel, le spécimen est séché sous une température de 110 °C durant 48 heures. La durée de l'essai est 40 jours.

1.5.2 Montage de gel-dégel sous une pression de confinement

1.5.2.1 Chargement 1D à déformation latérale empêchée

La norme ASTM D5918 « *Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils* » est appliquée aux sols susceptibles au gel (3% des tailles des particules fines $< 20 \mu\text{m}$) en géotechnique routière. L'ASTM propose deux cycles de gel-dégel sur des spécimens compactés de diamètre d'environ 146 mm et hauteur 150 mm. Les températures de gel-dégel sont appliquées à la base et au sommet des spécimens (figure 1-17). L'essai peut être effectué dans un système fermé sans alimentation en eau ou bien avec une alimentation continue en eau. Une surcharge de 3.5 kPa est appliquée au sommet du spécimen durant l'essai. Toute la procédure de gel-dégel nécessite 5 jours.

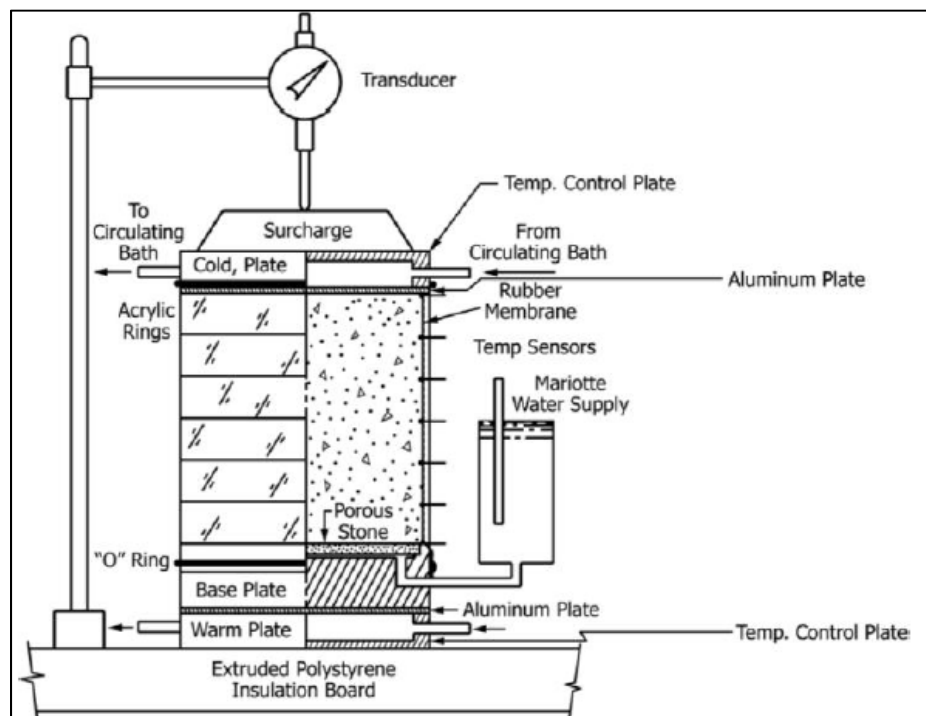


Figure 1-17 Montage de gel-dégel de la norme ASTM D5918
Tirée d'ASTM International (2013)

Le montage de l'Université technologique de Luleå (LTU) (figure 1-18) favorise un flux de chaleur unidirectionnel. L'alimentation en eau s'effectue à la base de spécimen qui se caractérise par une hauteur et un diamètre d'environ 10 cm. Les côtés de l'appareil doivent être isolés thermiquement. Le fluide de refroidissement circule à la base et au sommet de spécimen. Le dispositif permet aussi d'appliquer une pression de surcharge.

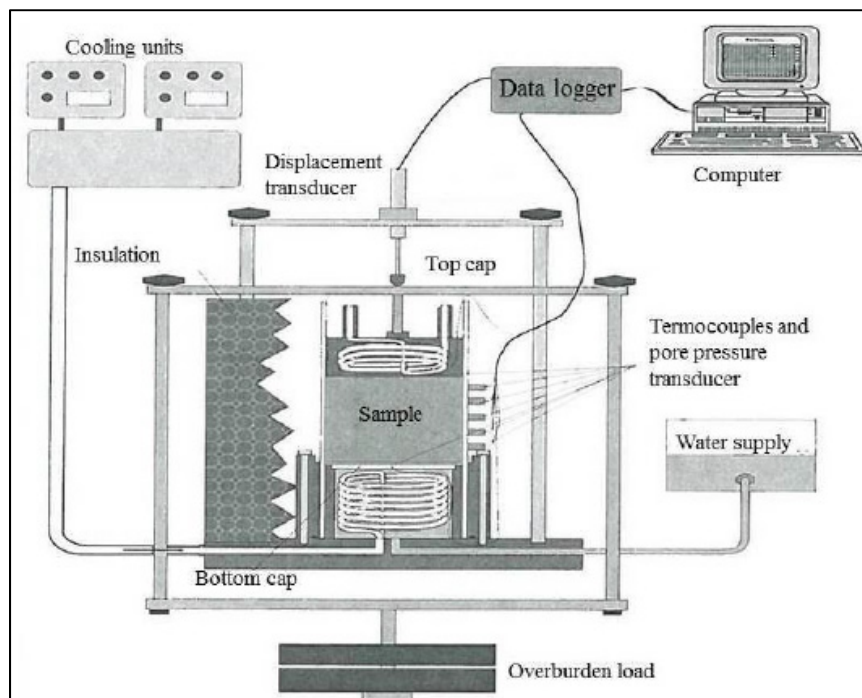


Figure 1-18 Présentation schématique de l'appareil LTU de gel-dégel

Tirée de Kujala (1991), cité par Zeinali et al. (2016)

L'essai de gel-dégel en Suisse (figure 1-19) s'applique selon deux procédures (Nguyen, 2015) :

- (i) Une procédure lente où la température de l'air qui refroidit l'échantillon est abaissée de -2°C à -15°C durant 72 h, ce qui permet une propagation de front de gel d'environ 20 mm/jour.
- (ii) Une procédure rapide utilisée pour les matériaux qui sont exposés à des climats sévères et des conditions hydrologiques intenses. Cette procédure dure 6 h à une température d'air d'environ -20°C qui circule à la tête de l'échantillon. Les deux

procédures exigent une source d'eau de température constante d'environ $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ au pied de l'éprouvette.

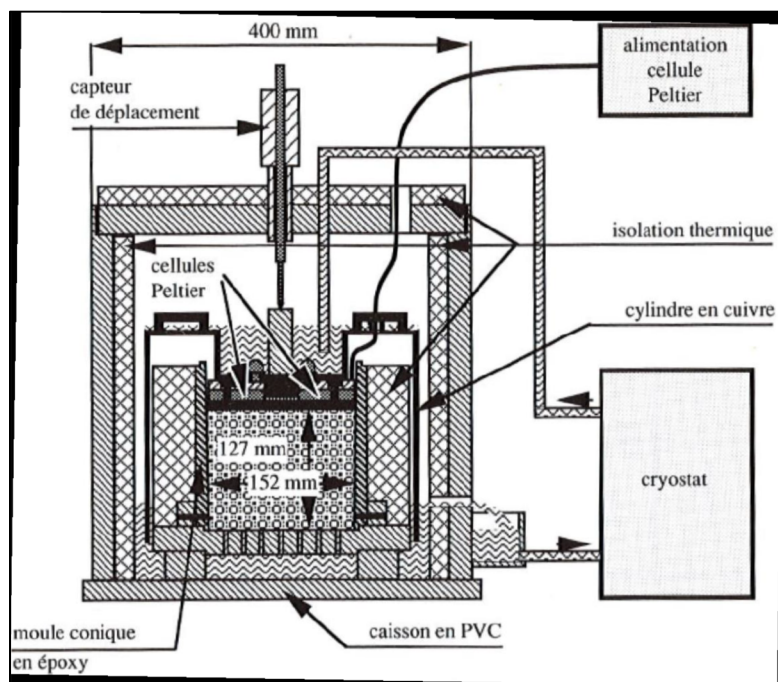


Figure 1-19 Dispositif d'essai de gel-dégel en Suisse
Tirée de Dysli & Allenbach (1988), cité par Nguyen (2015)

Les essais de gel-dégel de Chamberlain & Gow (1979) s'effectuent avec un montage qui se compose d'un cylindre en plexiglas avec un revêtement en téflon. La base de l'appareil est fixe alors que le piston mobile permet le drainage et le rinçage (figure 1-20). L'étanchéité du piston est assurée par des joints toriques lubrifiés. Le refroidissement des spécimens s'effectue par des dispositifs thermoélectriques installés sur le piston et à la base de l'appareil. Un bain thermique de température constante permet l'augmentation de la température et le dégel de spécimen. Le contrôle de la température se fait par des thermocouples placés à la base de l'appareil sur le piston et à la surface de spécimen. Cet appareil est aussi utilisé pour faire des essais de perméabilité entre les cycles de gel-dégel.

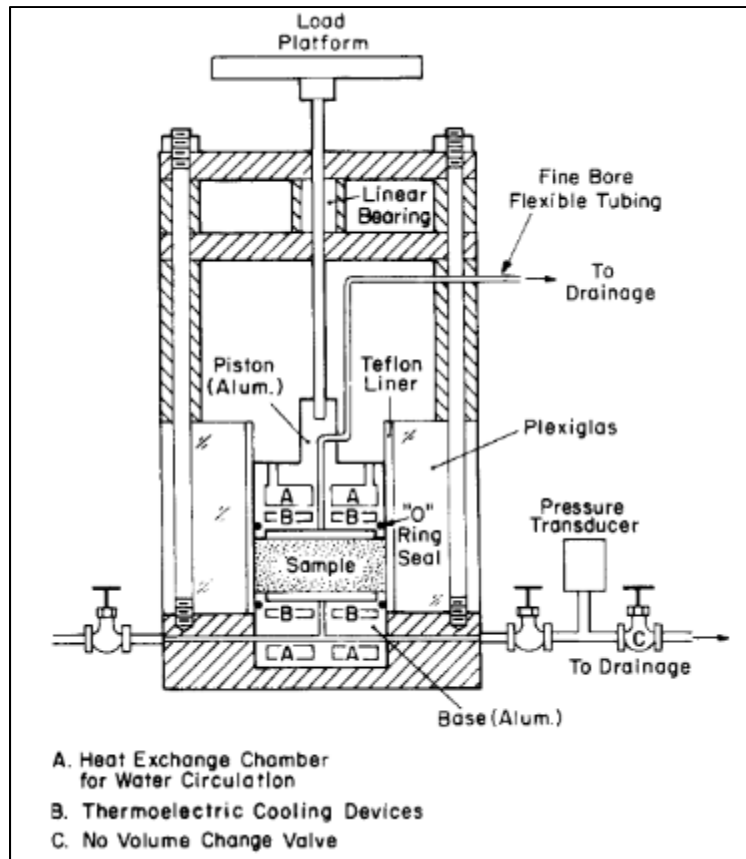


Figure 1-20 Appareil de gel-dégel
et de l'essai de perméabilité
Tirée de Chamberlain and Gow (1979)

Le montage de Jamshidi et al. (2016) est formé de deux tubes en plexiglas bien isolés en fibre de verre (figure 1-21). Les spécimens sont placés dans les tubes sur un spécimen fictif de même composition que les spécimens à testés et de 5 cm de diamètre. Les spécimens fictifs facilitent le transfert de chaleur et le maintien de la température de congélation. Un mélange d'eau et de glace est maintenu à la base de spécimen fictif pour garder une température d'environ 0 °C. Un circulateur réfrigéré permet la circulation d'un mélange d'eau et d'antigel (-10 °C) à travers les bouchons inoxydables placés au sommet des spécimens. Tout le montage est placé dans une chambre à température ambiante. Des thermocouples sont placés à la base des spécimens afin de contrôler la température et s'assurer de la congélation complète des spécimens.

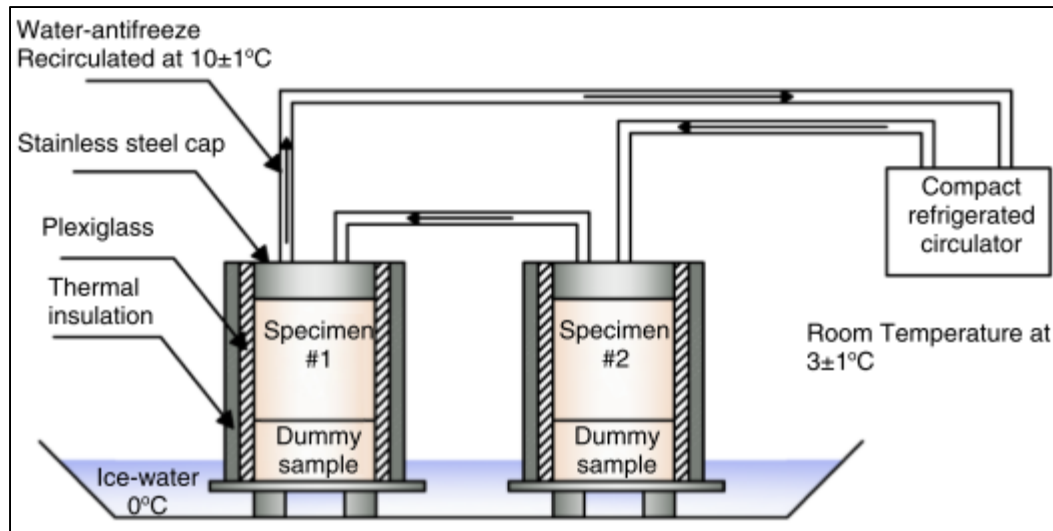


Figure 1-21 Montage de gel-dégel
Tirée de Jamshidi et al. (2016)

1.5.2.2 Montage de gel-dégel avec confinement isotrope

Bilodeau et al. (2011) ont utilisé un dispositif expérimental de gel-dégel pour simuler l'effet des cycles saisonniers sur la déformation permanente des matériaux granulaires utilisées dans une structure typique de chaussé (figure 1-22). Deux spécimens saturés et compactés en sept couches (42,9 mm pour chaque couche) ont subi plusieurs cycles de gel-dégel. Le premier spécimen a été testé sous des conditions drainées et l'autre sous des conditions non drainées. Le spécimen a été isolé par une gaine minérale avant d'être installé dans la cellule triaxiale. Tout le système est mis dans une chambre environnementale afin de contrôler la température et limiter l'écart avec la température ambiante. L'intervalle de température de gel-dégel est entre 40 °C et -20 °C.

Un bain thermique programmé a été utilisé pour mesurer et suivre la variation de la température du spécimen. Une modification du plateau supérieur est nécessaire pour connecter le bain thermique avec le sommet du spécimen et lui imposer une température de congélation de -8 °C avec un gradient de 0,06 à 0,03 °C/mm pendant le refroidissement. Une sonde thermique a été placée à 25,4 mm de la base d'échantillon pour mesurer la température. Lorsque la sonde indique une valeur de 0 °C le refroidissement est stoppé et le spécimen est dégelé en imposant

une température de 6 °C. Le même dispositif a été utilisé par Poupart (2013), sauf pour une modification de la cellule triaxiale. Dans ce cas, le spécimen a été saturé et compacté. Le niveau d'eau a été maintenu au tiers de la hauteur totale pour éviter la propagation du gel dans le montage. Le fluide refroidisseur (éthylène glycol) circule dans un circuit fermé à travers le plateau supérieur modifié. Le circuit est alimenté par un bain thermique dont la température est fixée à -8 °C. La mesure de la température et l'estimation de la propagation du front de gel s'effectuent par une thermistance fixée à la base de spécimen. La thermistance a été fixée par une membrane supplémentaire durant l'installation de montage. Une deuxième sonde peut être fixée dans la partie supérieure de la cellule triaxiale pour mesurer la température de l'air. La température de la chambre environnementale est d'environ 5 °C afin de minimiser l'écart de la température entre le spécimen et son environnement. Le soulèvement au gel est mesuré grâce à un capteur de déplacement placé au-dessus de la cellule.

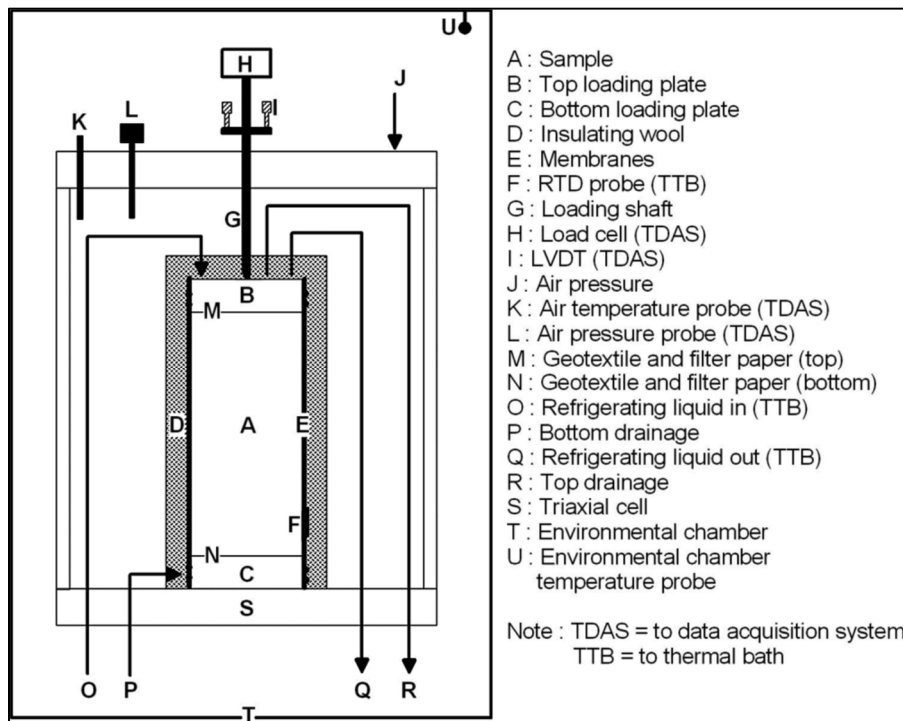


Figure 1-22 Cellule triaxiale pour la réalisation de cycles de gel-dégel avec un confinement isotrope
 Tirée de Bilodeau et al. (2011)

Simonsen & Isacsson (2001) ont évalué la variation du module de résilience et du coefficient de Poisson pour trois spécimens suite à des cycles gel-dégel sous une pression de confinement variable (VCP) et une pression de confinement constante (CCP). Le VCP présente des conditions plus réalistes qui s'approchent des conditions réelles. Le spécimen a été placé tout d'abord dans une chambre triaxiale entourée par un fluide de confinement (l'huile de silicone). Le gel du spécimen a été réalisé par la circulation d'azote liquide dans un cycle fermé alors qu'un échangeur thermique a permis le dégel du spécimen (figure 1-23).

Le dispositif expérimental a été associé à un outil informatique qui permet l'acquisition des données. Des sondes thermiques ont été positionnées à différents niveaux du système pour contrôler le changement de la température. L'intervalle de la température des cycles de gel-dégel est entre -10 à $+20$ C°.

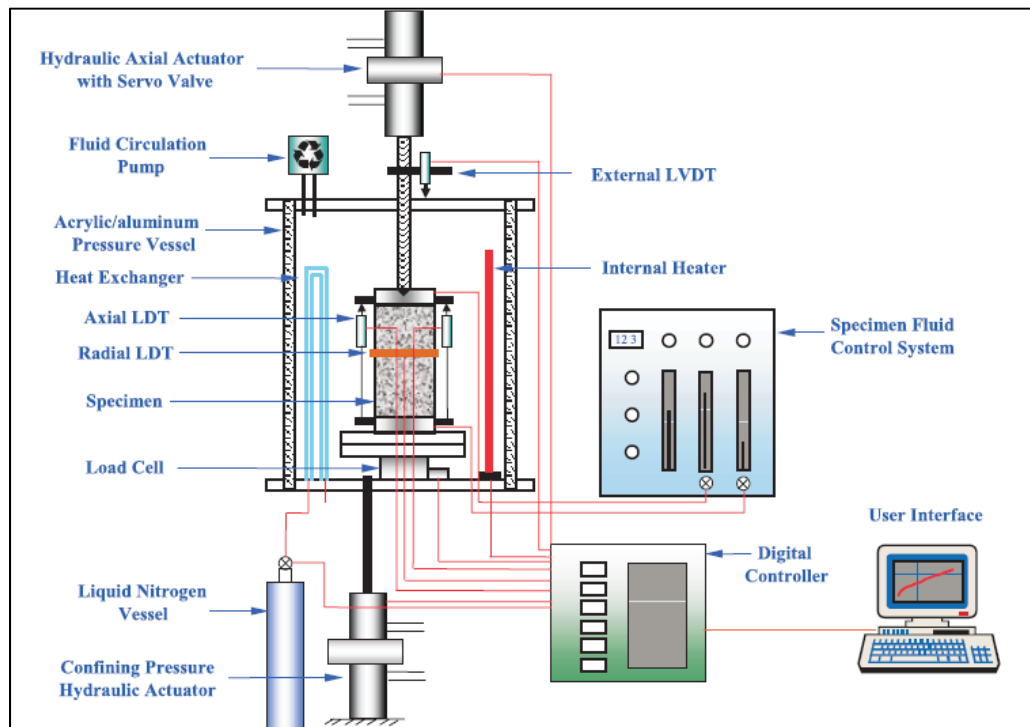


Figure 1-23 Cellule triaxiale pour l'essai de gel-dégel avec pression de confinement constant ou variable
Tirée de Simonsen & Isacsson (2001)

1.6 Objectifs

Cette revue de littérature a tout d'abord permis d'expliquer les mécanismes de gel-dégel et les principaux facteurs qui influencent la susceptibilité des matériaux aux cycles de gel-dégel. Il est clair que le comportement des sols cohérents, les argiles en particulier, a été bien étudié. Leur comportement durant les cycles de gel-dégel est bien documenté contrairement aux mélanges sol-ciment. Une amélioration des connaissances sur l'influence des cycles de gel-dégel sur les performances des mélanges sol-ciment serait donc souhaitable.

La susceptibilité des matériaux aux cycles de gel-dégel dépend de leur granulométrie, des performances hydrauliques initiales et des conditions environnementales, notamment la température, les contraintes appliquées et les conditions de drainage. Cependant, les contraintes appliquées en particulier le confinement est souvent négligé dans les montages expérimentaux de gel-dégel, malgré qu'il puisse avoir une influence significative sur le comportement des matériaux aux cycles de gel-dégel. Ce paramètre externe doit être respecté dans le présent travail pour bien simuler le mécanisme de gel-dégel.

La conductivité hydraulique, la résistance mécanique et la microstructure sont les paramètres qui sont le plus souvent évoqués pour décrire le comportement des matériaux vis-à-vis aux cycles des gel-dégel. Les mêmes paramètres seront utilisés dans ce projet de recherche pour permettre la comparaison des résultats avec les travaux de recherche précédents et pour vérifier l'influence du confinement sur la résistance aux cycles de gel-dégel des mélanges sol-ciment.

La dernière section de la revue résume les normes ASTM (D560, C666, D4842, C1262 et D5918) sur les essais de gel-dégel ainsi que quelques exemples de montages de gel-dégel classés selon la nature de la contrainte appliquée pendant l'essai (contrainte de confinement isotrope ou contrainte verticale 1D avec déformation latérale empêchée). Ce résumé présente les éléments nécessaires (un système de refroidissement, un système d'alimentation en eau, un système de contrôle de pression et un système de contrôle de température) qui doivent être présent dans le montage de gel-dégel qui va être utilisé durant cette recherche.

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIE

Ce projet de recherche vise à développer un montage expérimental qui permettra d'étudier l'interaction entre l'effet des cycles de gel-dégel sur les propriétés structurales, hydrauliques et mécaniques des mélanges sol-ciment et de la contrainte de confinement.

La réalisation des objectifs de la recherche dépend de la réalisation de deux types d'essais sur la durabilité du sol traité par le ciment Portland. Le premier essai correspond à un essai de résistance aux cycles de gel-dégel selon la norme ASTM D560. Le deuxième type d'essai consiste à évaluer la résistance aux cycles de gel-dégel, mais cette fois sous une contrainte de confinement. Le dispositif expérimental utilisé pour le deuxième type d'essai a été développé durant ce projet de maîtrise.

L'évaluation des propriétés des mélanges sol-ciment a été effectuée par des essais de conductivité hydraulique, des essais de cisaillement triaxial consolidé-drainé et des tomographies aux rayons x.

2.1 Plan expérimental

La première étape du plan expérimental consiste à définir les proportions des mélanges sol-ciment et la méthode de préparation des éprouvettes. Les proportions du premier mélange sont basées sur celles qui ont été utilisées dans des projets de Stabilisation/Solidification au Québec (Jean-Philippe Boudreault, communication personnelle, 20 avril 2017). Le deuxième mélange a été préparé à un pourcentage de ciment plus faible par rapport au premier mélange (5%) (Guney et al., 2006) et une teneur en eau qui correspond à l'optimum Proctor pour cette teneur en ciment (figure 2-1).

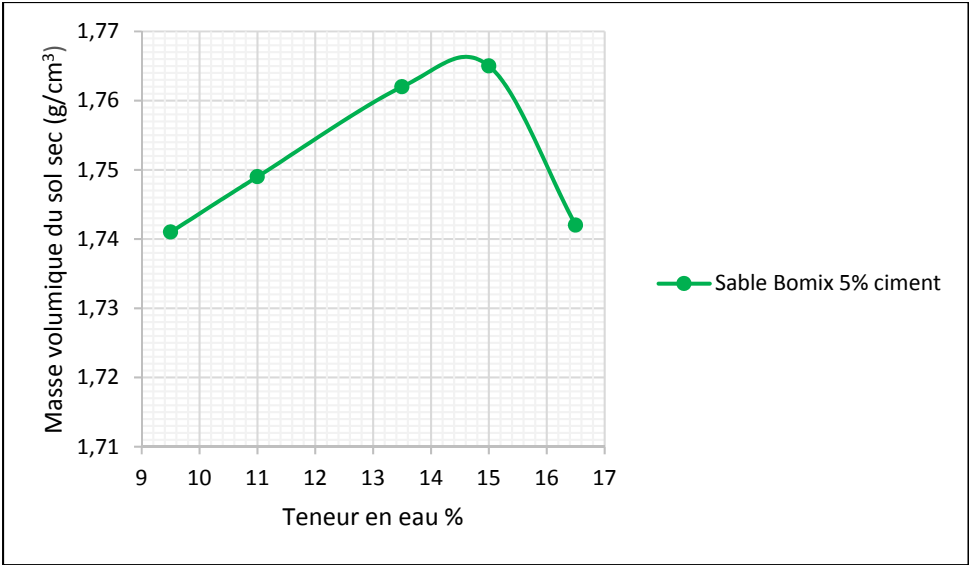


Figure 2-1 Courbe Proctor standard du deuxième mélange sol-ciment

Le tableau 2-1 présente les deux mélanges choisis ainsi que les caractéristiques de la méthode de préparation des éprouvettes. Ces méthodes seront décrites dans les prochaines sections.

Tableau 2-1 Types des mélanges et caractéristiques de la méthode de préparation et des essais de gel-dégel

	Sable - Ciment	
Numéro de mélange	Mélange 1	Mélange 2
E/C	1	6.93
C/S	0.12	0.02
Temps de cure (jour)	28	7
Nombre des cycles	12	
Température de gel (°C)	-11	-23
Méthode de compactage	À la main avec une dame	Un marteau modifié
Diamètre des éprouvettes (mm)	76.1	50.8
Nombre des couches	2	3

Les éprouvettes ont été préparées selon la norme ASTM C192. Les essais de conductivité hydraulique ont été réalisés suivant la norme ASTM D5084 et les essais de cisaillement triaxial consolidé-drainé (CD) respectent la norme ASTM D7181. Des tomographies aux rayons x ont été effectuées afin d'investiguer les changements de la microstructure sous les effets de gel-dégel.

2.2 Matériaux

2.2.1 Sol

Le sol utilisé est un sable sec de type *Bomix* ensaché par *Daubois inc.* La courbe granulométrique présentée à la figure 2-2 a été obtenue selon la norme ASTM C136. La courbe granulométrique permet la classification du sable selon le système USCS de la norme ASTM D2487. Selon la classification USCS, le sable est un sable silteux mal gradué (symbole SP-SM).

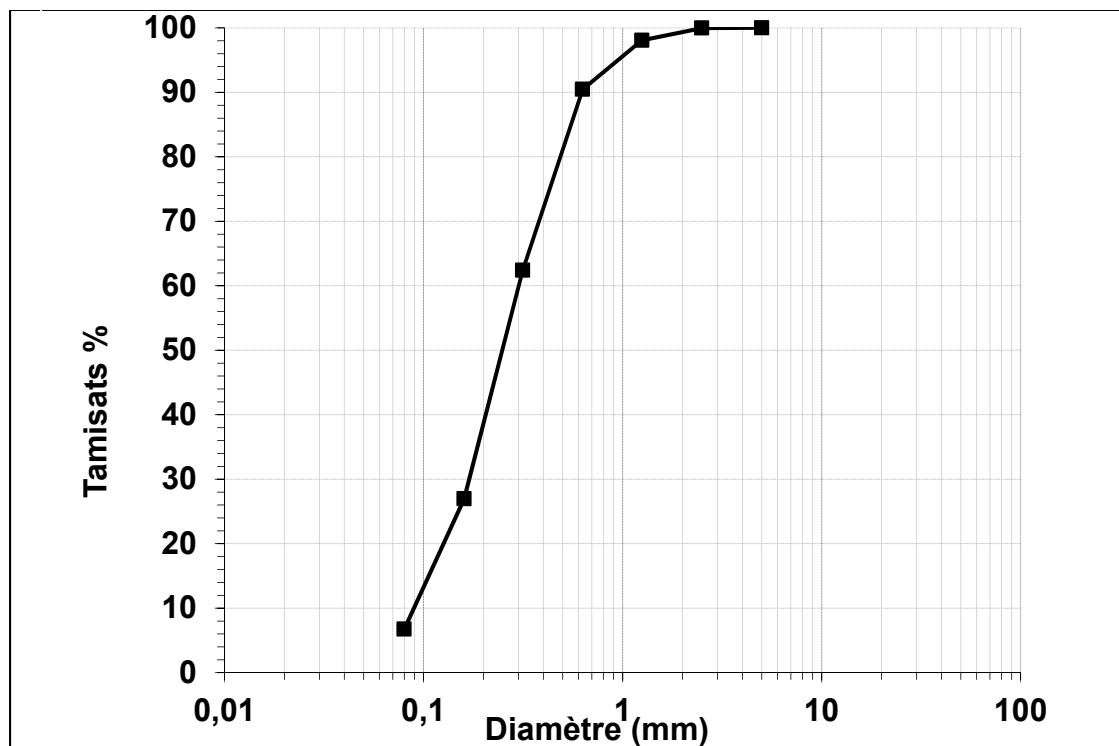


Figure 2-2 Courbe granulométrique du sable Bomix

La norme ASTM C128 a été utilisée pour déterminer l'absorption du sable en eau, la densité apparente et la densité brute (tableau 2-2).

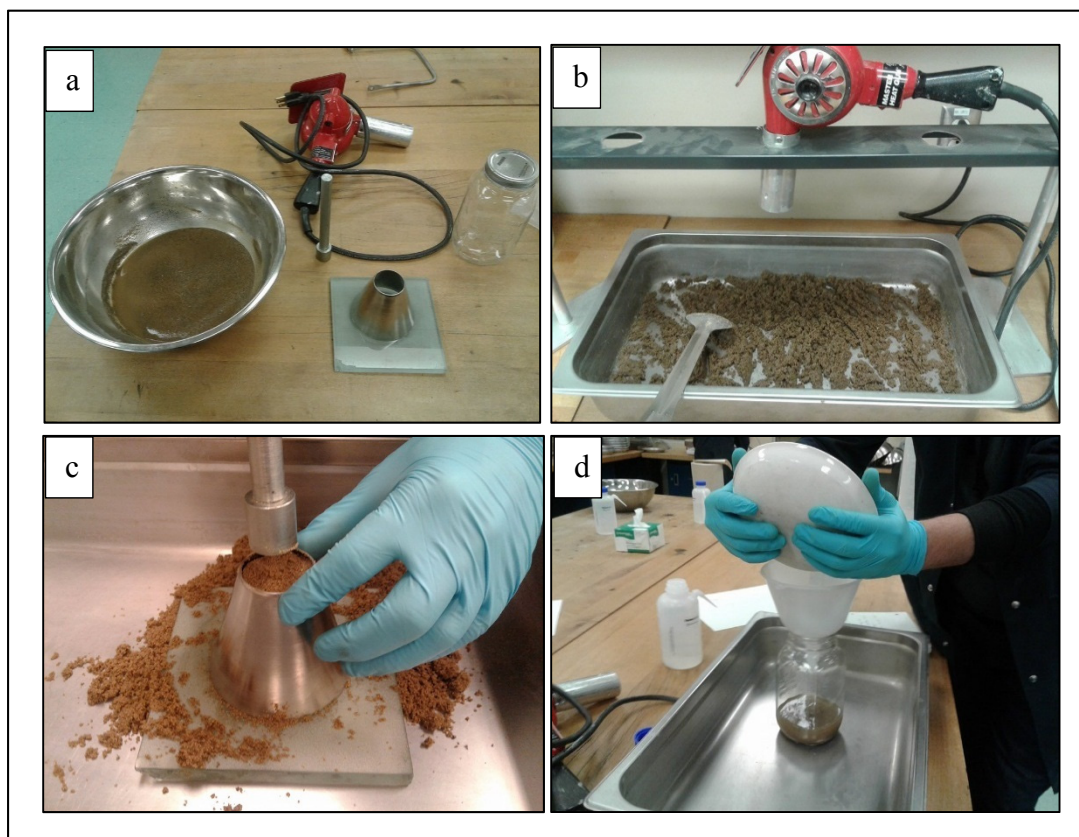


Figure 2-3 Procédure de caractérisation du sable
 (a) Équipements (b) Séchage du sable (c) Détermination de l'état SSS
 (d) Remplissage du Pycnomètre

Tableau 2-2 Caractéristiques du Sable 'Bomix'

Densité Apparente	2.722
Densité brute	2.790
Absorption (%)	0.9

2.2.2 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland GU (usage général). Les propriétés physico-chimiques du ciment, telles que fournies par le fabricant, sont présentées dans le tableau 2-3.

Tableau 2-3 Propriétés du ciment (GU)

Composition chimique		Propriétés physiques	
SiO ₂	18,6 %	Temps de prise : Initial	130 min
Al ₂ O ₃	4,0 %	Temps de prise : Final	235 min
Fe ₂ O ₃	2,4 %	Résistance à la compression	
CaO	62,1 %	À 3 jours	29,8 MPa
MgO	1,8 %	À 7 jours	32,3 MPa
SO ₃	3,1 %	À 28 jours	41,5 MPa

2.2.3 Eau

L'eau distillée du laboratoire mécanique des sols de l'ÉTS a été utilisée durant tous les essais.

2.2.4 Préparation des mélanges

Les mélanges sable-ciment ont été préparés selon la norme ASTM C192. La procédure de mélange commence par l'ajout de sol et de l'eau dans la cuve de malaxage, puis, on fait tourner le malaxeur durant 3 minutes avec une vitesse intermédiaire 280 tours/minute. Après 3 minute d'arrêt, on ajoute le ciment et on tourne le malaxeur pour 2 minutes supplémentaires. Il ne faut pas oublier de bien racler les parois et le fond de la cuve.

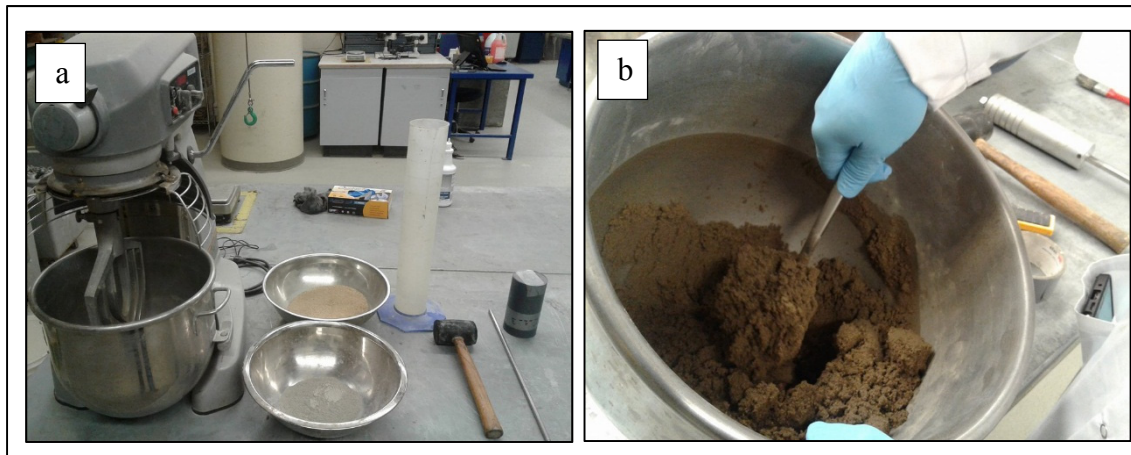


Figure 2-4 Matériel de préparation des éprouvettes (a) et malaxage à la main (b)



Figure 2-5 Marteau de compactage

2.3 Essai de gel-dégel suivant la norme ASTM D560

Cette norme présente deux procédures qui dépendent de la granulométrie du sol testé. La procédure A est utilisée lorsque 100 % du sol passe le tamis 5 mm alors que la procédure B est utilisée pour les sols dont une partie est retenue sur le tamis 5 mm. Dans notre cas la procédure A est sélectionnée suivant la courbe granulométrie présentée à la figure 2-2.

La norme exige le gel du spécimen dans une chambre de refroidissement dont la température est de -23 ± 3 °C pendant 24 h. Le géotextile doit aussi être en contact avec de l'eau pour qu'il se sature. Le dégel se fait dans une chambre humide dont la température est de 23 ± 3 °C pendant 23 h en gardant la source d'eau à la base de l'échantillon. Il doit y avoir de l'eau en surplus autour du géotextile pour qu'il se sature.

Quelques modifications ont été faites à la procédure expérimentale décrite par la norme ASTM D560. Les essais de gel appliqués sur la première recette ont été réalisés sous une température de congélation d'environ -11 °C qui correspond à la température minimale atteinte par la chambre de refroidissement. Par contre les essais de gel de la deuxième recette ont été réalisés dans un congélateur dont la température de gel est d'environ -23 °C.

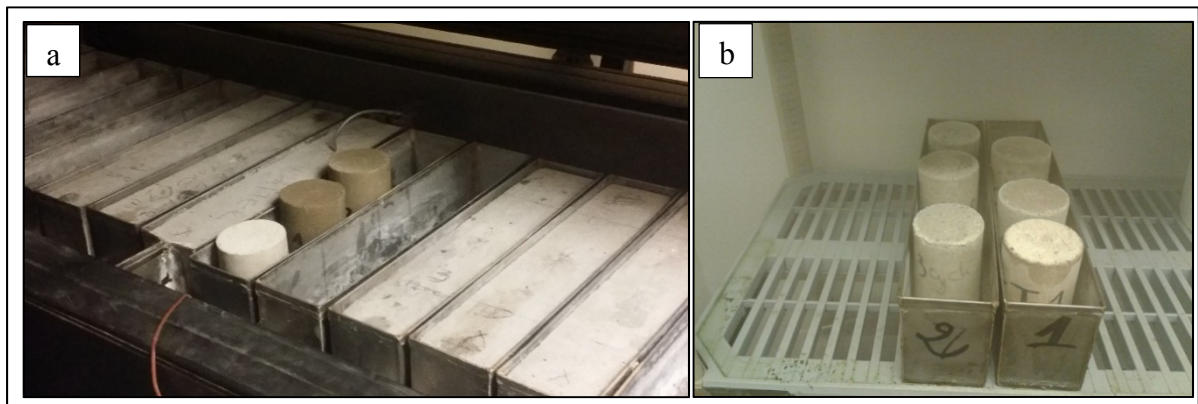


Figure 2-6 Éprouvettes dans la chambre de refroidissement (a) et dans la chambre humide (b).

2.4 Essai de perméabilité et essai de cisaillement triaxial

L'essai de perméabilité ainsi que l'essai de cisaillement triaxial ont été réalisés avec le montage de cisaillement triaxial disponible au laboratoire de mécanique des sols de l'École de technologie supérieure (ÉTS). Les deux types d'essais ont été réalisés dans les mêmes cellules triaxiales. L'essai de perméabilité a été effectué selon la norme ASTM D5084. La méthode C avec des niveaux d'eau variables en amont et en aval a été choisie.

L'essai triaxial consolidé-drainé (CD) a été effectué suivant la norme ASTM D7181. Cet essai permet la détermination de la résistance des matériaux et des relations contraintes-déformations. L'échantillon a été consolidé puis cisailé dans des conditions drainées.

Le montage expérimental est formé d'une cellule triaxiale qui joue aussi le rôle d'un perméamètre et d'un panneau de contrôle (a) qui permet de contrôler les pressions d'eau appliquées. Le panneau est aussi utilisé aussi lors de la désaération de l'eau du réservoir (b) comme intermédiaire entre la pompe à vide (c) et le ballon d'aspiration (d).

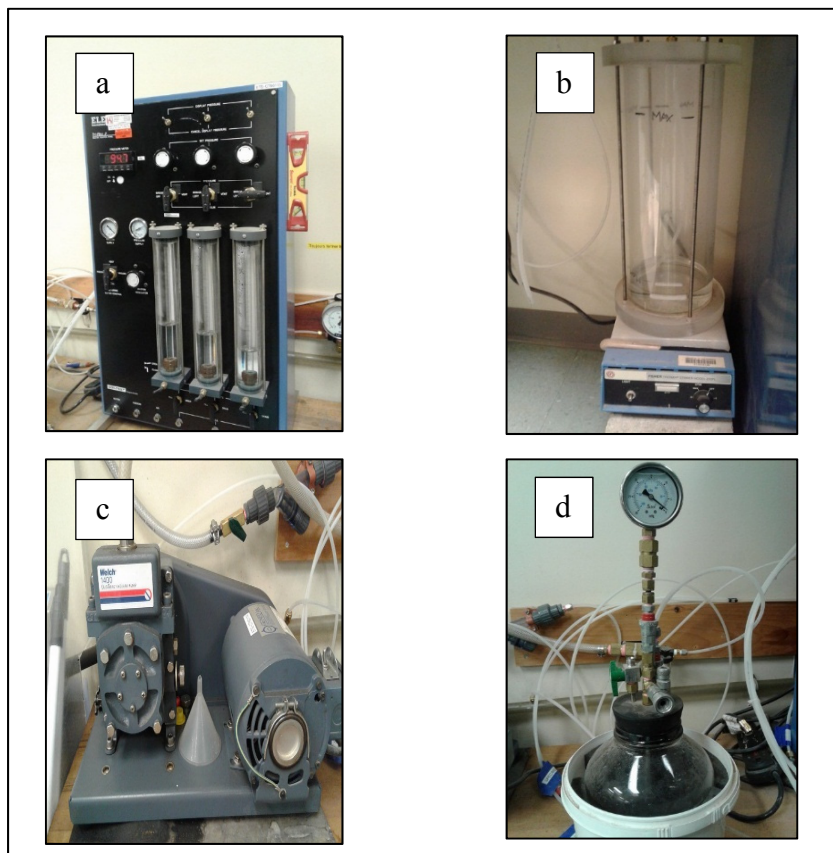


Figure 2-7 Matériel utilisé pour désaérer l'eau et pour contrôler les pressions pendant les essais en cellule triaxiale, (a) panneau de contrôle, (b) réservoir d'eau, (c) pompe à vide, (d) ballon d'aspiration.

2.4.1 Préparation des éprouvettes pour la cellule triaxiale

La préparation des éprouvettes pour l'essai de perméabilité nécessite l'utilisation d'une membrane en latex dont le diamètre est entre 90 et 95 % de celui de l'éprouvette. Cette membrane est installée à l'aide d'un moule afin d'isoler l'éprouvette et d'empêcher l'infiltration de l'eau de confinement durant l'essai. Deux joints toriques sont utilisés pour assurer l'étanchéité de membrane à la base et à la tête de l'échantillon. Deux pierres poreuses à la base et à la tête de l'éprouvette permettent une distribution égale de la pression sur toute la section de l'éprouvette.

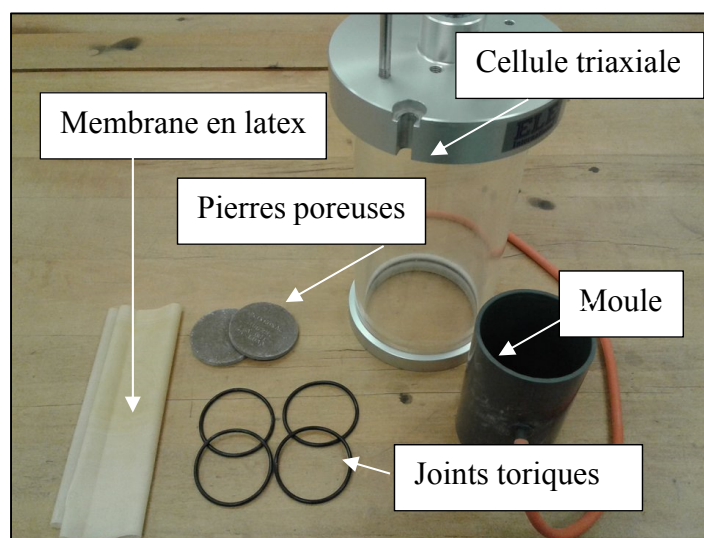


Figure 2-8 Équipement nécessaire pour la mise en place de l'éprouvette Dans la cellule triaxiale

La préparation de l'éprouvette dans la cellule triaxiale débute par la mise en place d'une pierre poreuse et un papier filtre à la base et à la tête de l'éprouvette, avant de placer la membrane au tour de l'éprouvette à l'aide d'un moule en appliquant le vide, il faut l'inspecter pour détecter les trous et les fuites. Finalement, on doit fixer les connecteurs de la pression au plateau supérieur et on installe la cellule triaxiale sur la presse et la remplir en eau.



Figure 2-9 Éprouvette placée sur la base de l'appareil triaxial

La saturation des éprouvettes a été faite en appliquant une contrepression. La saturation a été vérifiée avec le coefficient de Skempton B . Ce coefficient est défini comme le rapport de changement de pression de l'eau dans les pores d'échantillon par rapport au changement de la pression de confinement. L'échantillon est considéré saturé si $B \geq 0,95$ ou bien pour les matériaux incompressibles si la valeur de B reste constante avec l'augmentation de la contrepression (ASTM International D5084, 2003). La figure 2-10 montre la relation entre la contrepression, le degré de saturation lors de l'installation de l'éprouvette dans la cellule triaxiale et le degré de saturation finale après l'application de la contrepression. La relation présentée dans cette figure est basée sur l'hypothèse que l'eau est désaérée et que la seule source d'air dissous est l'air de l'échantillon. Après le remplissage de la cellule triaxiale avec de l'eau désaérée, une faible pression de confinement est appliquée en tournant la manille de pression. Les ports à la base et à la tête de la cellule sont connectés au panneau de contrôle puis une pression inférieure à la pression de confinement est appliquée pour éviter l'endommagement de l'échantillon.

La saturation de l'échantillon commence en effectuant des paliers en alternance entre la pression de confinement et la contrepression.

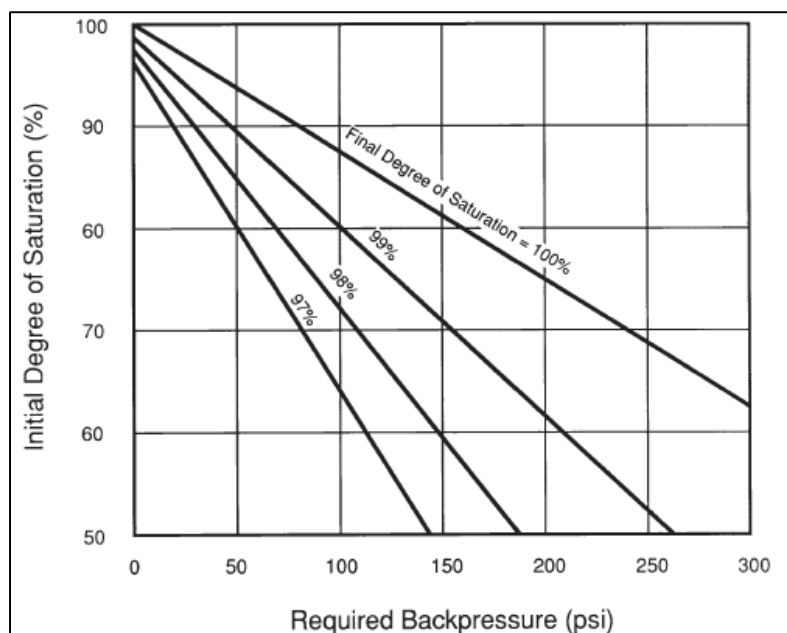


Figure 2-10 Relation entre la contrepression et les degrés de saturation initial et final (ASTM D5084, 2003).

L'essai de perméabilité débute après la saturation complète de l'éprouvette. Après avoir ajusté les niveaux de l'eau dans les burettes du panneau de perméabilité à un gradient initial égale à 20, on applique la même pression dans les deux burettes. Après, on tourne les valves à la tête et à la base de la cellule triaxiale et on déclenche un chronomètre simultanément. On prend des lectures des hauteurs de l'eau sur les deux burettes sur un intervalle de temps suffisant et jusqu'à le niveau de l'eau se stabilise.

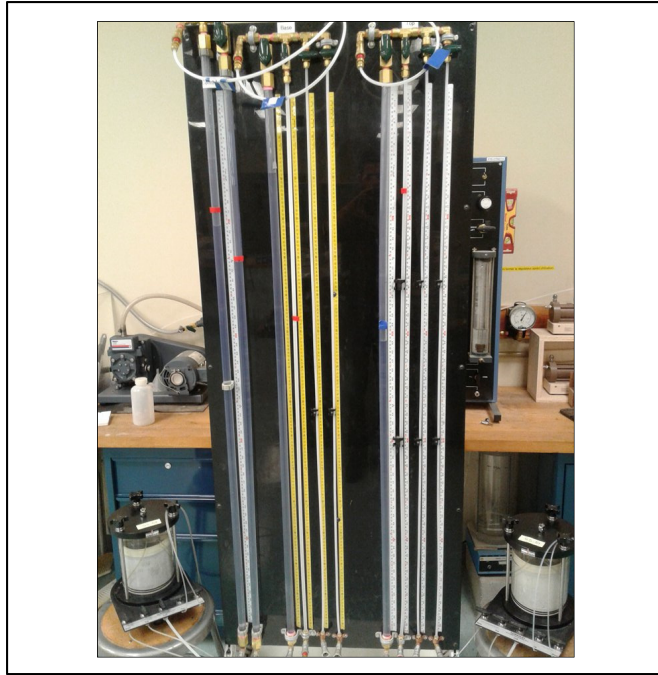


Figure 2-11 Burettes pour les essais de perméabilité

L'interprétation des essais de perméabilité est réalisée selon la relation suivante :

$$k = \frac{a_{in}a_{out} L}{(a_{in}+a_{out})A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2.1)$$

où a_{in} et a_{out} sont les sections des burettes amont et aval, A est la section de l'éprouvette ($\pi D^2/4$), h_1 et h_2 sont les différences de charge entre amont et aval au temps t_1 et t_2 et L est la longueur de l'éprouvette.

Pour faciliter le calcul et l'interprétation de l'essai, l'équation 2.1 peut être transformée en une relation linéaire entre t et $\ln(h)$. Le coefficient de perméabilité est alors déterminé à partir de la pente de la relation linéaire entre $\ln(h)$ et t :

$$k = \frac{\text{pente } a_{in}a_{out} L}{(a_{in}+a_{out})A} \quad (2.2)$$

La figure 2-12 présente l'appareil triaxial utilisé pour l'essai CD. Cet appareil est disponible au laboratoire de mécanique des sols de l'ÉTS.

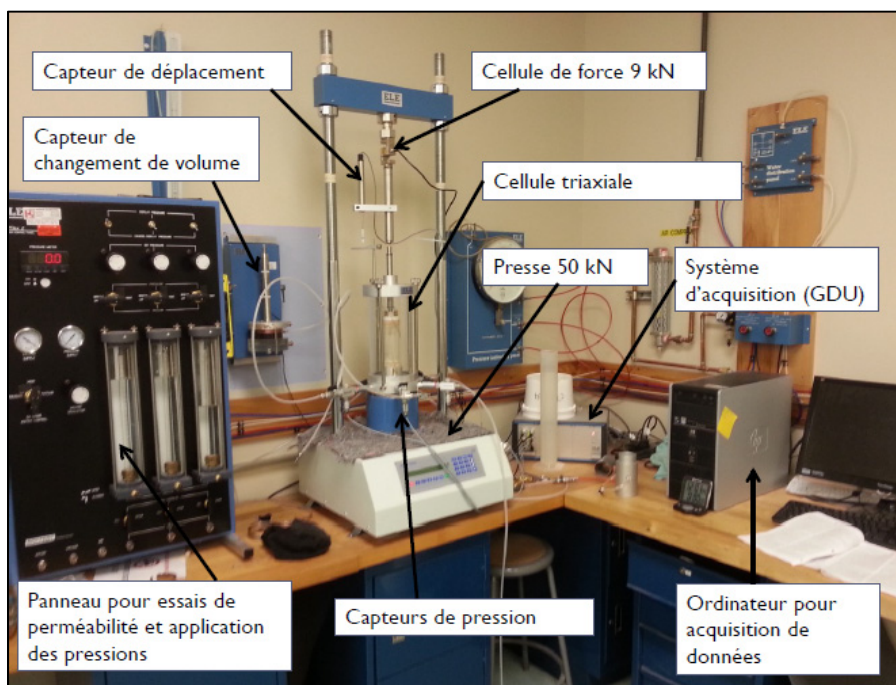


Figure 2-12 Appareil triaxial (Duhaime & Ethier, 2017)

L'essai consolidé drainé comporte trois phases : la saturation, la consolidation et finalement la compression (cisaillement). La saturation de l'échantillon a été effectuée de la manière décrite pour l'essai de perméabilité. La consolidation vise à mettre l'échantillon dans un état d'équilibre dans une contrainte de consolidation prédéfinie et dans une condition drainée. Toutes les éprouvettes sont consolidées à une contrainte effective d'environ 50 kPa. Les résultats de consolidation servent à déterminer la vitesse de déformation utilisée durant le cisaillement de l'échantillon. La vitesse de la presse est fixée à 0.0285 mm/min pour tous les essais réalisés. Finalement, le cisaillement est appliqué jusqu'à un déplacement maximal de la presse de 15 mm.

L'interprétation de l'essai CD s'effectue en suivant les différentes phases décrites dans la norme ASTM D-7181. Les résultats obtenus de l'essai de cisaillement permettent le traçage

des courbes σ_1 - σ_3 (contrainte déviatorique) versus ε (déformation) et ΔV (changement de volume) versus ε . Par conséquent on peut déterminer le déviateur et la déformation correspondante à la rupture.

2.5 Essai tomographie aux rayons X

La microstructure des échantillons a été évaluée par tomographie aux rayons X (CT). Cette méthode permet de reconstituer une image en 3D à partir de radiographies. La reconstitution de la structure 2D et/ou 3D interne est faite par un logiciel spécialisé (par exemple CT-Pro). L'appareil utilisé est un Nikon XT H 225 disponible au laboratoire institutionnel de l'ÉTS.

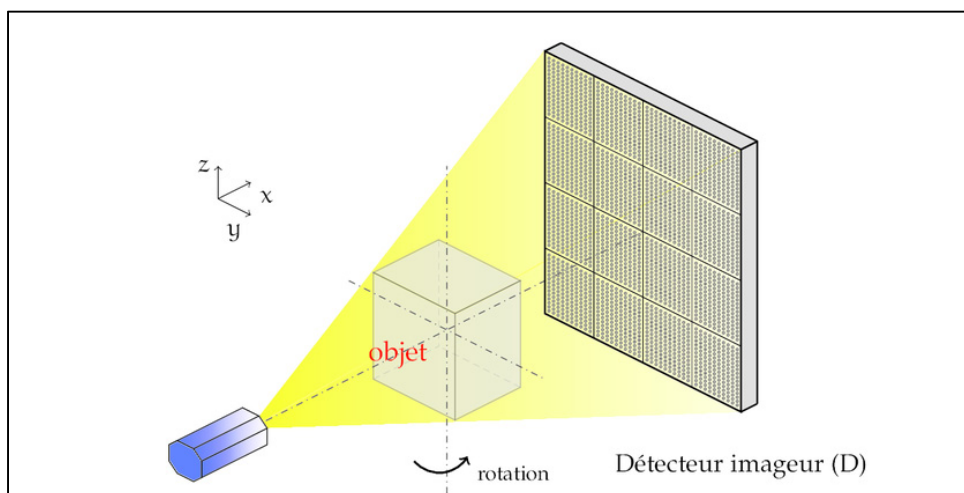


Figure 2-13 Schématisation du principe de la tomographie rayons X

Cet appareil est composé essentiellement d'une source micro-focus 225 kV et d'un détecteur numérique tel que présenté à la figure 2-13. Le détecteur correspond à un panneau en silicone amorphe qui contient un écran fluorescent capable de montrer les caractéristiques internes de l'objet testé. Le système offre un manipulateur qui permet le contrôle et le positionnement de l'objet dans le cabinet d'inspection.

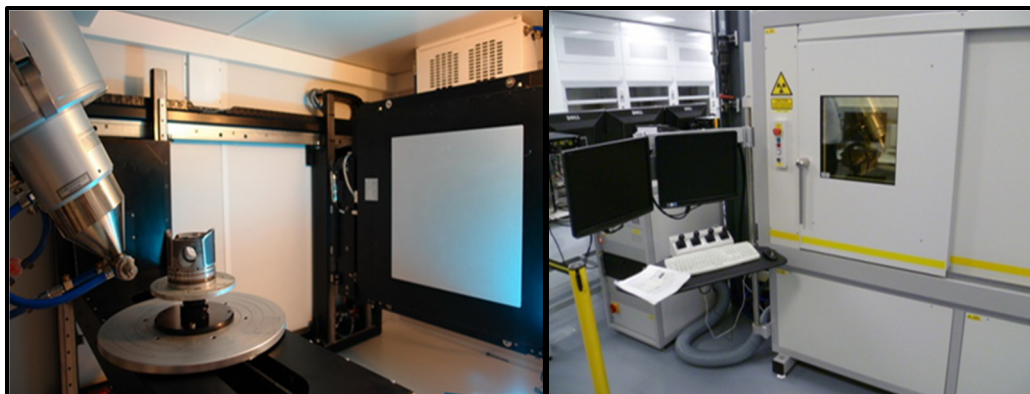


Figure 2-14 Nikon XT H 225 pour la tomographie aux rayons X.

Dans ce projet, des essais de tomographie aux rayons X sont réalisés sur des éprouvettes intactes (avant les cycles de gel-dégel) de sable-ciment et après douze cycles de gel-dégel dont le but d'évaluer le changement de la microstructure. Aussi des essais de tomographie numérique sont réalisés sur des éprouvettes qui sont confinés dans une cellule triaxiale (figure 2-15).

Les essais de tomographies numériques réalisés sur la première recette se caractérisent par un degré de résolution d'environ $50\text{ }\mu\text{m}$ et $220\text{ }\mu\text{m}$, respectivement. Par contre les éprouvettes confinées dans la cellule sont évaluées sous deux échelles de résolution différentes d'environ $60\text{ }\mu\text{m}$ et $110\text{ }\mu\text{m}$, respectivement.

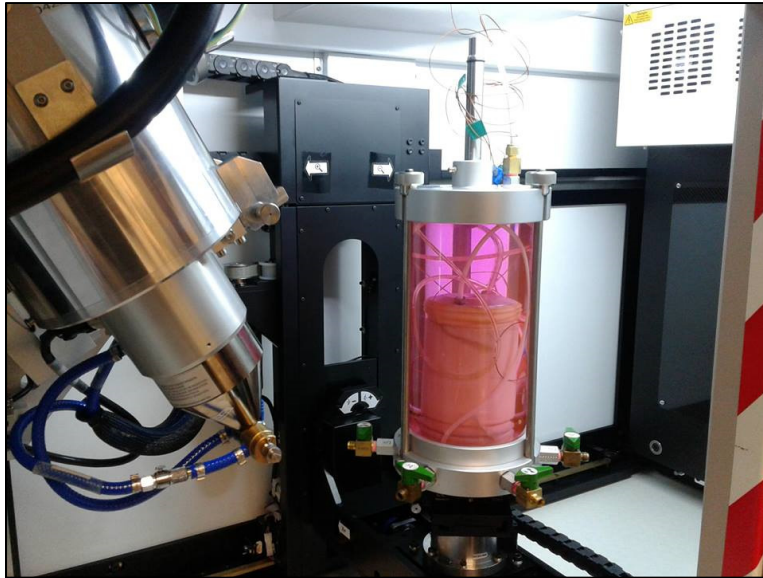


Figure 2-15 Essai tomographie rayons x sur un éprouvette confinée dans une cellule triaxiale

La manipulation de cet équipement nécessite le conditionnement de la source avant l'installation de l'éprouvette sur l'axe tournant. On doit vérifier le positionnement de l'éprouvette dont le but de bien cibler l'inspection. Après avoir enregistré des centaines d'image selon différents angles, on passe à l'étape d'optimisation de l'image (reconstruction) à l'aide de logiciel CT-Pro. À l'aide de logiciel Dragonfly on peut construire un volume interne en 3D à partir des images obtenues.

2.6 Essai de gel-dégel sous confinement

La réalisation d'un essai de gel-dégel sous une pression de confinement nécessite la création d'un dispositif expérimental capable de fournir une pression de confinement et permet l'application des plusieurs cycles successifs de gel-dégel. Une cellule triaxiale *ELE International* du laboratoire mécanique des sols de l'*ETS* a été utilisée en ajoutant certaines modifications selon les besoins.

2.6.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à geler et dégeler l'échantillon dans une cellule triaxiale sous une pression de confinement d'environ $60 \text{ kPa} \pm 10 \text{ kPa}$. Le fluide de confinement utilisé correspond à un mélange d'éthylène glycol (50%) et de d'antigel de plomberie (50%). Par analogie avec la procédure de gel-dégel de la norme ASTM D560, le gel dure 24h dans un congélateur de température égale à $-23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Le temps de dégel est aussi 24h sous une température ambiante d'environ $24^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

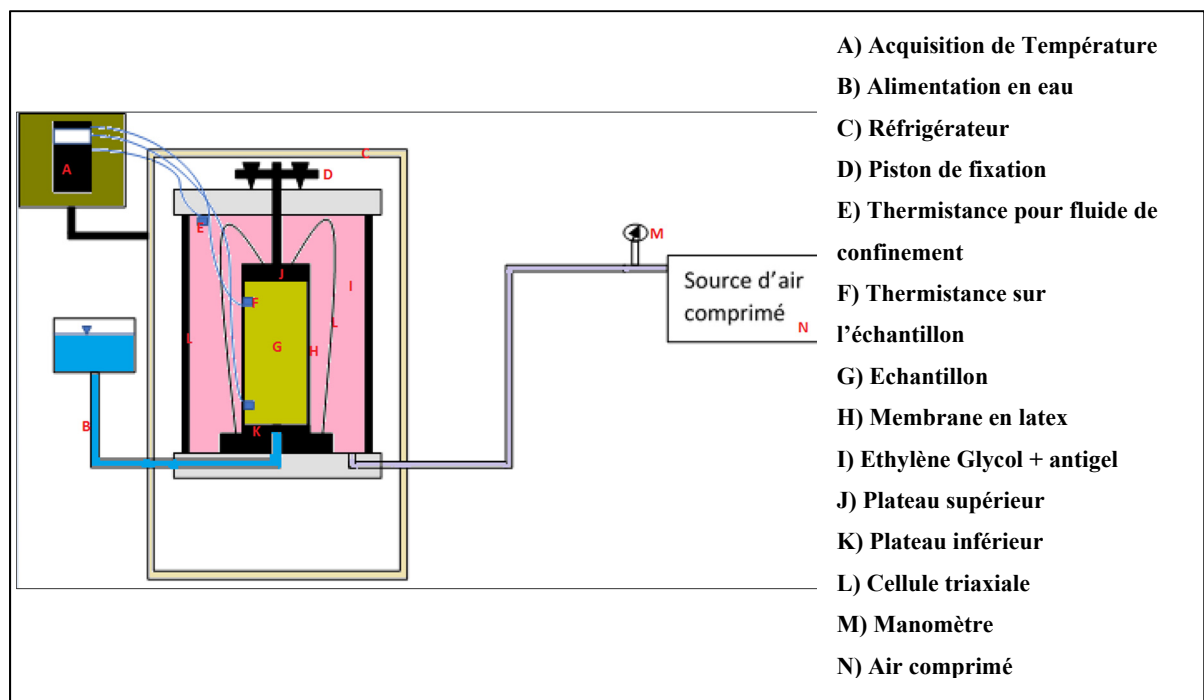


Figure 2-16 Présentation schématique du montage de gel-dégel

2.6.2 Appareillage

Le montage présenté à la figure 2-16 est formé par 4 principaux systèmes;

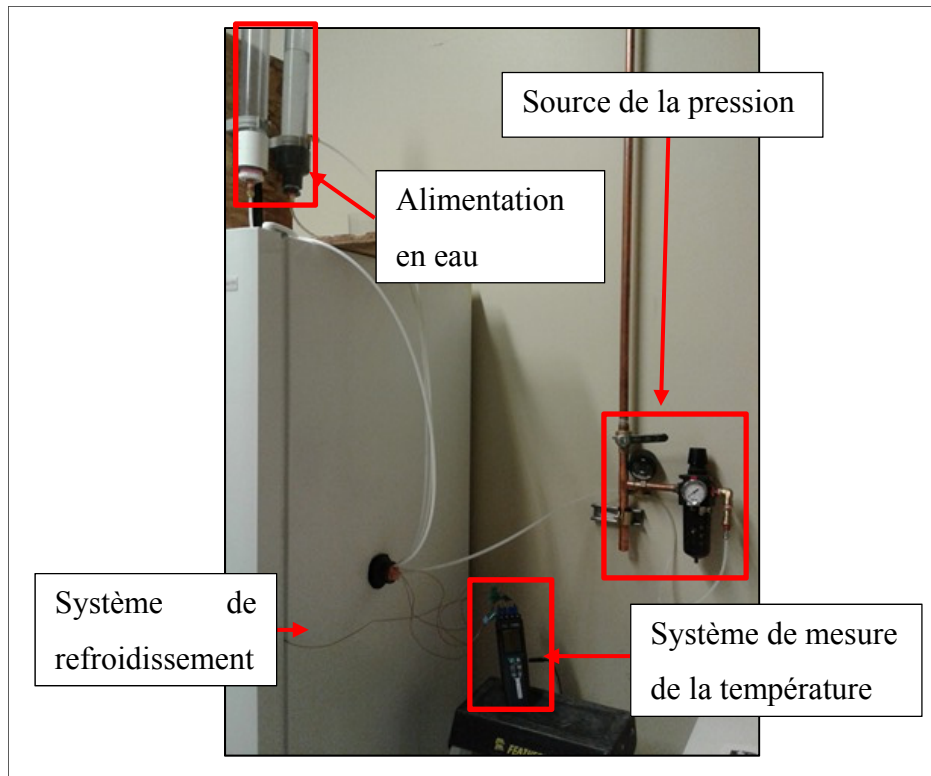


Figure 2-17 Composantes du montage de gel-dégel

- Une source de pression (figure 2-17) : correspond à une valve de réseau d'air comprimé de l'ÉTS et d'un régulateur de pression et d'un manomètre. Tout le système permet l'alimentation de la cellule en pression.



Figure 2-18 Système d'alimentation de la pression

- Système de mesure de la température (figure 2-19) : correspond à un afficheur de température lié à des thermocouples et qui mesure respectivement la température T1 du fluide de confinement, la température T2 au sommet de spécimen, la température T3 à la base de spécimen et la température T4 du congélateur.



Figure 2-19 Afficheur de la température

- Système d'alimentation en eau (figure 2-19) : correspond à deux réservoirs, le premier sert à remplir la cellule triaxiale en fluide de confinement par gravité et le deuxième est utilisé comme source d'alimentation en eau de l'éprouvette par la base lors du gel-dégel.

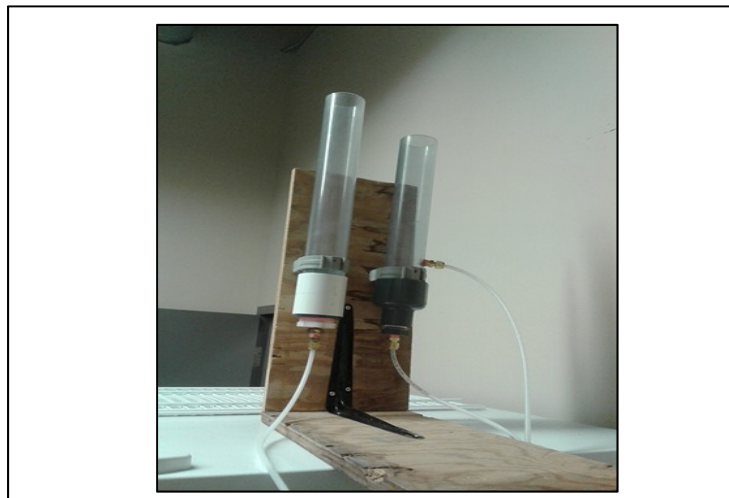


Figure 2-20 Réservoirs d'eau et de fluide de confinement

- Système de refroidissement (figure 2-20) : correspond à un congélateur de température minimale d'environ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. La cellule triaxiale est placée à l'intérieur du congélateur pendant toute la période de gel.

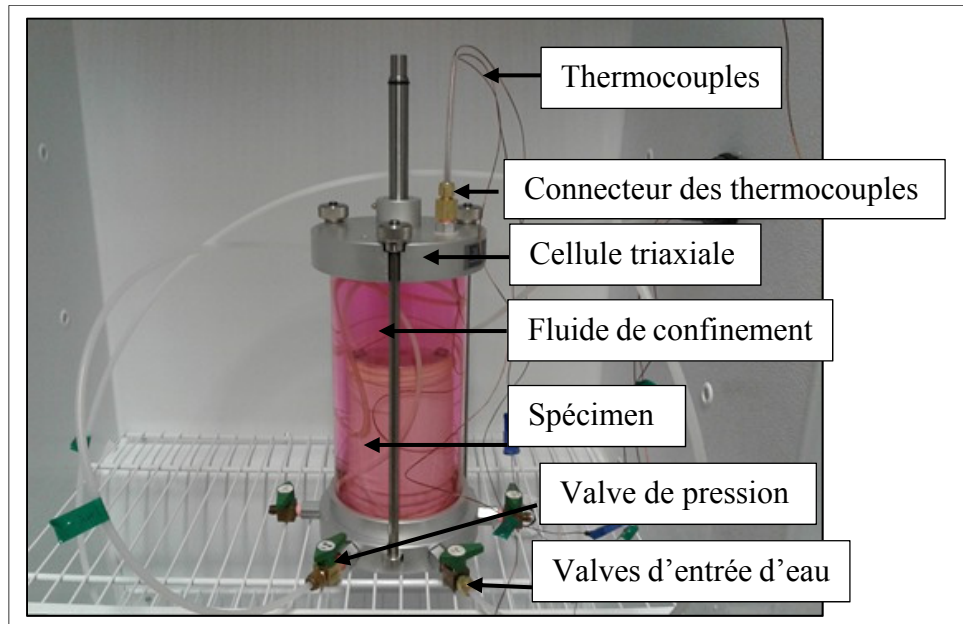


Figure 2-21 Cellule de gel placée dans le congélateur

2.6.3 Procédure de l'essai

L'essai de gel-dégel commence par la fixation des thermocouples sur la surface de l'éprouvette à l'aide d'une membrane supplémentaire et la mise en place de l'éprouvette dans la cellule triaxiale. On installe ensuite cette dernière dans le congélateur et on connecte les thermocouples et le tuyau de fluide de confinement pour remplir la cellule. On applique une pression de confinement de $60\text{ kPa} \pm 10\text{ kPa}$ et on connecte les tubulures qui amènent l'eau au spécimen. On fait fonctionner le congélateur et on commence la phase de gel en suivant le changement de température. Après 24 h de gel, on arrête le congélateur et on laisse l'éprouvette dégeler à la température ambiante.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'influence des cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique, le comportement contrainte-déformation, la résistance au cisaillement et la microstructure de deux mélanges sol-ciment par des essais de conductivité hydraulique et des essais triaxiaux consolidés drainés.

3.1 Comportement du mélange 1 sable-ciment lors des cycles de gel-dégel

Le mélange 1 sable-ciment a été évalué à un pourcentage de ciment de 12 % et une teneur eau de 11 % (par rapport à la masse sèche).

3.1.1 Conductivité hydraulique

Le tableau 3-1 présente la conductivité hydraulique des éprouvettes de contrôle et des éprouvettes exposées aux cycles de gel-dégel. Les valeurs du coefficient B de Skempton sont aussi associées à chaque essai afin de montrer les conditions de saturation des différents spécimens. Selon la norme ASTM D5084, le coefficient B doit être supérieur à 0,95 pour que l'éprouvette soit saturée, mais ce n'est pas le cas dans ce projet à cause de la rigidité des éprouvettes.

Tableau 3-1 Conductivité hydraulique
en fonction des cycles de gel-dégel

	Conductivité hydraulique (cm/s)			
	Éprouvette 1	Éprouvette 2	Éprouvette 3	Moyenne Géométrique
Contrôle	$1,25 \times 10^{-6}$	$2,20 \times 10^{-5}$	$8,20 \times 10^{-6}$	$6,09 \times 10^{-6}$
	B=0.87	B=0.86	B=0.82	
1 cycles	$3,04 \times 10^{-5}$	$9,66 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-4}$	$6,99 \times 10^{-5}$
	B=0.71	B=0.62	B=0.76	
3 cycles	$5,60 \times 10^{-4}$	$3,24 \times 10^{-5}$	$4,22 \times 10^{-5}$	$9,15 \times 10^{-5}$
	B=0.86	B=0.82	B=0.84	
6 cycles	$3,45 \times 10^{-7}$	$6,24 \times 10^{-5}$	$2,60 \times 10^{-5}$	$8,24 \times 10^{-6}$
	B=0.93	B=0.82	B=0.89	
12 cycles	$1,68 \times 10^{-5}$	$4,30 \times 10^{-7}$	$4,45 \times 10^{-6}$	$2,85 \times 10^{-6}$
	B=0.85	B=0.85	B=0.83	

La courbe 3-1 montre la variation de la conductivité hydraulique en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. Durant les 3 premiers cycles une augmentation de la conductivité hydraulique est observée. Cette augmentation est suivie d'une diminution progressive à partir de sixième cycle.

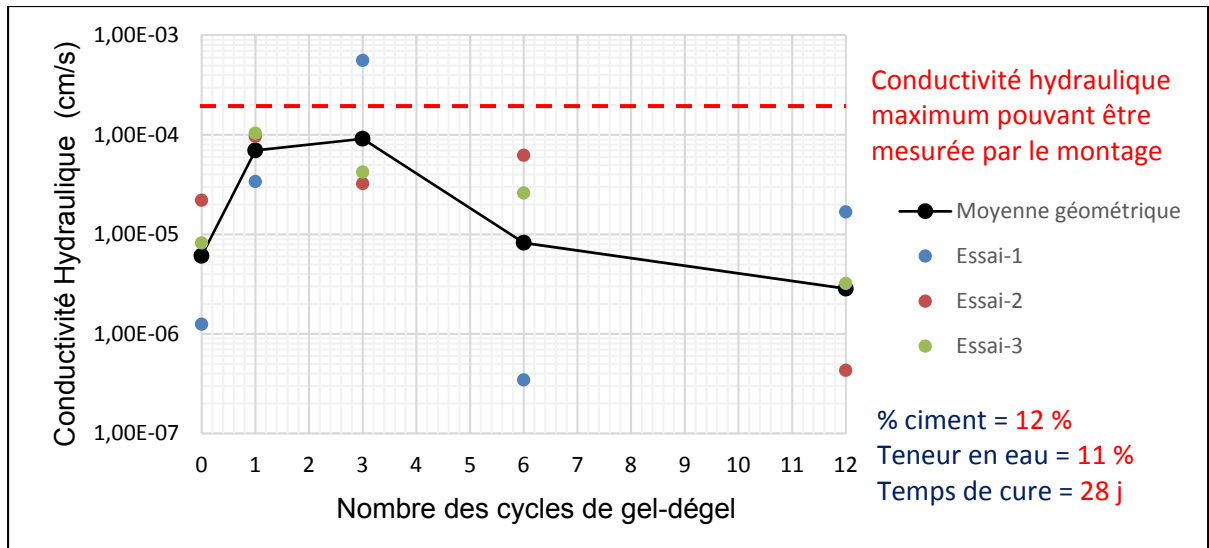


Figure 3-1 Changement de la conductivité hydraulique du mélange 1 en fonction du nombre de cycles de gel-dégel

Cette tendance peut être expliquée par l'hydratation du ciment qui se prolonge dans le temps de gel et par conséquent la diminution de l'interconnectivité du réseau poreux. L'imperméabilisation des spécimens due à l'hydratation continue du ciment est un phénomène discuté par Jamshidi, Lake, & Barnes (2014). En effet, les résultats d'un spécimen de sable silteux exposé à différents cycles de gel-dégel montrent qu'après douze cycles de gel-dégel sous une température de congélation d'environ -2 °C, les performances du spécimen s'améliorent en comparaison avec les résultats obtenus après quatre cycles de gel-dégel. Cependant, une analyse statistique plus poussée des résultats est nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

3.1.2 Propriétés mécaniques

Cette section traite du comportement contrainte-déformation, du changement de la résistance à la rupture et du mode de déformation des éprouvettes à la fin de chaque essai triaxial.

3.1.2.1 Comportement contrainte-déformation

Les courbes contraintes-déformations sont corrigées pour éliminer le décalage causé par la mise en place de l'éprouvette au début de chargement. Cette mise en place augmente la déformation apparente à la rupture.

Les courbes contraintes-déformations de la figure 3-2 peuvent être divisées en trois parties: élastique linéaire, non linéaire, et post-rupture. Les éprouvettes se caractérisent par un comportement anti-écrouissage (*strain-softening*) qui se manifeste par un pic clair suivi d'une diminution de la contrainte. Après une partie linéaire initiale, la contrainte déviatorique continue d'augmenter jusqu'à la contrainte déviatorique maximale. Après le premier cycle de gel-dégel ainsi qu'après 3 cycles, on remarque une diminution de la contrainte déviatorique maximale comparativement à l'éprouvette n'ayant pas subi de gel-dégel (0 cycle). Par contre, après 12 cycles de gel-dégel, la contrainte déviatorique maximale a dépassé celle mesurée à 0 cycles. La déformation axiale mesurée à la rupture a semblé peu affectée par le nombre de cycles de gel-dégel. Elle est apparue légèrement inférieure à celles mesurées à 0 cycles de gel-dégel après 1 et 3 cycles de gel. Cependant, après 12 cycles l'éprouvette retrouve sa rigidité initiale avec une déformation axiale presque égale à celle de l'éprouvette du contrôle (0 cycle).

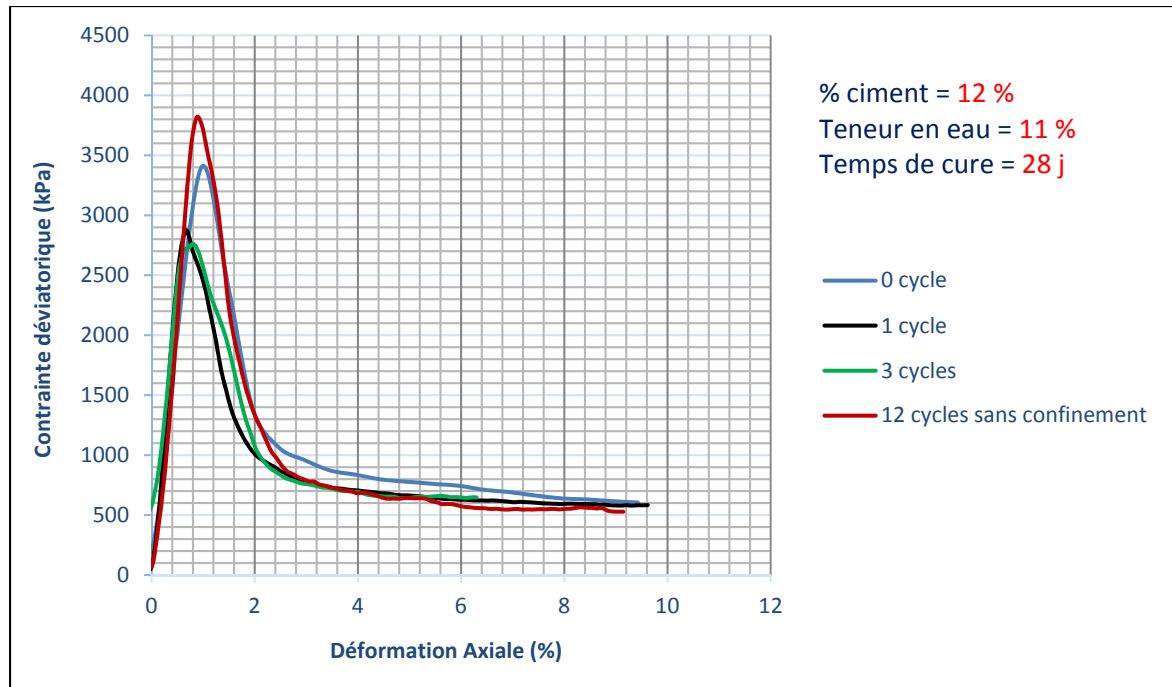


Figure 3-2 Courbes contraintes-déformations du mélange 1 en fonctions des cycles de gel-dégel

Les courbes contraintes-déformations suggèrent également l'existence d'un état ultime, à partir duquel la contrainte déviatorique tend vers une valeur constante. Cet état ultime ne semble pas être affecté par le gel-dégel.

3.1.2.2 Résistance à la compression

Les résultats des essais triaxiaux montrent une variation de la résistance en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. Durant les premiers cycles, la résistance diminue alors qu'après 12 cycles, les spécimens deviennent plus résistants. Ce comportement appuie l'hypothèse qui a été formulée précédemment pour expliquer les variations de la conductivité hydraulique suite aux cycles de gel-dégel : l'hydratation continue du ciment augmente davantage la résistance mécanique des éprouvettes que le gel-dégel ne l'affecte. Les résultats de Jamshidi et al. (2014) montrent que la résistance à la compression non confinée de sable silteux exposé à 12 cycles de gel-dégel sous une température de -2°C augmente par rapport à la valeur observée après seulement quatre cycles. Par ailleurs, l'augmentation de la résistance en fonction du nombre

de cycles de gel-dégel est expliquée par Orakoglu et Liu (2017). Au cours du processus de gel-dégel les performances physiques des sols changent, de sorte que le sol évolue d'un état instable à un nouvel état d'équilibre dynamique. Cependant, il demeure difficile de confirmer cette hypothèse avec le nombre limité d'éprouvettes, notamment si la variabilité observée est attribuable seulement à l'hydratation du ciment ou bien si elle est due à la variabilité inter-spécimen.

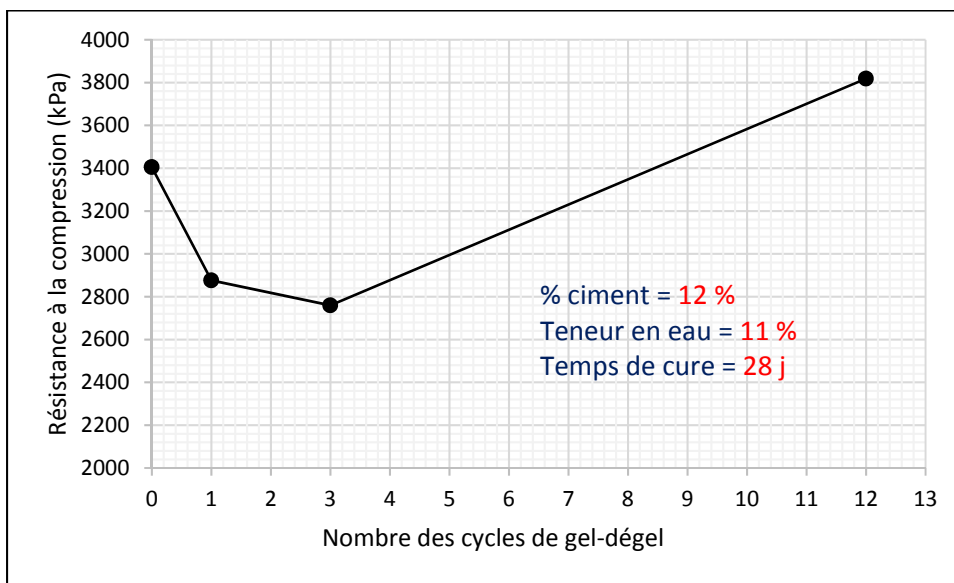


Figure 3-3 Résistance à la compression en fonction du nombre de cycles de gel-dégel

3.1.2.3 Mode de la rupture

Le nombre des cycles de gel-dégel n'a pas d'effet sur le mode de rupture des spécimens. Le spécimen de contrôle et les spécimens exposés au gel montrent un mode de rupture en plan dont la bande de cisaillement est épaisse (figure 3-4).



Figure 3-4 Mode de rupture des éprouvettes du premier mélange sable-ciment en fonction du nombre des cycles de gel-dégel

3.1.3 Microstructure

Les résultats de tomographie aux rayons x (figures 3-5 et 3-6) montrent que le changement de la microstructure après 12 cycles de gel-dégel n'est pas significatif. Le mécanisme de dégradation observé avec les argiles n'est pas observé avec ce type des matériaux qui se caractérise par une résistance en compression élevée à cause de la capacité de liaison des produits de l'hydratation de ciment.

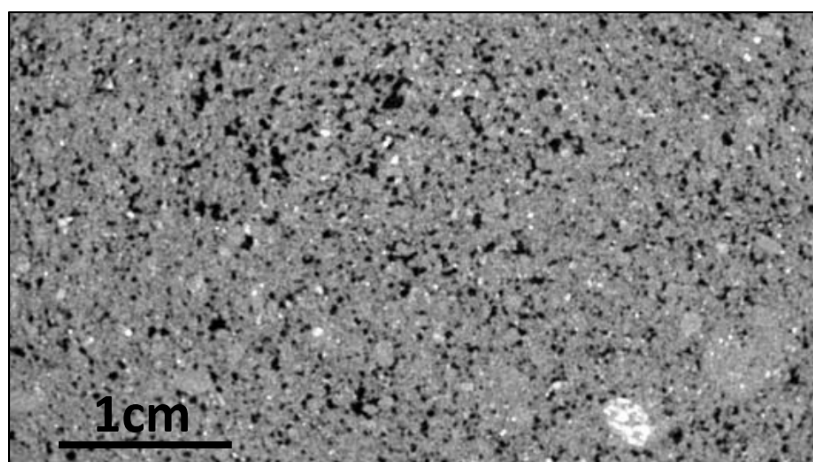


Figure 3-5 Microstructure de l'éprouvette de contrôle du premier mélange

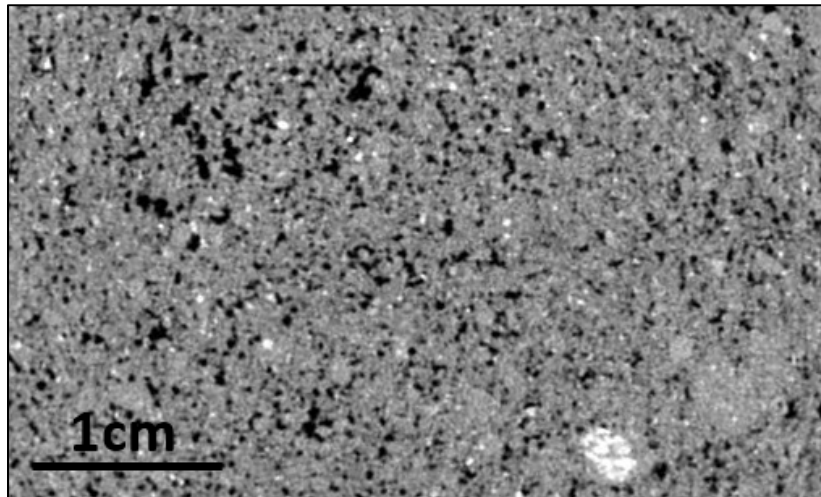


Figure 3-6 Microstructure après 12 cycles de gel-dégel
du premier mélange

Une détérioration de la base de l'éprouvette est observée à la fin des cycles de gel-dégel, surtout dans la zone saturée en eau (figure 3-7). Cette observation nous amène à évaluer la microstructure à ce niveau de spécimen.



Figure 3-7 Détérioration à la base de spécimen
sous l'effet de gel-dégel

La figure 3-8 montre qu'après 12 cycles de gel-dégel, la dégradation ne touche pas que l'extérieur de l'éprouvette.

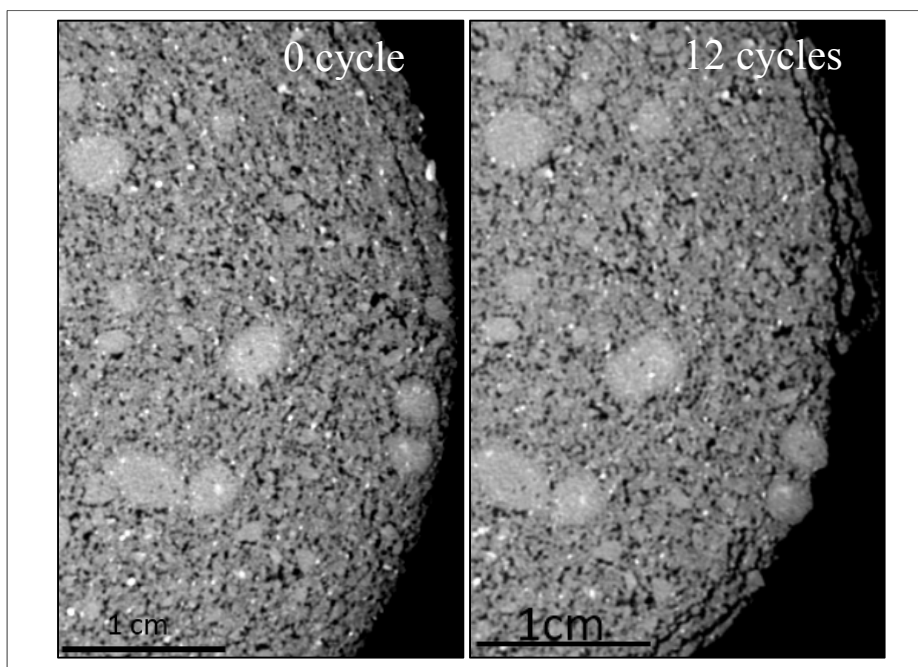


Figure 3-8 Dégradation de la superficie du spécimen après 12 cycles de gel-dégel

Les résultats des essais de conductivité hydraulique et de la résistance au cisaillement montrent que les propriétés changent légèrement en fonction de nombre de cycles de gel-dégel. En effet, une augmentation de la conductivité hydraulique et une détérioration de la résistance au cisaillement sont observés aux premiers cycles. Après 12 cycles, la conductivité hydraulique diminue et la résistance s'améliore. Cette tendance peut être expliquée par l'hydratation continue de ciment durant le gel.

Cette hypothèse nécessite d'autres essais pour la confirmer. Cependant, la tendance observée peut être aussi due à l'hétérogénéité inter-spécimen. L'analyse de la microstructure à partir des images CT-scan montre que l'effet de gel-dégel n'est pas significatif sauf au niveau de l'extrémité des spécimens dans la partie saturée en eau.

Une deuxième recette est proposée avec 5 % de ciment et une teneur en eau optimale pour évaluer l'effet des cycles de gel-dégel sur les propriétés de mélange sable-ciment. Certaines modifications sont introduites durant la préparation des spécimens afin de minimiser les sources de l'hétérogénéité des spécimens.

3.2 Évaluation de la durabilité au gel-dégel de mélange 2 sable-ciment

Certaines modifications ont été attribuées à la préparation de la deuxième recette afin de minimiser les sources de l'hétérogénéité inter-spécimen et de bien contrôler les effets de gel-dégel sur les propriétés de mélange sable-ciment.

3.2.1 Conductivité hydraulique

Après la réalisation de l'essai de conductivité hydraulique sur le spécimen de contrôle (0 cycle de gel-dégel), ce dernier a été exposé à 3 et 12 cycles de gel-dégel avant de répéter l'essai de conductivité hydraulique après chaque nombre des cycles. La figure 3-9 compare les résultats de conductivité hydraulique dans les conditions de contrôle et les conditions de gel-dégel.

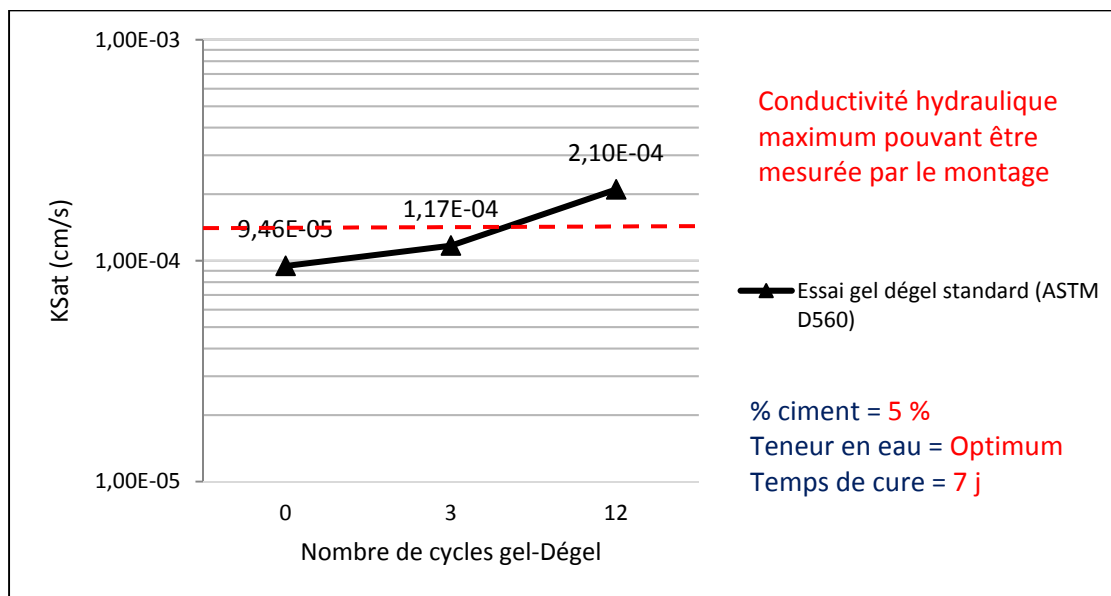


Figure 3-9 Changement de conductivité hydraulique de mélange 2 en fonction de nombre des cycles de gel-dégel

La figure 3-9 montre une légère augmentation de la conductivité hydraulique en fonction de nombre des cycles de gel-dégel. Jamshidi et al. (2014) ont évalué la conductivité hydraulique de sable silteux traité au ciment (12 % de ciment) sous 12 cycles de gel-dégel. Ils ont montré une détérioration plus élevée de la conductivité hydraulique à cause des cycles de gel-dégel. Ces résultats ont été expliqués par le pourcentage élevé de ciment, lequel a limité l'espace des vides et, par conséquent, l'espace pour la dilatation de l'eau lorsqu'elle gèle. Il s'ensuit donc une augmentation des contraintes à l'intérieur de l'échantillon.

Guney et al. (2006) ont évalué un mélange sol-ciment compacté à une teneur en eau optimale et avec 5 % de ciment. Après 8 cycles de gel-dégel, la conductivité hydraulique augmente de 20 fois. Le sol utilisé dans cette recherche était un sable de fonderie caractérisé par un pourcentage de fine dépassant 24%, ce qui explique sa forte susceptibilité au gel-dégel.

3.2.2 Propriétés mécaniques

Les courbes contrainte-déformation du deuxième mélange sable-ciment montrent des intervalles de contraintes de cisaillement plus faibles que les valeurs obtenues avec le premier mélange à cause de la diminution du pourcentage de ciment et du temps de cure. Cependant, la même tendance a été observée, soit une diminution, puis une augmentation de la contrainte déviatorique maximale (figure 3-10).

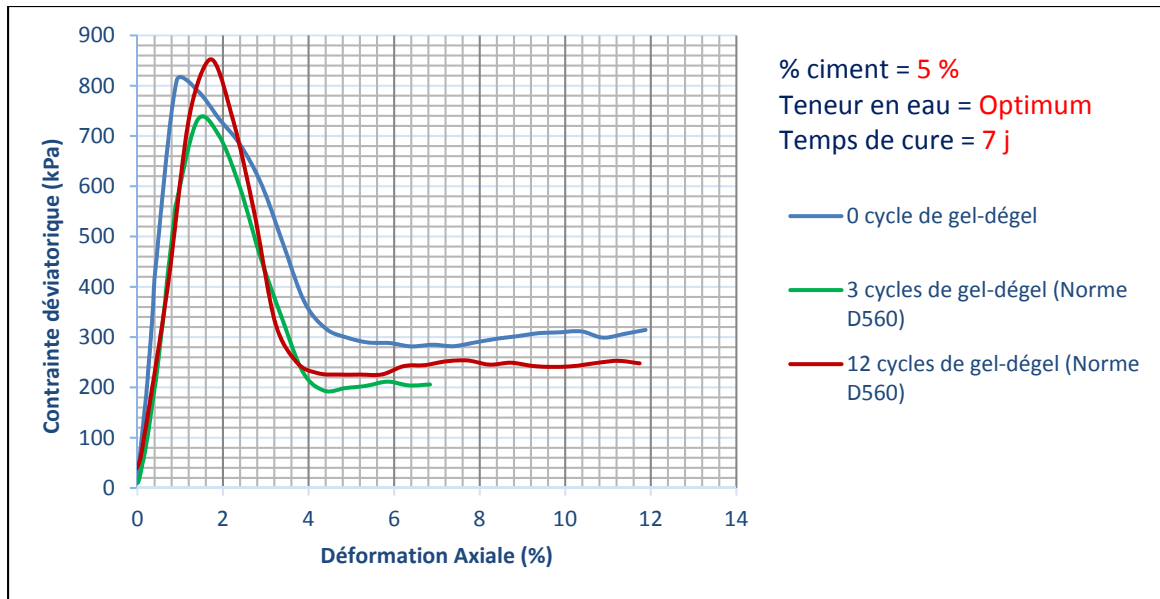


Figure 3-10 Courbes contrainte-déformation du mélange 2 en fonction du nombre des cycles de gel-dégel

La résistance à la compression tend à diminuer d'environ 70 kPa après les trois premiers cycles (figure 3-11). Après 12 cycles de gel-dégel, une légère augmentation de la résistance est observée par rapport à l'éprouvette de contrôle.

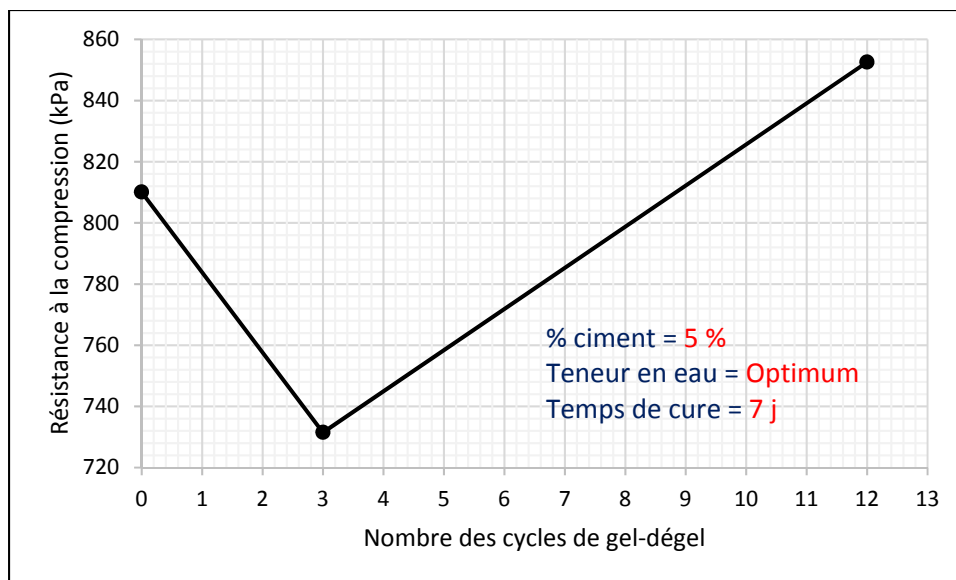


Figure 3-11 Résistance à la compression en fonction des cycles de gel-dégel pour la deuxième recette

La figure 3-12 montre le mode de rupture en fonction de nombre des cycles de gel-dégel. Un mode de rupture en plan est bien identifié avec une bande épaisse de cisaillement.

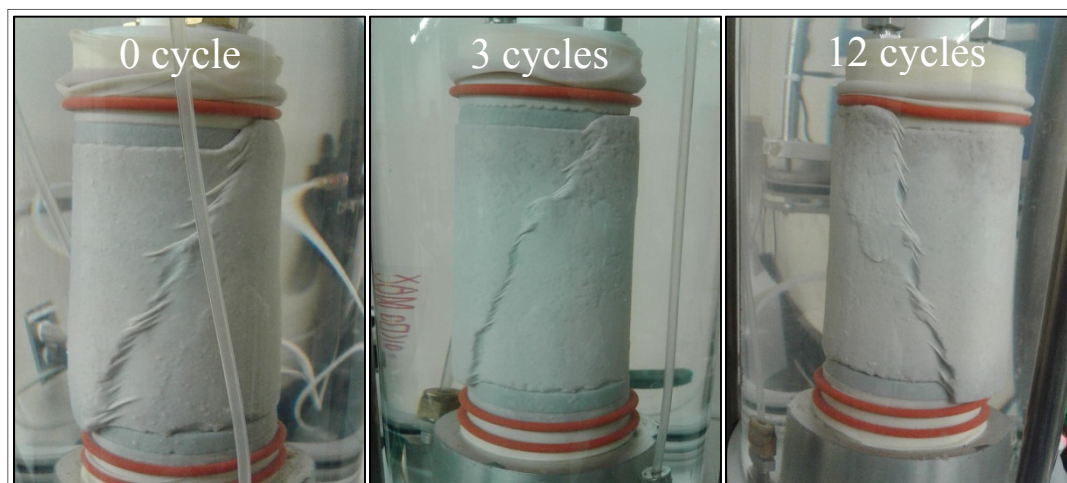


Figure 3-12 Mode de rupture des spécimens du deuxième mélange sable-ciment en fonction du nombre des cycles de gel-dégel

3.2.3 Microstructure

Les résultats de tomographie aux rayons x réalisé sur les éprouvettes de deuxième mélange sable-ciment montrent que les cycles répétitifs de gel-dégel ne change pas la distribution de la structure poreuse (figures 3-13 et 3-14).

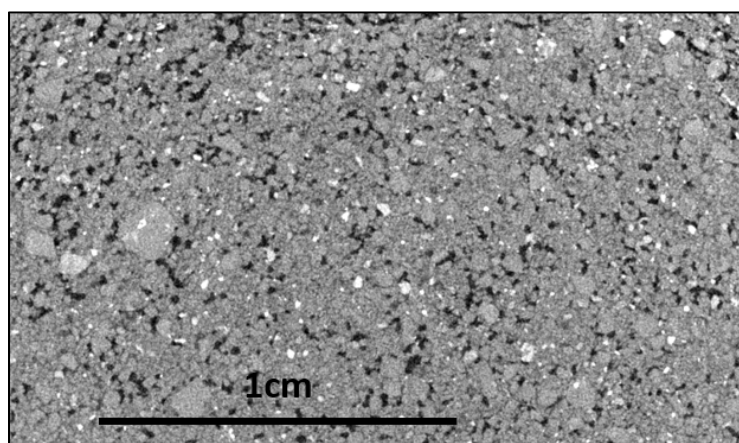


Figure 3-13 Microstructure de l'éprouvette de contrôle du deuxième mélange

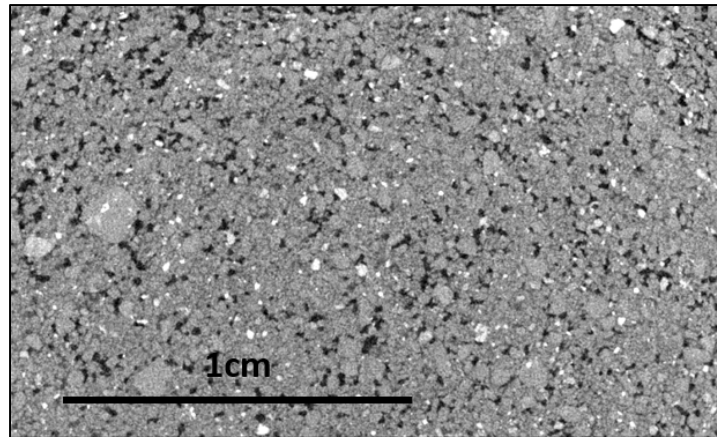


Figure 3-14 Microstructure après 12 cycles de gel-dégel
du deuxième mélange

3.3 Évaluation de l'interaction entre les cycles de gel-dégel et la pression de confinement pour le deuxième mélange sable-ciment

L'objectif principal de la recherche est l'évaluation de l'effet de l'interaction des cycles de gel-dégel et de la pression de confinement sur les propriétés hydrauliques et mécaniques des spécimens de sable-ciment. Donc certains essais de cisaillement triaxial et de perméabilité sont effectués sur les éprouvettes de deuxième mélange.

3.3.1 Conductivité hydraulique

La figure 3-13 montre le changement de la conductivité hydraulique en fonction du nombre des cycles de gel-dégel et sous deux contraintes de confinement différentes.

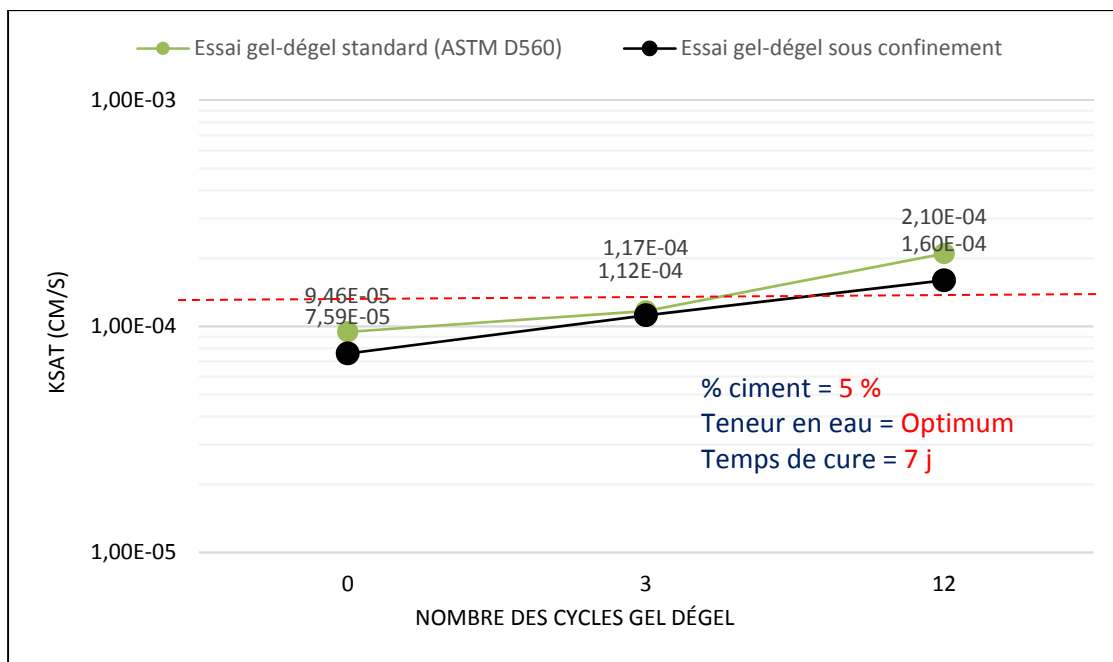


Figure 3-15 Effet de la pression de confinement sur le changement de la conductivité hydraulique sous des conditions de gel-dégel

Les résultats de la conductivité hydrauliques ne montrent pas une interaction marquée entre l'effet des cycles de gel-dégel et la pression de confinement. La conductivité hydraulique tend à augmenter légèrement en fonction du nombre des cycles de gel-dégel dans les deux conditions d'essai.

3.3.2 Propriétés mécaniques

Après les trois premiers cycles de gel-dégel, la résistance à la compression diminue quel que soit les conditions de gel-dégel. La détérioration de la résistance du spécimen sous confinement est plus importante d'environ 120 kPa par rapport au spécimen sous des conditions de gel-dégel standard. Cette variation ne peut pas être attribuée à l'effet de la pression de confinement parce que la pression de confinement tend à supporter la structure de spécimen et empêcher sa dilatation. Cependant, les trois essais sont appliqués sur trois spécimens différents donc la variation observée est liée forcément à la variabilité inter-spécimen.

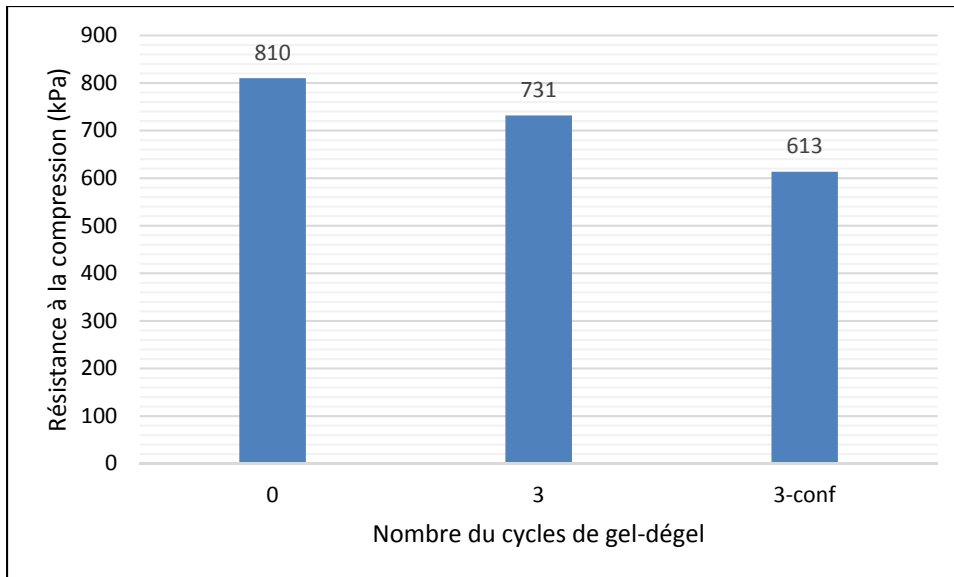


Figure 3-16 Effet du confinement sur la résistance à la compression après 3 cycles de gel-dégel

La figure 3-15 montre un décalage vers la droite de la courbe contrainte-déformation de spécimen évalué sous une pression de confinement par rapport à l'éprouvette de contrôle et l'éprouvette sous des conditions non confinées de gel-dégel standard. Le pic de cisaillement est à peu près à 1 % de déformation plus élevé par rapport aux autres pics de déformation. Cette petite variation met en évidence l'effet de confinement sur la résistance au cisaillement. En effet, l'éprouvette qui subit des cycles de gel-dégel sous une pression de confinement acquies une certaine rigidité qui se manifeste par un pourcentage élevé de déformation axiale à la rupture.

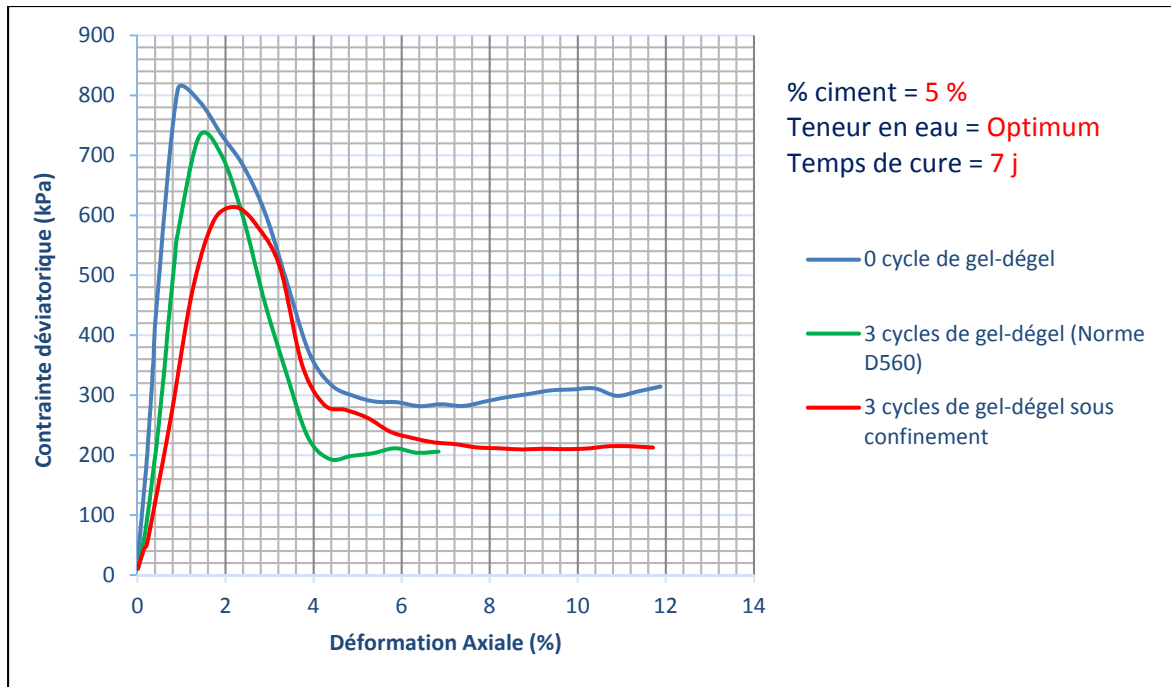


Figure 3-17 Interaction entre l'effet de gel-dégel et la pression de confinement sur la résistance au cisaillement après 3 cycles de gel-dégel

La courbe 3-16 montre aussi un décalage plus intense de pic de cisaillement de la courbe contrainte-déformation sous confinement après 12 cycles de gel-dégel. Le cisaillement s'effectue à 4% de déformation, cette tendance peut être à l'origine de la pression de confinement qui support la structure de l'éprouvette sable-ciment.

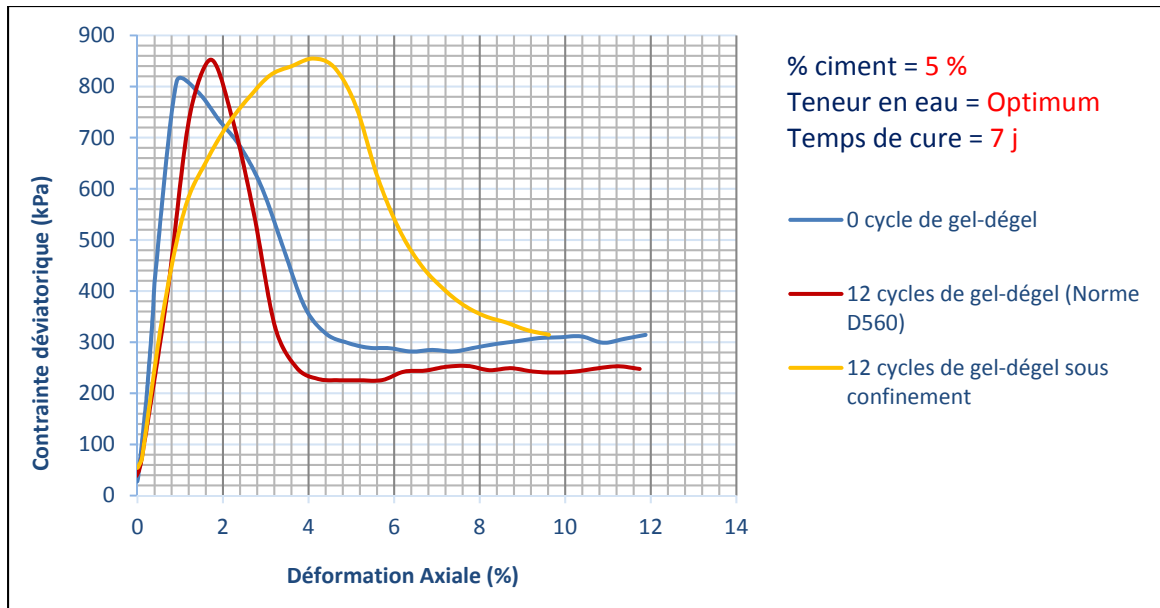


Figure 3-18 Interaction entre l'effet des cycles de gel-dégel et la pression de confinement sur la résistance au cisaillement après 12 cycles de gel-dégel

Après 12 cycles de gel-dégel la résistance à la compression augmente d'environ 40 kPa dans les deux conditions d'essai. Les cycles répétés de gel modifient les performances physiques des éprouvettes jusqu'à une certaine stabilité indépendante de la pression de confinement.

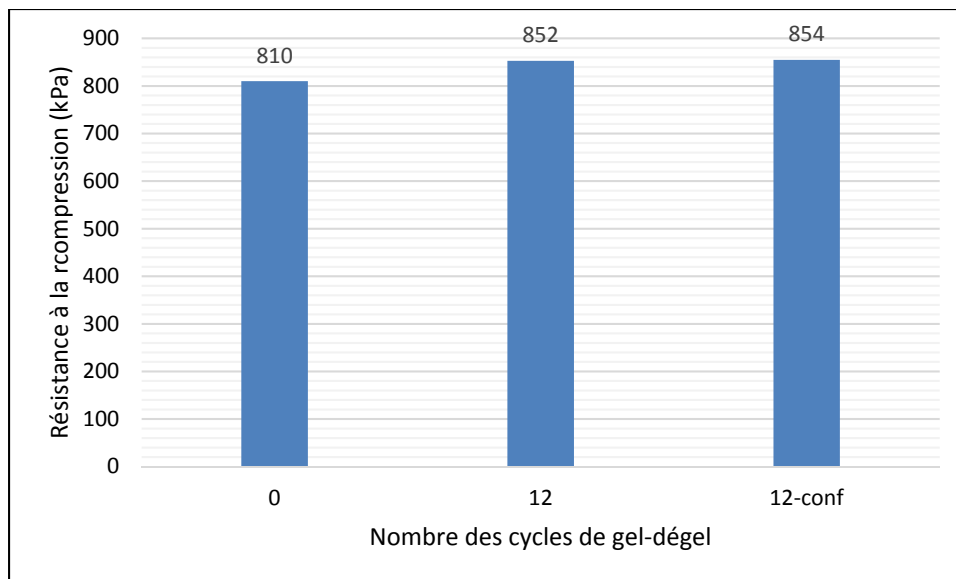


Figure 3-19 Effet du confinement sur la résistance à la compression après 12 cycles de gel-dégel

Le mode de rupture présenté à la figure 3-18 montre que les spécimens se comportent de la même façon quel que soit les conditions et le nombre de cycles de gel-dégel.



Figure 3-20 Mode de rupture après des cycles de gel-dégel sous une pression de confinement

3.3.3 La microstructure

Afin d'évaluer le changement de la microstructure sous l'effet de gel-dégel et sous une pression de confinement, on a essayé de faire un essai de tomographie numérique sur un spécimen confiné dans une cellule triaxiale.

Les photos préliminaires montrent une mauvaise résolution, ce qui rend difficile l'identification de la structure poreuse. Deux échelles de résolution ont été utilisées dont le but de trouver une méthode d'analyse multi-échelle afin d'améliorer la qualité des images Ct-scan. Cette méthode utiliserait une μ CT plus générale, incluant la cellule triaxiale, pour corriger une μ CT focalisée sur le spécimen. Elle permet aussi la réduction de bruit pour les μ CT réalisées dans des cellules triaxiales.

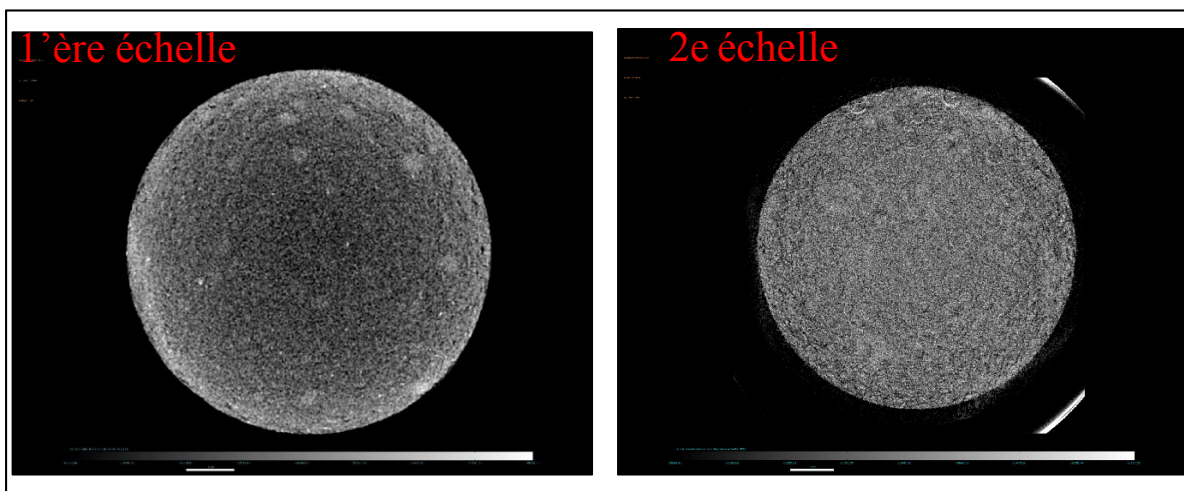


Figure 3-21 Photos Ct-scan d'un spécimen confiné dans une cellule triaxiale

3.4 Évaluation de la maturation des spécimens en fonction du temps

Pour bien comprendre l'effet de l'hydratation de ciment sur les performances hydrauliques et mécaniques de mélanges sable-ciment, au moment de cycles de gel-dégel, des essais de conductivité hydraulique et de cisaillement triaxial ont été réalisés sur les éprouvettes de deuxième mélange après trois temps de cure différents (7, 14 et 45 jours). Les résultats de l'essai de conductivité hydraulique (figure 3-20) ne montrent pas une variation significative après 14 et 45 jours de cure par rapport à la valeur trouvée après seulement 7 jours de cure.

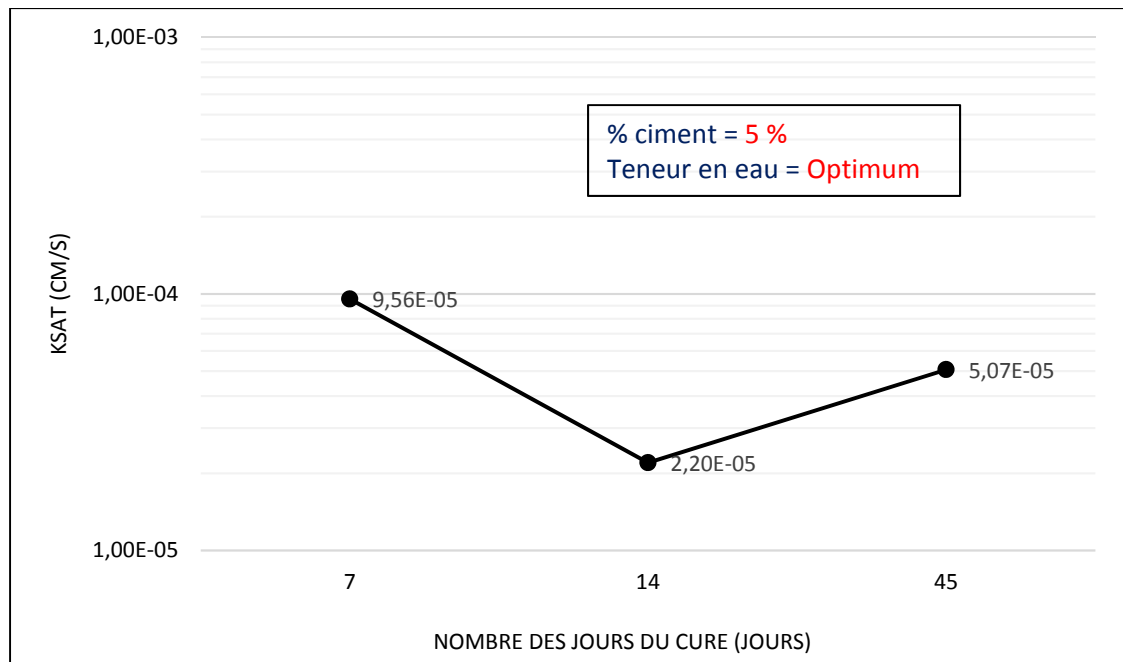


Figure 3-22 Évaluation de l'effet du temps du cure sur la conductivité hydraulique de mélange 2 sable-ciment

Les courbes contrainte-déformation (figure 3-21) gardent le même comportement après 3 différents temps de cure. La résistance de la compression est proche pour les trois essais (figure 3-22).

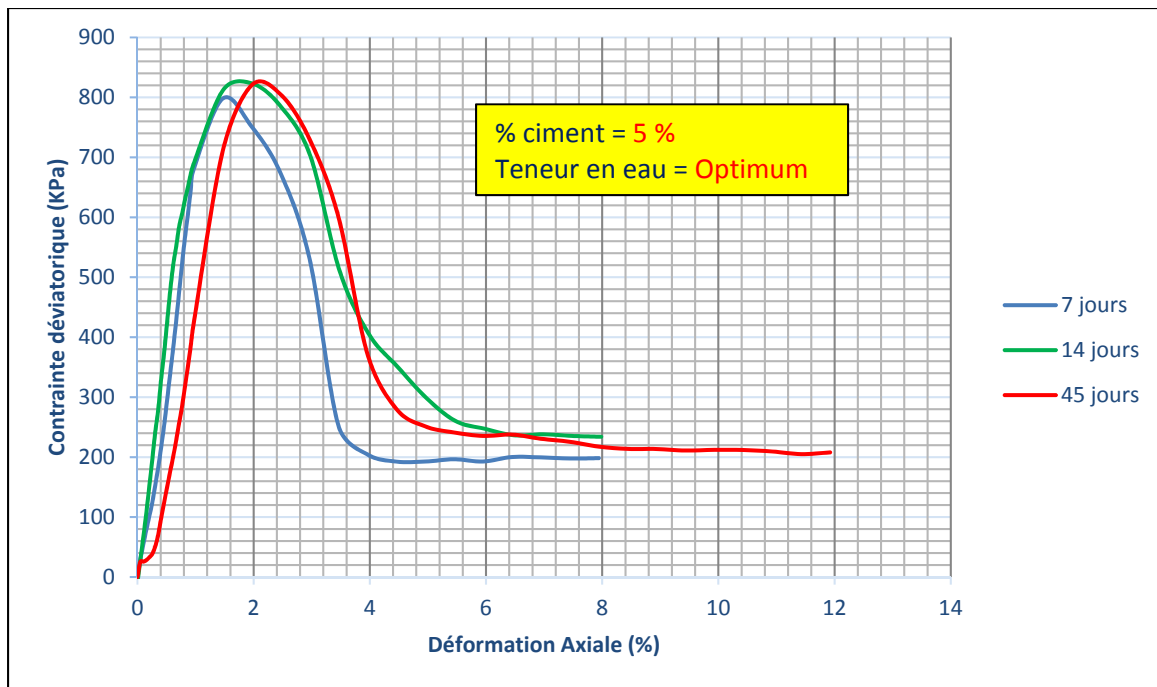


Figure 3-23 Évaluation de l'effet du temps de cure sur le comportement contrainte-déformation du mélange 2 sable-ciment

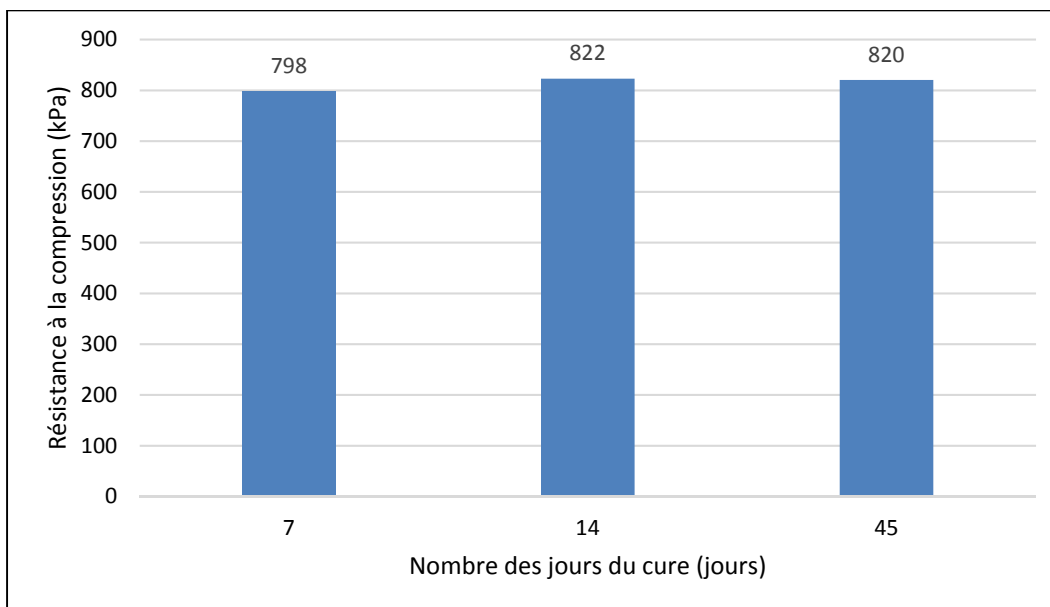


Figure 3-24 Évaluation de l'effet du temps de cure sur la résistance à la compression du mélange 2 sable-ciment

On peut conclure que les propriétés de deuxième mélange formé à 5 % de ciment ne sont pas influencées par le changement du temps de cure. Ce comportement explique peut-être l'augmentation progressive de la conductivité hydraulique en fonction de nombre des cycles de gel-dégel.

L'évaluation du comportement du premier mélange fabriqué à 12 % de ciment est nécessaire dont le but de comprendre la diminution brutale de la conductivité hydraulique à partir de sixième cycle de gel-dégel.

CONCLUSION

Les résultats de l'évaluation des performances des mélanges sable-ciment sous des conditions de gel-dégel montrent les choses suivantes :

- Le montage développé est fonctionnel et permet de simuler les cycles de gel-dégel sous confinement.
- Les variations de la conductivité hydraulique observées sont dues à la fissuration, ou bien à l'inter-variabilité des éprouvettes
- Le premier mélange montre un comportement légèrement plus susceptible au gel-dégel par rapport au deuxième mélange, à cause de pourcentage élevé de ciment (12%) qui permet la fermeture des pores et empêche la dilatation de l'eau lorsqu'elle gèle et par conséquent augmente les contraintes dans la structure de l'éprouvette.
- La maturation des spécimens peut se poursuivre durant les cycles de gel-dégel ce qui permet l'augmentation de la résistance à la rupture après 12 cycles de gel-dégel et l'imperméabilisation de milieux poreux surtout avec un pourcentage élevé de ciment et un temps de cure prolongé.
- La pression de confinement n'a pas un effet significatif sur le changement de la conductivité hydraulique de la recette évaluée, cependant elle semble affecter la déformation au moment de la rupture de l'éprouvette, par conséquent la pression de confinement rend l'éprouvette moins fragile après les cycles de gel-dégel.
- Le changement des propriétés hydrauliques et mécaniques des mélanges sable-ciment sous des conditions de gel-dégel dépend de deux mécanismes, l'hydratation de ciment et le changement de phase de l'eau des pores. La dominance de chaque mécanisme par

rapport à l'autre dépend des plusieurs facteurs comme le temps de cure et les propriétés de mélange.

RECOMMANDATIONS

Les travaux qui peuvent être réalisés pour améliorer les connaissances en se basant sur ce travail sont les suivants :

- Réaliser des essais similaires à ce travail, mais sur différents types de sol dont la proportion des fines est élevée afin d'augmenter la susceptibilité aux cycles de gel-dégel.
- Évaluer la variation des performances hydrauliques et mécaniques des spécimens totalement saturés exposés à des cycles de gel-dégel.
- Faire plus d'essai sur des éprouvettes en duplicata pour aider à confirmer les comportements observés.
- Évaluer l'interaction entre les contaminants dans les sols stabilisés au ciment et le changement des propriétés à cause des cycles de gel-dégel.
- Évaluer l'effet la pression de confinement sur les performances hydrauliques et mécaniques des mélanges sol-ciment exposés à des contraintes mécaniques
- Au lieu de comparer l'essai de gel-dégel sous confinement avec l'essai de gel-dégel de la norme ASTM D560, on peut comparer deux essais de gel-dégel sous deux contraintes de confinement différentes. L'essai de la norme D560 est trop différent de l'essai en cellule triaxiale.
- Trouver une méthode d'analyse multi-échelle afin d'améliorer la qualité des images Ct-scan réalisées sur des éprouvettes confinées.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM International. (2006). *Classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. International standard, ASTM D2487-06, West Conshohocken (PA): ASTM, 2006, 12 p.
- ASTM International. (2007). *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*. International standard, ASTM C192-07, West Conshohocken (PA): ASTM, 2007, 8 p.
- ASTM International. (2007). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. International standard, ASTM C136-06, West Conshohocken (PA): ASTM, 2007, 5 p.
- ASTM International. (2007). *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate*. International standard, ASTM C127- 07. West Conshohocken (PA) : ASTM, 2007, 7 p.
- ASTM International. (2008). *Standard test method for evaluating the freeze-thaw durability of dry-cast segmental retaining wall units and related concrete units*. International standard, ASTM C1262-08. West Conshohocken (PA) : ASTM, 2008, 5 p.
- ASTM International. (2003). *Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures*. International standard, ASTM D560-03. West Conshohocken (PA) : ASTM, 2003, 7 p.
- ASTM International. (1990). *Standard test method for determining the resistance of solid wastes to freezing and thawing*. International standard, ASTM D4842-90. West Conshohocken (PA) : ASTM, 1990, 4 p.
- ASTM International. (2003). *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. International standard, ASTM D5084-03. West Conshohocken (PA) : ASTM, 2003, 23 p.
- ASTM International. (2015). *Standard test methods for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*. International standard, ASTM D666-15. West Conshohocken (PA) : ASTM, 2015, 7 p.
- ASTM International. (2013). *Standard test methods for frost heave and thaw weakening susceptibility of soils*. International standard, ASTM D5918-13. West Conshohocken (PA) : ASTM, 2013, 13 p.

- ASTM International. (2016) *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. International standard*, ASTM C192-16. West Conshohocken (PA) : ASTM, 2016, 8 p.
- ASTM International. (2011) *Standard test methods for consolidated drained triaxial compression test for soils. International standard*, ASTM D7181-11. West Conshohocken (PA) : ASTM, 2011, 11 p.
- Al-Mala Yousif, M. (2015). *Freeze-thaw performance of low-cement content stabilized soils for containment applications*. Mémoire de maîtrise. Université Dalhousie. Halifax, Nova Scotia.
- Alkire, B. D., & Morrison, J. M. (1983). Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading. *Transportation Research Record*(918).
- Anderson, D. M., & Morgenstern, N. (1973). Physics, chemistry and mechanics of frozen ground: A review. *Paper presented at the Permafrost: The North American Contribution to the Second International Conference*, National Academy of Sciences, Washington, DC.
- Arvidson, W. D., & Morgenstern, N. R. (1977). Water flow induced by soil freezing. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(2), 237-245.
- Benson, C. H., & Othman, M. A. (1993). Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 276-294.
- Bilodeau, J. P., Dore, G., & Schwarz, C. (2011). Effect of seasonal frost conditions on the permanent strain behaviour of compacted unbound granular materials used as base course. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(5), 507-518.
- Black, P. B., & Hardenberg, M. J. (1991). Historical perspectives in frost heave research: The early works of S. Taber and G. Beskow (No. CRREL-SR-91-23). *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*.
- Casagrande, A. (1931). Discussion on frost heaving. Paper presented at the Proceedings, Highway Research Board.
- Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113(1), 901-930.
- Chamberlain, E. J. (1983, July). Frost heave of saline soils. *In Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost*. Fairbanks, Alaska (pp. 17-22).
- Chamberlain, E. J. (1981a). Frost susceptibility of soil, review of index tests. (No. CRREL-81-2). *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*.

- Chamberlain, E. J. (1981b). Overconsolidation effects of ground freezing. *Engineering geology*, 18(1-4), 97-110.
- Chamberlain, E. J., & Gow, A. J. (1979). Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. In *Developments in Geotechnical Engineering* (Vol. 26, pp. 73-92): Elsevier.
- Daniel, J. S., & Kim, Y. R. (2001). Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(6), 434-440.
- Dempsey, B. J., & Thompson, M. R. (1973). A Vacuum Saturation Method for Predicting the Freeze-Thaw Durability of Stabilized Materials. *A report of the investigation of durability testing of stabilized materials*. Project IHR-401. Illinois Cooperative Highway Research Program.
- Duhaime, F., & Ethier, Y. (2017). MGC843: Introduction à l'essai de cisaillement triaxial. Note du cours méthodes expérimentales en géotechnique. École de technologie supérieure.
- Dysli, M. (1991). Le gel et son action sur les sols et les fondations: PPUR presses polytechniques.
- Eigenbrod, K. (1996). Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4), 529-537.
- Fabbri, A. (2006). *Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel*. Thèse de doctorat,, Université de Marne la Vallée.
- Graham, J., & Au, V. (1985). Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(1), 69-78.
- Guney, Y., Aydilek, A. H., & Demirkan, M. M. (2006). Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste Management*, 26(9), 932-945.
- Guthrie, W. S., Lay, R. D., & Birdsall, A. J. (2007). Effect of reduced cement contents on frost heave of silty soil: laboratory testing and numerical modeling. In *Transportation Research Board 86th Annual Meeting Compendium of Papers*.
- Hallet, B. (1976). Deposits formed by subglacial precipitation of CaCO_3 . *Geological Society of America Bulletin*, 87(7), 1003-1015.
- Hearn, N. (1998). Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference?. *Materials and structures*, 31(8), 563.

- Henin, S. (1957). Etude sur le gel du sol. France. 259-265.
- Hill, D. W. (1977). *The influence of temperature and load on moisture transfer in freezing soil*. Doctoral dissertation, University of Alberta.
- Hinman, W. (1970). Effects of freezing and thawing on some chemical properties of three soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 50(2), 179-182.
- Horiguchi, K. (1987). An osmotic model for soil freezing. *Cold Regions Science and Technology*, 14(1), 13-22.
- Jamshidi, R. J., Lake, C. B., Barnes, C., Hills, C. D., & Gunning, P. (2011). Physical Performance of cement-treated silty sand soil under cycles of freezing/thawing. *Paper presented at the Pan-Am CGS Geotechnical Conference*.
- Jamshidi, R. J., Lake, C. B., & Barnes, C. L. (2014). Examining freeze/thaw cycling and its impact on the hydraulic performance of cement-treated silty sand. *Journal of Cold Regions Engineering*, 29(3), 04014014.
- Jamshidi, R. J., Lake, C. B., Gunning, P., & Hills, C. D. (2016). Effect of freeze/thaw cycles on the performance and microstructure of cement-treated soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 04016162.
- Johnson, T. C., Cole, D. M., & Chamberlain, E. J. (1979). Effect of freeze—thaw cycles on resilient properties of fine-grained soils. *Engineering geology*, 13(1-4), 247-276.
- Jamshidi, R. J. (2014). *Evaluation of cement-treated soils subjected to cycles of freezing and thawing*. Doctoral Dissertation, Dalhousie University. Halifax Nova Scotia.
- Kaplar, C. W. (1974). Freezing Test for Evaluating Relative Frost Susceptibility of Various Soils. (No. CRREL-TR-250). *Cold Regions Research And Engineering Lab Hanover Nh*.
- Konrad, J.-M. (1980). *Frost heave mechanics*. Ph.D. thesis, University of Alberta, Alberta.
- Konrad, J.-M. (1989). Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology*, 16(3), 291-303.
- Konrad, J.-M. (1999). Frost susceptibility related to soil index properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(3), 403-417.
- Konrad, J.-M., & Morgenstern, N. (1982). Effects of applied pressure on freezing soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(4), 494-505.

- Konrad, J.-M., & Samson, M. (2000). Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 857-869.
- Ladanyi, B. (1996). *La conception et la réhabilitation des infrastructures de transports en régions nordiques, Études et Recherches en Transport, Ministère des Transports du Québec, Direction des communications*. Rapport RTQ-94-07, Montréal, Canada.
- Lee, W., Bohra, N., Altschaeffl, A., & White, T. (1995). Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 559-568.
- Leroueil, S., Tardif, J., Roy, M., Rochelle, P. L., & Konrad, J.-M. (1991). Effects of frost on the mechanical behaviour of Champlain Sea clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(5), 690-697.
- Létourneau, M. (2012). *Effet du gel et du dégel sur les propriétés mécaniques et physiques des sols argileux*. Mémoire de maîtrise, Université Laval.
- Liu, J., Chang, D., & Yu, Q. (2016). Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand. *Engineering Geology*, 210, 23-32.
- Livet, J. (1981). Experimental method for the classification of soils according to their frost susceptibility. France. *Frost I Jord, Frost action in Soils*.
- Marion, G. M. (1995). Freeze-Thaw Processes and Soil Chemistry. (No. CRREL-SR-95-12). *Cold Regions Research And Engineering Lab Hanover NH*.
- Miller, R. (1972). Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils. *Highway Research Record*(393).
- Nakano, Y. (1990). Quasi-steady problems in freezing soils: I. Analysis on the steady growth of an ice layer. *Cold Regions Science and Technology*, 17(3), 207-226.
- Nguyen, T. T. H. (2015). *Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel*. Thèse de doctorat, Paris Est.
- Önalp, A. (1970). *The mechanisms of frost heave in soils with particular reference to chemical stabilisation*. Doctoral dissertation, University of Newcastle upon Tyne.
- Orakoglu, M. E., & Liu, J. (2017). Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2128-2140.
- Padilla, F., & Villeneuve, J. P. (1989). *Simulation des effets de l'hiver sur les chaussées du Québec pour une meilleure planification des techniques de protection et de réhabilitation*. (No. R270). INRS-Eau.

- Padilla, F., Villeneuve, J. P., & Stein, J. (1997). Simulation and analysis of frost heaving in subsoils and granular fills of roads. *Cold Regions Science and Technology*, 25(2), 89-99.
- Penner, E. (1957). Soil moisture tension and ice segregation. *Highway Research Board Bulletin*(168).
- Pigeon, M., Pleau, R. (1995). *Durability of Concrete in Cold Climates*. London: CRC Press.
- Poupart, J. (2013). *Étude du comportement en déformation permanente des matériaux granulaires non liés de fondation de chaussées en condition de gel saisonnier*. (Thèse de doctorat, Université Laval).
- Portland Cement Association. (2018). *Prevention of concrete scaling* Reperé à <http://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability/prevent-scaling>.
- Qi, J., Vermeer, P. A., & Cheng, G. (2006). A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. *Permafrost and periglacial processes*, 17(3), 245-252.
- Richardson, J., Arndt, J., & Enz, J. (1990). Effects of freezing on sulfate salts in North Dakota soils and wetlands. Paper presented at the Proc. Int. Symp. Frozen Soil Impacts on Agriculture, Range, and Forest Lands. KR Cooley (ed.). *US Army Cold Region Res. Eng. Lab., Hanover, NH*.
- Roy, M., Rochelle, P. L., Leroueil, S., Konrad, J., & Bergeron, G. (1995). Effets de cycles de gel-dégel sur les propriétés d'une argile sensible. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 725-740.
- Saint-Laurent, D. (2006). *Chaussée-Logiciel de dimensionnement des chaussées souples: guide de l'utilisateur*. Service des chaussées, Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec.
- Schwarz, C. (2009). Etude des déformations permanentes des matériaux granulaires non liés dans les fondations de chaussées face aux cycles de gel/dégel. *INSA de Strasbourg*.
- Shihata, S. A., & Baghdadi, Z. A. (2001). Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(4), 243-247.
- Simonsen, E., & Isacsson, U. (2001). Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(4), 863-875.
- Simonsen, E., Janoo, V. C., & Isacsson, U. (2002). Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 16(1), 28-50.

- Wang DY, Ma W, Chang XX, (2005). Physical-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24: 4313–4319.
- Wang, D.-y., Ma, W., Niu, Y.-h., Chang, X.-x., & Wen, Z. (2007). Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai–Tibet clay. *Cold regions science and technology*, 48(1), 34-43.
- Watanabe, K. (1999). *Ice lensing mechanism during soil freezing*. Thèse de doctorat, Mie University, Japan.
- Wissa, A., Martin, R., & Koutsoftas, D. (1972). *Equipment for measuring the water permeability as a function of degree of saturation for frost susceptible soils*. Cambridge, Mass. : M.I.T. Dept. of Civil Engineering. Soil Mechanics Division, 1972.
- Wong, L. C., & Haug, M. D. (1991). Cyclical closed-system freeze–thaw permeability testing of soil liner and cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), 784-793.
- Yu, J., Chen, X., Li, H., Zhou, J.-w., & Cai, Y.-y. (2015). Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties and permeability of red sandstone under triaxial compression. *Journal of Mountain Science*, 12(1), 218.
- Zeinali, A., Dagli, D., & Edeskär, T. (2016). Freezing-Thawing Laboratory Testing of Frost Susceptible Soils. Paper presented at the Nordic Geotechnical Meeting: Challenges in Nordic Geotechnics 25/05/2016-27/05/2016.

