Étude du potentiel de ségrégation du granulat de verre postconsommation et son application comme barrière thermique et capillaire

par

Laurence PICARD

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

MONTRÉAL, LE 11 OCTOBRE 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Laurence Picard, 2018

©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 média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. François Duhaime, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

M. Nam Nguyen, Examinateur externe
SNC-Lavalin

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

LE 11 SEPTEMBRE 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de maîtrise Michel Vaillancourt pour la confiance qu'il m'a accordé dans ce projet de recherche, son encadrement et pour son implication indéfectible. Je tiens aussi à souligner ta grande disponibilité accordée à nos nombreuses rencontres et pour toutes les réflexions que nous avons partagées tout au long de ce projet. Durant notre collaboration, tu m'as offert plusieurs opportunités de projets qui m'ont permis de développer de nouvelles compétences reliées au domaine routier.

Je tiens également à souligner l'appui indispensable de Sébastien Ménard et d'Alexis Vadeboncoeur, vous m'avez appris la nécessité de la rigueur au travail et de la débrouillardise que j'appliquerai dans mes prochaines réalisations. Un grand merci aussi à mes collègues du laboratoire avec qui j'ai eu la chance de partager cette belle expérience et ce, dans les moments les plus forts et les plus bas.

Je veux remercier ma famille pour avoir cru en moi, vous avez fait preuve d'un soutien inconditionnel et d'une écoute attentive. Vos encouragements et votre appui m'ont permis de persévérer pour arriver au bout de ce que j'ai entrepris.

Finalement, merci à toi, Emmanuel Dion pour tes encouragements constants, ton écoute active et ton réconfort qui m'ont permis de persévérer et de puiser le courage nécessaire, afin que je puisse me dépasser et mener à bien ce projet. Ta propre expérience de l'accomplissement d'une maîtrise en science appliquée t'a permis de prodiguer des conseils avisés qui m'ont été d'une aide précieuse.

ÉTUDE DU POTENTIEL DE SÉGRÉGATION DU GRANULAT DE VERRE POSTCONSOMMATION ET SON APPLICATION COMME BARRIÈRE THERMIQUE ET CAPILLAIRE

Laurence PICARD

RÉSUMÉ

Au Québec, la situation de la valorisation du verre postconsommation (VPC) issu de la collecte municipale est en déclin. Depuis 2012, une augmentation de 14% de cette matière est entreposée dans des lieux d'enfouissement pour des fins de recouvrement granulaire. L'une des principales avenues de valorisation du granulat de VPC est le domaine de la construction. Le Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) de l'ÉTS étudie les avenues pour l'incorporation du granulat de VPC à différents niveaux de la composition d'une structure de chaussée. Les performances mécaniques et hydrauliques du granulat de VPC sont bien documentées, tandis que le comportement en condition de gel est peu étudié.

L'incorporation du verre postconsommation (VPC) dans les structures de chaussée situées dans des régions nordiques requiert une analyse de la réponse au gel de ce matériau. Ce projet de recherche a pour objectif de comparer le comportement sous les effets du gel du granulat de VPC et de la pierre calcaire pour des applications comme couche de fondation et comme système de protection au gel. Cette comparaison se fait par le biais d'essais expérimentaux basé sur le principe du potentiel de ségrégation pour la caractérisation au gel des matériaux granulaires que l'on retrouve dans une structure de chaussée et des sols naturels. L'évaluation de la sensibilité au gel des matériaux à l'étude est déterminée dans un état saturé ce qui reflète la condition la plus critique en condition de gel. Les matériaux granulaires grossiers étudiés sont la fraction passant le tamis 5mm. Les résultats expérimentaux montrent la diminution de la sensibilité au gel en fonction de l'augmentation de la porosité des granulats. Les systèmes de protection au gel étudiés sont la barrière thermique et la barrière capillaire où est étudiée l'influence de la nature granulaire. Les résultats expérimentaux montrent que malgré la faible influence de la barrière thermique le gel, le VPC performe mieux à réduire les effets du gel. La barrière capillaire de VPC demeure la configuration offrant la meilleur protection contre le gel. L'analyse s'est principalement concentrée sur les critères de performance au gel reliés au potentiel de ségrégation tels que le soulèvement au gel, le gradient thermique, la succion moyenne de la frange gelée et le profil de teneur en eau en fin d'essai. La tendance observée indique que le granulat de VPC est plus stable en condition de gel que le granulat de pierre calcaire.

Mots clés : verre postconsommation, potentiel de ségrégation, matériau de fondation, barrière capillaire, isolant thermique, structure de chaussée.

STUDY OF THE POTENTIAL OF SEGREGATION OF POST-CONSUMPTION GLASS AGGREGATE AND ITS APPLICATION AS A THERMAL AND CAPILLARY BARRIER

Laurence PICARD

ABSTRACT

In Quebec, the status of the post-consumption glass valorization, coming from the municipal collection, is in decline. Since 2012, an increase of 14 % of this material is going to waste disposal site and use as backfill. One of the main avenue for post-consumption glass valorization is in the construction industry. The LCMB at ÉTS is studying possible avenues for the incorporation of the recycled glass aggregate at various levels in the composition of road structure. The mechanical and hydraulic performances of the post-consumption glass aggregate are well documented, whereas its behavior in frost conditions has been the object of few studies.

The incorporation of post-consumption glass in road structure, located in cold region, requires an analysis of the frost heave response. The main objective of this research project is to compare the behavior of post-consumption glass and limestone under the effects of frost as a base course and as frost protection applications. This comparison is made by means of experimental tests based on the principle of the segregation potential for the frost heave characterization of the granular materials found in road structure and natural soils. The evaluation of the frost heave sensitivity of the granular materials in this study is determined in a saturated state witch reflects the most critical conditions in frost condition. The coarse granular material used in this studied is the fraction passing the 5mm sieve. The experimental results show the decrease of the sensibility of the frost heave according to the increase of the porosity of the granular material. The frost protection systems studied are the thermal barrier and the capillary barrier where is studied the influence of the granular nature. The experimental results show that in spite of the low influence of the thermal barrier the frost, the VPC performs better to reduce the effects of the frost heave. The capillary barrier of VPC remains the configuration offering the best protection against frost heave. The analysis is mainly concentrated on frost susceptibility criteria connected to the segregation potential such as frost heave, the thermal gradient, the average suction of freezing fringe and the moisture content profile. The observed tendency indicates that the post-consumption glass aggregate performs better in freezing conditions than limestone aggregate.

Keywords: post-consumption glass, segregation potential, base coarse, capillary barrier, thermal barrier, road structure.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 3
1.1 Le recyclage du verre au Québec 3
1.2 Action du gel sur les chaussées 7
1.2.1 Contexte climatique au Québec 7
1.2.2 Dégradations associées à l'effet du gel 8
1.2.2.1 Soulèvement différentiel 8
1.2.2.2 Perte de capacité portante 9
1.3 Propriétés thermiques 10
1.3.1 Conductivité thermique 10
1.3.2 Capacité thermique 10
1.3.3 Chaleur latente 11
1.3.4 Transfert de chaleur dans les milieux poreux 12
1.3.4.1 Effets de la porosité et de la composition minéralogique 12
1.3.4.2 Effets de l'eau 13
1.3.5 Propriétés thermiques du VPC 14
1.3.5.1 Conductivité thermique du VPC 15
1.3.5.2 Diffusivité thermique du VPC 17
1.3.6 Processus de cristallisation dans les milieux poreux 19
1.4 Concept de gélivité 22
1.4.1 Sol gélif 22
1.4.2 Sol non gélif 23
1.4.3 Classification de la gélivité 23
1.4.4 Sensibilité au gel du VPC 23
1.5 Potentiel de ségrégation 25
1.5.1 Mécanisme de formation de lentilles de glace 25
1.5.2 Facteurs influençant le potentiel de ségrégation 30
1.5.2.1 La succion moyenne de la frange gelée 30
1.5.2.2 Le taux de refroidissement de la frange gelée 32
1.5.2.3 La pression de surcharge 34
1.5.3 Relation empirique du potentiel de ségrégation 35
1.5.4 Essai en laboratoire pour déterminer le potentiel de ségrégation 38
1.5.5 Détermination du potentiel de ségrégation (SP) sur le terrain 40
1.5.6 Le potentiel de ségrégation (SP) applicable pour les chaussées bitumineuses 41
1.5.6.1 La susceptibilité au gel des matériaux de fondation 43
1.6 Techniques de mitigation au gel 46
1.6.1 Surépaississement de la couche de sous-fondation 46
1.6.2 Barrière thermique 47
1.6.3 Barrière capillaire 49
1.6.3.1 Barrière capillaire de géosynthétique 50

1.7 Synthèse de la revue de la littérature 55

CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE 57
2.1 Objectifs 57
2.2 Méthodologie 57
2.3 Programme expérimental 58
2.3.1 Montage expérimental de l'essai de détermination du potentiel de ségrégation 59
2.3.2 Élaboration d'un sol gélif 60
2.3.3 Caractérisation du potentiel de ségrégation du granulat de verre 60
2.3.4 Étude d'un système d'amélioration des sols contre les effets du gel par l'installation d'une barrière thermique 61
2.3.5 Étude d'un système d'amélioration des sols contre les effets du gel par l'installation d'une barrière capillaire 62
2.3.6 Synthèse du programme expérimental 62

CHAPITRE 3 MONTAGES EXPÉRIMENTAUX, MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES D'ESSAIS 65
3.1 Montage expérimental du potentiel de ségrégation (SP_0) 65
3.1.1 La cellule 66
3.1.2 Enceinte thermique 69
3.1.3 Sonde de température 70
3.1.4 Capteur de déplacement 71
3.1.5 Acquisition des données 72
3.2 Montage expérimental du point de congélation d'équilibre (T_f) 73
3.2.1 Enceinte thermique 73
3.2.2 Sonde de température 75
3.3 Description et provenance des matériaux utilisés 76
3.3.1 Caractéristiques du granulat naturel 76
3.3.2 Caractéristiques des particules de verre 77
3.3.3 Caractéristiques du sol de référence 78
3.4 Configuration des échantillons de l'étude 79
3.4.1 Description des échantillons MG 20, phase II 79
3.4.1.1 Granulométrie à l'étude 79
3.4.1.2 Classes granulométriques 81
3.4.1.3 Caractérisation échantillon MG 20 82
3.4.2 Description des échantillons incorporant une barrière contre les effets du gel, phase III et IV 83
3.4.2.1 Sol fin de référence 84
3.4.2.2 Configuration des échantillons avec une barrière thermique 85
3.4.2.3 Configuration des échantillons avec une barrière capillaire 85
3.5 Description de la procédure de l'essai SP_0 86
3.5.1 Préparation du montage et des mélanges 88
3.5.2 Mise en place et compaction des échantillons 88
3.5.3 Saturation des échantillons 88

3.5.4 Période de consolidation et de conditionnement 90
3.5.5 Mode opératoire 91
3.5.6 Prise de mesures 92
3.5.7 Démontage et prélèvement d'échantillons 93
3.5.8 Calcul du potentiel de ségrégation (SP_0) 95

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS 97
4.1 Résultats de l'essai SP_0 sur le sol de référence 97
4.2 Température de congélation d'équilibre (Tf) des matériaux étudiés 102
4.3 Résultats des essais SP_0 selon la taille des granulats de VPC 104
4.3.1 Analyse des résultats SP_0 selon la taille des granulats de VPC 108
4.4 Résultats des essais SP_0 selon la nature granulaire 110
4.4.1 Analyse des résultats SP_0 selon la nature granulaire 113
4.5 Résultats des essais SP_0 avec les barrières thermiques 115
4.5.1 Analyse des résultats SP_0 avec la barrière thermique 121
4.6 Résultats des essais SP_0 avec les barrières capillaires 127
4.6.1 Analyse des résultats SP_0 avec une barrière capillaire 131

CONCLUSION 135

ANNEXE I APPLICATION DU VPC EN CONSTRUCTION ROUTIÈRE 141

ANNEXE II DIMENSIONNEMENT AU GEL DES CHAUSSÉES SOUPLES AU QUÉBEC 147

ANNEXE III BILAN THERMIQUE DU SYSTÈME D'ISOLATION DE LA CELLULE 153

ANNEXE IV PROGRAMME LABVIEW POUR L'ACQUISITION DES DONNÉES 157

ANNEXE V CALIBRATION DES SONDES DE TEMPÉRATURE 163

ANNEXE VI PROCÉDURE DE RECONSTITUTION DES ÉCHANTILLONS 169

ANNEXE VII RAPPORT DE LABORATOIRE EXP 171

ANNEXE VIII RÉSULTATS ESSAIS SP_0 SUR LE SOL DE RÉFÉRENCE ET PHOTOS DES ÉCHANTILLONS À LA FIN DES ESSAIS SP_0 177

ANNEXE IX RAPPORT D'ESSAI DU POINT DE CONGÉLATION T_f 184

BIBLIOGRAPHIE 191

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Catégories de verre selon la fabrication de produits 5

Tableau 1.2 Utilisation du verre postconsommation mixte selon le type de conditionnement Adapté de ÉEQ (2017) 6

Tableau 1.3 Conductivité thermique moyenne des minéraux d'argile 13

Tableau 1.4 Conductivité thermique de la pierre calcaire en fonction de la teneur en eau pour différentes classes granulométriques 16

Tableau 1.5 Conductivité thermique du VPC en fonction de la teneur en eau pour différentes classes granulométriques 16

Tableau 1.6 Diffusivité thermique de la pierre calcaire en fonction de la teneur en eau pour différentes classes granulométriques 18

Tableau 1.7 Diffusivité thermique du granulat de VPC en fonction de la teneur en eau pour différentes classes granulométriques 18

Tableau 1.8 Échelle de gélivité 43

Tableau 1.9 Paramètres des sections tests de chaussées instrumentées incorporant une barrière thermique composée de matériaux recyclés 48

Tableau 1.10 Description des échantillons comportant un géotextile et les conditions thermiques 51

Tableau 1.11 Description des échantillons comportant un géocomposite et les conditions thermiques 54

Tableau 2.1 Résumé du plan expérimental et des essais SP_0 63

Tableau 3.1 Caractéristiques du granulat naturel 77

Tableau 3.2 Caractéristiques des particules de verre 77

Tableau 3.3 Caractéristiques de l'argile kaolin 78

Tableau 3.4 Caractéristiques du sable sec type tout usage 78

Tableau 3.5 Division granulométrique par tamis du fuseau admissible du MG20 et la granulométrie à l'étude 80

Tableau 3.6 Classes granulométriques de particules de verre 81

Tableau 3.7 Caractérisation des granulats de verre et de calcaire 83

Tableau 3.8 Propriétés géotechniques du sol de référence 84

Tableau 4.1 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 pour le silt et argile (SA-3) 98

Tableau 4.2 Résultats d'essai SP_0 du sol de référence (SA) 101

Tableau 4.3 Écarts des résultats SP_0 du sol de référence par rapport à SA-3 102

Tableau 4.4 Paramètres de mise en place des essais de point de congélation d'équilibre (T_f) des matériaux à l'étude 103

Tableau 4.5 Résultats des essais de point de congélation d'équilibre (T_f) des matériaux à l'étude 103

Tableau 4.6 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 pour les trois classes granulaires de VPC 104

Tableau 4.7 Résultats des essais SP_0 sur les trois classes granulaires de VPC 107

Tableau 4.8 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 menés sur le VPC et la pierre calcaire 110

Tableau 4.9 Résultats des essais SP_0 sur le verre et la pierre calcaire 113

Tableau 4.10 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 menés sur les échantillons intégrants une barrière thermique de verre et de pierre calcaire 116

Tableau 4.11 Résultats des essais SP_0 des échantillons avec une barrière thermique de VPC et de pierre calcaire 120

Tableau 4.12 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 menés sur les échantillons intégrants une barrière capillaire de VPC et de pierre calcaire 127

Tableau 4.13 Résultats des essais SP_0 sur les échantillons incorporant une barrière capillaire de VPC et de pierre calcaire 131

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Cycle de valorisation du VPC....4

Figure 1.2 Illustration schématique des transferts thermiques dans un milieu poreux en fonction de la teneur en eau....14

Figure 1.3 Dispositif expérimental pour mesurer la diffusivité thermique..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 1.4 Courbe de refroidissement de l'eau pure (A'B'C'D'E') et d'un système sol-eau (ABCDE)....20

Figure 1.5 Processus de congélation de l'eau intertsitielle d'un sol....22

Figure 1.6 Taux de soulèvement au gel du verre, de l'agrégat naturel (PSG et CG) et du combiné de gravier naturel et verre (70 :30)....24

Figure 1.7 Schéma rythmique de formation de lentilles de glace....26

Figure 1.8 Les trois phases caractéristiques de gel....27

Figure 1.9 Changement des caractéristiques de la frange gelée suivant la progession du front de gel....29

Figure 1.10 Principes thermodynamiques de la frange gelée
(a) Sol non gelé
(b) Profil de succion à travers l'échantillon ;
(c) Formation d'une lentille de glace causé par la succion de la frange gelée....30

Figure 1.11 Relation entre le potentiel de ségrégation (SP_0) et la succion de la frange gelée....31

Figure 1.12 Refroidissement de la frange gelée pendant les conditions de gel transitoire....33

Figure 1.13 Le potentiel de ségrégation et la succion au front de gel selon l'application d'une surcharge....34

Figure 1.14 Montage de l'essai de potentiel de ségrégation....38

Figure 1.15 Condition de gel dans une structure de chaussée souple....42

Figure 1.16 Relation entre le potentiel de ségrégation (SP) et la porosité de la fraction fine (n_f)....45

Figure 1.17 (a) Soulèvement au gel (b) Pénétration du front de gel des échantillons avec un disque de géotextile....52

Figure 1.18 Profils de teneurs en eau de la série d'essais 4 avec géotextile 53

Figure 1.19 Profils de teneurs en eau de la série d'essais 5 avec géotextile 53

Figure 1.20 Soulèvement au gel des échantillons de la série d'essais 7 comportant un géocomposite 55

Figure 2.1 Structure du plan expérimental 59

Figure 3.1 Schéma général du montage expérimental 66

Figure 3.2 Schéma de la cellule de gel et de son instrumentation....68

Figure 3.3 Montage expérimental placé dans l'enceinte thermique : (a) Vue du plateau supérieur attaché au piston à air et de la réserve d'eau ; (b) Système d'isolation de la cellule 69

Figure 3.4 Exemple de courbe de calibration de sonde thermique 71

Figure 3.5 Courbe de calibration du capteur de déplacement 72

Figure 3.6 Support isolant de polystyrène contenant les moules pour l'essai de congélation d'équilibre 74

Figure 3.7 La courbe de refroidissement de l'essai de congélation d'équilibre....75

Figure 3.8 Calibration des thermocouples pour l'essai de congélation d'équilibre 76

Figure 3.9 Fuseau granulométrique admissible pour un MG20 (CS et CI), granulométrie à l'étude (GE) et continuité de GE 81

Figure 3.10 Subdivision des classes granulométriques basée sur la courbe GE 82

Figure 3.11 Courbe de compaction au Proctor Standard sur le VPC et le calcaire....83

Figure 3.12 Distribution granulométrique du sol de référence 85

Figure 3.13 Configurations des échantillons qui comportent une barrière thermique ou une barrière capillaire 86

Figure 3.14 Organigramme des manipulations pour réaliser l'essai SP_0....87

Figure 3.15 Schéma du montage expérimental à l'étape de conditionnement de l'essai SP_0 91

Figure 3.16 Schéma du montage expérimental à l'étape du mode opératoire de l'essai SP_0 92

Figure 3.17 Sections prélevées à la fin de l'essai SP_0 pour un échantillon sans barrière 94

Figure 3.18 Sections prélevées à la fin de l'essai SP_0 pour un échantillon avec une barrière : (a) barrière capillaire et (b) barrière thermique 94

Figure 4.1 Pénétration du front de gel et soulèvement en fonction du temps du sol de référence SA-3 99

Figure 4.2 Profil de températures en fonction de la profondeur au temps de stabilisation T_P du sol de référence SA-3 100

Figure 4.3 Profil des teneurs en eau du sol de référence (SA-3) en fin d'essai 100

Figure 4.4 Progression du front gel en fonction du temps sur les trois classes granulaires de VPC 105

Figure 4.5 Profils de températures en fonction de la profondeur au temps de stabilisation T_P des trois classes granulaires de VPC 106

Figure 4.6 Profils de teneurs en eau en fonction de la profondeur en fin d'essai des trois classes granulaires de VPC 107

Figure 4.7 Progression du front gel en fonction du temps à travers les échantillons de VPC et de pierre calcaire 111

Figure 4.8 Profils de températures en fonction du temps au temps de stabilisation T_P des échantillons de VPC et de pierre calcaire 112

Figure 4.9 Profils de teneurs en eau en fonction de la profondeur en fin d'essai du VPC et e la pierre calcaire 112

Figure 4.10 Variation du ratio soulèvement-consommation en eau et le soulèvement total 114

Figure 4.11 Pénétration du front de gel et soulèvement en fonction du temps des échantillons avec une barrière thermique de VPC et de pierre calcaire et du sol de référence (SA-3) 117

Figure 4.12 Profils des températures en fonction de la profondeur au temps de stabilisation T_P des échantillons ave une barrière thermique de VPC ou de pierre calcaire et du sol de référence 118

Figure 4.13 Profils des teneurs en eau selon la profondeur des échantillons avec une barrière thermique de VPC ou de pierre calcaire et du sol de référence 120

Figure 4.14 Caractérisation conceptuelle d'un sol en congélation lors de la formation de la dernière lentille de glace ($|P_{u1}| < |P_{u2}| < |P_{u3}| < |P_{u4}|$) 122

Figure 4.15 Conductivité thermique du sable et d'argile en condition gelée et non gelée en fonction de la masse volumique sèche : A- sable gelé et saturé, B- sable non gelé et saturé, C- sable gelé et Sr=75%, D- sable non gelé et SR=50%, E-argile gelée et saturée, F-argile non gelée et saturée 124

Figure 4.16 Échantillon avec une barrière thermique sèche de pierre calcaire à la fin de l'essai SP_0 125

Figure 4.17 Évolution du potentiel de ségrégation en fonction de la succion selon le taux de refroidissement pour le Devon silt 126

Figure 4.18 Pénétration du front de gel et soulèvement en fonction du temps du sol de référence et des échantillons intégrant une barrière capillaire de VPC ou de pierre calcaire 128

Figure 4.19 Profils des températures en fonction de la profondeur au temps de stabilisation T_P du sol de référence et des échantillons incorporant une barrière capillaire de VPC ou de pierre calcaire 129

Figure 4.20 Profils des teneurs en eau selon la profondeur du sol de référence et des échantillons incorporant une barrière capillaire de VPC ou de pierre calcaire 130

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American Society for Testing Material
ÉTS	École de Technologie Supérieure
ÉEQ	Éco Entreprise Québec
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
ICI	Industriel, Commercial et Institutionnel
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
LVDT	Capteur de déplacement linéaire
MG-112	Matériau granulaire 0-112 mm
MG-20	Matériau granulaire 0-20 mm
MTMDET	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports
SAQ	Société des alcools du Québec
VPC	Verre postconsommation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉ DE MESURE

C°	Degré Celsius (unité de température)
K	Kelvin
g	Gramme (unité de masse)
kg	Kilogramme
j	Jour
J	Joules
Hz	Hertz
m	Mètre (unité de longueur)
mm	Millimètre
m^2	Mètre carré
m^3	Mètre cube
kPa	KiloPascal
MPa	MégaPascal
Ω	Ohm
s	Seconde (unité de temps)
V	Volt
W	Watt
µm	Micron

SYMBOLE

α	Diffusivité thermique
a	Coefficient de surcharge

c	Capacité thermique massique
C	Capacité thermique volumique
C_uF	Coefficient d'uniformité de la fraction fine
$d_{50}(FF)$	Diamètre moyen de la fraction fine
ε_v	Gonflement volumique
$\%F$	Pourcentage de la fraction fine
$\%F_v$	Pourcentage de la fraction fine pour combler l'espace poreux grossier
$gradT$	Gradient thermique
H_w	Succion dans le film d'eau actif de la frange gelée
H	Hauteur
k	Conductivité thermique
K_u	Perméabilité du sol non gelé
λ	Conductivité thermique
l	Chaleur latente massique
L	Chaleur latente volumique
l_i	Chaleur latente massique de la glace
l_o	Hauteur du sol non gelé
M	Constante
n_c	Porosité de la fraction grossière
n_f	Porosité de la fraction fine
ϕ	Gradient thermique
P_u	Succion au front de gel
P_w	Succion dans le film d'eau

P_e	Pression de surcharge
ρ_d	Masse volumique du sol sèche
ρ_w	Masse volumique de l'eau
ρ_s	Masse volumique des grains solides
q	Flux de chaleur
u	Succion par capillarité
R_T	Résistance d'une thermistance
R	Résistance
r_f	Teneur en fine relative
SP_0	Potentiel de ségrégation sans surcharge
SP	Potentiel de ségrégation avec surcharge
Sr	Degré de saturation
Ss	Surface spécifique
SsF	Surface spécifique de la fraction fine
T	Température
T_{so}	Température du front de ségrégation
T_i	Température de l'isotherme 0°C
T_0*	Température de congélation de l'eau pure
T_p	Temps de stabilisation de la température à travers le sol
T_{soul}	Taux de soulèvement
T_f	Point de congélation d'équilibre
t	Temps

V_o	Vitesse d'écoulement de l'eau au front de gel
V	Signal en tension (voltage)
V_w	Volume spécifique de l'eau
w	Teneur en eau
w_L	Teneur en eau de la limite liquide
w_f	Teneur en glace
γ_w	Poids volumique de l'eau
Ψ	Sur-refroidissement

INTRODUCTION

Le Bilan 2015 de Recyc-Québec (Recyc-Québec, 2017) relate l'évolution de la pratique de gestion des matières résiduelles au Québec. Le verre postconsommation (VPC) représente 17% des matières recyclables issues des ménages québécois. Depuis 2012, la valeur marchande du VPC a diminué de manière considérable due au manque d'intérêt des conditionneurs et des recycleurs pour cette matière. La quantité de matière vendue par les centres de tri a diminué de 65%. Le verre de couleur mixte est celui dont la situation est la plus critique. Le niveau élevé de contaminants comme la présence de papiers et de matières non recyclables réduisent les avenues de valorisation de cette matière. Ainsi, 86% du verre de couleur mixte collecté au niveau résidentiel est acheminé à des sites d'enfouissement pour des fins de recouvrement, au lieu d'être traité par des centres de tri. Actuellement, l'industrie de la construction est la principale avenue de valorisation pour le verre de couleur mixte. Le granulat de VPC présente des propriétés mécaniques et thermiques intéressantes pouvant être mises à profit dans les travaux de construction routière (Mohsenian Hadad Amlashi, 2015; Berraha, 2017). Or, le comportement en condition de gel du granulat de VPC est peu étudié. L'introduction du VPC comme matériau granulaire dans les chaussées, nécessite donc l'étude de son comportement en condition de gel pour le dimensionnement des chaussées localisées dans un climat nordique.

Les régions nordiques sont confrontées à la dégradation de leur réseau routier causée par l'action du gel. La présence combinée de températures inférieures à 0°C, une source d'eau à proximité et un sol sensible au gel, augmente les risques de problèmes structuraux causés par les cycles de gel-dégel. Les dégradations de la chaussée associées à l'action du gel ont un impact sur l'ensemble de la structure de chaussée. Les détériorations prépondérantes sont le soulèvement au gel et la perte de capacité portante. Elles sont causées par la formation de lentilles de glace dans le sol d'infrastructure ou encore dans la couche granulaire de la structure de chaussée. Plusieurs stratégies de conception sont utilisées pour mitiger les effets du gel. Il existe une vaste gamme de mesures pour atténuer, voire neutraliser les facteurs responsables des mécanismes de gel comme le surépaississement de la couche de sous-fondation, la mise en place d'isolant thermique, ou encore la mise en place d'une barrière capillaire.

Le présent projet fait partie du plan de recherche du Laboratoire sur les chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) en partenariat avec la Société des alcools du Québec (SAQ), Éco Entreprise Québec (ÉEQ), de la ville de Montréal et de Recyc-Québec sur l'incorporation du VPC au niveau des couches structurales de chaussée. Le volet de recherche porte principalement sur la caractérisation au gel du granulat de VPC. Les notions théoriques et expérimentales du potentiel de ségrégation ont permis d'étudier la réponse au gel du granulat de VPC de couleur mixte pour son introduction dans les chaussées.

L'objectif principal de ce projet de recherche est de mesurer et de comparer le comportement au gel du VPC et de la pierre calcaire comme matériau granulaire de chaussée et en tant que mesure de mitigation au gel. Le projet se divise en trois phases : 1) l'évaluation de la sensibilité au gel comme matériau de structure de chaussée ; 2) l'évaluation du potentiel de chacun des granulats à titre de barrière thermique ; 3) l'évaluation du potentiel de chacun des granulats à titre de barrière capillaire.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

1) le premier chapitre présente l'état des connaissances sur la situation du recyclage du VPC au Québec, les enjeux liés à l'action du gel et du dégel sur les chaussées, le concept de la gélivité, le paramètre d'ingénierie du potentiel de ségrégation et les techniques de mitigation vis-à-vis le gel ;
2) le deuxième chapitre définit les objectifs du projet de recherche, la méthodologie de recherche et le programme expérimental ;
3) le troisième chapitre décrit le montage expérimental pour la détermination du potentiel de ségrégation (SP_0), le montage expérimental pour la détermination du point de congélation d'équilibre (T_f), les propriétés des matériaux utilisés, les configurations des échantillons et la procédure d'essai SP_0 adaptée au montage expérimental du LCMB ;
4) le quatrième chapitre présente les résultats des essais de potentiel de ségrégation et de point de congélation d'équilibre. De plus, une analyse des résultats expérimentaux met en perspective les résultats selon les concepts de mécanisme de formation de lentilles de glace pour expliquer le comportement au gel observé.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le verre postconsommation (VPC) est un verre ayant servi un premier usage et qui a été mis au rebut. Puis, le VPC peut être ensuite soit recyclé ou disposer dans un site d'enfouissement (Gouvernement du Québec, 2012). Afin de répondre à la problématique de la valorisation du VPC issue de la collecte sélective plusieurs solutions sont envisagées. L'une d'elles consiste à utiliser le VPC comme matériau granulaire dans le corps de la chaussée de manière à atténuer les effets du gel et ainsi limiter ses effets sur la durabilité de la chaussée. Ce chapitre fait le point sur l'état des connaissances de l'impact du gel sur le comportement des chaussées et sur les mesures de mitigation incorporant des matières recyclées. Les principaux sujets abordés sont les suivants : le recyclage du verre au Québec ; l'action du gel sur les chaussées ; les propriétés thermiques ; le concept de la gélivité ; le potentiel de ségrégation ; et les techniques de mitigation au gel.

1.1 Le recyclage du verre au Québec

Le Plan d'action 2011-2015 contribue à l'atteinte des objectifs de la politique québécoise de gestion des matières résiduelles (Gouvernement du Québec, 2011). Cette volonté gouvernementale a pour but d'encourager de meilleures pratiques de gestion des matières résiduelles et de contribuer à bâtir une économie verte. Les enjeux majeurs ciblés concernant la gestion des matières résiduelles par le Plan d'action 2011-2015 sont les suivants : réduire le gaspillage des ressources ; augmenter la quantité de matières recyclées ; et responsabiliser les acteurs dans le domaine de la gestion des matières résiduelles (Gouvernement du Québec, 2011). Une saine gestion des matières recyclables implique le bon fonctionnement économique de plusieurs acteurs impliqués dans le cycle de vie de valorisation et du réemploi des matières recyclables. La Figure 1.1 montre le cycle de vie de valorisation du verre postconsommation (VPC). L'un des objectifs quantitatifs intermédiaires du Plan d'action 2011-2015 est d'augmenter la quantité de matières recyclables traitées à 70 %, dont 54 % proviennent des ménages québécois (Gouvernement du Québec, 2011). Le Bilan 2015 de Recyc-Québec

portant sur la gestion des matières résiduelles au Québec met en lumière l'évolution de la pratique du recyclage depuis 2012. Le Bilan 2015 confirme que l'objectif du Plan d'action 2011-2015 de recycler 70% des matières recyclables n'a pas été atteint et qu'il existe un écart de 16 % par rapport à l'objectif initial.

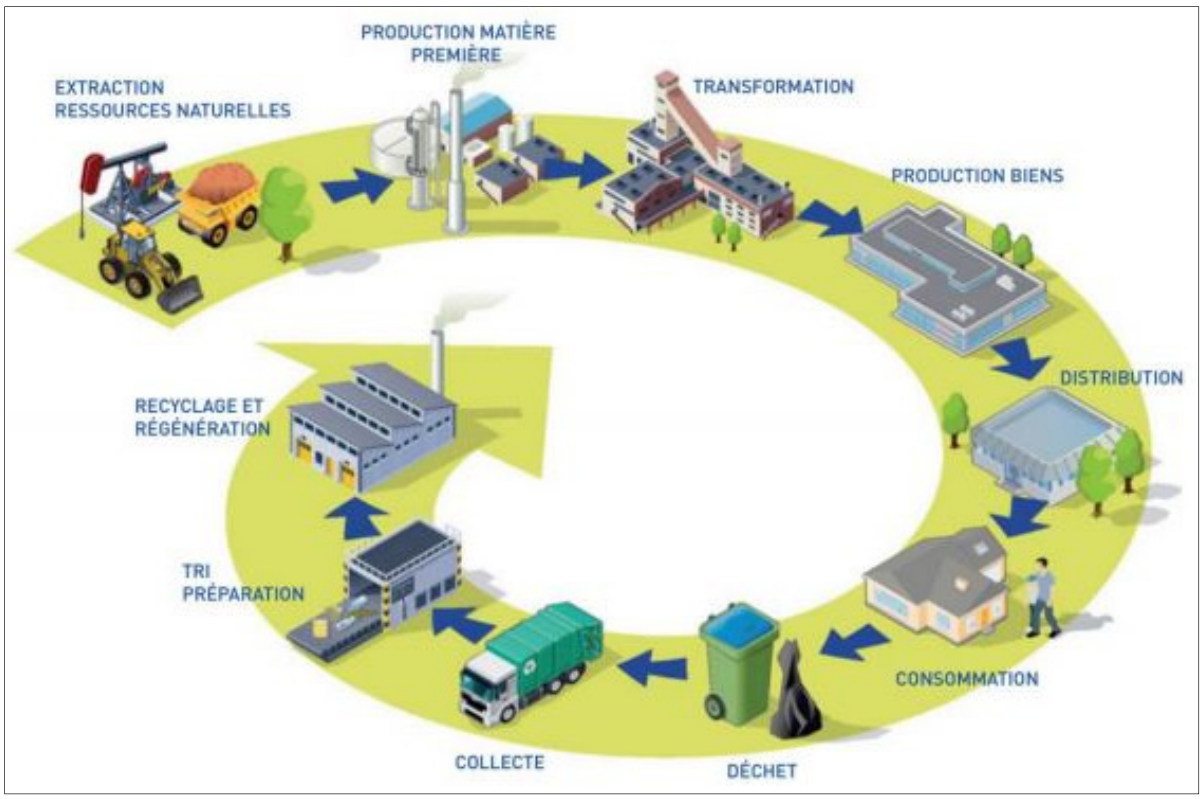


Figure 1.1 Cycle de valorisation du VPC
Tirée de Hestin, Veron et Devauze (2017)

Les résidus de verre sont récupérés au moyen de quatre systèmes de collecte soient : la collecte sélective municipale, la consigne publique, la consigne privée et la collecte pour le secteur industriel, commercial et institutionnel (ICI) (Gagnon, 2010). La collecte du verre issu des différents secteurs récupère quatre catégories de verre qui sont utilisées dans la fabrication de produits telles que présentées au Tableau 1.1. La variation de la composition chimique du verre nécessite un mode distinct de recyclage selon la catégorie. (Gagnon, 2010). Le verre récupéré par la collecte sélective municipale est essentiellement de type creux et il représente 17% des matières recyclables.

Tableau 1.1 Catégories de verre selon la fabrication de produits
Adapté de Gagnon (2010)

Catégorie de verre	**Applications**
Verre creux	Industrie alimentaire (ex: contenant, bouteille, pot)
Verre plat	Fenestration et vitrage (ex: fenêtre, vitre d'automobile)
Verre spécialisé	Résistant aux agents (ex: produit chimique, chaleur)
Verre optique	Optique (ex: lentille, appareil optique)

Au Québec, on compte 29 centres de tri dans les 17 régions administratives. Depuis 2012, on note une baisse de la quantité de VPC acheminée dans les centres de tri (Recyc-Québec, 2017). En 2010, 53 % du VPC collecté au niveau résidentiel est conditionné par les centres de tri alors que cinq ans plus tard, seulement 14 % du VPC est acheminé au centre de tri, tandis que le reste est envoyé dans des sites d'enfouissement pour des fins de recouvrement (Recyc-Québec, 2017). Le rejet du VPC des centres de tri s'explique de plusieurs façons :

- le bris des récipients de verre ne permet pas aux opérations de traitement la récupération de toutes les matières recyclables ;
- la réception de matières non recyclables ;
- le niveau élevé de contaminants.

Néanmoins, le système de consigne publique sur les bouteilles permet de garder le verre intact et facilite les opérations de traitement dans les centres de tri. Les enjeux actuels concernent la valorisation du verre de couleurs mélangées, récupéré lors de la collecte municipale. Depuis 2012, la quantité de matières vendue a diminué de 65 %, ceci étant lié à la présence de contaminants et à une faible croissance des marchés de produits fabriqués à partir de verre conditionné de couleurs mélangées (Recyc-Québec, 2017). Diverses utilisations sont possibles pour la valorisation du verre de post-consommation de couleurs mélangées. Le Tableau 1.2 présente les types de produits confectionnés à partir de VPC selon le type de conditionnement du verre (ÉEQ, 2017). Le verre possède des propriétés mécaniques et thermiques avantageuses qui peuvent bonifier les produits dans lesquels il est incorporé. Actuellement, l'industrie de la

construction est le principal débouché pour la valorisation du verre au Québec. Le marché de la laine en fibre de verre utilisée pour l'isolation des bâtiments est en pleine croissance et il devient concurrentiel sur le marché québécois (Québec, 2002). Le laboratoire des chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ÉTS) explore la substitution du granulat naturel par le granulat de verre dans les enrobés bitumineux et les couches structurales de la chaussée. Les autres avenues d'utilisation du VPC mixte présentées au Tableau 1.2 sont encore au stade de recherche de marché au Québec, bien que leurs applications soient déjà adoptées dans d'autres pays (ÉEQ, 2017).

Tableau 1.2 Utilisation du verre postconsommation mixte selon le type de conditionnement
Adapté de ÉEQ (2017)

Conditionnement du verre	**Potentiel éco matériaux**
Fibre de verre	Laine isolante
Poudre de verre	Verre cellulaire
	Additif cimentaire
	Encres
	Pneu
	Peinture
	Silicone
	Caoutchouc
Agrégat de verre	Filtration eau
	Abrasif
	Trappe de sable (Golf)
	Terrain synthétique
	Enrobé bitumineux
	Fondation routière
	Paillis ornemental

Le réemploi de matières résiduelles permet de réduire la consommation des matières premières et offre une seconde vocation à un matériau destiné au départ à des lieux d'enfouissement. Les applications potentielles du granulat de verre en construction routière sont nombreuses : isolation, aménagement paysagé, recouvrement granulaire et substitut à une matière première.

Les matériaux granulaires employés pour diverses applications structurales doivent respecter des critères de qualité assurant la performance de l'ouvrage. Ces critères portent principalement sur les propriétés mécaniques du matériau contenu dans l'ouvrage. Les propriétés du VPC documentées sont : la résistance à l'abrasion, la capacité de compaction, la résistance au cisaillement, et la conductivité hydraulique telles que présentées à l'Annexe I.

1.2 Action du gel sur les chaussées

1.2.1 Contexte climatique au Québec

La province de Québec couvre un large territoire (1 700 000km^2) ce qui donne lieu à un climat qui varie selon la région. Le climat du Québec se distingue par un écart important des températures enregistrées au cours de l'année variant de +30 °C à -30 °C dépendamment de la saison. Les précipitations perçues annuellement sur le territoire sont importantes, elles totalisent de 800 à 1400mm (Institut de la statistique Québec, 2014). En période hivernale, il s'agit d'un climat froid, humide et où les précipitations peuvent prendre plusieurs formes. En moyenne, il tombe 210cm de neige par hiver au Québec (Météo média, 2018). De plus, il faut prévoir 13 jours où il tombe de la pluie verglaçante qui est souvent associée à un redoux de la température durant l'hiver. Du mois de décembre à février, la température moyenne de l'air est de -10°C au Québec. La période de gel, où la température de l'air est sous 0°C, varie de quatre à cinq mois par année (St-Laurent, 2012). La profondeur de pénétration du gel maximale varie selon les régions et la rigueur de l'hiver. Dans la région de Montréal, la pénétration du gel peut atteindre une profondeur avoisinante 1,5 mètre, tandis que dans les régions plus au nord comme Val d'Or, on peut observer une pénétration jusqu'à 3,0 mètres (apsam; 2018). L'indice de gel est utilisé pour quantifier la froidure globale d'un hiver où les températures minimales journalières de l'air sous 0 °C sont additionnées. Au Québec, l'indice de gel varie de 800 à 2200 °C•jour ce qui est catégorisé comme un climat nordique.

1.2.2 Dégradations associées à l'effet du gel

Au Québec, les infrastructures routières totalisent 170 000km de routes dont 30 985km constituent le réseau supérieur où la maintenance est sous la responsabilité du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET). Les régions nordiques sont confrontées à la dégradation de leur réseau routier causée par l'action du gel. De manière général, la dégradation de la chaussée associée à l'action du gel peut avoir un impact total ou partiel sur les couches de la structure de chaussée qui se composent : du revêtement ; du corps granulaire de chaussée ; et du sol d'infrastructure. Au niveau du revêtement, les dégradations répertoriées sont le retrait thermique, le nid-de-poule et la fissuration de type lézarde, transversal ou longitudinal au centre de la chaussée. Au niveau des couches granulaires, les dégradations observées sont le gonflement en période de gel et l'orniérage structural. Au niveau du sol d'infrastructure selon le type de sol naturel, les dégradations sont principalement le gonflement en période gel et la perte de capacité portante en période de dégel.

Au Québec, l'outil de dimensionnement des chaussées souples utilisé par le MTMDET est le logiciel CHAUSSÉE 2. Ce logiciel comporte deux volets de calcul de pénétration du gel et de l'estimation du soulèvement en fonction de la région et des propriétés des matériaux composant la structure de chaussée. L'Annexe II présente en détail les stratégies de conception des chaussées souples vis-à-vis le gel et les deux volets de protection au gel du logiciel CHAUSSÉE 2.

1.2.2.1 Soulèvement différentiel

Dans la mesure où le phénomène de soulèvement au gel se manifesterait de façon uniforme, aucun inconfort ne serait perçu par l'usager. Dans le cas d'un soulèvement différentiel, le niveau de sévérité de la dégradation de l'uni peut entrainer une réduction du confort jusqu'à la perte de contrôle de l'usager (Doré, 1997). Lafleur et al. (1994) exposent les quatre scénarios de soulèvement différentiel observé notamment : le type ordinaire représenté par l'apparition de bosses; le type inverse défini par la présence de dépressions; le type ondulatoire caractérisé

par l'observation d'une série de bosses et de creux; et le type différentiel transversal déterminé par un soulèvement plus accentué au centre de la chaussée qu'aux bordures. Le soulèvement différentiel se produit en partie à cause de la variabilité de la nature du sol d'infrastructure sous l'axe longitudinal et transversal de la chaussée (Bilodeau, 2013). En effet, les caractéristiques du sol support comme la teneur en fines, la minéralogie, la densité, la pression de surcharge et la teneur variable en eau des sols naturels, influencent la sensibilité au gel (Bilodeau et Dore, 2013) (Konrad, 1999). L'évolution du gonflement du sol d'infrastructure sous l'action du gel provoque le soulèvement du corps de chaussée, puis lorsque les contraintes en tension atteignent le point de rupture du revêtement de surface, on observe alors la formation de fissures (Doré, 1997).

La prise en considération du gel, dans les couches granulaires de fondation et de sous-fondation, est souvent négligée puisque ces matériaux sont catégorisés comme non gélifs, étant donné la faible présence de particules fines. Cependant, Bilodeau, Doré et Pierre (2008) ont exposé que la sensibilité au gel des matériaux granulaires grossiers est en fait non négligeable. Le niveau élevé de la nappe phréatique ou une infiltration d'eau dans le corps de la chaussée sont des sources suffisantes d'approvisionnement en eau pour la formation de lentilles de glace (Spencer Guthrie, 2003).

1.2.2.2 Perte de capacité portante

Durant le dégel printanier, l'augmentation de la teneur en eau due à la fonte des lentilles de glace, additionnée au passage du trafic, entrainent une augmentation de la pression interstitielle ce qui diminue la résistance au cisaillement du sol support (Doré, 1991) (Dysli, 1991b). L'affaiblissement de la capacité portante au dégel est influencé par la vitesse de la pénétration du front chaud, le taux de consolidation et la capacité de la structure à drainer l'excès d'eau (Doré, 2004). En fait, les sols gélifs possèdent, en général, une structure naturelle ayant la capacité de contenir une teneur en eau élevée. Par conséquent, il présente des conditions de drainage pauvres et une faible résistance en compression (Côté et Konrad, 2007 ; Leroueil et al., 1991). L'affaissement de la structure de chaussée occasionne l'accélération du processus

de dégradation des matériaux tel que la fissuration par carrelage de la couche de surface ou encore l'orniérage structural.

1.3 Propriétés thermiques

La connaissance des propriétés thermiques des matériaux d'une structure de chaussée est essentielle à l'estimation de son comportement durant les cycles de gel-dégel. L'exposition à la chaleur et au froid des matériaux qui y sont soumis se traduisent de différentes manières selon la conductivité thermique, la capacité thermique et la chaleur latente.

1.3.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique notée k est le rapport entre le flux de la chaleur passant à travers une unité de surface sous un gradient thermique unitaire tel que présenté à l'équation 1.1. La théorie de la conductivité thermique [W/mK] repose sur l'hypothèse de Fourier (Dysli, 1991a).

$$k = \frac{q}{\overrightarrow{grad\ T}} \tag{1.1}$$

Où q est le flux de chaleur (W/m^2), T est la température (K) et $\overrightarrow{gradT}$ (K/m) le gradient thermique. La modélisation de l'écoulement d'un flux thermique est similaire à un écoulement hydraulique. La conductivité ou la perméabilité d'un corps multicouche correspond à la moyenne des conductivités thermiques de chacune des couches, dans le cas où l'orientation du flux de chaleur est unidirectionnel au corps multicouche. De plus, la température en contact avec le corps étudié est un paramètre important qui influe sur la conductivité thermique (Jannot, 2012).

1.3.2 Capacité thermique

La capacité thermique massique c [J kg^{-1} K^{-1}] représente la quantité d'énergie nécessaire à fournir à un corps d'un kilogramme pour élever sa température d'un degré Kelvin. La capacité

thermique volumique C [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$] ($C=\rho \cdot c$) représente la quantité d'énergie nécessaire à fournir à un corps d'un mètre cube pour élever sa température d'un degré Kelvin. Cette propriété thermique reflète la capacité d'un corps à accumuler et restituer de l'énergie par échange thermique lorsqu'il est soumis à une variation de la température. La capacité thermique volumique d'un sol non gelé (C_u) nécessite la connaissance de la capacité thermique thermique massique des particules solides (c_s), de la capacité thermique massique de l'eau (c_w) et de la teneur en eau du milieu poreux (w %) (1.2).

$$C_u = c_s * \rho_d + \frac{w}{100} * c_w * \rho_d \tag{1.2}$$

Dans le cas d'un sol gelé, la conductivité thermique volumique (C_f) inclut la conductivité thermique massique de la glace (c_i) et de la teneur en glace (w_f) du sol (1.3).

$$C_f = c_s * \rho_d + \frac{w - w_f}{100} * c_w * \rho_d + \frac{w_f}{100} * c_i * \rho_d \tag{1.3}$$

1.3.3 Chaleur latente

La chaleur latente massique l [$J \cdot kg^{-1}$] ou la chaleur latente volumique L [$J \cdot m^{-3}$] est l'énergie nécessaire appliquée à une masse ou à un volume, afin d'engager un changement d'état physique soit solide, liquide ou gazeux. Selon le régime thermique, la chaleur latente dégagée durant le changement de phase peut être absorbée par le système (Farouki, 1986). La chaleur latente massique d'un sol est fonction de la chaleur latente de fusion de la glace (l_i) et de sa teneur en glace (w_f) (équation 1.4)

$$l = l_i \frac{w_f}{1 + w_f} \tag{1.4}$$

1.3.4 Transfert de chaleur dans les milieux poreux

Certaines propriétés des matériaux ont une influence sur les transferts de chaleur dans un sol dont la porosité (n) et le degré de saturation (Sr).

1.3.4.1 Effets de la porosité et de la composition minéralogique

Les sols sont constitués d'un ensemble de particules solides entourées de vides. À l'état sec, la conductivité thermique d'un sol est principalement influencée par sa masse volumique sèche et sa porosité. La porosité est le rapport entre les vides d'un matériau granulaire et son volume. Pour un matériau granulaire, la porosité est directement reliée avec la masse volumique sèche et exprime le niveau de compaction de ce matériau. En fait, le transfert de chaleur d'un squelette granulaire dans un état sec se manifeste par la nature et le nombre de contacts entre les grains solides (Farouki, 1986). Ainsi, l'augmentation de la porosité occasionne une réduction de la surface de contacts entre les grains et une hausse de la quantité d'air dans le matériau granulaire. L'air possède une conductivité thermique très faible qui agit comme isolant thermique. En revanche, si les grains solides sont reliés par un liant ou une pâte, la conductivité thermique est améliorée considérablement par l'augmentation de la surface de contacts (Farouki, 1986). De plus, la forme des grains et la distribution granulométrique influencent l'aire de contact entre ceux-ci et la capacité de compaction. La présence de particules fines remplit l'espace des vides du squelette granulaire grossier et augmente la densité du matériau. L'effet de desserrement de la structure granulaire, causé par la quantité de fines qui écarte les particules plus grossières, provoque une diminution du transfert de chaleur selon Farouki (1986).

Côté et Konrad (2007) ont effectué des analyses thermiques dans le but de déterminer une méthode indirecte pour estimer la conductivité thermique d'un sol naturel. Ils proposent une méthode basée sur la conductivité thermique des grains solides à l'état sec, plus précisément en fonction de la fraction de quartz. Le quartz possède une conductivité thermique de 7,69

W/mK comparativement à la valeur moyenne des autres minéraux constituant l'argile de Champlain de 2,15 W/mK. En fait, la teneur en quartz peut engendrer une variation de la conductivité thermique de 20,0 %, comparativement à 3,0% pour les autres minéraux. Le Tableau 1.3 présente la conductivité thermique moyenne des minéraux constituant l'argile.

Tableau 1.3 Conductivité thermique moyenne des minéraux d'argile
Tiré de Côté et Konrad (2007)

Mineral	ρ_s (g/cm^3)	k_m (W/mK)
Clay minerals		
Chlorite	2.78	5.25
Illite	2.66	1.85
Kaolinite	2.63	2.64
Smectite	2.63	1.88
Other mineral families in clay soils		
Amphibole	2.90	3.46
hornblende	3.18	2.81
Calcite	3.16	3.59
Dolomite	2.90	5.42
K-feldspar	2.57	2.25
Mica	2.87	2.20
Plagioclase	2.69	1.84
Quartz	2.65	7.69
silicate glass	2.65	1.35

Note: Mean values computed from Brigaud and Vasseur (1989) and Horai (1971).

1.3.4.2 Effets de l'eau

L'eau a un effet complexe sur les transferts de chaleur dans un corps poreux. Dans un corps granulaire comportant une faible teneur en eau, l'eau est retenue par une forte tension capillaire à la surface des grains solides. Une fois que le film d'eau recouvre l'ensemble des grains, l'eau remplit les vides interstitiels. Dans cet état, l'eau favorise le transfert de chaleur du squelette granulaire par la création de ponts d'échange thermique entre les grains comme représenté à la Figure 1.2. En fait, l'eau est 22 fois plus conducteur que l'air (Farouki, 1986). Ainsi, la conductivité thermique augmente avec la teneur en eau dans la mesure où les contacts entre les grains sont préservés. L'introduction d'eau supplémentaire à un sol saturé provoque un

comportement dilatant du squelette granulaire et une réduction de la conductivité thermique qui tend vers celle de l'eau. Berraha (2017) montre que la présence d'eau a une plus forte influence sur la conductivité thermique que la densité ou la distribution granulométrique.

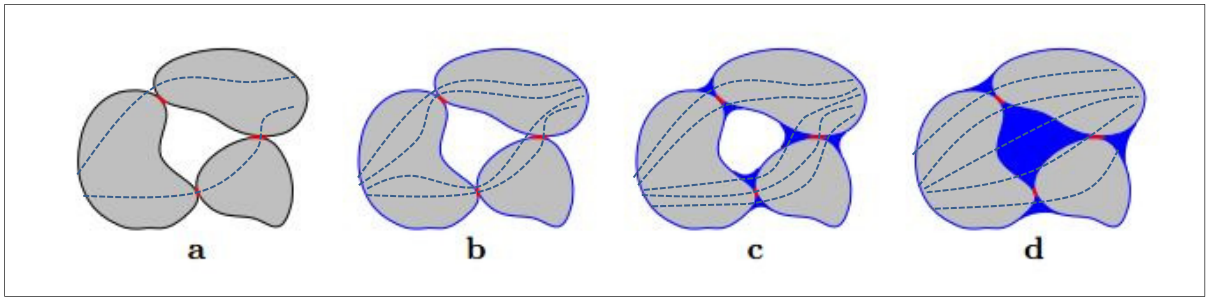


Figure 1.2 Illustration schématique des transferts thermiques
dans un milieu poreux en fonction de la teneur en eau
Adaptée de Roth (2006)

Le transfert de chaleur dans un sol est un concept complexe puisque l'eau est grandement affectée par la variation de la température. Dans un sol, la présence d'eau est observée sous plusieurs états soient : vapeur, liquide et solide. L'eau possède des propriétés thermiques propres à chacune de ses phases. Notamment, la glace possède une conductivité thermique quatre fois plus élevée que celle de l'eau soit de 2,1 W/mK pour la glace par rapport à 0,6071 W/mK pour l'eau à l'état liquide. En effet, des essais de conductivité thermique réalisés sur différents types de sol en fonction de la porosité suggèrent que la conductivité thermique des sols saturés et gelés tend vers celle de la glace, tandis que celle des sols non gelés s'approche de celle de l'eau selon une porosité croissante (Terzaghi, 1952). La conductivité thermique d'un sol gelé augmente progressivement avec la diminution des températures (Kozlowski, 2009). Toutefois, la congélation des sols comportant une faible teneur en eau engendre la rupture des ponts thermiques. La congélation du film d'eau recouvrant les particules solides diminue le nombre de points de contact entre les grains solides.

1.3.5 Propriétés thermiques du VPC

Les propriétés thermiques, telles que la conductivité thermique et la diffusivité thermique sont essentielles pour l'analyse des performances des chaussées à long terme, plus particulièrement

lors de l'intégration d'isolant dans le corps de la chaussée (Côté, 2001). Berraha (2017) a réalisé une caractérisation expérimentale comparative des propriétés thermiques des granulats de VPC et de pierre calcaire. Les paramètres physiques à l'étude sont les facteurs influençant les propriétés thermiques dans les milieux poreux tels : la teneur en eau, la minéralogie, et la granulométrie.

1.3.5.1 Conductivité thermique du VPC

La conductivité thermique (λ) est la vitesse d'écoulement de la chaleur au travers d'un corps sous l'application d'un gradient thermique. La mesure de la conductivité thermique est réalisée à l'aide d'une sonde thermique insérée dans le corps granulaire. La procédure d'essai s'inspire de la norme ASTM D5334 (2014). Les résultats de conductivité thermique du granulat de VPC et de pierre calcaire sont présentés aux Tableau 1.4 etTableau 1.5. Les Tableau 1.4 etTableau 1.5 incluent aussi les résultats d'essais comme : la masse volumique sèche lors des essais de conductivité thermique (ρ_d^{λ}); la porosité (n) ; le degré de saturation (Sr) ; et l'écart type (s). Les deux sources de granulats présentent une conductivité thermique plus élevée pour la classe granulométrique 0,08-1,25mm à l'état sec. Cette classe granulométrique possède une quantité de particules fines plus importante permettant de remplir les vides du squelette granulaire grossier. Une porosité plus basse conduit à une augmentation du nombre de contacts entre les grains facilitant le transfert du flux de chaleur (Farouki, 1986). À l'état sec, une valeur de la porosité qui tend vers 0 % entraine une conductivité thermique équivalente à celle des grains solides (Berraha, 2017). Toutefois, l'impact de la variation granulométrique pour les deux sources de granulats est plutôt faible à l'état sec soit de 0,140 à 0,265 W/mK pour la pierre calcaire et 0,135 à 0,245 W/mK pour le VPC.

Tableau 1.4 Conductivité thermique (λ) de la pierre calcaire en fonction de la teneur en eau volumique (θ) pour différentes classes granulométriques
Tiré de Berraha (2017)

Pierre calcaire	ρ_d	θ	n	S_r	$\overline{\lambda_h^{corr}}$	s	$\overline{\lambda_{hc}^{corr}}$	s
	g/cm^3	%			$W/(m.K)$			
0,08-1,25 mm (classe #1)	1,94	0,0	30,1	0,0	0,265	0,003	0,251	0,003
	1,86	9,3	33,1	28,1	1,202	0,024	1,251	0,031
	1,86	17,7	32,8	53,9	1,508	0,052	1,519	0,015
	1,81	29,0	34,7	83,4	1,513	0,047	1,540	0,018
	1,68	35,2	39,5	89,1	1,439	0,020	1,504	0,050
	1,50	42,4	46,1	92,0	1,359	0,015	1,281	0,010
0,630-2,5 mm (classe #2)	1,71	0,0	38,3	0,0	0,166	0,001	0,156	0,001
	1,65	15,5	40,6	38,1	1,158	0,017	1,217	0,010
	1,67	24,2	39,8	60,8	1,438	0,038	1,546	0,053
	1,70	33,1	38,7	85,6	1,546	0,022	1,317	0,048
	1,63	37,6	41,0	91,6	1,328	0,020	1,301	0,006
1,25-5 mm (classe #3)	1,70	0,0	38,5	0,0	0,140	0,004	0,131	0,003
	1,68	12,9	39,2	33,0	0,726	0,035	0,697	0,030
	1,70	26,6	38,4	69,3	1,067	0,052	1,058	0,033
	1,70	33,6	38,6	86,2	1,315	0,034	1,305	0,019
	1,59	38,7	42,4	91,3	1,244	0,010	1,216	0,013

Tableau 1.5 Conductivité thermique (λ) du VPC en fonction de la teneur en eau volumique (θ) pour différentes classes granulométriques
Tiré de Berraha (2017)

VPC	ρ_d	θ	n	S_r	$\overline{\lambda_h^{corr}}$	s	$\overline{\lambda_{hc}^{corr}}$	s
	g/cm^3	%			$W/(m.K)$			
0,08-1,25 mm (classe #1)	1,80	0,0	28,7	0,0	0,245	0,003	0,242	0,001
	1,73	14,3	31,6	45,4	0,598	0,013	0,583	0,010
	1,73	25,1	31,5	79,6	0,691	0,010	0,706	0,008
	1,61	31,3	36,3	86,2	0,793	0,009	0,811	0,005
	1,41	40,4	44,3	91,2	0,778	0,004	0,799	0,003
0,630-2,5 mm (classe #2)	1,49	0,0	40,9	0,0	0,152	0,002	0,150	0,001
	1,50	11,9	40,4	29,4	0,418	0,007	0,434	0,003
	1,46	24,5	42,2	57,9	0,574	0,004	0,584	0,003
	1,50	34,8	40,4	86,3	0,703	0,004	0,706	0,004
	1,43	38,7	43,1	89,8	0,729	0,011	0,766	0,004
1,25-5 mm (classe #3)	1,52	0,0	38,0	0,0	0,135	0,005	0,129	0,004
	1,52	11,6	37,9	30,6	0,352	0,013	0,348	0,012
	1,54	23,9	37,2	64,3	0,512	0,004	0,515	0,004
	1,56	32,8	36,3	90,3	0,722	0,006	0,717	0,006
	1,43	38,7	41,6	93,1	0,683	0,015	0,675	0,013

L'introduction d'une quantité d'eau dans le milieu poreux entraine une augmentation significative de la conductivité thermique. Selon les Tableau 1.4 et 1.5, l'augmentation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumique (θ%) est moins importante pour le VPC que pour la pierre calcaire. D'ailleurs, le VPC obtient une valeur maximum de 0,793 W/mK (θ=31,3 %) par rapport à 1,546 W/mK (θ=33,1 %) pour la pierre calcaire. Ces résultats montrent que la conductivité thermique du VPC est moins sensible à l'eau que la pierre calcaire (Berraha, 2017).

1.3.5.2 Diffusivité thermique du VPC

La diffusivité thermique (α) est associée à l'inertie thermique du matériau exprimé par le rapport de la conductivité thermique (λ) et de la capacité thermique. La mesure de la diffusivité est réalisée à l'aide d'un dispositif expérimental inspiré de la méthode proposée par Mrawira et Luca (2002) pour la mesure de la diffusivité thermique sur des éprouvettes de béton bitumineux, voir la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Les résultats de diffusivité thermique (α) pour la pierre calcaire et le VPC en fonction de la teneur en eau volumique (θ) pour trois classes granulaires sont présentés aux Tableau 1.6 et 1.7. Les Tableaux 1.6 et 1.7 incluent aussi les résultats d'essais comme : la masse volumique sèche lors des essais de conductivité thermique (ρ_d^{λ}) ; la masse volumique sèche lors des essais de diffusivité thermique (ρ_d^{α}); le rapport des deux masses volumiques définit par le facteur X ; la porosité (n) ; le degré de saturation (Sr) ; et l'écart type (s).

Tableau 1.6 Diffusivité thermique (α) de la pierre calcaire en fonction de la teneur en eau volumique (θ) pour différentes classes granulométriques
Tiré de Berraha (2017)

Pierre calcaire	ρ_d^α	ρ_d^λ	χ	θ	n	S_r	$\overline{\alpha}$	s
	g/cm^3		%				x10^{-7} m^2/s	
0,08-1,25 mm (classe #1)	1,87	1,94	96	0,0	32,6	0,0	2,09	0,14
	1,81	1,86	97	13,8	34,7	39,7	4,88	0,16
	1,81	1,81	100	24,2	34,8	69,5	4,81	0,97
0,630-2,5 mm (classe #2)	1,65	1,71	97	0,0	40,5	0,0	2,28	0,25
	1,63	1,65	99	12,4	41,2	30,1	5,13	0,16
	1,62	1,67	97	23,6	41,7	56,6	4,21	0,36
1,25-5 mm (classe #3)	1,68	1,70	99	0,0	39,2	0,0	2,29	0,27
	1,67	1,68	99	13,2	39,7	33,2	4,83	0,14
	1,68	1,70	99	23,3	39,4	59,1	5,18	0,28

Tableau 1.7 Diffusivité thermique (α) du granulat de VPC en fonction de la teneur en eau pour différentes classes granulométriques
Tiré de Berraha (2017)

VPC	ρ_d^α	ρ_d^λ	χ	θ	n	S_r	$\overline{\alpha}$	s
	g/cm^3		%				x10^{-7} m^2/s	
0,08-1,25 mm (classe #1)	1,74	1,80	97	0,0	31,1	0,0	2,20	0,09
	1,64	1,73	95	13,0	35,0	37,0	2,70	0,21
	1,68	1,73	97	21,9	33,4	65,5	2,89	0,15
0,630-2,5 mm (classe #2)	1,42	1,49	95	0,0	43,6	0,0	1,76	0,18
	1,44	1,49	97	10,5	42,7	24,7	2,82	0,19
	1,41	1,46	97	16,8	44,0	38,1	2,74	0,15
1,25-5 mm (classe #3)	1,50	1,52	99	0,0	38,8	0,0	1,77	0,11
	1,51	1,52	99	14,3	38,6	37,1	2,66	0,17
	1,54	1,54	100	21,5	37,3	57,6	3,11	0,10

À l'état sec, la diffusivité thermique de la pierre calcaire est légèrement supérieure à celle du VPC soit de 2,2 x10^{-7} contre 1,8 x10^{-7} m^2/s. L'augmentation de la teneur en eau fait croître rapidement la diffusivité thermique des deux matériaux qui atteint un plateau aux environs de 5,0 x10^{-7} m^2/s pour la pierre calcaire et de 2,5 x10^{-7} m^2/s à 3,0 x10^{-7} m^2/s pour le VPC. La tendance suggère que le VPC est moins sensible à l'augmentation de la teneur en eau que la

pierre calcaire. À l'échelle de la chaussée, une valeur basse de la diffusivité thermique se traduit par un effet d'amortissement de la variation de la température de l'air (Berraha, 2017). L'effet d'amortissement de la variation de la température de l'air se traduit par une variation de la température du matériau plus faible que la variation de la température de l'air dans lequel il est conditionné.

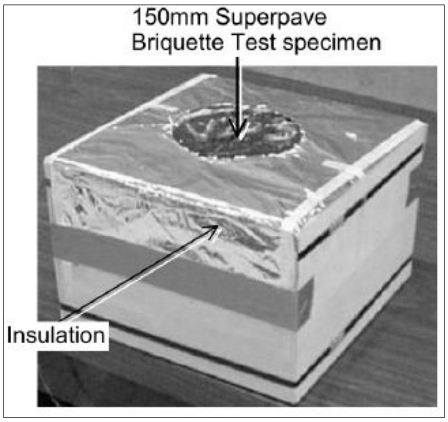


Figure 1.3 Dispositif expérimental pour mesurer la diffusivité thermique d'éprouvette de béton bitumineux
Tirée de Mrawira et Luca (2002)

1.3.6 Processus de cristallisation dans les milieux poreux

Le changement de phase de l'eau liquide à solide se produit au point de congélation de 0°C. Toutefois, l'eau gèle à des températures légèrement inférieures à 0°C dans les cas de soluté, de l'application de haute pression, et de système sol-eau (Kozlowski, 2009). Le concept de dépression du point de congélation fait référence à l'écart entre le point de congélation de l'eau pure et la température réelle à laquelle l'eau gèle dans une solution ou un système sol-eau (Anderson, 1967) (Konovalov, 2015) (Bing et Ma, 2011; Suzuki, 2004) (Kozłowski, 2009). La dépression du point de congélation d'un système sol-eau est causée par la nucléation hétérogène de l'eau interstitielle. Les facteurs influençant le point de congélation T_f dans un système sol-eau sont les suivants : l'application d'une pression, la teneur en eau et le degré de salinité de la solution (Bing et Ma, 2011 ; Suzuki, 2004 ; Konovalov, 2015).

La Figure 1.4 affiche la courbe de refroidissement de l'eau pure (A'B'C'D'E') et d'un système sol-eau (ABCDE) (Kozlowski, 2009). Les températures notées T_{sn} et T_f font référence à la température de nucléation spontanée et la température de congélation du système sol-eau. Le processus de congélation de l'eau pure et d'un système sol-eau comporte quatre évènements : le sur-refroidissement ou surfusion (A-A'); la nucléation spontanée (B-B'); la formation de cristaux de glace (CD-C'D'); la croissance des cristaux de glace (E); et la diminution de la chaleur sensible de la glace (E') (Zhang, Ma et Yang, 2015) (Akyurt, Zaki et Habeebullah, 2002).

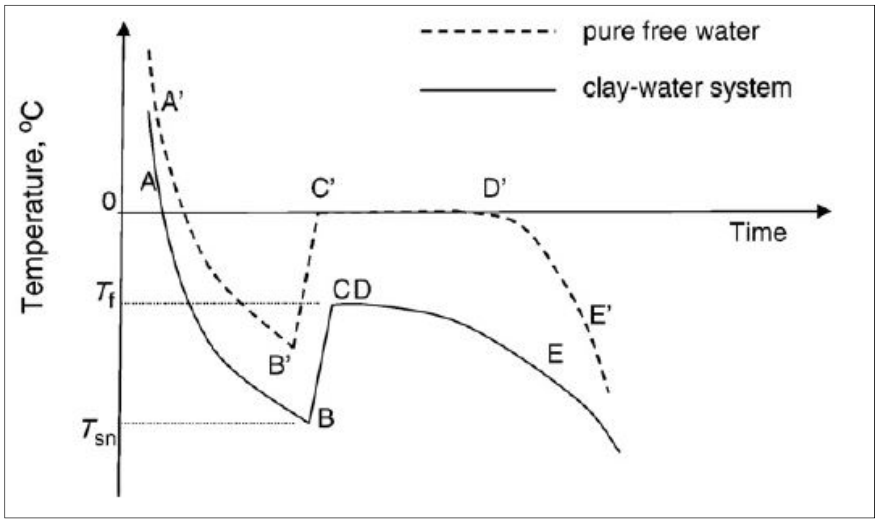


Figure 1.4 Courbe de refroidissement de l'eau pure (A'B'C'D'E')
et d'un système sol-eau (ABCDE)
Tirée de Kozlowski (2009)

Le gel de l'eau liquide est précédé d'une période de sur-refroidissement (A-A') qui atteint des températures inférieures au point de congélation. Le sur-refroidissement est un état métastable de l'eau liquide associé à une chute rapide de la température pour l'activation de l'énergie nécessaire pour provoquer la nucléation spontanée (Kozlowski, 2009) (Konovalov, 2015). Pendant le sur-refroidissement, une fois passé le point de congélation, des germes cristallins se forment et croissent progressivement pour atteindre la taille de cristaux (Anderson, 1967) (Konovalov, 2015). Le sur-refroidissement dépend de la masse du sol, de la teneur en eau, de l'intensité de l'extraction de la chaleur et de l'historique thermique du sol (Kozlowski, 2004; 2009) (Konovalov, 2015). L'amplitude du sur-refroidissement notée Ψ, est représentée par la

différence entre la température de congélation T_f et la température de nucléation spontanée T_{sn} (Kozłowski, 2009). À noter que l'eau liquide peut être refroidie à des températures inférieures à 0°C sans se solidifier et demeurer dans cet état d'équilibre instable pour une durée de temps considérable (Akyurt, Zaki et Habeebullah, 2002).

Une fois que les germes cristallins atteignent une taille critique, l'évènement de la cristallisation est initié. Cet évènement est associé à la température T_{sn} (B'-B) (Akyurt, Zaki et Habeebullah, 2002) (Kozłowski, 2009). Le phénomène de nucléation spontanée est accompagné du dégagement de la chaleur latente qui élève la température du système à la température T_f pour le système sol-eau (C) et de 0°C pour l'eau pure (C') (Kozlowski, 2009) (Suzuki, 2004). D'après Akyurt (2001) et Kozlowski (2004), le système est considéré hyper refroidi lorsque l'eau liquide en période de super-refroidissement atteint une température si basse que lors du dégagement de la chaleur latente celui-ci n'élève pas suffisamment la température du système pour atteindre le point de congélation T_f.

Au point C-C', on constate l'installation de l'état d'équilibre où la croissance des cristaux de glace est amorcée. Le processus de congélation de l'eau pure débute par une phase de transition où coexiste de l'eau sous forme solide et liquide. À l'interface de l'eau solide et liquide, on observe une microstructure cristalline qui emprunte une morphologie de type colonne, dendritique ou amorphe (Akyurt, Zaki et Habeebullah, 2002). Dans le cas de l'eau pure, le mélange partiellement gelé maintient une température de 0°C jusqu'à ce que l'ensemble de l'eau liquide disponible soit solidifié (C'D'). Une fois la cristallisation complétée, la température diminue de D'à E', où la chaleur sensible de la glace est éliminée progressivement (Akyurt, Zaki et Habeebullah, 2002).

Au plateau C-D du système sol-eau, le phénomène de cristallisation débute par la solidification de l'eau libre dans les pores du sol. Puis, la température du système diminue progressivement après avoir atteint le point CD. Les cristaux de glace dans les pores du sol croissent en fonction de la diminution de la température (Zhang, Ma et Yang, 2015) (Konovalov, 2015). Pour les sols comportant des particules très fines, un film d'eau actif recouvrant les particules de sol se

maintient sous forme liquide en équilibre sous des conditions de températures très basses (Kozlowski, 2004). La quantité d'eau non gelée en état d'équilibre est plus élevée pour les matériaux qui possèdent une surface spécifique élevée (Anderson, 1967). La Figure 1.5 affiche les trois étapes de congélation de l'eau interstitielle dans un système sol-eau.

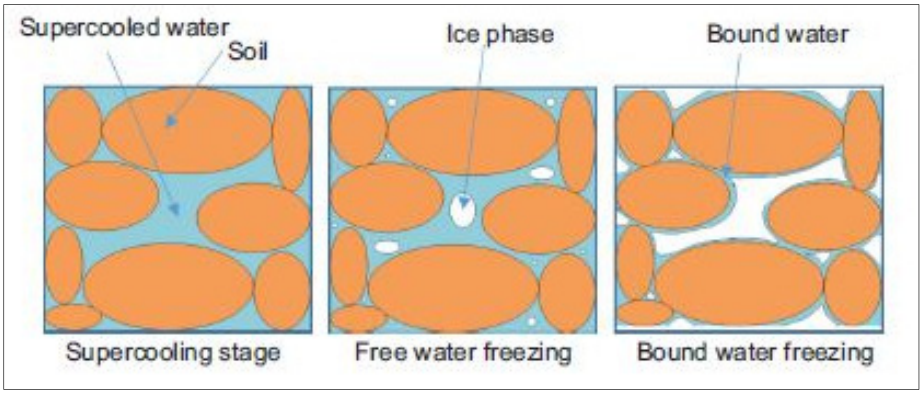


Figure 1.5 Processus de congélation de l'eau interstitielle d'un sol
Tirée de Zhang, Ma et Yang (2015)

1.4 Concept de gélivité

1.4.1 Sol gélif

En présence d'un front de gel, un sol gélif se distingue par une modification de sa structure qui se traduit par une augmentation de sa teneur en eau et un gonflement volumique (Rouquès et al., 1975) (Leroueil et al., 1991). En fait, le mécanisme de formation de lentilles de glace se déclenche dès la création des premiers cristaux de glace. À ce moment, la perméabilité du sol décroit en fonction de la diminution de la température ce qui exerce une pression d'aspiration de l'eau interstitielle du sol non gelé favorisant l'alimentation en eau au front de gel. La gélivité et le gonflement se manifestent par le développement de plusieurs couches subhorizontales d'eau gelée à travers le sol (Dysli, 1991b).

1.4.2 Sol non gélif

En présence de conditions de gel, un sol non gélif a tendance à se congeler en masse, c'est-à-dire qu'il ne présente pas d'augmentation significative de sa teneur en eau. Un léger gonflement peut être perçu, mais il est principalement associé au changement de phase de l'eau liquide en glace correspondant à une augmentation volumique de l'eau interstitielle de 9,0 % (Rouquès et al., 1975) (Dysli, 1991b). Dans certains cas, cette expansion de l'eau à travers un sol est suffisante pour briser les liens de cohésion. L'équation 1.5 tirée de Dysli (1991) permet d'estimer le gonflement volumique (ε_v) associé au changement de phases de l'eau liquide à solide en fonction de la teneur en eau (w).

$$\varepsilon_v = \frac{9w}{(w + 37)} \tag{1.5}$$

1.4.3 Classification de la gélivité

Trois niveaux de précision de l'estimation de la sensibilité au gel des sols sont utilisés dans le domaine routier (Chamberlain, 1981) (Konrad, 1983) . Le premier niveau est essentiellement basé sur la proportion de la fraction de particules fines, soit la quantité de particules dont le diamètre est inférieur à 0,074 mm ou 0,02 mm selon le système de classification des sols USCS ou AASHTO. Le deuxième niveau est basé sur les propriétés géotechniques de base du sol non gelé notamment, la distribution granulométrique et les limites de consistance. Le troisième niveau fait une estimation de la sensibilité au gel directement à partir des propriétés du sol en condition de gel à l'aide d'une procédure d'essai de congélation en laboratoire. Konrad et Morgenstern (1980) ont standardisé la procédure d'essai de congélation basée selon le concept du potentiel de ségrégation.

1.4.4 Sensibilité au gel du VPC

La sensibilité au gel est un critère de conception de chaussée important pour l'usage d'un nouveau matériau dans les régions nordiques. L'une des propriétés peu explorée du VPC est

sa sensibilité au gel. Henry et Hunnewell Morin (1997) ont étudié la sensibilité au gel du verre recyclé en se basant sur l'hypothèse initiale que les contraintes engendrées par les cycles de gel-dégel et la charge du trafic accélèrent le processus d'usure des particules de verre et augmentent la teneur en fines. Selon le critère de gélivité se basant sur la relation entre la sensibilité au gel et la teneur en fines, la sensibilité au gel augmente avec une teneur en fines croissante.

Suivant la procédure d'essai de gel et dégel ASTM D5918 (1991), Henry et Hunnewell (1997) ont déterminé la sensibilité au gel des particules de verre, de gravier naturel (PSG, CG) et des combinés gravier naturel-verre (70 %:30 %). Selon la Figure 1.6, la sensibilité au gel du granulat de verre est très faible et celles des mélanges gravier naturel-verre sont équivalentes ou inférieures au gravier naturel. L'ajout de verre au gravier Perry (PSG) engendre une réduction du taux de soulèvement au gel, tandis que pour le gravier Concord (CG), le taux de soulèvement étant déjà faible, il n'est pas affecté par l'addition de verre. Ces résultats suggèrent que l'incorporation de particules de verre peut réduire la sensibilité au gel de certains agrégats naturels.

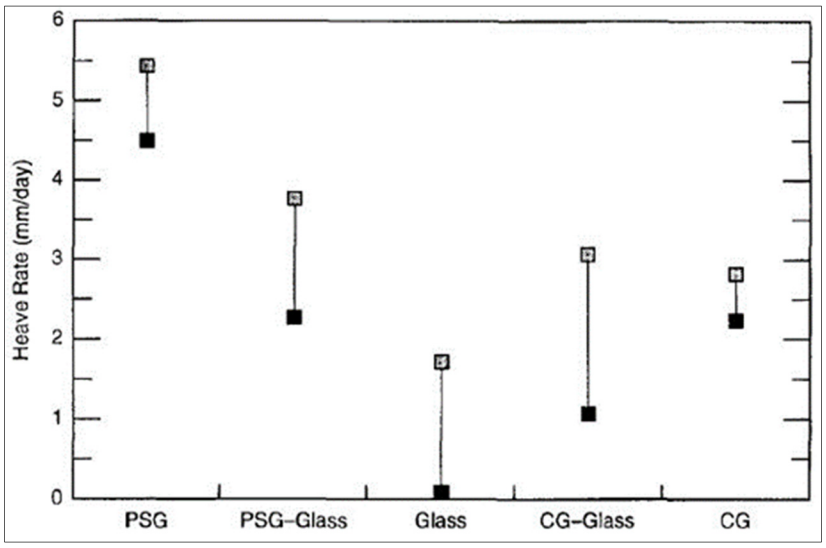


Figure 1.6 Taux de soulèvement au gel du verre, de l'agrégat naturel (PSG et CG) et du combiné de gravier naturel et verre (70 : 30)
Tirée de Henry et Hunnewell (1997)

1.5 Potentiel de ségrégation

Le potentiel de ségrégation (SP_0) est un paramètre d'ingénierie basé sur la théorie couplée du transfert de masse et de chaleur en période de gel afin de quantifier le degré de gélivité d'un sol. Le potentiel de ségrégation se définit comme le rapport entre la vitesse d'apport d'eau et le gradient thermique à travers la frange gelée (Konrad et Morgenstern, 1982b). Au Québec, il s'agit du critère de gel le plus précis pour déterminer la sensibilité au gel d'un sol ou d'un matériau granulaire fin à partir des caractéristiques de gel propres au sol. Le potentiel de ségrégation est utilisé pour prédire les transferts de masse durant la période de gel et ainsi estimer l'amplitude du soulèvement qui découle de la formation de lentilles de glace (Konrad et Morgenstern, 1980).

Cette section traite des différents aspects et applications du potentiel de ségrégation : la théorie couplée du transfert de masse et de chaleur ; les facteurs qui influencent les conditions générales de gel transitoire ; les méthodes directes et indirectes pour déterminer le SP ; et l'utilisation du SP à l'échelle de la chaussée.

1.5.1 Mécanisme de formation de lentilles de glace

Le mécanisme de formation de lentilles de glace dans un milieu poreux soumis à un système de gel unidirectionnel et à des conditions de gel constantes, a fait l'objet d'études approfondies réalisées par Konrad et Morgenstern (1980 ; 1981). Ces chercheurs approchent le soulèvement du sol au gel comme un problème de drainage qui empêche l'écoulement de l'eau vers la surface.

Le mécanisme de formation de lentilles de glace débute par le conditionnement de la surface d'un sol sous des températures de congélation. La pénétration d'un front de gel dans le sol crée un flux de chaleur instable entre la chaleur fournie par le sol et l'extraction de la chaleur par la baisse de température. Le changement rapide des températures à travers le sol produit un taux de refroidissement élevé ne permettant pas la formation de lentilles de glace à ce niveau. Certes, on observe un gel de l'eau interstitielle qui se produit essentiellement sur le sommet

des grains en direction de l'extraction de la chaleur. Il en découle la formation d'une matrice de glace ancrée entre les grains du sol. Cette partie de sol gelé est traitée comme un système passif puisqu'elle contribue peu au soulèvement total parce qu'aucun transfert de masse ne s'effectue à ce niveau du sol (Konrad et Morgenstern, 1981). À mesure que le front de gel progresse dans le sol, le taux d'avancement ralentit permettant à l'eau de s'accumuler à un niveau donné, puis il atteint un état stationnaire.

En fait, le système de gel unidirectionnel borné par des conditions thermiques fixes tend vers l'atteinte d'un état thermique en équilibre. La condition thermique à la base est une température qui se situe légèrement au-dessus de 0 °C et elle réchauffe la base de la lentille de glace en limitant la progression du front de gel. Vers l'atteinte de l'état d'équilibre, le taux de soulèvement et la vitesse d'écoulement de l'eau diminuent progressivement, jusqu'à la formation de la dernière lentille de glace. Le système de gel s'immobilise lorsque l'équilibre thermique du sol soumis aux conditions thermiques est atteint. Le procédé de formation de lentilles de glace selon la pénétration d'un front de gel est illustré à la Figure 1.7

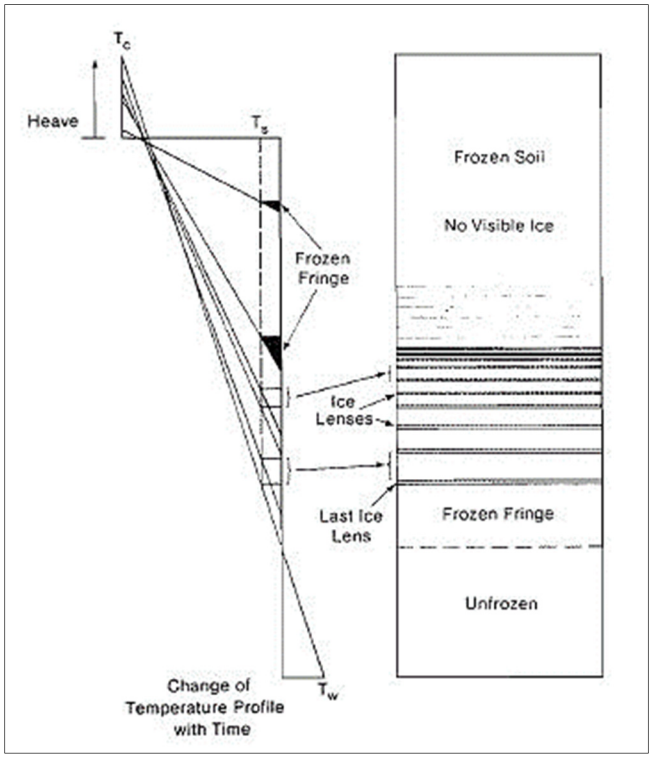


Figure 1.7 Schéma rythmique de formation de lentilles de glace
Tirée de Konrad et Morgenstern (1980)

En résumé, le système de gel unidirectionnel régi par un gradient de température constant et sans l'application de surcharge évolue selon trois phases caractéristiques de gel présentées à la Figure 1.8. Les phases 1 et 2 correspondent à la période de gel transitoire associée aux conditions de flux de chaleur instable. La phase 1 est associée à un super-refroidissement où la vitesse de pénétration du front de gel est très élevée. À la phase 2, on remarque un ralentissement de la progression du front de gel, une diminution de la vitesse de l'apport d'eau et du taux de soulèvement puisque le système est en voie d'atteindre un régime permanent. Puis, l'état stationnaire est atteint à la phase 3, lorsque le système thermique est en équilibre marqué par la formation de la dernière lentille de glace. Ensuite, l'écoulement de l'eau et le taux de soulèvement visent à se stabiliser. Le potentiel de ségrégation est déterminé au moment de la formation de la dernière lentille de glace, au début du régime permanent.

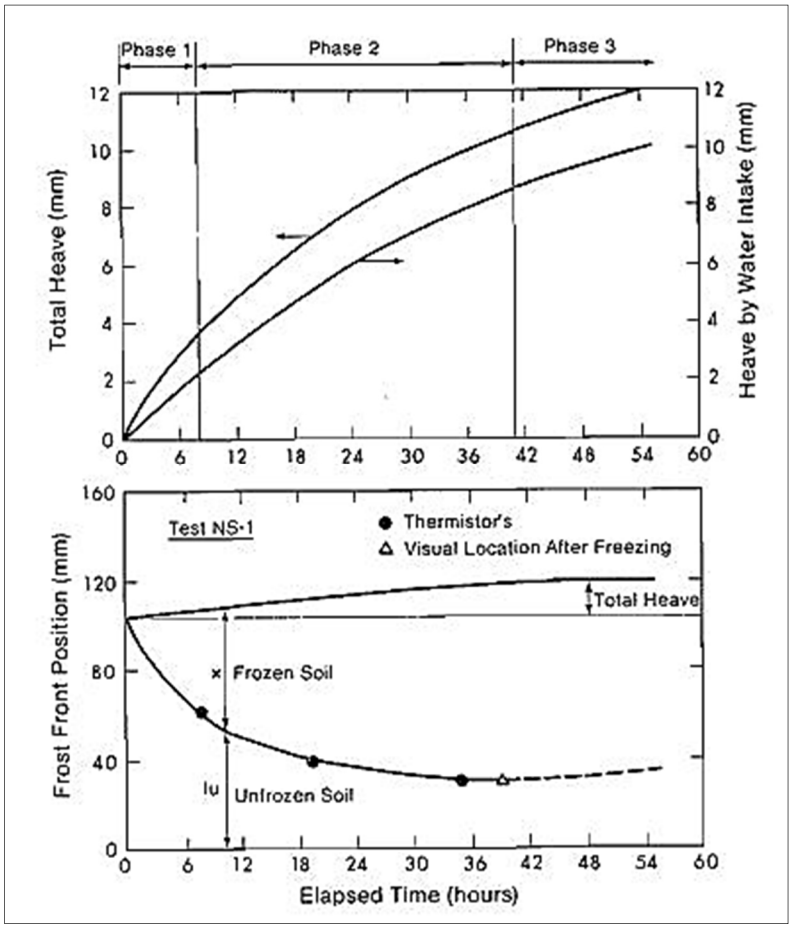


Figure 1.8 Les trois phases caractéristiques de gel
Tirée de Konrad et Morgenstern (1980)

De plus, on remarque à la Figure 1.7 la présence de lentilles de glace à différents niveaux dans l'échantillon. L'espacement vertical des lentilles de glace dans l'échantillon augmente progressivement en lien avec le gradient de température qui diminue avec la progression du front de gel dans l'échantillon. Konrad et Morgenstern (1980) explique que le système actif de formation de lentilles de glace se produit au niveau de la frange gelée. La frange gelée est une mince couche de sol partiellement gelée, et bornée deux conditions thermiques tel que la température du front de ségrégation (T_s) et la température du front de gel (T_i) comme illustrée à la Figure 1.10. La limite froide de la frange gelée (T_s) correspond au front de ségrégation positionné à la base de la lentille de glace. Le front de ségrégation correspond à la température de congélation d'un système sol-eau tel que présenté à la section 1.4.6, où l'eau interstitielle gèle à une température légèrement sous le point de congélation de l'eau pure. Elle est estimée aux environs de -0,05 °C à -0,15 °C pour un silt, tandis que pour un sol plus fin comme une argile la gamme de températures T_s est plus froide soit de -0,4 °C à -0,8 °C. La limite chaude de la frange gelée (T_i) est associée au front de gel ou appelé isotherme 0 °C correspondant à la température la plus chaude à laquelle de la glace se forme dans les pores d'un sol.

La perméabilité de la frange gelée varie en fonction de la température, où la perméabilité du sol diminue avec une diminution de la température. En fait, l'épaisseur du réseau d'eau capillaire et du réseau d'eau absorbée à la surface des grains diminuent avec la diminution de la température puisque la quantité d'eau sous forme liquide disponible décroit. De plus, la distribution de la température à travers la frange gelée varie de manière non-linéaire entre les deux conditions thermique T_f et T_i. Le développement de l'effet de succion de la frange gelée est le résultat de la combinaison de : la diminution de la perméabilité de la frange gelée en fonction de la température ; et la distribution de la température non-linéaire à travers la frange gelée. La succion de la frange gelée est inversement proportionnel à la perméabilité de la frange gelée telle que représentée par les Figure 1.9 et Figure 1.10.

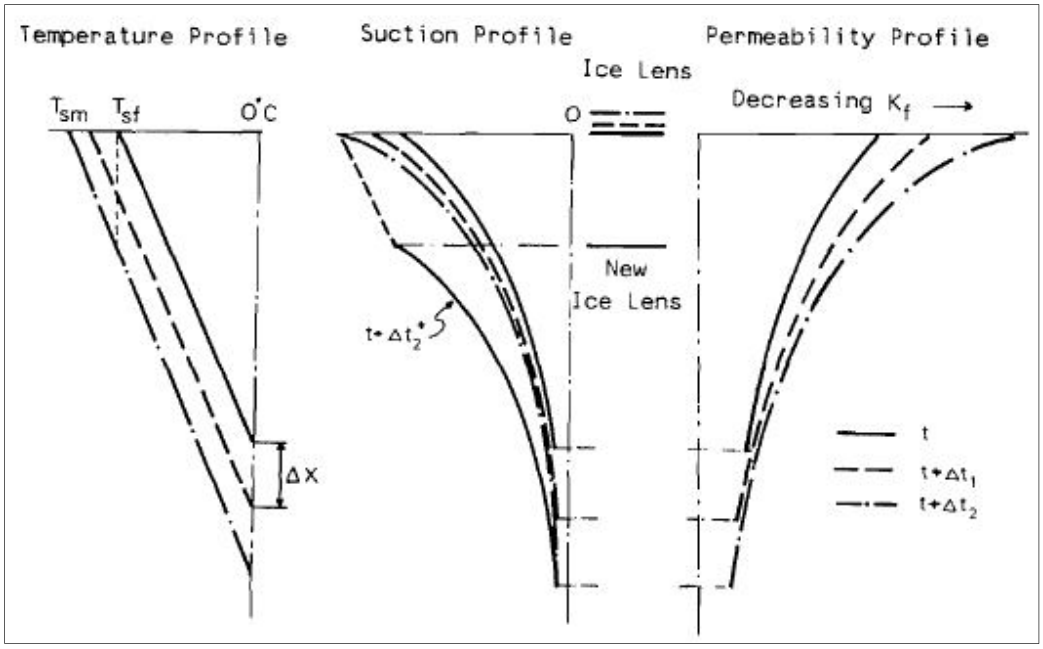


Figure 1.9 Changement des caractéristiques de la frange gelée
suivant la progression du front de gel
Tirée de Konrad et Morgenstern (1980)

La croissance des lentilles de glace évolue suivant la progression de la frange gelée dans le sol. Le film d'eau actif plus épais à la frontière chaude, l'isotherme 0°C, aspire l'eau non gelée vers la frontière froide, le front de ségrégation, où le film d'eau actif rétrécit suivant un comportement non linéaire. L'apport d'eau se solidifie à la frontière froide correspondant à la température de congélation du système sol-eau. La frange gelée est considérée comme le système actif du mécanisme de formation de lentilles de glace. Le volume d'eau consommé lorsque le front de gel est stationnaire se compare avec l'épaisseur de la dernière lentille de glace (Konrad et Morgenstern, 1980 ; 1981).

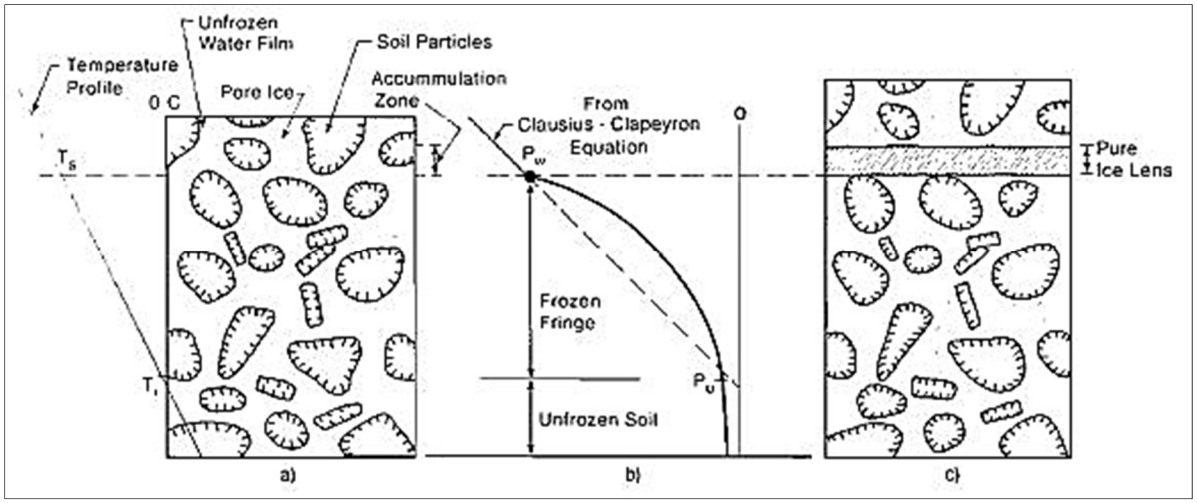


Figure 1.10 Principes thermodynamiques de la frange gelée
(a) Sol non gelé ; (b) Profil de succion à travers l'échantillon ; (c) Formation d'une lentille de glace causé par la succion de la frange gelée
Tirée de Konrad et Morgenstern (1980)

1.5.2 Facteurs influençant le potentiel de ségrégation

Konrad et Morgenstern (1980), (1981), (1982a), (1982b), ont étudié les mécanismes de formation de lentilles de glace. Ils ont permis de mettre en lumière les facteurs influençant le potentiel de ségrégation, notamment la succion moyenne de la frange gelée, le taux de refroidissement de la frange gelée et la pression de surcharge.

1.5.2.1 La succion moyenne de la frange gelée

Konrad et Morgenstern (1980) ont montré que la succion moyenne de la frange gelée en condition stationnaire influence fortement le potentiel de ségrégation dans un environnement soumis à aucune pression de surcharge. La succion de la frange gelée gouverne la capacité à acheminer l'eau du sol non gelée au front de ségrégation. La Figure 1.11 montre la relation où le potentiel de ségrégation (SP_0) diminue avec une pression de succion au front de gel croissante.

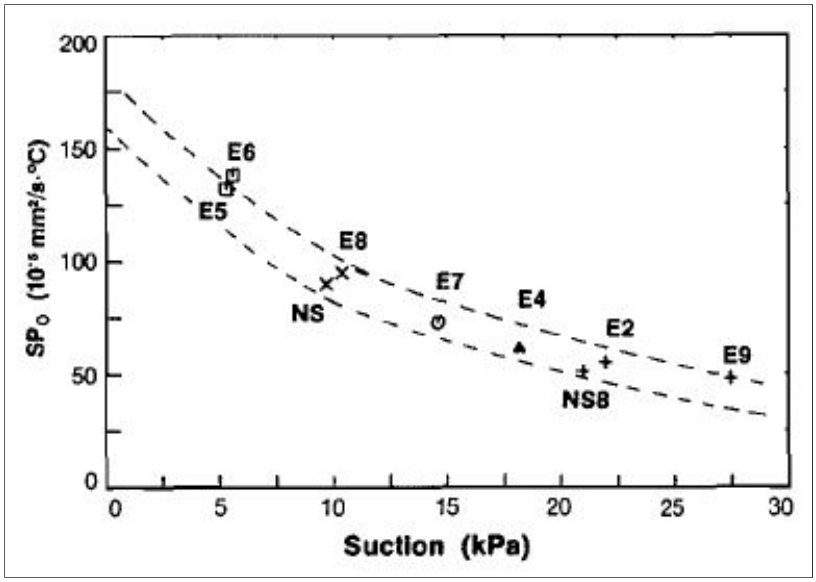


Figure 1.11 Relation entre le potentiel de ségrégation (SP_0) et la succion de la frange gelée
Tirée de Konrad et Morgenstern (1982b)

Le modèle de transfert du flux de chaleur et de masse de Konrad et Morgenstern (1980) (1981) présente deux méthodes pour calculer la succion de la frange gelée d'un sol qui est saturé, incompressible et sans l'application de surcharge. La succion du film d'eau actif de la frange gelée (H_w) varie principalement selon la température du front de ségrégation telle que présentée par les équations 1.6 et 1.7.

$$P_w = \left(\frac{l}{V_w T_0 *}\right) T_s = M T_s \tag{1.6}$$

où P_w est la succion dans le film d'eau (Pa), l est la chaleur latente massique de fusion de l'eau ($J \cdot kg^{-1}$) , V_w est le volume spécifique de l'eau ($m^3 \cdot kg^{-1}$), T_0* est la température de congélation de l'eau pure (K), T_s la température du front de ségrégation (°C) et M une constante.

$$H_w \cong \frac{P_w}{\gamma_w} = \frac{M}{\gamma_w} * T_s \tag{1.7}$$

où H_w est la succion lors de la formation de la dernière lentille de glace (cm d'eau), γ_w est le poids volumique de l'eau. Quant à la succion au front de gel (P_u) elle est davantage influencée par la hauteur du sol non gelé telle que présentée par l'équation 1.8.

$$P_u = \frac{v_o * l_o}{K_u} \tag{1.8}$$

Où P_u est la succion au front de gel (kPa), v_o est la vitesse d'écoulement d'eau à travers la frange gelée lors de la formation de la dernière lentille de glace, l_o est la hauteur du sol non gelé et K_u est la perméabilité du sol non gelé. À noter que dans cette étude, la variation de la succion du film d'eau actif de la frange gelée (H_w) basée selon la température du front de ségrégation (T_{so}) est utilisée à titre comparatif.

1.5.2.2 Le taux de refroidissement de la frange gelée

Konrad et Morgenstern (1982b) affirment que le potentiel de ségrégation est régi par la succion de la frange gelée, mais aussi par son taux de refroidissement. Leurs travaux de recherche ont porté sur la réalisation en laboratoire d'essais répétés de gel sur un même échantillon selon différentes conditions de températures. Les résultats montrent qu'une variation du potentiel de ségrégation est observée selon différents régimes thermiques et ce pour une succion donnée de la frange gelée. L'amplitude d'un régime thermique affecte la distribution des températures dans le sol gelé et non gelé, donc de l'épaisseur de la frange gelée. Dans la mesure où la frange gelée est le système actif du gonflement des sols gélifs, le régime thermique global est représenté selon un taux de refroidissement de la frange gelée tel que présenté à la Figure 1.12 (Konrad et Morgenstern, 1982a; 1982b).

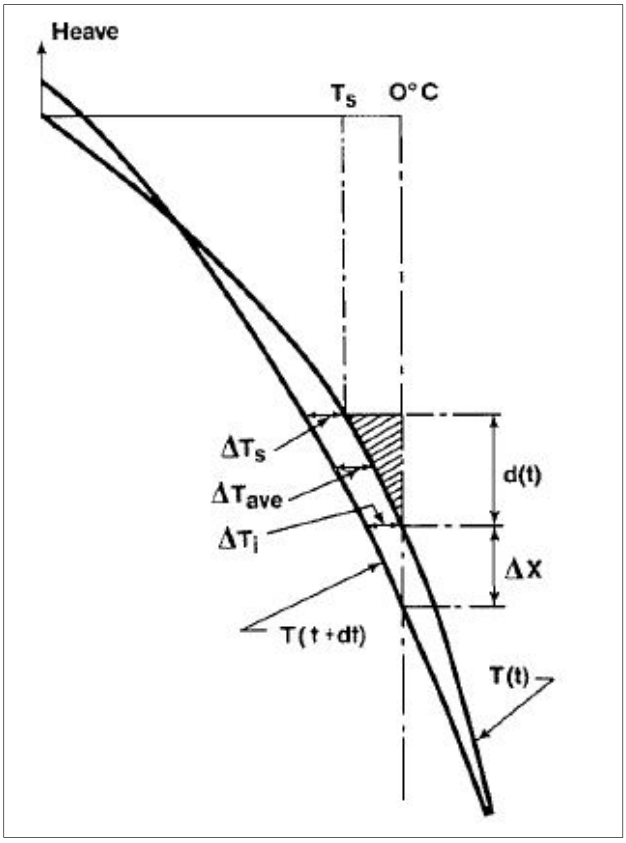


Figure 1.12 Refroidissement de la frange gelée pendant les conditions de gel transitoire
Tirée de Konrad et Morgenstern (1982b)

Le taux de refroidissement de la frange gelée (dT_f/dt) se calcule suivant l'équation 1.9 qui se détaille comme l'évolution du gradient thermique (gradT) en fonction du temps au niveau du front de gel.

$$\frac{dT_f}{dt} = grad\ T(t + dt)d \tag{1.9}$$

Le taux de refroidissement quantifie l'instabilité du flux de chaleur dans la mesure où il est très élevé en début de gel, puis diminue en cours d'essai pour ainsi converger vers zéro. Konrad et Morgenstern (1982b) estiment que la dernière lentille de glace se forme à un taux de refroidissement de 0,01°C/h qui se produit légèrement avant la stabilisation du front de gel. À noter que la détermination du taux de refroidissement de 0,01°C/h est utilisée dans ce projet de recherche pour établir le temps de stabilisation du front de gel, en d'autres termes,

l'installation du régime permanent. L'utilisation du taux de refroidissement de la frange gelée permet l'évaluation du SP_0 indépendamment de l'amplitude du gradient thermique global et ce qu'il soit constant ou variable tel que présenté à l'équation 1.10.

$$SP(t) = v(t)/gradT_f(t) \tag{1.10}$$

1.5.2.3 La pression de surcharge

En condition de gel, l'application d'une surcharge sur un sol entraine : une augmentation des contacts entre les grains ce qui favorise une meilleure conductivité thermique ; une expulsion de l'eau interstitielle diminuant la température du front de ségrégation ; et une réduction de la conductivité hydraulique. La Figure 1.13 illustre l'effet de la surcharge sur le potentiel de ségrégation sans surcharge (SP_0) et la succion au front de gel (Konrad et Morgenstern, 1982a).

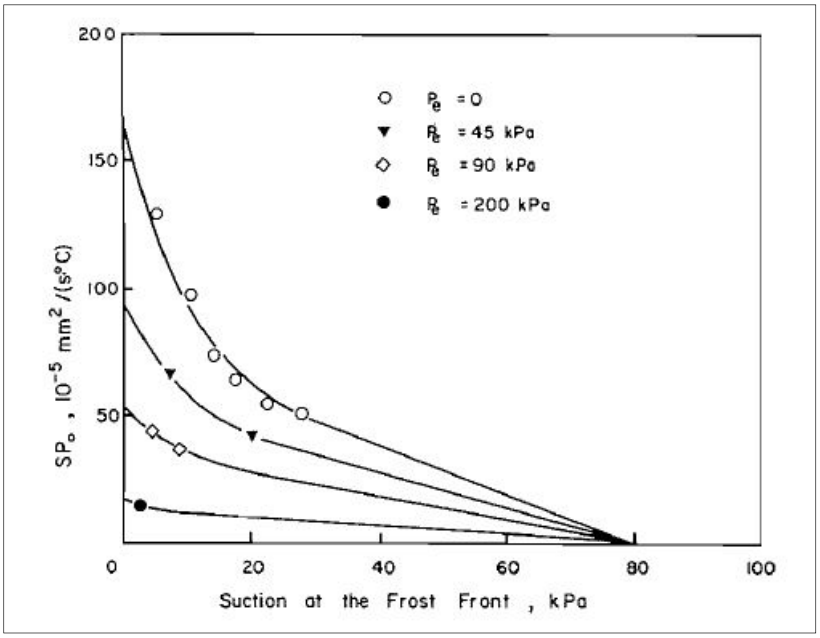


Figure 1.13 Le potentiel de ségrégation et la succion au front de gel selon l'application d'une pression de surcharge
Tirée de Konrad et Morgenstern (1982a)

Le potentiel de ségrégation avec l'application d'une surcharge (SP) peut être estimé à partir de la pression de surcharge appliquée (P_e), le potentiel de ségrégation sous aucun chargement (SP_0) et un coefficient de surcharge (a) lié au type de sol (Konrad, 1999) tel que représenté par les équations 1.11 et 1.12 tirées de St-Laurent (2006).

$$SP = SP_0 e^{-aP_e} \tag{1.11}$$

$$a = 5[d_{50}(FF)]^{0,45} \tag{1.12}$$

où d_{50}(FF) est le diamètre moyen des particules de la fraction fine.

1.5.3 Relation empirique du potentiel de ségrégation

Une relation empirique développée par Konrad (1999) permet l'estimation du potentiel de ségrégation à partir des propriétés géotechniques de base qui sont les plus couramment déterminées en laboratoire. La susceptibilité au gel peut être liée aux propriétés géotechniques de base ayant une influence sur le mouvement de l'eau dans le sol et la nature du contact entre les grains. Une relation empirique est établie entre le potentiel de ségrégation (SP_0) et les propriétés suivantes : la distribution granulométrique de la fraction fine, la minéralogie de la fraction fine, la densité du sol, et la pression de surcharge.

La distribution granulométrique et la teneur en particules fines (pourcentage < 0,075mm) influencent la quantité d'eau capillaire et d'eau absorbée d'un sol. La proportion de particules fines qui remplit les vides du squelette granulaire grossier favorise le maintien d'un réseau d'eau continu à travers le sol. En condition de gel, un réseau d'eau continu contribue à la migration de l'eau à travers la frange gelée et la formation de lentilles de glace. En revanche, une fraction de particules fines qui ne remplit pas l'espace entre les particules grossières favorise un réseau d'eau non gelée discontinu. Ainsi, une porosité élevée soutient la formation de cristaux de glace dans les pores, ce qui diminue la perméabilité du sol. L'équation 1.13 tirée

de Konrad (1999) permet de calculer le pourcentage de la fraction fine requise pour combler l'espace poreux de la fraction grossière ($\%F_v$).

$$\%F_v = \frac{n_c(1-n_F)}{1-n_F n_c}100 \tag{1.13}$$

Où n_c est la porosité de la structure grossière, n_F est la porosité de la fraction fine. La teneur en fines relatives (r_f) permet d'établir le rapport entre le pourcentage de fines nécessaire pour remplir les vides des particules grossières ($\%F_v$) et la teneur en fines réelle (%F) (équation 1.14). Le potentiel de ségrégation est estimé à partir des équations 1.15 ou 1.16 lorsque le rapport r_f est inférieur à une valeur de 1.

$$r_F = \frac{\%F}{\%F_v} \tag{1.14}$$

$$SP = 0 \ \ pour \ \ r_F < 0{,}12 \tag{1.15}$$

$$SP = 1{,}14(r_F - 0{,}12)SP_0(FF) \ \ pour \ \ 0{,}12 < r_F < 1 \tag{1.16}$$

La surface minérale des grains influence le mouvement de l'eau contenue dans les micropores. L'eau contenue dans les micropores réfère au film d'eau adsorbé à la surface des grains, tandis que les macropores soutiennent le canal capillaire. L'épaisseur du film d'eau adsorbée est mis en lien avec la caractéristique de surface spécifique de la fraction fine (S_s(FF)) qui quantifie l'aire de surface des grains. Ainsi, une surface spécifique croissante entraine la diminution de la quantité d'eau dans le canal capillaire. Une réduction de la mobilité de l'eau capillaire atténue le potentiel de ségrégation puisqu'il est la source d'alimentation en eau principale vers les lentilles de glace. Konrad (1999) conseille l'usage de la technique du bleu de méthylène ou celle de l'éthylène glycol pour estimer la surface spécifique puisqu'elles permettent de mesurer les surfaces externes et internes des grains. La surface spécifique de la fraction fine (pourcentage < 0,075mm) peut être déterminée à partir de la méthode normalisée appliquée sur les particules passant 425µm telle que présentée à l'équation 1.17.

$$S_s = S_s(< 425\mu m)\frac{(pourcentage < 425\mu m)}{(pourcentage < 75\mu m)} \quad (1.17)$$

L'indicateur de la densité du sol est estimé à partir de l'indice des vides et de la condition de saturation du sol, sous le rapport (w/w_L). Le rapport (w/w_L) quantifie l'état de consistance du sol par le rapport entre la teneur en eau (w) et à la limite liquide du sol (w_L). L'estimation du potentiel de ségrégation soumis à aucune surcharge est déterminée selon l'équation 1.18. L'usage de l'équation 1.18 requiert deux éléments : un pourcentage de la fraction réelle de fine (%F) qui est supérieur à la quantité de fines nécessaire pour combler l'espace des vides entre les grains grossiers ($\%F_v$); et un rapport de densité (w/w_L) de 0,7±0,1. Dans le cas où le sol naturel comporte un rapport de densité différent de 0,7±0,1, l'application d'une correction est nécessaire selon l'équation 1.19.

$$SP_0S_s = (116 - 75\log(d_{50}(FF)) * 10^3 \ \ (mm^4/\text{℃} * s * g) \quad (1.18)$$

$$SP = SP_0 + 900 * 10^{-5}\log\left(\frac{w}{0{,}7w_L}\right) \ (mm^2/\text{℃} * s) \quad (1.19)$$

Puis, la valeur du potentiel de ségrégation doit être ajustée en fonction du poids des terres et de la surcharge appliquée sur le sol (1.20).

$$SP = SP_0e^{-aP_e} \quad (1.20)$$

Où « a » est un coefficient de sensibilité au gel et P_e est la pression de la surcharge. La méthode indirecte pour l'estimation de la valeur de SP à partir des propriétés géotechniques de base est une méthode économique pour identifier les zones à risque de soulèvement au gel. À noter que cette relation empirique est présentée plus en détail puisqu'elle est utilisée dans ce projet de recherche, afin de vérifier la fiabilité des résultats de SP_0 obtenus avec le montage expérimental fabriqué dans nos laboratoires. En 2005, Konrad a développé une seconde relation empirique pour l'estimation du potentiel de ségrégation afin d'inclure les sols dont la minéralogie de la

fraction fine est non argileuse, ce qui résulte à des valeurs de surface spécifique plus faible et un rapport w/w_L plus grand que 0,7.

1.5.4 Essai en laboratoire pour déterminer le potentiel de ségrégation

La méthode d'essai LC 22-331 (2010) «Détermination du potentiel de ségrégation des sols» est utilisée en laboratoire pour déterminer le potentiel de ségrégation des sols et des matériaux granulaires fins. Cette procédure d'essai est basée sur le concept du potentiel de ségrégation élaboré par Konrad et Morgenstern (1980). L'essai consiste à faire geler du sommet vers la base un échantillon de sol saturé de manière à produire un soulèvement. Les conditions thermiques aux bornes de l'échantillon visent à simuler les conditions de congélation d'un sol d'infrastructure (Doré et Zubeck, 2009). Une illustration schématique de la cellule de gel est présentée à la Figure 1.14.

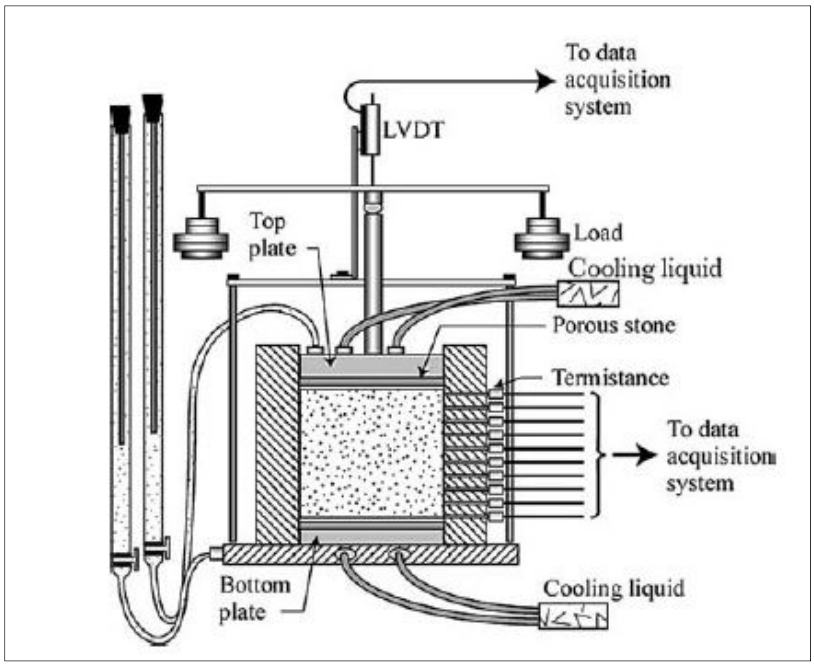


Figure 1.14 Montage de l'essai de potentiel de ségrégation
Tirée de Doré et Zubeck (2009)

Selon le type de sol et son application, l'échantillon est compacté dans la cellule de gel selon la procédure d'essai Proctor Standard ASTM D698 (ASTM, 2012), Proctor modifié ASTM

D1557 (ASTM, 2015) ou à l'aide d'un pilon (Doré et Zubeck, 2009). Une pratique plus courante pour évaluer les caractéristiques de gel d'un site naturel est de réaliser un essai de potentiel de ségrégation sur un échantillon de sol intact. L'éprouvette de sol possède un diamètre de 100mm et une hauteur de 120 à 130mm. La cellule contenant l'échantillon est placée dans une enceinte réfrigérée programmée pour maintenir une température de +1,0°C. La température de l'échantillon est abaissée à celle de l'enceinte. Ensuite, Un gradient thermique allant de -4,0°C au plateau supérieur et de +1,0°C au plateau inférieur est appliqué sur le sol. Une source d'eau est maintenue à un niveau constant à la base de l'échantillon. Pendant le gel, la pénétration de l'isotherme 0°C dans l'échantillon de sol est enregistrée par des sondes thermiques installées au travers de la paroi de la cellule. Un capteur de déplacement fixé au plateau supérieur permet le suivi des mouvements du sol. L'essai est terminé une fois que l'ensemble des températures enregistrées est stable.

Les calculs et expressions des résultats de l'essai SP_0 regroupent les équations 1.21 à 1.24. À la fin de l'essai, les données enregistrées sont : l'évolution de la température pour différentes profondeurs dans l'échantillon en fonction du temps ; et la déformation axiale de l'échantillon en fonction du temps. Le moment « T_p » est déterminé pour établir le passage du régime thermique transitoire au régime thermique permanent où le SP_0 est calculé. Ce moment est associé à la stabilisation du front de gel estimé à un taux de refroidissement de la frange gelée de 0,01°C/h.

$$\Phi = \frac{T_2 - T_1}{P_2 - P_1} \tag{1.21}$$

Le gradient thermique (ϕ ou gradT) est évalué à partir du profil des températures à travers l'échantillon au moment « T_p » où T_2 et T_1 sont les températures aux frontières de la frange gelée (°C) et P_1 et P_2 sont les profondeurs dans l'échantillon des températures T_2 et T_1 (mm).

$$T_{soul} = \frac{S_1 - S_2}{H_1 - H_2} \tag{1.22}$$

Le taux de soulèvement (T_{soul}) est équivalent à la pente de la courbe de soulèvement en fonction du temps au moment « T_p » où S_1 et S_2 sont les soulèvements (mm) et H_1 et H_2 sont les temps cumulés (heure) associés aux soulèvements S_1 et S_2.

$$\mathrm{v} = \frac{T_{soul}}{1{,}09} \tag{1.23}$$

La vitesse d'écoulement de l'eau interstitielle vers le front de gel (v) est déduite à partir du taux de soulèvement et de l'augmentation volumique de l'eau de 9,0 % lorsqu'elle gèle.

$$SP_0 = \frac{\mathrm{v}}{\Phi} \tag{1.24}$$

Le potentiel de ségrégation (mm^2/°C*heure) est exprimé selon le rapport entre la vitesse d'écoulement de l'eau vers le front de gel (mm/h) et le gradient thermique de la frange gelée (°C/mm).

1.5.5 Détermination du potentiel de ségrégation (SP) sur le terrain

Le potentiel de ségrégation (SP) peut être déterminé directement sur le terrain (Ministère des Transports, 2002). L'observation in situ du comportement au gel d'une chaussée existante ou de sols naturels saturés nécessite la mise en place de thermistances ou de tubes de gel et de repères de soulèvement. Le gradient de température est calculé aux environs de l'isotherme 0°C (Konrad, 2001). Le taux de soulèvement est mesuré à l'aide d'une station totale installée sur le site. Le potentiel de ségrégation, déterminé à partir de données provenant d'un site instrumenté, est calculé selon l'équation 1.25.

$$SP_{terrain} = \frac{(dhs/dt)}{gradT * 1{,}09} \tag{1.25}$$

Où dhs/dt est la vitesse de soulèvement de la surface de la chaussée et gradT le gradient thermique.

1.5.6 Le potentiel de ségrégation (SP) applicable pour les chaussées bitumineuses

L'action du gel sur les chaussées souples est responsable du soulèvement différentiel de la surface dans l'axe longitudinal et/ou transversal, pouvant causer la fissuration du revêtement. En période de dégel, l'excès d'eau accumulé dans le corps de chaussée entraine une variation saisonnière de la capacité portante. L'observation de ces dégradations liées à l'action du gel requiert trois facteurs essentiels soit : la présence de températures sous le point de congélation, une nappe phréatique à proximité et un sol gélif.

En période de gel, un front de gel pénètre à travers le corps de la chaussée pour atteindre le sol d'infrastructure susceptible au gel où se développent progressivement des lentilles de glace. Ce scénario suppose que les matériaux granulaires des couches de fondation et de sous-fondation ne sont pas sensibles au gel compte tenu de leur faible teneur en particules fines. À cet égard, le mouvement de la surface de la chaussée dépend principalement de la sensibilité au gel du sol d'infrastructure qui peut se diviser en trois zones selon le niveau de la nappe phréatique et la classe de sol tel qu'illustré à la Figure 1.15 (Konrad et Roy, 2000).

Selon la Figure 1.15, la zone 3 est une couche de sol saturé positionnée sous le niveau de la nappe phréatique. La valeur du SP peut être déterminée selon trois méthodes : un essai en laboratoire sur un échantillon intact, une estimation empirique du SP basée sur les propriétés géotechniques de base du type de sol en place, ou un suivi in situ du site en période hivernale. À cette profondeur, la valeur du SP doit tenir compte de la pression de surcharge moyenne.

La zone 2 est la couche de sol positionnée à l'interface de la nappe phréatique. Cette couche de sol est saturée par l'action de la capillarité, un phénomène que l'on retrouve dans les sols à grains fins. La succion par capillarité (u) se calcule selon l'équation 1.26.

$$u = -h\rho_w \mathrm{g} \tag{1.26}$$

Où h est la distance entre le front de gel et le niveau de la nappe phréatique, ρ_w la densité de l'eau et g le coefficient d'accélération gravitationnelle. La valeur du SP a tendance à diminuer avec une succion par capillarité croissante. Par conséquent, les sols dont la hauteur de succion capillaire est supérieure à 1,0 mètre nécessitent l'application d'une correction à la valeur du SP présentée à l'équation 1.27, où b est une constante du sol. La valeur du SP est déterminée suivant la procédure d'évaluation de la sensibilité au gel de la zone 3 lorsque la hauteur de succion capillaire est inférieure à 1,0 mètre.

$$SP_{Field} = SP_{lab} + b \log(\frac{u_{Field}}{u_{lab}}) \tag{1.27}$$

La zone 1 est la couche de sol où la remontée capillaire est plutôt faible étant donné la distance qui la sépare du niveau de la nappe phréatique. Selon Konrad et Roy (2000), la valeur du SP pour cette zone est estimée négligeable pour un sol dont le degré de saturation est inférieur à 70 %.

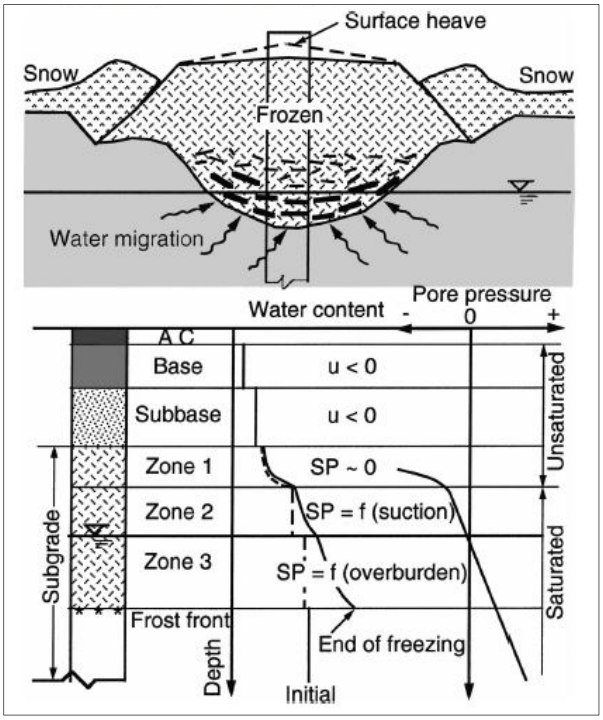


Figure 1.15 Condition de gel dans une structure de chaussée souple
Tirée de Konrad et Roy (2000)

Le Tableau 1.8 présente l'échelle de gélivité pour catégoriser le niveau de sévérité du potentiel de ségrégation et de l'indice de soulèvement au gel, tiré du Guide de l'utilisateur du logiciel CHAUSSÉE 2. L'approche de conception des chaussées souples vis-à-vis le gel du MTMDET est présentée plus en détail à l'Annexe II. À noter, cette échelle de gélivité est employée dans ce présent projet pour déterminer le niveau de sévérité du potentiel de ségrégation.

Tableau 1.8 Échelle de gélivité
Tiré de St-Laurent (2007)

Gélivité	SP			CRREL, 1981	indice de soulèvement
	$mm^2/°C \cdot heure$	$mm^2/°C \cdot jours$	$(x10^{-5})mm^2/°Csec$	mm/jour	$\Delta h / h_{gel}$
Négligeable	< 0,5	< 12	< 14	< 0,5	< 0,01
Faible	0,5 à 1,5	12 à 35	14 à 40	0,5 à 2	0,01 à 0,04
Moyenne	1,5 à 3	35 à 75	40 à 87	2 à 4	0,04 à 0,08
Élevée	3 à 8	75 à 200	87 à 230	4 à 8	0,08 à 0,20
Très élevée	> 8	> 200	> 230	> 8	> 0,2

1.5.6.1 La susceptibilité au gel des matériaux de fondation

La susceptibilité au gel des matériaux granulaires de la couche de fondation et de sous-fondation est estimée nulle puisqu'ils possèdent une faible teneur en fines et un degré de saturation inférieur à 60 % lors de la mise en place. Le MTMDET exige pour les matériaux de fondation de respecter un fuseau granulométrique dont la fraction fine ne doit pas excéder 7 %, afin de prévenir le soulèvement au gel et minimiser l'affaiblissement de la structure de chaussée en période de dégel. (BNQ 2560-114) (BNQ 2002).

En raison des systèmes de drainage, de la grande conductivité hydraulique et des conditions initiales de compactage des matériaux granulaires des couches structurales, on estime ainsi être protégé des effets du gel. Cependant, des soulèvements importants ont déjà été observés au début de la période hivernale, lorsque le front de gel est positionné au niveau de la couche de fondation (Evans et al., 2002). Le corps de la chaussée est un système ouvert pouvant être en contact avec des sources d'approvisionnement en eau qui entrainent des degrés de saturation différentiels. Les sources d'infiltrations d'eau dans le corps de chaussée proviennent de la surface où l'eau pluviale est interceptée par la fissuration du revêtement, par l'effet de capillarité ou encore par un écoulement d'eau subhorizontal émanant des accotements

(Bilodeau, Doré et Pierre, 2008). Guthrie et Hermansson (2003) ont effectué des essais de potentiel de ségrégation en système fermé qui montrent qu'à différents degrés de saturation, l'eau interstitielle retenue par le corps granulaire est une source suffisante d'approvisionnement en eau au front de gel pour former des lentilles de glace.

D'après Konrad (2008) et Bilodeau, Dore et Pierre (2008), les spécifications courantes basées uniquement sur la teneur en fines et la distribution granulométrique ne sont pas adéquates pour évaluer le niveau de sévérité relatif au gel. En laboratoire, des essais de gel ont été réalisés sur plusieurs sources granulaires utilisées pour des applications en génie civil à différents degrés de saturation. Konrad (2008) a déterminé la susceptibilité au gel de la fraction fine et Bilodeau, Doré et Pierre (2008) sur la portion passant le tamis de 5mm. Konrad (2008) établit que le matériau de fondation est classé susceptible au gel, s'il produit un soulèvement supérieur à 1 %, souvent accompagné d'une augmentation de la teneur en eau au niveau du front de gel par rapport à l'état initial.

La sensibilité au gel des matériaux de fondation est influencée par la présence d'eau qui entraine un gain de volume et une augmentation de la teneur en eau qui peut être observée. Konrad (2008) montre que le SP_0 augmente de manière significative en fonction du degré de saturation initial de l'échantillon. L'amplitude du soulèvement est plus élevée lorsque le degré de saturation initial est supérieur à 60 %. Cependant, lorsque le degré de saturation initial est inférieur à 60 %, l'augmentation de la teneur en eau additionnelle influe davantage sur la sensibilité au gel.

La sensibilité au gel des matériaux granulaires est fortement liée à la distribution granulométrique, la quantité et la minéralogie des particules fines (Bilodeau, Dore et Pierre, 2008 ; Konrad, 2008 ; Konrad et Lemieux, 2005 ; Janoo, 2002). La gradation et la quantité de particules fines sont représentées par la valeur de la porosité de la fraction fine (n_f) qui quantifie la dispersion et la compaction des fines à l'intérieur des vides du squelette granulaire de la fraction grossière (équation 1.31) (Bilodeau, Doré et Pierre, 2008).

$$n_f = \frac{n_c - \%F}{n_c(1 - \%F)} \tag{1.28}$$

Où n_c est la porosité de la fraction grossière, ρ_d la masse volumique sèche et ρ_s la masse volumique des grains solides. La relation entre la porosité de la fraction fine et le potentiel de ségrégation pour différentes sources de granulat est présentée à la Figure 1.16. Une valeur plus faible de la porosité de la fraction fine favorise le maintien de la tortuosité des canaux capillaires. Un potentiel capillaire plus élevé influence grandement la capacité du matériau à conduire l'eau vers le front de gel. À cet égard, Konrad et Lemieux (2005) ont aussi observé une augmentation de la susceptibilité au gel des matériaux de fondation en fonction de la teneur en fines croissante où les vides de la fraction grossière sont estimés être remplis lorsque la teneur en fines est supérieure à 15 ou 20 %.

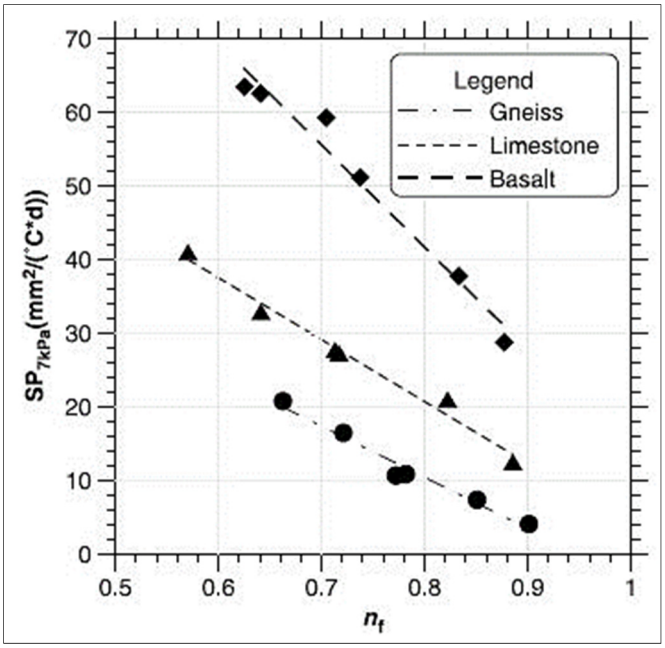


Figure 1.16 Relation entre le potentiel de ségrégation (SP) et
la porosité de la fraction fine (n_f)
Tirée de Bilodeau, Doré et Pierre (2008)

La variation de la sensibilité au gel selon la source des agrégats est le mieux exprimée par deux paramètres liés à la conductivité hydraulique : la surface spécifique de la fraction de fines (S_sF)

et le coefficient d'uniformité de la fraction de fines (C_uF). La minéralogie de la fraction fine influence principalement la quantité d'eau adsorbée à la surface des grains, qui par occasion renvoi sur l'épaisseur des canaux capillaires non gelés. Pour les matériaux granulaires dont la surface spécifique des fines est relativement faible, on observe une hausse de la sensibilité au gel avec une augmentation de la surface spécifique et du coefficient d'uniformité des fines (Bilodeau, Doré et Pierre, 2008). La minéralogie et la gradation des particules fines contribuent fortement à la sensibilité au gel des matériaux possédant une faible teneur en fines. Cependant, la tendance s'inverse lorsque la teneur en fines augmente puisque les caractéristiques minéralogiques des particules fines diminuent la conductivité hydraulique.

1.6 Techniques de mitigation au gel

La stratégie de conception alternative est une approche de mitigation qui vise à contrôler, voir neutraliser les facteurs responsables des mécanismes du gel tels que des températures de congélation, une source d'eau à proximité ou encore un sol susceptible au gel. L'intérêt de cette approche est que la plupart des techniques réduisent le soulèvement différentiel et la perte de capacité portante. Les techniques de mitigation au gel sont utilisées lorsque les stratégies de dimensionnement ne satisfont pas les critères géométriques ou de performances requises. Il existe une vaste gamme de mesures pour atténuer les effets du gel.

1.6.1 Surépaississement de la couche de sous-fondation

Le surépaississement de la couche de sous-fondation est la technique la plus couramment utilisée pour réduire ou neutraliser les effets du gel. Cette technique consiste à épaissir la couche granulaire placée entre le sol d'infrastructure et la couche de fondation, afin de protéger le sol support en l'éloignant du front de pénétration du gel. Cette couche est, dans la plupart des cas, constituée d'un matériau granulaire appelé MG-112. C'est le matériau le plus économique de la structure de chaussée, il possède un fuseau granulaire très peu restrictif. D'autres fonctions sont attribuables à cette couche comme : de dissiper les charges transmises; d'atténuer les mouvements différentiels du sol support; et de drainer l'eau excédante (Doré, 1997).

En général, l'épaisseur des couches de la structure est déterminée selon la sollicitation du trafic. Pour contrer les effets du gel, l'épaisseur totale de la chaussée est adaptée par l'ajustement de l'épaisseur de la couche de sous-fondation. Cette technique peut être jumelée avec l'excavation des sols naturels gélifs où le surépaississement est dirigé par le bas, afin de ne pas surélever le niveau de la chaussée (Doré, 1997). Cette approche de mitigation au gel est délaissée lors de la rencontre de contraintes relatives à l'épaisseur de la structure de chaussée et/ou la présence de sols naturels classés très susceptibles au gel. La rencontre de sol très sensible au gel requiert une prise de mesure protectrice accrue afin de diminuer le risque de dégradation prématurée de la chaussée due au gel.

1.6.2 Barrière thermique

Le recours à une isolation thermique permet de protéger le sol d'infrastructure en limitant la pénétration du gel. Le polystyrène extrudé est l'isolant thermique le plus couramment utilisé comme barrière thermique dans les chaussées du Québec. Cependant, la mise en place d'un isolant modifie le régime thermique à l'intérieur de la structure de chaussée et occasionne un refroidissement plus prononcé des couches sus-jacentes à la couche isolante. Ce refroidissement peut même provoquer la formation de givre à la surface de la chaussée (Côté, 2001) (Gustafson, 1981). Pour contrer la formation de givre, le MTMDET (2017) exige un recouvrement granulaire au-dessus de l'isolant thermique d'une épaisseur minimum de 450 mm jusqu'à 600 mm pour les régions dont l'indice de gel avoisine les 1700°C.

Plusieurs chercheurs ont étudié la possibilité d'utiliser des matériaux recyclés possédant une conductivité thermique faible et présentant des propriétés isolantes (Humphrey et Blumenthal, 2010; Oiseth, Aaboe et Hoff, 2007; Segui et al., 2016). Le Tableau 1.9 présente les paramètres des sections de chaussée instrumentées incorporant une barrière thermique composée de matériaux recyclés.

Tableau 1.9 Paramètres des sections tests de chaussées instrumentées incorporant une barrière thermique composée de matériaux recyclés

Référence	Matériau isolant	% Recyclé	Diamètre maximal des particules (mm)	Conductivité thermique (W/mK)	Masse volumique (kg/m3)	Épaisseur (mm)	Recouvre-ment granulaire (mm)
Humphrey (2011)	Pneu déchiqueté	100%	76,2	0,24	720	152 / 304	432 / 635
		33% 65%		-	-	304	635
Edgar et al. (2015)	Polymère expansé	-	Injection de mousse	0,03	-	25 / 75	450
Oiseth et al. (2006)	Agrégat argile légère	100%	32	0,18	280	150	430
	Verre cellulaire	100%	60	0,16	180-250	150	430
	Polystyrène expansé	0%	Panneaux	0,04	50	30	550
Segui, Doré et al. (2016)	Verre cellulaire	100%	20 - 60	0,06 -0,09	300	150	325
	Polystyrène expansé	0%	Panneaux	0,03-0,04	-	50	425

Oiseth, Aaboe et Hoff (2007) ont mis en place des sections de chaussée instrumentées intégrant chacunes des agrégats d'argile légère, d'agrégats de verre cellulaire ou de panneaux de polystyrène. Ils ont observé que le polystyrène et le verre cellulaire ont mieux performé vis-à-vis la pénétration du front de gel que le granulat d'argile légère. Toutefois, pour l'obtention de performances similaires, l'épaisseur de la barrière thermique est beaucoup plus importante pour les matériaux recyclés que pour les panneaux de polystyrène. Pour sa part, Segui et al. (2016) ont constaté la formation de givre à la surface de ces deux sections instrumentées incorporant le verre cellulaire et le polystyrène. L'apparition de givre peut être contrôlée par l'augmentation de l'épaisseur du recouvrement granulaire superposé à la couche isolante (Gustafson, 1981). Par ailleurs, Humphrey et Blumenthal (2010) et Kang et al. (2013) constatent que la combinaison de matériaux recyclés avec des granulats naturels a tendance à

réduire la performance de la barrière thermique comparativement avec l'utilisation d'une couche unique de matériaux isolants.

En somme, l'incorporation d'une barrière thermique réduit le soulèvement différentiel et la profondeur de pénétration du gel par rapport à la section de référence. L'emploi de panneaux de polystyrène a mieux performé pour protéger la structure de chaussée que les matériaux recyclés, et ce pour une épaisseur de 30-50mm en concurrence de 150 mm pour les matériaux recyclés. À noter que les conditions climatiques et de terrain varient pour chacun des bancs d'essai et c'est pour cette raison qu'ils sont présentés de façon indépendante.

1.6.3 Barrière capillaire

La mise en place d'une barrière capillaire à l'interface de la couche de sous-fondation de la structure de chaussée et du sol d'infrastructure est une technique employée pour la mitigation des effets du gel. Une barrière capillaire est une couche de matériau non gélif qui possède une distribution granulométrique uniforme afin de maximiser l'ouverture des pores du système. La barrière capillaire a deux fonctions : (i) intercepter l'écoulement de l'eau interstitielle ascendant du sol; et (ii) drainer l'eau excédante à l'extérieur de la structure de chaussée. La barrière capillaire est utilisée dans les structures de chaussée pour prévenir le soulèvement différentiel et la perte de capacité portante en coupant l'alimentation en eau au front de gel et en agissant comme système de drainage en période de dégel.

Les deux phénomènes qui contribuent à l'ascension de l'eau souterraine vers la surface sont la succion de l'eau au front de gel et l'ascension par capillarité. Le comportement des sols naturels pendant la saison hivernale est illustré par le concept du potentiel de ségrégation, où la succion au front de gel peut générer une accumulation de quantité d'eau importante à ce niveau. L'ascension de l'eau par capillarité se produit principalement dans les sols fins où des forces d'adhésion entre les grains et l'eau poussent l'eau à remonter et à pénétrer dans les couches de sols superposées (Dysli, 1991b; Holtz et Kovacs, 1991).

Selon Rengmark (1963) et Henry (1996), la conception d'une barrière capillaire doit suivre les lignes directrices suivantes :

- l'épaisseur de la barrière capillaire doit excéder la hauteur d'ascension capillaire du matériau dont elle est composée ;
- la barrière capillaire doit être placée au-dessus du niveau de la nappe phréatique et au-dessous de la profondeur de pénétration du front de gel ;
- un système de drainage doit être mis en place pour évacuer l'eau récupérée ou pour abaisser le niveau de la nappe phréatique ;
- la barrière capillaire doit être protégée à l'aide de filtres pour éviter la contamination par les particules fines.

Plusieurs matériaux ont été mis à l'essai pour tester le potentiel des barrières capillaires, afin de mitiger les effets du gel dans un milieu poreux comme le géotextile et le géocomposite (Henry et Holtz; 2001)

1.6.3.1 Barrière capillaire de géosynthétique

Henry et Holtz (2001) ont étudié le potentiel des barrières capillaires de géotextile et de géocomposite pour réduire le soulèvement au gel. En laboratoire, la sensibilité au gel est déterminée suivant la procédure d'essai ASTM D5918-96. Le sol gélif de référence (Sol A) utilisé est classifié ML et comporte un degré de sensibilité au gel très élevé. La sensibilité au gel des spécimens est déterminée pour des régimes thermiques de 30 et 55 W/m^2, soit de niveau faible et élevé. L'efficacité de la barrière capillaire est influencée par les conditions thermiques. Ils estiment que l'usage d'un géosynthétique pour mitiger le soulèvement au gel est plus efficace lorsque le flux de chaleur est bas. En laboratoire, les indices de performance de réduction du phénomène de gélivité se présentent sous deux formes : la diminution du taux de soulèvement, et une teneur en eau plus élevée à la base de l'échantillon.

Les géotextiles utilisés comme barrière capillaire sont des tissus de fibres de polypropylène à poinçon aiguilleté dont l'ouverture des pores varie entre 0,15 et 0,18mm. La description des échantillons comportant un disque de géotextile est présentée au Tableau 1.10. À l'étape de la

saturation, l'eau ascendante ne traverse pas la couche de sol superposée à la barrière capillaire pour certains échantillons comportant un disque de géotextile (4-1, 4-2 et 5-2).

Tableau 1.10 Description des échantillons comportant un géotextile et les conditions thermiques
Adapté de Henry et Holtz (2001)

No. Essai	**Géotextile**	**Géotextile**			**Masse vol. sèche sol A (Mg/m^3)**	**Saturation du sol A**	**Température des bains (°C)**	
		Fibres de polypropylène	**AOS (mm)**	**Masse vol. (g/m^2)**			**Haut**	**Bas**
4-1	A10	Discontinues	0,15	339	1,98	Inférieure	-1,4	0,7
4-2	A10	Discontinues	0,15	339	1,95	Inférieure		
4-3	Aucun	N/A	N/A	N/A	1,98	Complet		
4-4	Aucun	N/A	N/A	N/A	1,95	Complet		
5-1	A16	Discontinues	0,15	543	1,96	Complet	-1,4	1,0
5-2	A10	Discontinues	0,15	543	1,95	Inférieure		
5-3	ST750	Continue	0,18	340	1,93	Complet		
5-4	Aucun	N/A	N/A	N/A	1,95	Complet		

Les résultats de la série d'essais de congélation des spécimens 4 et 5 sont présentés par les Figure 1.17, 1.18 et 1.19 qui exposent le soulèvement au gel, la pénétration du front de gel et le profil de teneur en eau à la fin de l'essai. Les indices de performance des barrières capillaires se présentent sous deux formes; la diminution du taux de soulèvement (Figure 1.17) et une teneur en eau plus élevée à la base de l'échantillon (Figure 1.18Figure 1.19). Une diminution du taux de soulèvement au gel est observée pour les échantillons 4-1, 4-2 et 5-2. Henry et Holtz (2001) ont relevé qu'à l'étape de la saturation si l'eau pénètre dans la couche superposée à la barrière capillaire, celle-ci échoue à réduire le soulèvement au gel. L'hypothèse émise suggère que le géotextile humide absorbe et transmet plus facilement l'eau qu'à l'état sec. Les échantillons avec les géotextiles qui ont réduit le soulèvement au gel présentent un profil de teneur en eau croissant avec la profondeur. Les échantillons témoins et ceux avec un géotextile qui n'a pas réduit le soulèvement au gel présentent une teneur en eau plus élevée dans la partie supérieure de l'échantillon.

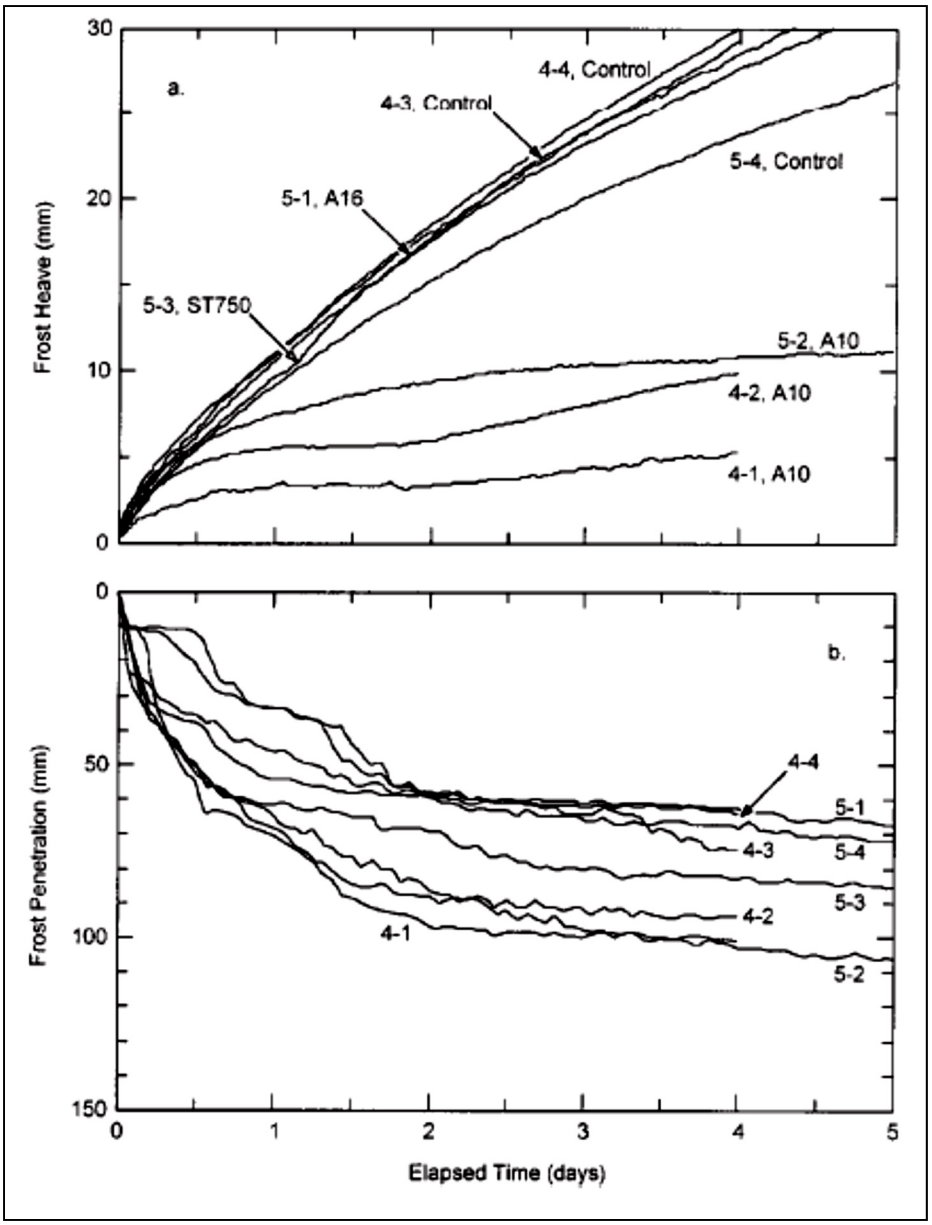


Figure 1.17 (a) Soulèvement au gel (b) Pénétration du front de gel dans les échantillons avec un disque de géotextile
Tirée de Henry et Holtz (2001)

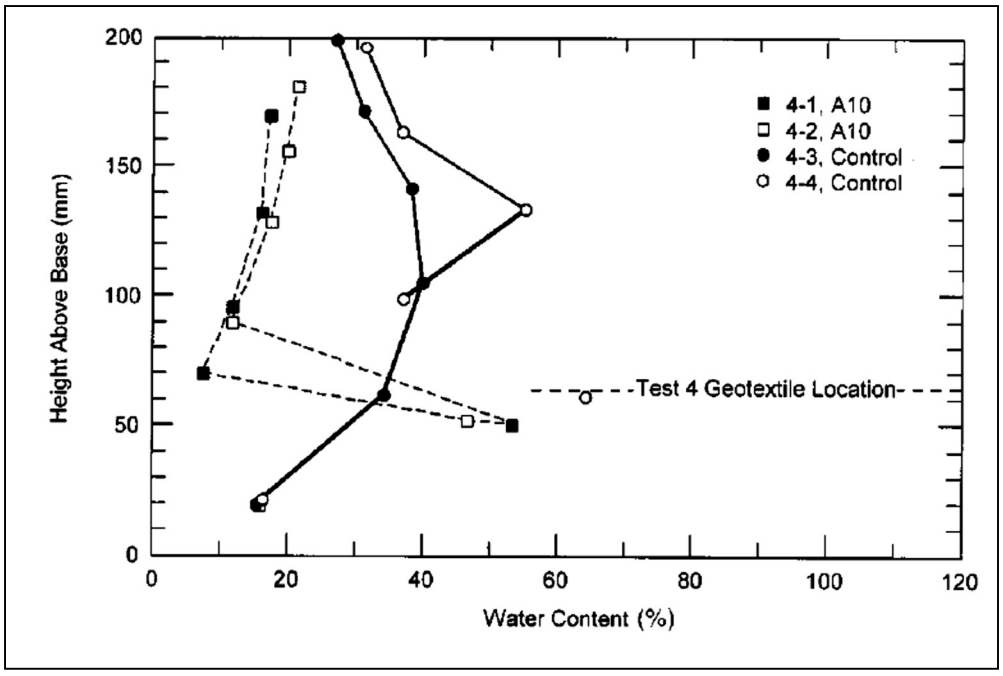


Figure 1.18 Profils de teneur en eau de la série d'essais 4 avec géotextile
Tirée de Henry et Holtz (2001)

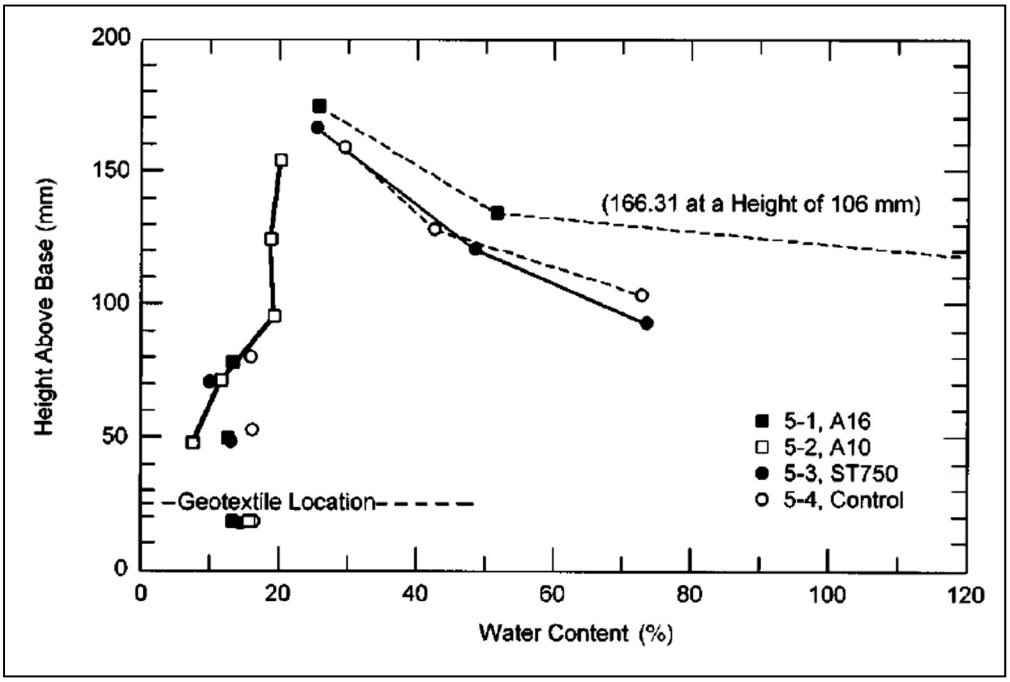


Figure 1.19 Profils de teneur en eau de la série d'essais 5 avec géotextile
Tirée de Henry et Holtz (2001)

La barrière capillaire de géocomposite utilisée est constituée d'un géonet A-10 placé entre deux géotextiles. La description des échantillons de la série 7 comportant un disque de géocomposite est présentée au Tableau 1.11. À l'étape de la saturation, l'eau ne traverse pas le niveau de la barrière capillaire pour l'échantillon 7-2 et le sol de référence 7-3.

Tableau 1.11 Description des échantillons comportant un géocomposite et les conditions thermiques
Adapté de Henry et Holtz (2001)

No. Essai	Géotextile	Géonet				Masse vol. sèche sol A (Mg/m3)	Saturation du sol A	Température des bains (°C)	
		Type	Épais (mm)	Ouverture (mm)				Haut	Bas
				Large	Petite				
7-1	A-10	TN	6,4	15,3	7,2	2,07	Complet	-1,4	1,7
7-2	A-10	TN				2,01	Inférieure		
7-3	Aucun	N/A	N/A	N/A	N/A	1,95	Inférieure		
7-4						1,98	Complet		

Les résultats d'essais de congélation avec le disque de géocomposite présentent un comportement semblable au géotextile où seulement les échantillons partiellement saturés réduisent le soulèvement au gel. Dans le cas de l'échantillon 7-2 aucun soulèvement n'a été enregistré en cours de gel tel que présenté à la Figure 1.20.

La barrière capillaire de géocomposite a mieux performé que le géotextile. À noter, à l'étape de saturation lorsque l'eau traverse la barrière capillaire, le sol est à un degré de saturation de 80% et plus, tandis que s'il est saturé partiellement, le degré de saturation est de 75% et moins. La succion en cours de gel est estimée à partir du degré de saturation suivant la relation tirée de Gadner (1958). L'évaluation de la succion du sol A pour un degré de saturation de 80% et 75% équivaut à une succion de 800 et 1800mm. La succion exercée dans la couche de sol qui recouvre la barrière capillaire de géocomposite doit être au minimum de 1800mm pour que le géocomposite réduise de manière significative le soulèvement au gel.

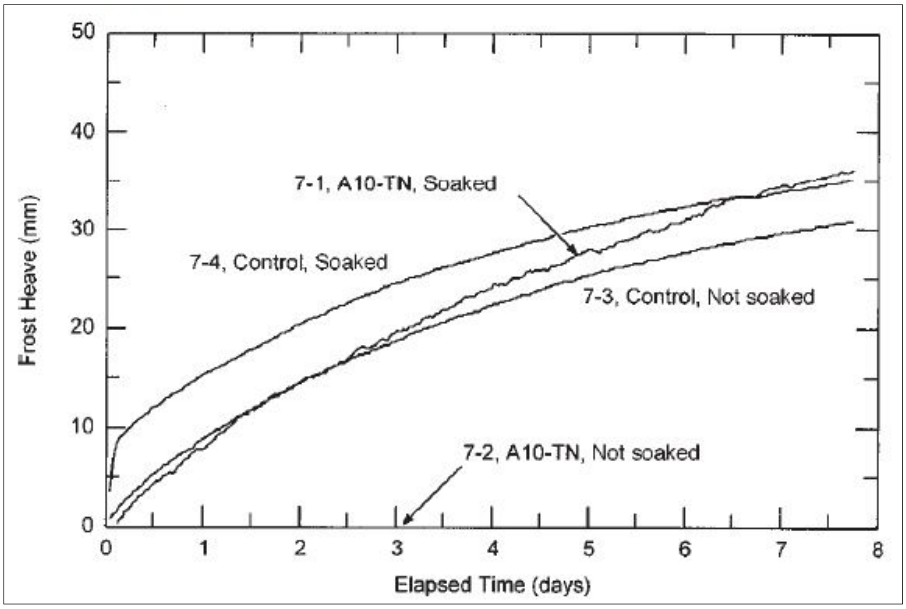


Figure 1.20 Soulèvement au gel des échantillons de la série d'essais 7 comportant un géocomposite
Tirée de Henry et Holtz (2001)

1.7 Synthèse de la revue de la littérature

Cette revue de la littérature a permis de faire le point sur les mécanismes de formation de lentilles de glace dans le but de mieux comprendre le processus de gel dans les milieux poreux, ainsi que les paramètres influençant ce phénomène. L'utilisation du paramètre d'ingénierie du potentiel de ségrégation permet d'incorporer ces principes théoriques dans la caractérisation au gel des matériaux granulaires et des sols.

La construction routière dans les régions nordiques nécessite la prise en considération de l'action du gel à l'étape de conception. L'action du gel peut entrainer plusieurs types de dégradations pouvant affecter chacune des couches composant une structure de chaussée. Le phénomène de soulèvement au gel du corps granulaire de chaussée et du sol d'infrastructure est étudié plus en profondeur. Les mouvements de la structure d'une forte amplitude produits par le cycle de gel-dégel peuvent entrainer la dégradation de l'uni et la perte de capacité portante de la structure. Des mesures de protection au gel doivent être appliquées pour assurer la stabilité et la pérennité de l'ouvrage. Des techniques de mitigation au gel sont présentées

telles que l'isolation thermique et la barrière capillaire. Des matériaux recyclés comportant des propriétés isolantes ont déjà été utilisés comme système de protection au gel pour les chaussées. La substitution du granulat naturel par un granulat de VPC dans une structure de chaussée a été étudiée par plusieurs chercheurs. C'est une avenue de valorisation du VPC comme système de protection au gel des chaussées mettant à profit les propriétés mécaniques et thermiques avantageuses que présente le VPC.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre traite des objectifs et de la méthodologie de recherche de l'étude comparative du comportement au gel du granulat de verre et de pierre calcaire pour des applications en génie routier localisées dans les régions nordiques.

2.1 Objectifs

L'objectif principal de ce projet de recherche est de mesurer et de comparer le comportement du granulat de VPC et de la pierre calcaire comme matériau granulaire de chaussée soumis au gel. L'objectif principal se décline en trois sous-objectifs :

1) l'évaluation de la sensibilité au gel du granulat de VPC et de pierre calcaire comme matériau pour la couche de fondation et sous-fondation selon différentes distributions granulométriques ;
2) la détermination de la performance du granulat de VPC et de pierre calcaire en tant que barrière thermique vis-à-vis la limitation de la pénétration du gel ;
3) la détermination du potentiel du granulat de VPC et de pierre calcaire en tant que barrière capillaire, afin de limiter la formation de lentilles de glace dans le sol gélif.

Les essais de gel comparatifs entre le granulat de VPC et le granulat de pierre calcaire permettent d'évaluer les performances au gel de chacun des matériaux afin de justifier l'usage d'une matière résiduelle dans des travaux en génie routier.

2.2 Méthodologie

L'évaluation du degré de gélivité des matériaux granulaires à l'étude est effectuée selon le concept du potentiel de ségrégation (SP_0) élaboré par Konrad et Morgenstern (1980). Ce concept est employé pour ce projet de recherche, car le SP_0 est un paramètre de conception en structure de chaussée exigé par le MTMDET. Celui-ci permet l'estimation du risque de soulèvement au gel. La méthode d'essai, LC 22-331 *«Détermination du potentiel de*

ségrégation des sols», est principalement utilisée pour caractériser le comportement au gel des sols naturels et des matériaux granulaires employés en conception de chaussées. De plus, cette procédure d'essai permet de quantifier la vitesse d'écoulement de l'eau vers la frange gelée, le gradient thermique et le taux de soulèvement au gel. Au Québec, la théorie couplée des transferts de masse et de chaleur, développée au début des années 80 est actuellement l'une des méthodes d'analyse au gel qui est utilisée pour traduire la pénétration d'un front de gel et le développement des lentilles de glace dans un matériau poreux.

2.3 Programme expérimental

Afin d'atteindre son objectif, le programme expérimental inclut les étapes suivantes :

- le montage expérimental de l'essai de détermination du potentiel de ségrégation et la programmation de l'acquisition des mesures au moyen du logiciel LabVIEW ;
- l'élaboration en laboratoire d'un sol gélif ;
- la caractérisation de la sensibilité au gel du granulat de VPC selon différentes classes granulaires ;
- la caractérisation de la sensibilité au gel du granulat de pierre calcaire ;
- l'évaluation du potentiel d'amélioration des sols contre les effets du gel par l'utilisation du VPC et de la pierre calcaire comme barrière thermique ;
- l'évaluation du potentiel d'amélioration des sols contre les effets du gel par l'utilisation du VPC et de la pierre calcaire comme barrière capillaire.

La Figure 2.1 illustre la séquence de réalisation du programme expérimental et les essais en laboratoire planifiés à chacune des phases.

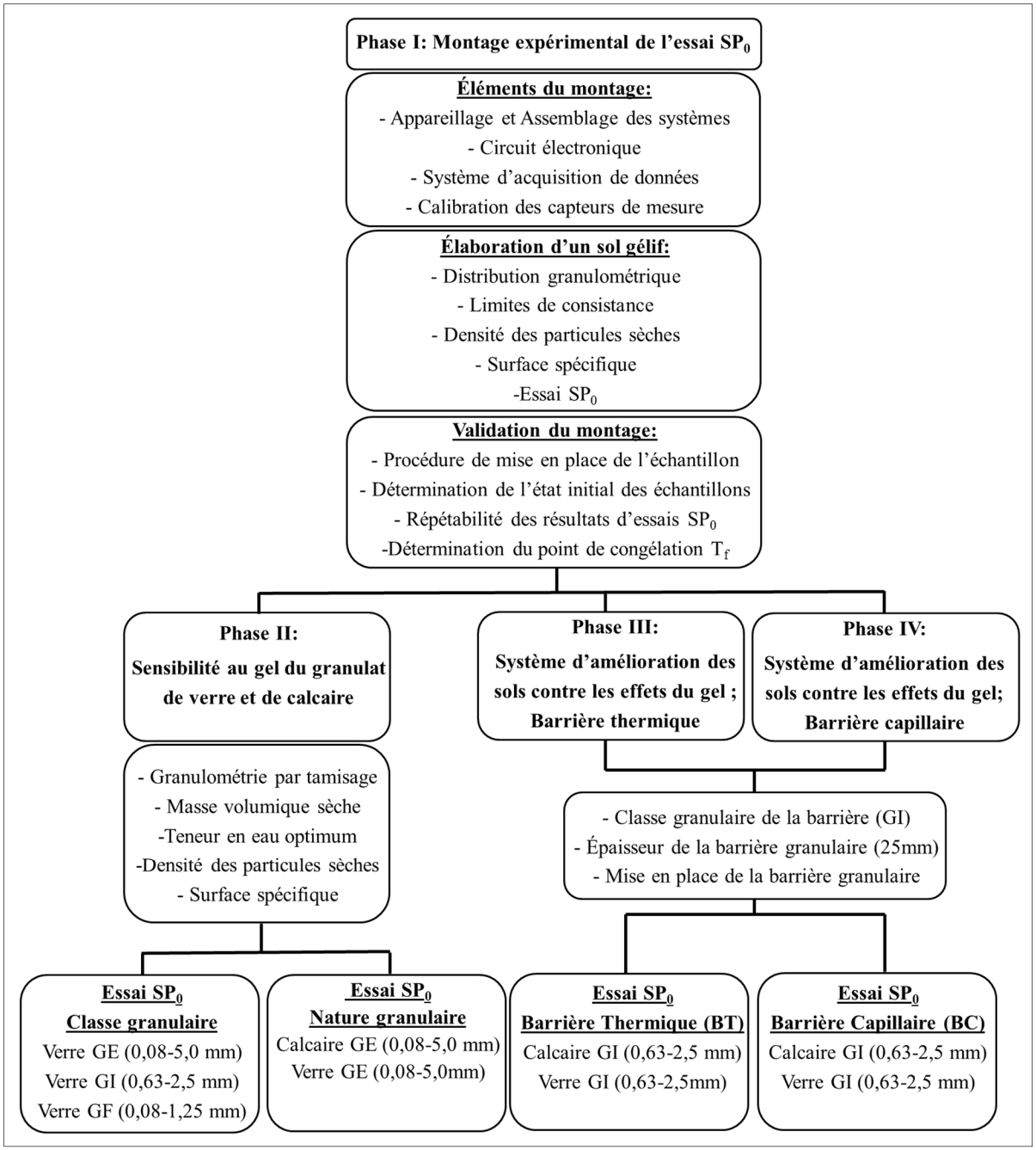


Figure 2.1 Structure du plan expérimental

2.3.1 Montage expérimental de l'essai de détermination du potentiel de ségrégation

Le montage expérimental de l'essai de détermination du potentiel de ségrégation (SP_0), assemblé en laboratoire, est basé sur la méthode d'essai LC 22-331, sur la norme ASTM

D5918-96 ainsi que sur plusieurs publications traitant de ce sujet (Konrad et Morgenstern; 1980; 1981; 1982b) (Doré et Zubeck, 2009). La réalisation du montage expérimental est effectuée en plusieurs étapes soit : la fabrication de pièces, l'assemblage des systèmes mécaniques, l'instrumentation du montage; le montage du circuit électronique pour l'acquisition de données, la programmation du système d'acquisition de données, la calibration des sondes de températures et la calibration du capteur de déplacement. Une procédure de mise en place des échantillons dans la cellule de gel est établie, afin de contrôler et d'uniformiser l'état initial des échantillons de manière à permettre la comparaison des valeurs du SP_0. La répétabilité des résultats d'essai du montage expérimental est vérifiée par la comparaison des résultats d'essai SP_0 d'un même matériau à plusieurs reprises. Puis, il est vérifié si les régimes thermiques développés à l'intérieur des matériaux à l'étude avec la cellule de gel sont reproductibles dans un autre contexte de gel. Le point de congélation d'équilibre T_f mesuré dans une enceinte thermique est comparé avec la température du front de ségrégation mesurée en cellule de gel.

2.3.2 Élaboration d'un sol gélif

Le sol gélif élaboré en laboratoire est constitué de matériaux à l'état sec pour assurer une constance des propriétés géotechniques de base. Le critère de sélection du sol de référence consiste à présenter un comportement gélif de niveau de sévérité élevé. Le matériau de référence est caractérisé à partir des essais d'identification géotechnique soit la distribution granulométrique, les limites de consistance, la densité des particules sèches et la surface spécifique. La reconstitution d'un sol gélif en laboratoire permet la calibration du montage expérimental de manière à vérifier la répétabilité des résultats SP_0 selon des conditions d'essai semblables. De plus, ce sol de référence sert de sol d'infrastructure aux essais de gel intégrant une barrière thermique ou capillaire.

2.3.3 Caractérisation du potentiel de ségrégation du granulat de verre

Selon plusieurs chercheurs, on estime que le granulat de verre présente une sensibilité au gel très faible voire négligeable (Bilodeau, Doré et Pierre, 2008 ; Konrad et Lemieux, 2005). Cette

faible sensibilité au gel est basée sur les caractéristiques de base soit la teneur en particules fines, la porosité de la fraction fine et la surface spécifique des fines. La distribution granulométrique des échantillons de verre et de calcaire est reconstituée en laboratoire suivant le fuseau granulométrique du MG-20 en accord avec les spécifications du MTMDET pour un matériau granulaire de fondation routière (BNQ 2560-114, 2002). La portion de la courbe granulométrique du MG-20 à l'étude est la fraction passant le tamis 5mm. Selon la classification USCS, les échantillons de verre et de pierre calcaire sont classés comme un sable mal gradué (SP). L'influence de la taille des granulats de verre sur la sensibilité au gel est évaluée pour la classe entière GE (0,08-5,0 mm), la classe intermédiaire GI (0,63-2,5 mm) et la classe fine GF (0,08-1,25 mm). Le comportement au gel du granulat de verre est comparé à celui du granulat de calcaire selon la même classe granulaire entière GE (0,08-5,0 mm). Des essais de compactage au Proctor Standard (ASTM D698-12, 2015) sont réalisés pour chacun des échantillons à l'étude, afin de déterminer la masse volumique sèche maximale qui est utilisée comme indice de référence pour la mise en place dans la cellule de gel. La méthode de compactage au Proctor Standard est employée compte tenu de la taille des particules des échantillons de l'ordre du sable fin.

2.3.4 Étude d'un système d'amélioration des sols contre les effets du gel par l'installation d'une barrière thermique

L'étude d'un système d'amélioration des sols contre les effets du gel par l'utilisation d'une barrière thermique vise à limiter, voire empêcher la pénétration du front de gel dans le sol gélif. La barrière thermique est composée de la classe granulaire GI et d'une épaisseur de 25mm. Cette classe granulaire possède une porosité élevée, ce qui réduit le nombre de contacts entre les grains contribuant ainsi à la diminution de la conductivité thermique (Farouki, 1986). L'influence de la mise en place d'une barrière thermique sur la sensibilité au gel du sol gélif est relevée au moyen d'une comparaison du comportement au gel avec un échantillon contrôle de sol gélif.

2.3.5 Étude d'un système d'amélioration des sols contre les effets du gel par l'installation d'une barrière capillaire

L'étude d'un système d'amélioration des sols contre les effets du gel par l'utilisation d'une barrière capillaire vise à limiter, voire couper l'alimentation en eau au front de gel dans le sol gélif placé au-dessus de la barrière. La barrière capillaire est composée de la classe granulaire GI d'une épaisseur de 25mm. La porosité élevée de cette classe granulaire réduit la capacité de remontée capillaire de l'eau interstitielle au front de gel et la continuité du réseau d'eau capillaire (Rengmark, 1963) (Henry, 1996). L'influence de la mise en place d'une barrière capillaire sur la sensibilité au gel du sol gélif est relevée au moyen d'une comparaison du comportement au gel avec un échantillon contrôle de sol gélif.

2.3.6 Synthèse du programme expérimental

Le Tableau 2.1 Résumé du plan expérimental et des essais SP_0 présente une vue d'ensemble des activités et des essais SP_0 réalisés à chacune des phases du projet.

Tableau 2.1 Résumé du plan expérimental et des essais SP_0

Phase	Activité	Détail	Essai SP_0
Phase I: Montage expérimental	Confection du montage (1 an)	Appareillage Instruments de mesure Assemblage des systèmes mécaniques Circuit électronique Programmation acquisition de données Calibration des instruments de mesure Mise en fonction de l'essai SP_0	Silt sableux et argileux (CL) #67 (x5) Argile silteuse intacte (CH) #114 (x1)
	Élaboration d'un sol gélif (3 mois)	Granulométrique par sédimentation Granulométrie par tamisage Limites de consistance Densité des particules sèche Surface spécifique Masse vol. sèche/ Teneur en eau op.	Silt avec un peu sable (ML) (x3) Argile Kaolinite (CH) (x1) Silt et Argile (CL) (x1)
	Validation du montage (2 mois)	Établir l'état initial de mise en place Procédure de mise en place Répétabilité des résultats d'essais SP_0 Point de congélation d'équilibre	Silt et Argile (CL) (x3)
Phase II: Sensibilité au gel des granulats (VPC/Calcaire)	Caractérisation des classes granulaires et Essai SP_0 (1 semaine / essai)	Séparation des particules par tamisage Masse vol. sèche/ Teneur en eau op. Densité des particules sèche Surface spécifique Point de congélation d'équilibre	Calcaire GE (0,08-5,0) (x1) Verre GE (0,08-5,0) (x2) Verre GI (0,63-2,5) (x1) Verre GF (0,08-1,25) (x1)
Phase III: Barrière thermique	Essai SP_0 (1 semaine / essai)	Mise en place de la barrière thermique État de la barrière sèche/saturée Classe granulaire barrière GI (0,63-2,5) Épaisseur barrière 15mm et 25mm	Calcaire saturée, barrière 25mm (x1) Calcaire sèche, barrière 25mm (x2) Verre saturée, barrière 15mm (x1) Verre saturée, barrière 25mm (x1) Verre sèche, barrière 25mm (x1)
Phase IV: Barrière capillaire	Essai SP_0 (1 semaine / essai)	Mise en place de la barrière capillaire État de la barrière saturée Classe granulaire barrière GI (0,63-2,5)	Calcaire, barrière 25mm (x1) Verre, barrière 15mm (x1) Verre, barrière 25mm (x2)

CHAPITRE 3

MONTAGES EXPÉRIMENTAUX, MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES D'ESSAIS

Ce chapitre décrit les aspects concernant les montages expérimentaux, les matériaux utilisés et les méthodes d'essais réalisées dans le cadre de ce projet. Les composantes du montage expérimental du SP_0 et du point de congélation d'équilibre assemblées dans les laboratoires de l'ÉTS y sont décrites telles que les systèmes mécaniques, les spécifications des instruments de mesure, la calibration des instruments de mesure et le logiciel d'acquisition de données utilisé. Les caractéristiques intrinsèques des matériaux granulaires à l'étude sont décrites, ainsi que les propriétés géotechniques de base permettant l'identification des matériaux granulaires. La technique de mise en place des échantillons et la procédure d'essai SP_0 y sont également présentées.

3.1 Montage expérimental du potentiel de ségrégation (SP_0)

Le principe de l'essai de gel est basé sur le concept de potentiel de ségrégation élaboré par Konrad et Morgenstern (1980). L'essai consiste à faire geler une éprouvette de sol, du sommet vers la base, afin d'enregistrer la pénétration du front de gel et les mouvements du sol lors de la formation de lentilles de glace. La construction du montage expérimental est basée selon les spécifications de la norme LC-22 331 (BNQ, 2015), en ce qui concerne l'appareillage et les instruments de mesure. La Figure 3.1 illustre une vue générale du montage expérimental réalisé dans les laboratoires de l'ÉTS pour déterminer le potentiel de ségrégation (SP_0) d'un sol. Les composantes du montage expérimental sont : une cellule contenant un échantillon de sol; deux plateaux connectés à une unité de réfrigération; une réserve d'eau; un piston à air; une enceinte thermique; des sondes thermiques placées au travers de la paroi de la cellule (T1 à T10), dans l'enceinte et dans les deux plateaux (TP.I et TP.S) ; un LVDT; un système d'acquisition de données; et un ordinateur. Les instruments de mesure numérotés de 1 à 15 sur la Figure 3.1 sont associés aux canaux d'entrées du système d'acquisition. Le système d'acquisition est connecté à l'ordinateur pour l'enregistrement des mesures en cours d'essai.

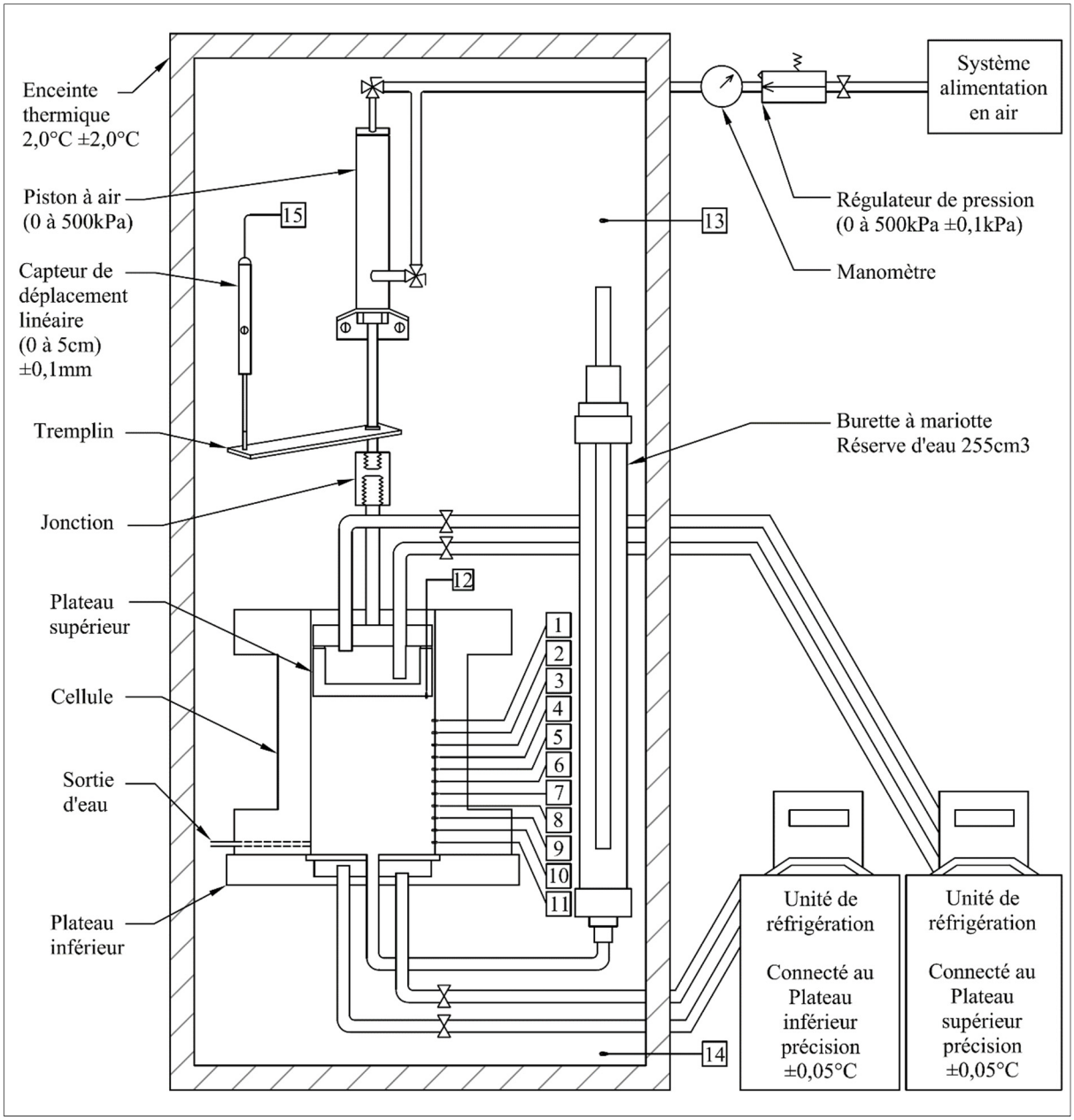


Figure 3.1 Schéma général du montage expérimental

3.1.1 La cellule

La cellule est en forme de « I », elle possède un diamètre intérieur de 100 mm, une hauteur de 200 mm et une paroi d'une épaisseur de 25,26 mm dans la partie centrale et de 63,26 mm aux extrémités. La cellule est composée d'un plastique de type polyéthylène à haute densité. La capacité thermique du polyéthylène à haute densité varie de 0,45 à 0,51 W/Km, ce qui en fait

un matériau conforme en termes de conductivité thermique pour cet essai. La Figure 3.2 présente un schéma de la cellule, des systèmes attachés et de l'instrumentation. La cellule est coupée en deux sections verticales pour faciliter le démoulage de l'échantillon, à la fin de l'essai. Les demi-sections de la cellule sont refermées sur deux boudins de caoutchouc. Afin d'assurer l'étanchéité de la cellule, trois serres placées autour de la cellule compriment les boudins. La cellule est boulonnée sur le plateau inférieur où l'étanchéité de la base de la cellule est préservée à l'aide d'un joint d'étanchéité en caoutchouc d'une épaisseur de 6,35 mm.

Aux extrémités de la cellule, deux plateaux évidés dans lesquels circule un liquide caloporteur sont mis en contact avec le sol, mais séparés par l'intermédiaire de pierres poreuses. L'extrémité chaude est positionnée à la base de la cellule où le plateau inférieur est statique. L'extrémité froide est fixée à la tête de l'échantillon où le plateau supérieur est mobile. Chacun des plateaux est connecté en circuit fermé à un bain réfrigérant qui permet la circulation d'un fluide caloporteur. Les bains maintiennent ce fluide à une température constante avec une précision de ±0,05 °C. Le liquide caloporteur utilisé est une solution d'éthylène glycol et d'eau distillée, dont les concentrations équilibrent un point de fusion de -20°C. Le point de fusion du liquide caloporteur est plus bas que la température programmée, afin d'empêcher l'accumulation de glace sur les serpentins de refroidissement. La formation de glace dans le bain réfrigérant agit comme isolant et réduit la capacité de refroidissement de l'unité de contrôle de la température.

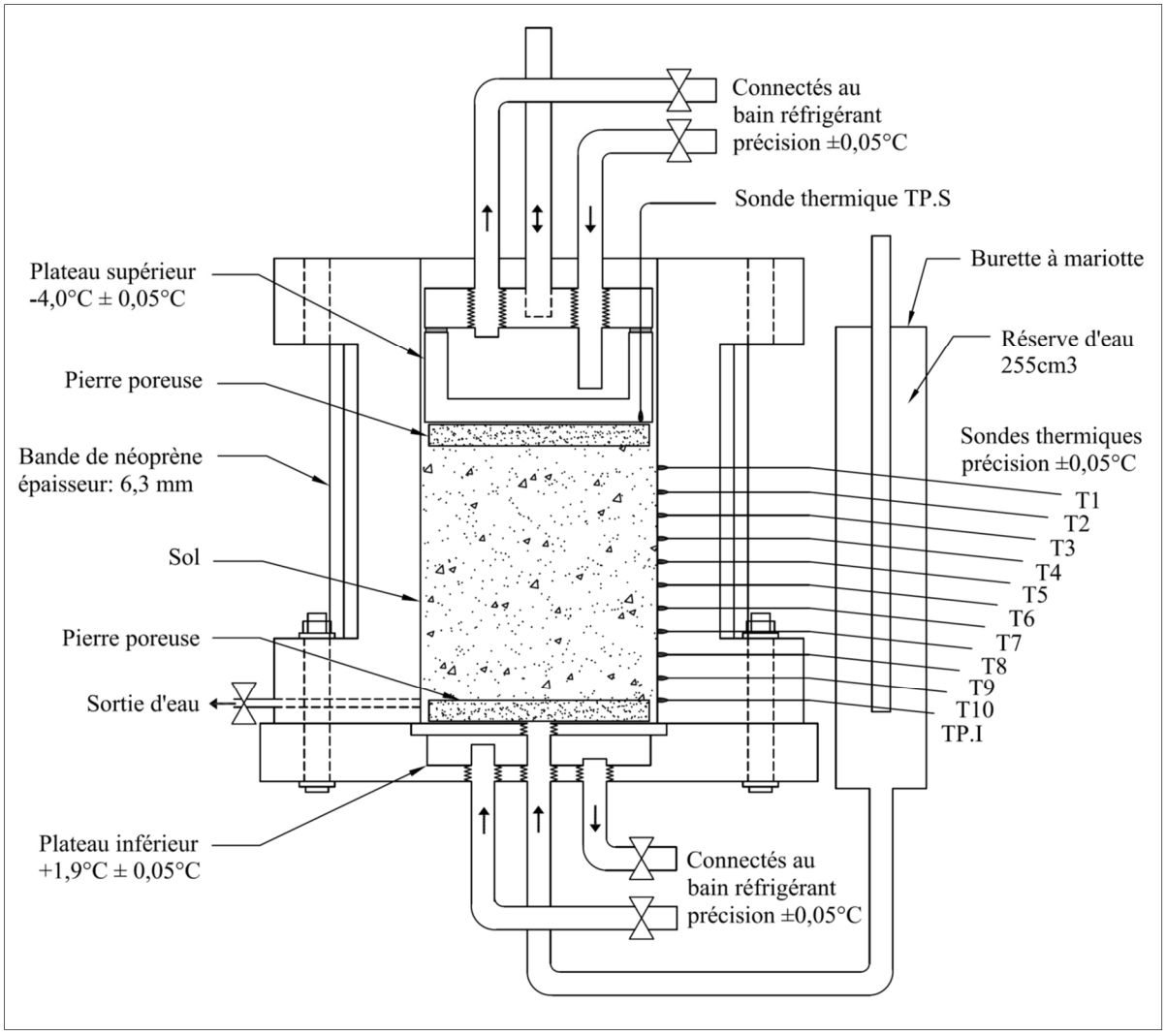
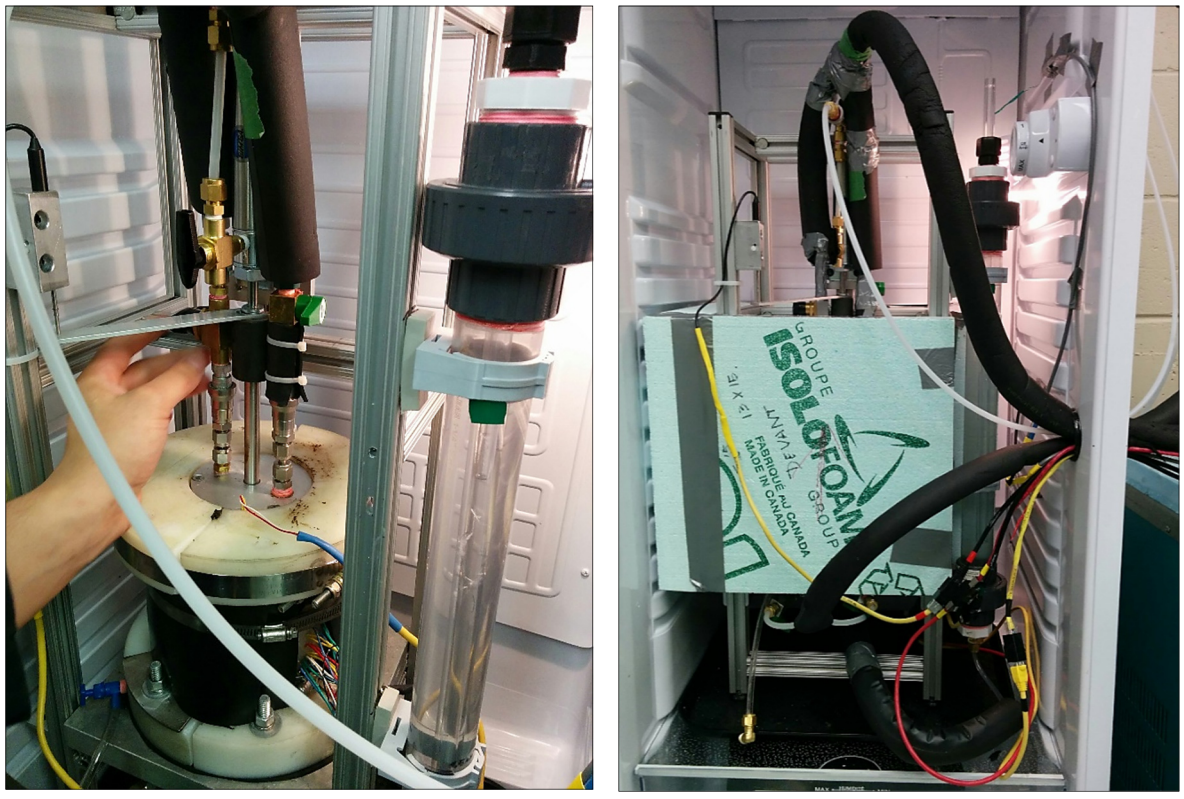


Figure 3.2 Schéma de la cellule de gel et de son instrumentation

Un piston à air raccordé au plateau supérieur permet l'application d'une pression à la tête de l'échantillon. Un régulateur de basse pression permet le maintien d'une pression avec une précision de ±1,0 kPa. Afin d'alimenter et de conserver un niveau d'eau libre constant à 0,5 cm au-dessus de la base de l'échantillon, une réserve de 255 cm^3 d'eau distillée contenue dans une burette à Mariotte est connectée à la base de la cellule. La cellule, l'appareillage et les instruments de mesure sont installés sur un support en acier extrudé tels que présentés à la Figure 3.3(a). L'usage d'un support en acier extrudé permet l'ajustement de la hauteur et du niveau des appareils et des instruments de mesure du montage.

3.1.2 Enceinte thermique

La cellule et l'appareillage sont placés dans une enceinte à température contrôlée qui conserve la température de l'air avec une précision de ±2,0 °C. Un système d'isolation thermique est mis en place pour réduire l'influence de la variation de la température à l'intérieur de l'enceinte thermique. Le système d'isolation thermique est représenté à la
Figure 3.3 (b), il comporte deux bandes de néoprène de 6,3 mm, une couverture isolante de 2,0 mm et des panneaux de polystyrène d'une épaisseur de 62,2 mm enveloppant la cellule. Le bilan thermique incluant la cellule et le système d'isolation, en cours d'essai est présenté à l'Annexe III.



(a) (b)

Figure 3.3 Montage expérimental placé dans l'enceinte thermique : (a) Vue du plateau supérieur attaché au piston à air et de la réserve d'eau; (b) Système d'isolation de la cellule

3.1.3 Sonde de température

Dix sondes de température sont installées au travers de la paroi de la cellule selon un espacement de 1,0cm pour suivre la pénétration du front de gel dans l'échantillon de sol, T1 à T10 (Figure 3.2). Des sondes de température supplémentaires sont utilisées pour le suivi et le contrôle de l'essai dans les plateaux inférieur et supérieur (TP.I et TP.S), ainsi que dans l'enceinte thermique. Les sondes de température utilisées sont de type thermistance d'une précision de ±0,05 °C (U.S. Sensor, Thermistor 10K ohm, modèle : PS103J2). L'équation 3.1 de Steinhart-Hart est utilisée pour traduire la résistance d'un dispositif à thermistance typique sur une plage de températures de -10 °C à +10 °C.

$$T(Rt) = \frac{1}{1.1186 * 10^{-3} + 2.3573 * 10^{-4} * \ln(Rt) + 8.2249 * 10^{-8}} - 2.73.15 \qquad (3.1)$$

$$Rt = \frac{R * Vo}{Vi - Vo} * 1000 \qquad (3.2)$$

Où T est la température (°C), Rt est la résistance d'une thermistance (Ω), Vi (Volt) le signal en tension intrant du circuit, Vo (Volt) le signal en tension à la sortie du circuit et R la résistance (~33,05 Ω).

Les sondes de température sont calibrées pour établir l'écart entre la température réelle dans la cellule et celle calculée avec l'équation 3.1 de Steinhart-Hart. La technique de calibration utilisée pour les sondes positionnées dans la paroi de la cellule consiste à faire circuler un liquide caloporteur à l'intérieur de la cellule selon quatre températures de calibration soit +4,0 °C, +1,0 °C, -1,0 °C et -4,0 °C. La température du liquide caloporteur à l'intérieur de la cellule est mesurée avec un thermomètre de calibration (Martel electronics corps, Beta Probe TI) avec une précision de ±0,05 °C. La Figure 3.4 affiche une courbe de calibration qui présente les températures calculées en fonction de l'écart entre la température calculée avec l'équation 3.1 et la température mesurée avec le thermomètre de calibration. L'application de

l'équation de calibration permet de réduire l'erreur avec la température réelle pour une température calculée donnée.

La technique de calibration pour les sondes positionnées dans le couvercle supérieur et dans l'enceinte thermique consiste à immerger directement les sondes dans un bain à circulation réfrigérée programmée à deux températures de calibration. L'ensemble des courbes de calibrations des sondes thermiques se retrouve à l'Annexe V. L'acquisition du signal en tension des sondes de température est enregistrée par un programme sur la plate-forme du logiciel LabVIEW (2010).

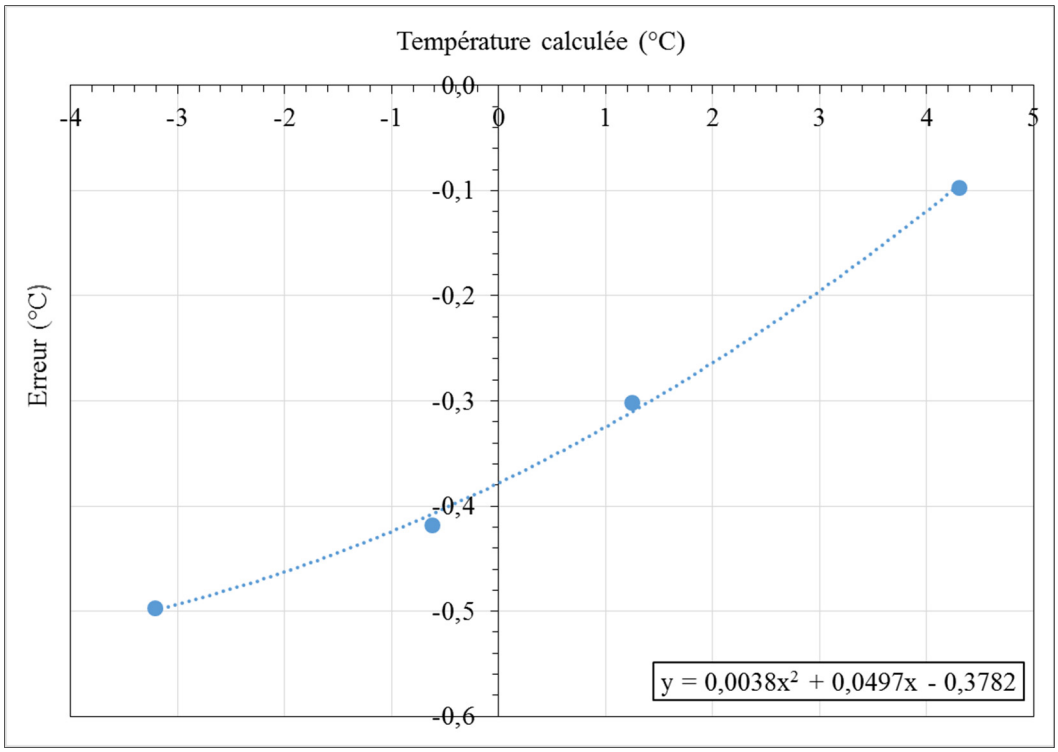


Figure 3.4 Exemple de courbe de calibration de sonde thermique

3.1.4 Capteur de déplacement

Un capteur de déplacement (Honeywell, modèle : F38000202) ayant une course de 50,0 mm mesure le déplacement du couvercle supérieur durant l'essai avec une précision de ±0,1mm. Le capteur inductif renvoie un signal en tension variant de 0,1 à 4,8 volts en fonction du

développement de la course. Le capteur inductif est calibré pour obtenir la relation entre la longueur de la tige (mm) et la tension (U) mesurée (Figure 3.5). L'acquisition du voltage mesuré par le capteur de déplacement est enregistrée par un programme utilisant le logiciel LabVIEW (2010).

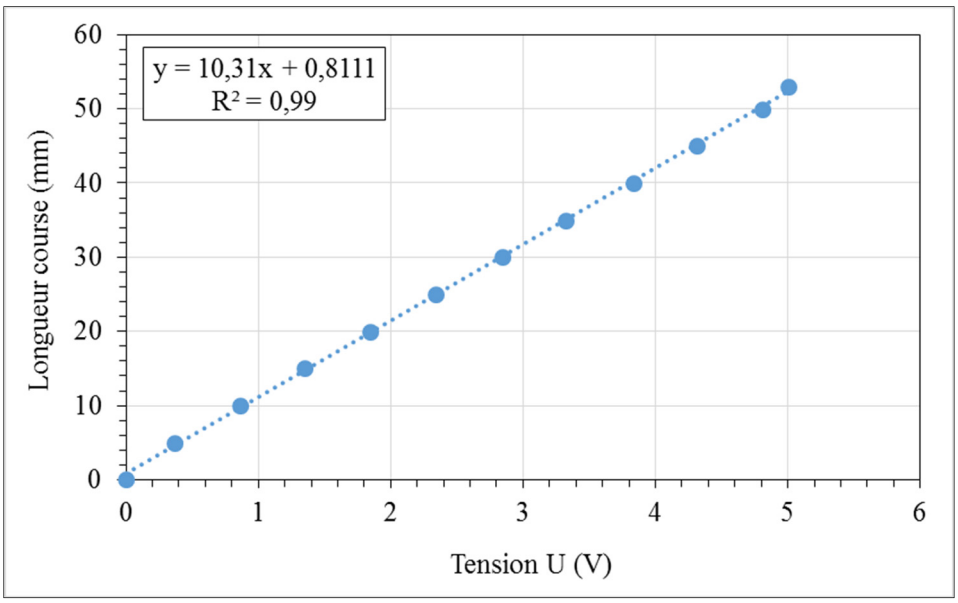


Figure 3.5 Courbe de calibration du capteur de déplacement

3.1.5 Acquisition des données

Le système d'acquisition de données de températures et de déplacement linéaire du couvercle supérieur a été programmé sur une plate-forme du logiciel LabVIEW (2010) qui utilise un langage de programmation schématique. Chacun des instruments de mesure est connecté à un canal du système d'acquisition (NI USB-62-11, 16 entrées, 16 bits, 250 kS/s, Multifunction I/O) où les signaux en tension sont transmis à l'ordinateur. Le programme de traitement du signal a pour fonction : la prise de mesure du voltage sortant (Vo) de chacun des canaux du système d'acquisition ; l'application des équations de traduction du signal et de calibrations ; et l'enregistrement des valeurs calculées dans un document Excel. L'interface du programme affiche des graphiques suivant l'évolution de la température mesurée par les sondes de température et le déplacement linéaire du plateau supérieur mesuré par le capteur de

déplacement afin de suivre le déroulement de l'essai. L'alimentation du circuit électronique est activée seulement lors de l'acquisition de la mesure du signal. Cette disposition permet de réduire l'effet d'échauffement des sondes thermiques enrobées d'époxy, positionnées dans la paroi de la cellule. La programmation du système d'acquisition de données réalisés par l'auteure, sont présentés à l'Annexe IV.

3.2 Montage expérimental du point de congélation d'équilibre (T_f)

Afin de valider la température du front de ségrégation obtenue avec l'essai SP_0, des essais de point de congélation d'équilibre ont été réalisés sur les matériaux à l'étude. Le principe de l'essai du point de congélation d'équilibre consiste à faire geler une éprouvette de sol, afin d'enregistrer la dépression du point de congélation de l'eau contenue dans les pores du sol. La procédure pour la détermination du point de congélation d'équilibre (T_f) s'inspire des spécifications de l'annexe de la norme ASTM D5918-13. Le point de congélation est déterminé suivant l'évolution de la température de l'eau interstitielle durant la période de gel par une sonde de température placée à l'intérieur d'un échantillon de sol à une profondeur de 3,0 ± 0,5 cm.

La courbe de refroidissement du système sol-eau est utilisée pour trois raisons. En premier lieu, elle permet de déterminer la température de changement de l'eau interstitielle d'état liquide à solide. En second lieu, elle identifie la température de nucléation spontanée pendant l'essai de congélation. En troisième lieu, la température du point de congélation d'un système sol-eau est utilisée pour estimer la profondeur de pénétration du front de gel et de dégel.

3.2.1 Enceinte thermique

La préparation et le niveau de compactage des échantillons se basent sur les conditions initiales de mise en place pour les essais de gel SP_0. L'échantillon de sol est contenu dans un moule de plastique, il comporte une hauteur de 100mm et un diamètre de 51,5mm. Le sol est mis en place dans un état humide et compacté avec un pilon. Les moules remplis de sol sont mis en place dans une enceinte thermique qui maintient une température de -4,0°C ± 1,5°C. Les

moules sont placés dans un support isolant de polystyrène, puis ils sont recouverts de sable, afin de réduire l'influence de la variation de la température de l'enceinte thermique tel que présenté à la Figure 3.6. L'évolution de la température dans les échantillons et l'enceinte thermique est suivie par des sondes de température. Les températures mesurées sont enregistrées en cours d'essai par un système d'acquisition de données. L'essai est terminé lorsque la courbe de refroidissement comporte les quatre évènements suivants : un sur-refroidissement, une réaction exothermique, une stabilisation des températures, et une baisse de la température de l'échantillon. Le point de congélation d'équilibre T_f est déterminé à partir de la courbe de refroidissement, plus précisément au sommet de la réaction exothermique telle que présentée à la Figure 3.7.



Figure 3.6 Support isolant de polystyrène contenant les moules pour l'essai de congélation d'équilibre

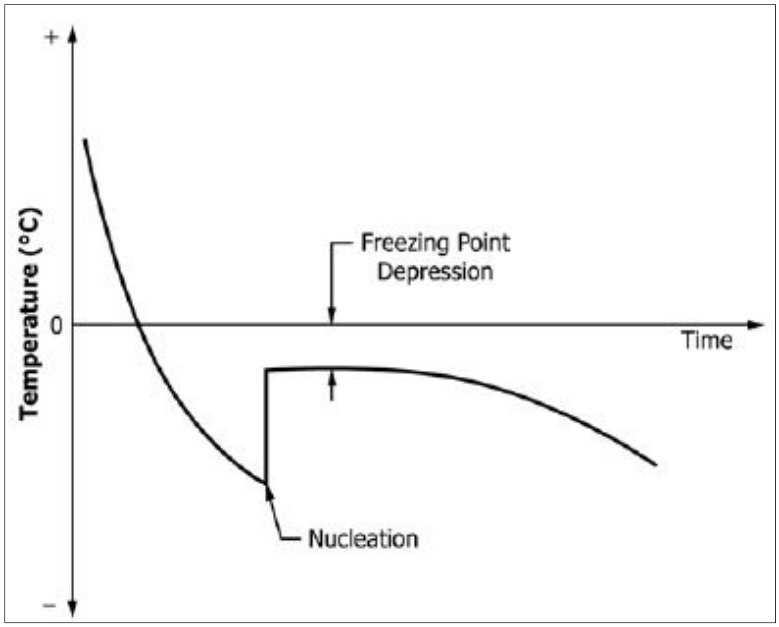


Figure 3.7 La courbe de refroidissement de l'essai de congélation d'équilibre (ASTM D5918-13)

3.2.2 Sonde de température

Une sonde de température est placée au centre d'un échantillon de sol ou de matériau granulaire pour suivre l'évolution de la température pendant la période de congélation. Deux sondes supplémentaires sont installées dans l'enceinte thermique. Les sondes thermiques utilisées sont de type thermocouple d'une précision de ±0,05 °C (Omega, thermocouple type T, Standard ±1,0°C). Les sondes de température sont calibrées pour établir l'écart entre la température réelle et celle calculée. La technique de calibration utilisée pour les sondes de température consiste à immerger directement les sondes dans l'unité réfrigérante programmée pour une température de calibration de -2,0°C (Figure 3.8). La température du liquide caloporteur à l'intérieur du bain réfrigérant est mesurée avec un thermomètre de calibration (Martel electronics corps, Beta Probe TI) avec une précision de ±0,05 °C. L'acquisition du signal en tension des sondes de température est enregistrée par un programme sur la plate-forme du logiciel LabVIEW. L'ensemble des points de calibration des sondes thermique se retrouve à l'Annexe V.

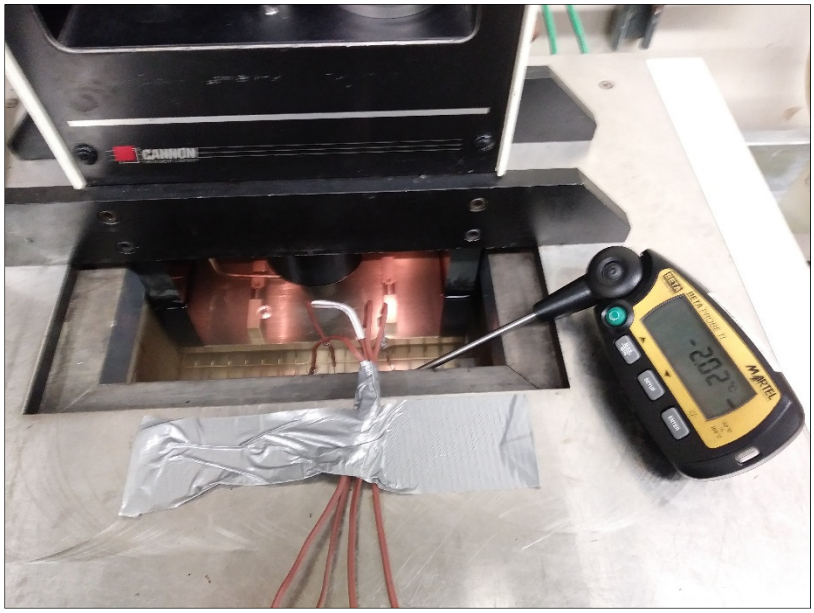


Figure 3.8 Calibration des thermocouples
pour l'essai de congélation d'équilibre

3.3 Description et provenance des matériaux utilisés

Cette section présente la source des matériaux à l'étude et les informations fournies par les fabricants sur leur produit.

3.3.1 Caractéristiques du granulat naturel

Le granulat naturel utilisé est un calcaire concassé provenant de la carrière située dans la municipalité de St-Philippe. Ce granulat de source sédimentaire est extrait et produit par l'entreprise « Construction DJL ». Le Tableau 3.1 présente les caractéristiques intrinsèques et celles de fabrication de la classe granulaire nommée « 0-5 non lavé ». Cette source de granulat est sélectionnée puisqu'elle correspond au contexte québécois pour ce qui a trait à l'approvisionnement en granulat naturel dans le domaine routier.

Tableau 3.1 Caractéristiques du granulat naturel

Caractéristiques		Granulométrie	
		Tamis (mm)	% Passant
Classe granulaire	0-5 non lavé	10	100
Nature minéralogique	Calcaire	5	97
Densité brute (dgb)	2,718	2,5	66
Absorption en eau	0,65	1,25	44
Micro-Deval (%)	14,5	0,630	31
Indice de friabilité (%)	29	0,315	25
Catégorie de granulat BNQ 2560-114	1	0,160	20
		0,080	15

3.3.2 Caractéristiques des particules de verre

Le granulat de verre de postconsommation (VPC) provient du centre de tri Tricentris situé dans la municipalité de Lachute. Les principales caractéristiques des granulats de VPC et les distributions granulométriques sont présentées au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Caractéristiques des particules de verre
Tiré de Lachance Tremblay (2014)

Classe granulaire		**0-0,315**	**0,630-2,5**
Nature minéralogique		Silice	Silice
Densité brute (d_{gb})		2,532	2,496
Absorption en eau		0,07	0,20
Granulométrie	Tamis (mm)	%Passant	
	2,50		100
	1,25		34
	0,63		0,2
	0,32	100	0,2
	0,16	92	0,1
	0,08	66	0,1

3.3.3 Caractéristiques du sol de référence

Le sol de référence est formé de silt et d'argile avec un peu de sable. Il est utilisé pour deux applications dans ce projet de recherche : la répétabilité des résultats SP_0 obtenus avec le montage expérimental ; et comme sol gélif pour tester le potentiel de barrière thermique et de barrière capillaire. Le sol de référence est reconstitué en laboratoire, il est composé d'argile kaolin, de filler de calcaire et de sable tout usage. L'argile kaolin est fournie par Sial Laval un fournisseur d'argiles, de glaçures et de pierres à sculptées. Le Tableau 3.3 présente les informations de la fiche technique de l'argile kaolin par le fournisseur. Le filler de calcaire est fourni par Construction DJL situé dans la région de Montréal. Le sable employé est de type tout usage de marque Bomix approvisionné dans les quincailleries à grande surface. Le Tableau 3.4 présente les informations de la fiche technique du sable tout usage. À la réception, les matériaux sont dans un état sec.

Tableau 3.3 Caractéristiques de l'argile kaolin

Nature Minéralogie	Bentonite
État à la réception	Sec
Couleur	Blanc
% Particule < 2µm	60
Surface spécifique (sqm/g)	20
PH 20% des solides	6,5

Tableau 3.4 Caractéristiques du sable sec type tout usage

Nature Minéralogie		N/D
Classe granulométrique		Sable Moyen-Fins
État à la réception		Sec
Couleur		Beige
Densité (kg/m3)		1600 - 1650
Granulométrie	Tamis (mm)	% Passant
	2,5	100
	1,25	85-95
	0,630	70-86
	0,315	50-65
	0,160	15-25
	0,080	0-3

3.4 Configuration des échantillons de l'étude

Cette section présente la caractérisation des matériaux utilisés dans ce projet et les configurations des échantillons en cellule de gel pour les phases II, III et IV du plan expérimental.

3.4.1 Description des échantillons MG 20, phase II

Les classes granulaires et la caractérisation géotechnique des granulats de VPC et de pierre calcaire y sont décrites. Les configurations des échantillons pour les essais de gel de la phase II sont présentées dans cette section.

3.4.1.1 Granulométrie à l'étude

Les granulats employés pour la couche de fondation et de sous-fondation composant une structure de chaussée font référence aux classes granulaires MG-20 et MG-112. La norme NQ 2560-114 (BNQ, 2002) traite sur les spécifications des granulats employés dans le domaine routier. Les caractéristiques de base telles que la granulométrie, la forme, la texture et la propreté influencent les propriétés d'ouvrabilité du matériau. Le fuseau granulométrique admissible pour un matériau granulaire MG-20 est présenté au

Tableau 3.5. La courbe supérieure (CS) et la courbe inférieure (CI) correspondent aux limites admissibles pour un matériau de fondation routière. La distribution granulométrique (GE) à l'étude est tracée à l'intérieur du fuseau granulométrique admissible pour un matériau granulaire MG-20.

Tableau 3.5 Division granulométrique par tamis du fuseau admissible du MG-20 et de la granulométrie à l'étude

Tamis (mm)	**% Passant**			**% Retenue**
	CS	**CI**	**GE**	**GE**
31,5	100	100	100	0
20	100	90	95	5
14	93	68	80	15
10	80	54	67	13
5	60	35	43	24
2,5	48	26	**33**	**10**
1,25	38	19	**23**	**10**
0,630	26	13,5	**13**	**10**
0,315	17	9	**9**	**4**
0,160	13	5	**6**	**3**
0,080	7	2	**3**	**3**

La portion de la courbe granulaire du MG 20 à l'étude (GE) regroupe seulement les particules passant le tamis 5mm. Cette portion de la courbe granulaire permet aussi l'observation des cas les plus critiques au gel. La Figure 3.9 montre la granulométrie à l'étude (GE) passant le tamis 5mm et la courbe en tireté correspond à l'extension de la courbe GE d'un matériau de type MG-20. Les deux sections de la courbe GE sont représentées à l'intérieur des limites du fuseau granulaire du MTMDET. Selon la classification USCS, la granulométrie à l'étude (GE) se catégorise comme un sable mal gradué (SP). Des essais de gel sont réalisés sur le granulat de VPC et de pierre calcaire selon la courbe GE à l'étude pour déterminer l'influence de la nature granulaire sur la sensibilité au gel.

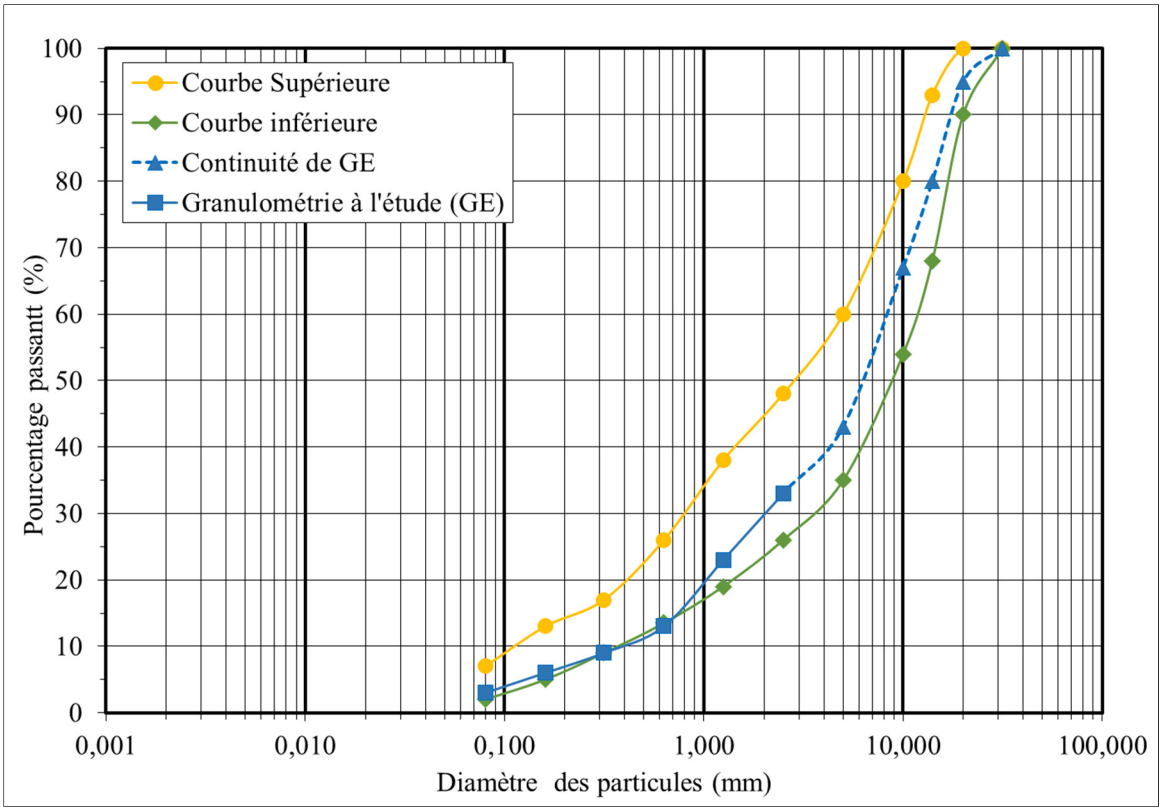


Figure 3.9 Fuseau granulométrique admissible pour un MG20 (CS et CI), granulométrie à l'étude (GE) et continuité de GE

3.4.1.2 Classes granulométriques

L'influence granulométrique sur la susceptibilité au gel du granulat de verre est évaluée à partir de la courbe granulaire entière à l'étude (GE). Le Tableau 3.6 décrit les deux classes granulaires tirées de la courbe GE adapté incluant la portion passant le tamis 5mm et le retenue 0,08mm et les principales caractéristiques granulométriques des classes étudiées.

Tableau 3.6 Classes granulométriques de particules de verre

Classes		USCS	Description
Classe GE	0,08-5,0 mm	SP	passant 5,0mm, retenue 0,08mm
Classe GI	0,63-2,5 mm	SP	passant 2,5mm, retenu 0,63mm
Classe GF	0,08-1,25 mm	SP	passant 1,25mm, retenu 0,08 mm

La classe GI regroupe les particules de taille intermédiaire de la courbe GE. La classe GF rassemble les particules plus fines de la courbe GE. La Figure 3.10 représente graphiquement la subdivision des classes granulaires tirée de la courbe GE à l'étude passant le tamis 5mm et retenue 0,08mm.

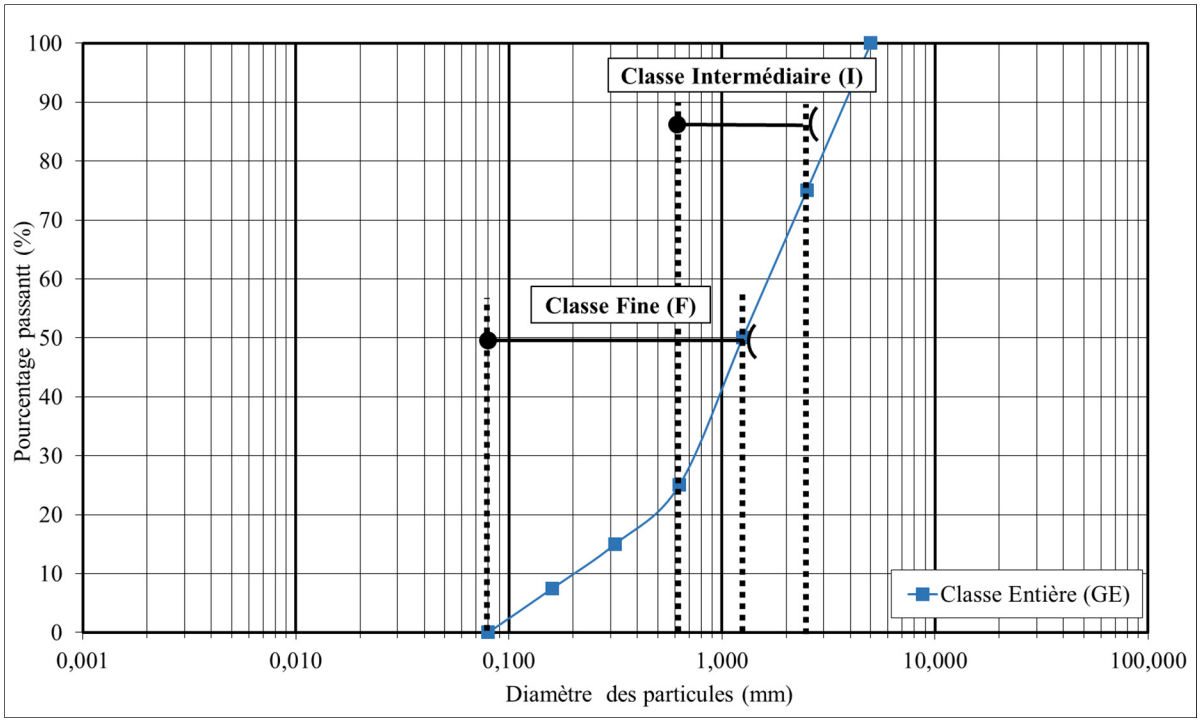


Figure 3.10 Subdivision des classes granulométriques basée sur la courbe GE adaptée

3.4.1.3 Caractérisation échantillon MG 20

Chacune des classes granulométriques étudiées (GE, GI, GF) a fait l'objet d'une caractérisation de ses propriétés géotechniques. Les essais réalisés sont le Proctor Standard D698-12 (ASTM, 2015), la densité des grains solides D854-14 (ASTM ,2010) et la surface spécifiques LC 21-255 (BNQ, 2007). Ces essais permettent de contrôler la qualité de la mise en place des matériaux testés. Les données recueillies de cette caractérisation sont répertoriées au Tableau 3.7. Les courbes de compaction obtenues à l'essai Proctor Standard sont affichées à la Figure 3.11. La valeur au bleu (VB) réalisée sur la fraction passant le tamis 400µm du verre et du calcaire a été déterminée par le laboratoire EXP au département des sols et granulats. Le rapport du laboratoire EXP est présenté à l'Annexe VII.

Tableau 3.7 Caractérisation des granulats de verre et de calcaire

Matériau	Densité (Gs)	Masse volumique sèche (g/cm^3)	Teneur en eau optimale (w%)	Valeur au bleu VB <400µm (ml/g)	Surface spécifique Ss <400µm (m^2/g)
Calcaire (GE)	2,795	1,97	11,77	0,20	4,18
Verre (GE)	2,505	1,84	11,50	0,03	0,62
Verre (GI)	2,505	1,48	15,04	N/A	N/A
Verre (GF)	2,505	1,72	9,93	N/A	N/A

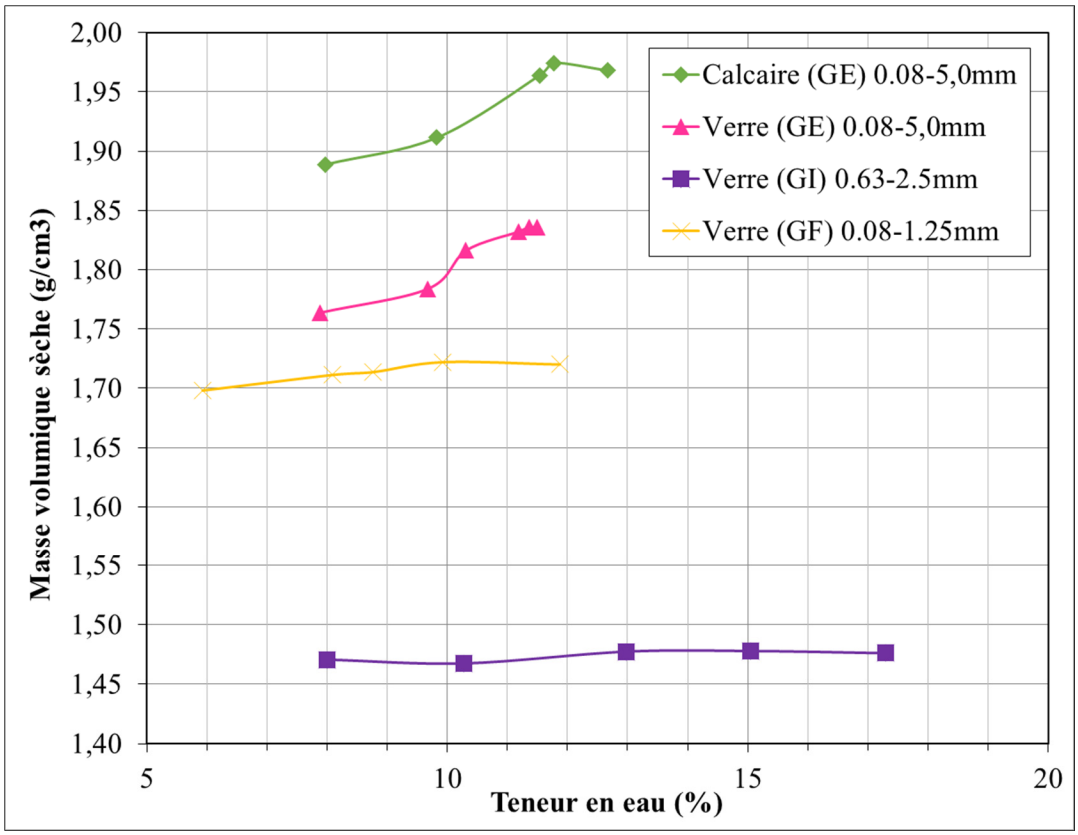


Figure 3.11 Courbe de compaction au Proctor Standard sur le VPC et le calcaire

3.4.2 Description des échantillons incorporant une barrière contre les effets du gel, phase III et IV

Cette section décrit les propriétés géotechniques de base du sol de référence et les configurations des échantillons intégrant une barrière thermique et capillaire de la phase III et

IV du plan expérimental. Les barrières thermiques et capillaires se conforment à la classe granulaire intermédiaire GI extraite de la classe GE à l'étude et l'épaisseur des barrières granulaires est de 25,0 ±1,0mm.

3.4.2.1 Sol fin de référence

Le sol de référence sélectionné est un silt et argile avec un peu de sable (CL) composé de proportions équivalentes d'argile kaolin (CH) et de silt sableux (ML). Le Tableau 3.8 montre les propriétés géotechniques du sol de référence. La valeur au bleu (VB) réalisé sur la fraction passant le tamis 400µm du silt et argile avec un peu de sable a été déterminée par le laboratoire EXP au département des sols et granulats. Les résultats d'essais de valeur au bleu effectué par le laboratoire EXP sont présentés à l'Annexe VII. La Figure 3.12 affiche la distribution granulométrique du silt et argile par sédimentation et par granulométrie au laser.

Tableau 3.8 Propriétés géotechniques du sol de référence

Nom	Argile et silt
Classe USCS	CL
Granulométrie Sable-Silt-Argile (%)	14,5 - 46,6 - 38,8
Pourcentage < 80µm	85,5%
Diamètre moyen de la fraction fine d50(FF) (µm)	11
Densité sèche (Gs)	2,689
Limite liquide (w_L)	47%
Indice Plastique (Ip)	26%
Valeur au bleu VB <400µm (ml/g)	1,47
Surface spécifique <400µm (m^2/g)	30,76

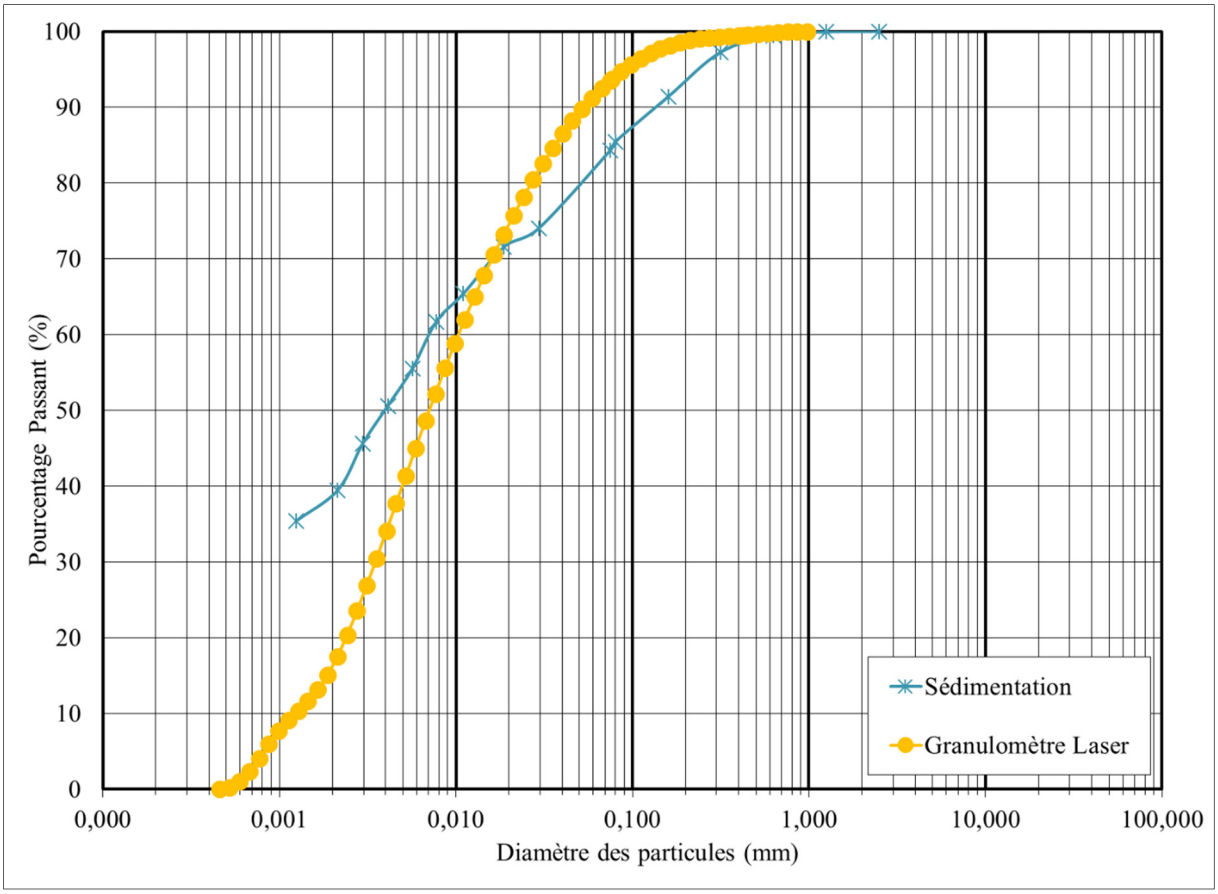


Figure 3.12 Distribution granulométrique du sol de référence

3.4.2.2 Configuration des échantillons avec une barrière thermique

La mise en place d'une barrière thermique vise à limiter la pénétration du front de gel dans le sol gélif situé en dessous de la barrière. La barrière thermique est mise en place au-dessus de l'échantillon soit directement en contact avec l'extrémité froide telle que présentée à la Figure 3.13. Les barrières thermiques de VPC et de pierre calcaire sont installées dans un état saturé ou sec.

3.4.2.3 Configuration des échantillons avec une barrière capillaire

Le potentiel de la barrière capillaire est évalué en fonction de la réduction du passage de l'eau interstitielle à la couche de sol gélif superposé à la barrière. La barrière capillaire est positionnée à 18,7 mm au-dessus du niveau de l'eau libre disponible à la base de l'échantillon

tel que présenté à la Figure 3.13. Les barrières capillaires de VPC et de pierre calcaire sont mises en place dans un état saturé.

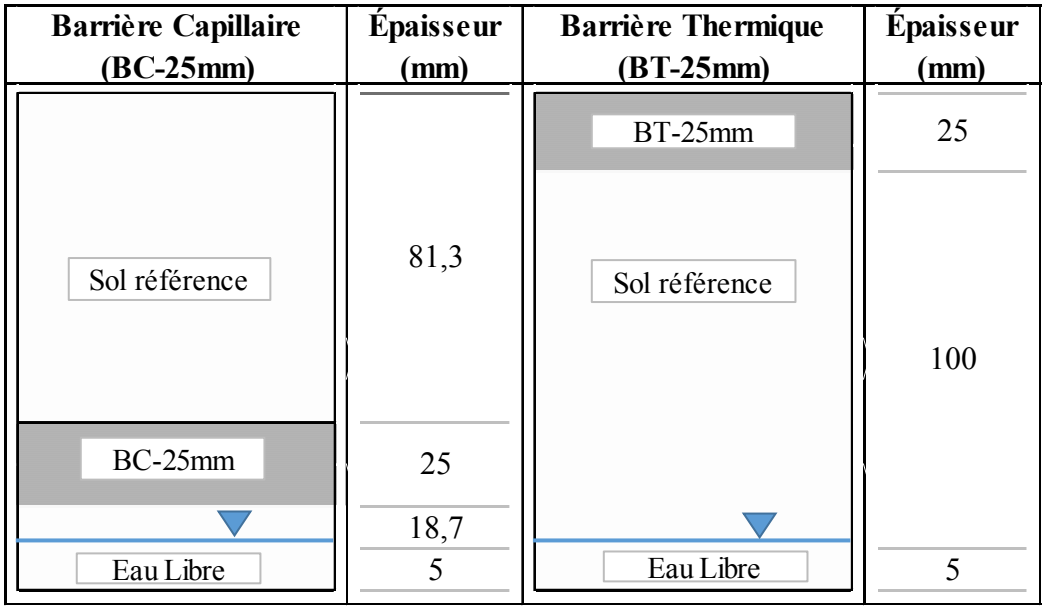


Figure 3.13 Configurations des échantillons qui comportent une barrière thermique ou une barrière capillaire

3.5 Description de la procédure de l'essai SP_0

Cette section fait la description de la procédure d'essai pour déterminer le potentiel de ségrégation, ainsi que les méthodes de compaction et de saturation pour un matériau cohérent et pulvérulent. La Figure 3.14 expose un organigramme des manipulations nécessaires à l'exécution de l'essai SP_0. Il regroupe les étapes suivantes : la préparation de la cellule, la préparation de l'échantillon, la compaction, la saturation, la période de conditionnement, le mode opératoire, le démontage de la cellule et le prélèvement de l'échantillon

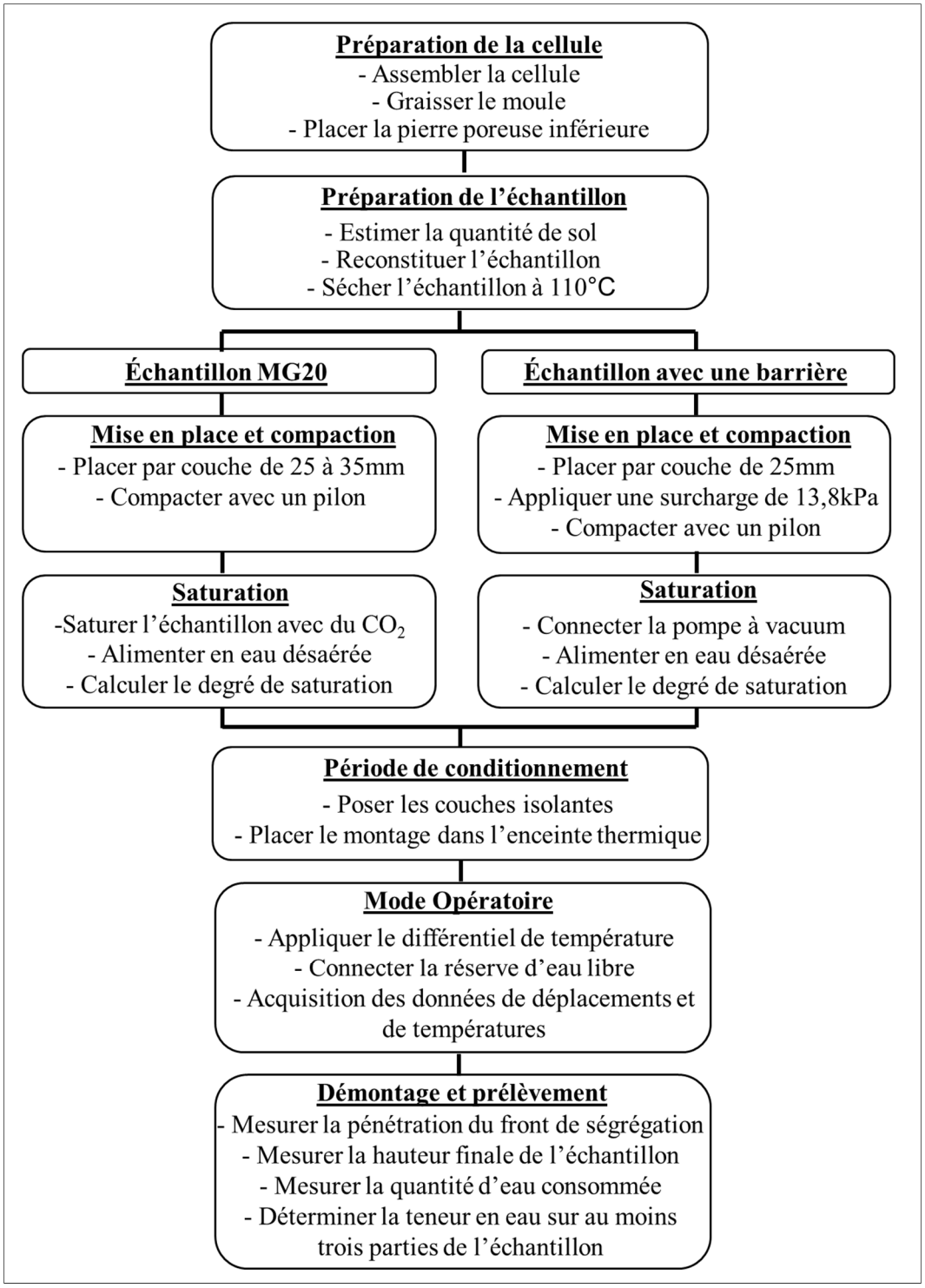


Figure 3.14 Organigramme des manipulations pour réaliser l'essai SP_0

3.5.1 Préparation du montage et des mélanges

La préparation du montage débute avec l'assemblage de la cellule. La paroi intérieure de la cellule est graissée pour limiter la formation de chemins préférentiels de l'eau interstitielle. Une pierre poreuse est placée dans le fond de la cellule pour une diffusion uniforme de l'eau libre à la base de l'échantillon. Les échantillons sont préparés en fonction des proportions massiques planifiées, puis placés dans une étuve programmée à 110 °C. La procédure de reconstitution des matériaux granulaires (GE, GI, GF) à partir des refus de tamis est présentée à l'Annexe VI.

3.5.2 Mise en place et compaction des échantillons

La procédure de mise en place dépend de la classe du sol. Pour un sol pulvérulent, elle suit les directives de la norme LC 22-331 (BNQ, 2015). Le matériau granulaire est mis en place par couche de 25 à 35 mm où chacune des couches est compactée à l'aide d'un pilon. Un degré de compaction équivalent à 95±2,0 % de la densité maximale sèche du Proctor Standard est visé.

Un sol cohérent à l'état sec est mis en place par couche de 15 à 25mm. Une masse de 9,68 kg compacte la couche de sol, puis le sol est pilonné. Cette technique de compactage est employée puisqu'elle facilite la mise en place des échantillons pourvus de barrières capillaires installées à l'intérieur du sol de référence. Des papiers filtres séparent le sol de référence de la barrière thermique ou capillaire, afin de limiter l'obstruction de la barrière de particules fines. Un degré de compaction minimal de 1,3 g/cm^3 établit en laboratoire est requis pour le sol cohérent.

3.5.3 Saturation des échantillons

Une fois l'échantillon compacté, des pierres poreuses et un ressort sont placés dans la cellule pour maintenir l'échantillon en place pendant l'étape de saturation. Un couvercle muni d'une soupape de ventilation est installé pour sceller la cellule.

La procédure de saturation pour les sols pulvérulents est basée sur la norme D5101-12 (ASTM, 2012). Chapuis, Baass et Davenne (1989) énoncent qu'un niveau de saturation supérieur à 95% est difficile à atteindre puisque des bulles d'air sont piégées dans le sol. Ainsi, le sol sec est saturé au dioxyde de carbone (CO_2). Le dioxyde de carbone étant plus dense que l'air, purge celui-ci du système. La saturation en eau désaérée de l'échantillon est faite par l'application d'un gradient hydraulique. Le dioxyde de carbone possède une solubilité plus élevée que l'air, réduisant ainsi la quantité de bulles d'air résiduelle dans l'échantillon. La période de saturation de l'échantillon est terminée lorsque l'eau s'écoule de la soupape de ventilation. L'échantillon saturé repose dans un état statique en système fermé, pendant 12 heures.

Dans le cas de sol cohérent, la technique de saturation adaptée pour la cellule de gel est inspirée de la section de préparation et de saturation des spécimens des normes D2434-68 (ASTM, 2006) et D5918-13 (ASTM, 2001). La méthode de saturation pour les sols cohérents nécessite une pompe à vacuum où une succion de -20 kPa est appliquée à la tête de la cellule pendant l'alimentation en eau désaérée à la base de la cellule. Une valve positionnée sur le tuyau d'alimentation en eau désaéré contrôle la vitesse d'écoulement de l'eau entrant dans la cellule.

Le degré de saturation (Sr%) pour les sols pulvérulents et cohérents est calculé selon l'équation 3.3 tirée de Chapuis, Baass et Davenne (1989).

$$Sr(\%) = \frac{V_w}{V_V} = \frac{M_w}{\rho_w * V_w} = \frac{M_{Tot} - M_e + V * \rho_w - M_s}{V * \rho_w - (\frac{M_s}{G})} \tag{3.3}$$

Où V est le volume de l'échantillon (cm^3), M_s est la masse de solide (g), M_e est la masse du moule rempli d'eau (g) et M_{Tot} la masse du moule rempli de sol et d'eau (g). À noter, un degré de saturation minimal de 90 % est établi pour les essais de potentiel de ségrégation. L'incertitude relative au degré de saturation ($\Delta Sr/Sr$) est calculée à l'aide des équations 3.4 à 3.6 tirées de Chapuis, Baass et Davenne (1989).

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{2 * \Delta D}{D} + \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4)$$

Où ΔV est l'incertitude du volume du spécimen (cm^3), D le diamètre de l'échantillon (cm), ΔD est l'incertitude de mesure relative au diamètre (cm), L est la hauteur de l'échantillon (cm) et ΔL l'incertitude de mesure de la hauteur (cm).

$$Sr(\%) = \frac{X}{Y} \quad (3.5)$$

$$\frac{\Delta Sr}{Sr} = \frac{\Delta M_{Tot}}{X} + \frac{\Delta M_e}{X} + \rho_w * \Delta V * \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{Y}\right) + \Delta M_s * \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{G * Y}\right) + \frac{(\Delta M_s * \Delta G)}{G^2 * Y} \quad (3.6)$$

3.5.4 Période de consolidation et de conditionnement

Selon la norme LC 22-331 (BNQ, 2015), cette période comporte les étapes de consolidation et de conditionnement. La procédure d'essai adaptée au plan expérimental assure un niveau de compaction à l'étape de la mise en place. Ainsi, cette période sert de conditionnement où la température de l'échantillon est abaissée à la température de l'enceinte thermique programmée à +2,0 °C ± 2,0 °C. La durée de la période de conditionnement varie entre 24 à 48 heures. La Figure 3.15 illustre les systèmes mécaniques du montage en fonction pendant la période de conditionnement. Le tracé jaune schématise le système d'alimentation en air où une pression est appliquée à la tête de l'échantillon pour que le couvercle supérieur reste en contact avec le sol. Le capteur de déplacement enregistre le tassement de l'échantillon. Le tracé noir signifie que le système est inactif. Au moment où l'ensemble des sondes de température affiche une température de l'échantillon au voisinage de +2,0 °C, la période de conditionnement est terminée.

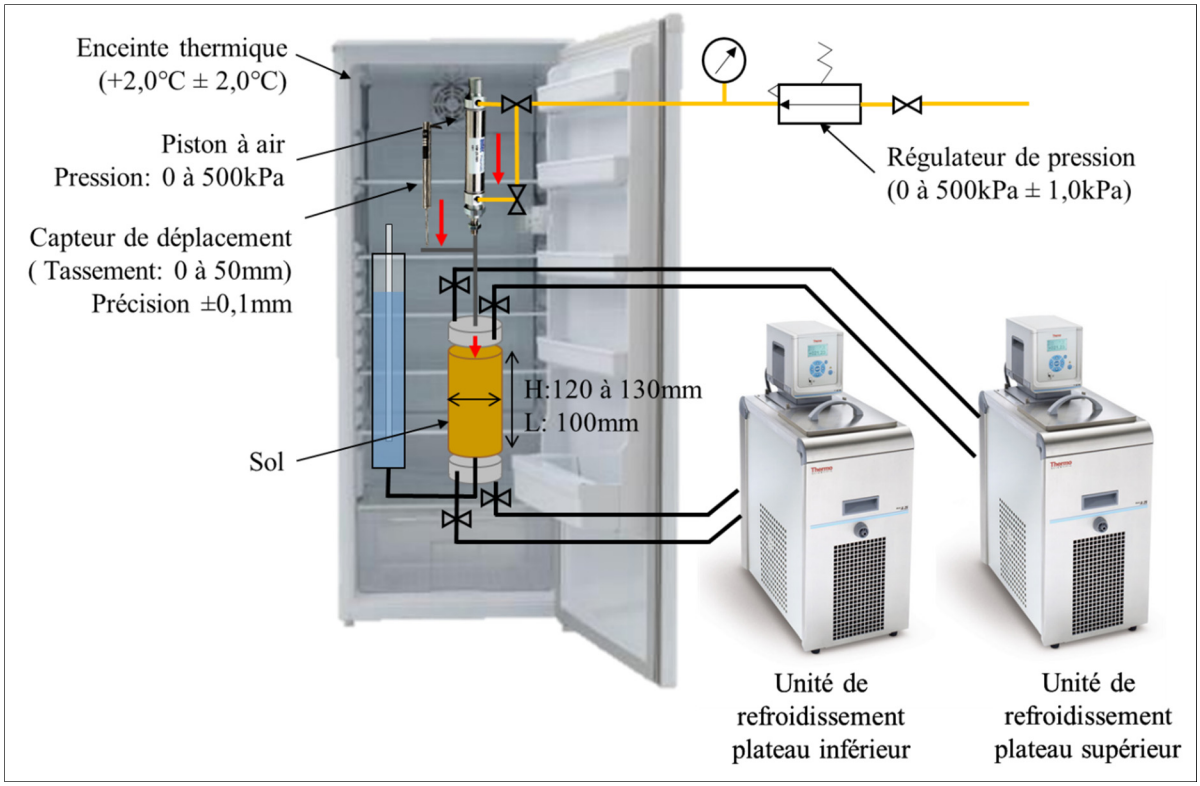


Figure 3.15 Schéma du montage expérimental à l'étape de conditionnement de l'essai SP_0

3.5.5 Mode opératoire

Le mode opératoire consiste à la mise en gel de l'échantillon. L'échantillon est soumis à une période de gel jusqu'à la stabilisation du front de gel. La Figure 3.16 illustre les systèmes du montage en fonction pendant le mode opératoire. La pression est enlevée à la tête de l'échantillon identifié ici par le tracé noir. Le tracé bleu représente la connexion de la réserve d'eau à la base de la cellule, maintenant un niveau d'eau libre à 5,0mm de la base de l'échantillon. Les bains à circulation réfrigérés sont mis en fonction. Le liquide caloporteur contenu dans les réservoirs est refroidi à la température programmée en circuit fermé. Le tracé vert foncé illustre la circulation dans le plateau supérieur du liquide caloporteur refroidi à -4,0 ± 0,05 °C. Le tracé vert pâle schématise le circuit réfrigéré connecté au plateau inférieur dont le liquide caloporteur est refroidi à +1,9±0,05°C. La température du plateau inférieur est plus chaude que celle prescrite par la méthode d'essai LC 22-331 (BNQ, 2015). Les critères de conception de la barrière capillaire requièrent que la barrière soit placée sous le front de gel et

au-dessus du niveau d'eau libre. L'observation de cellule de gel avec une barrière capillaire nécessite que la profondeur du front de gel traverse seulement la partie supérieure de l'échantillon. La température programmée au plateau inférieur contrôle la profondeur de pénétration du front de gel (Konrad et Morgenstern, 1981).

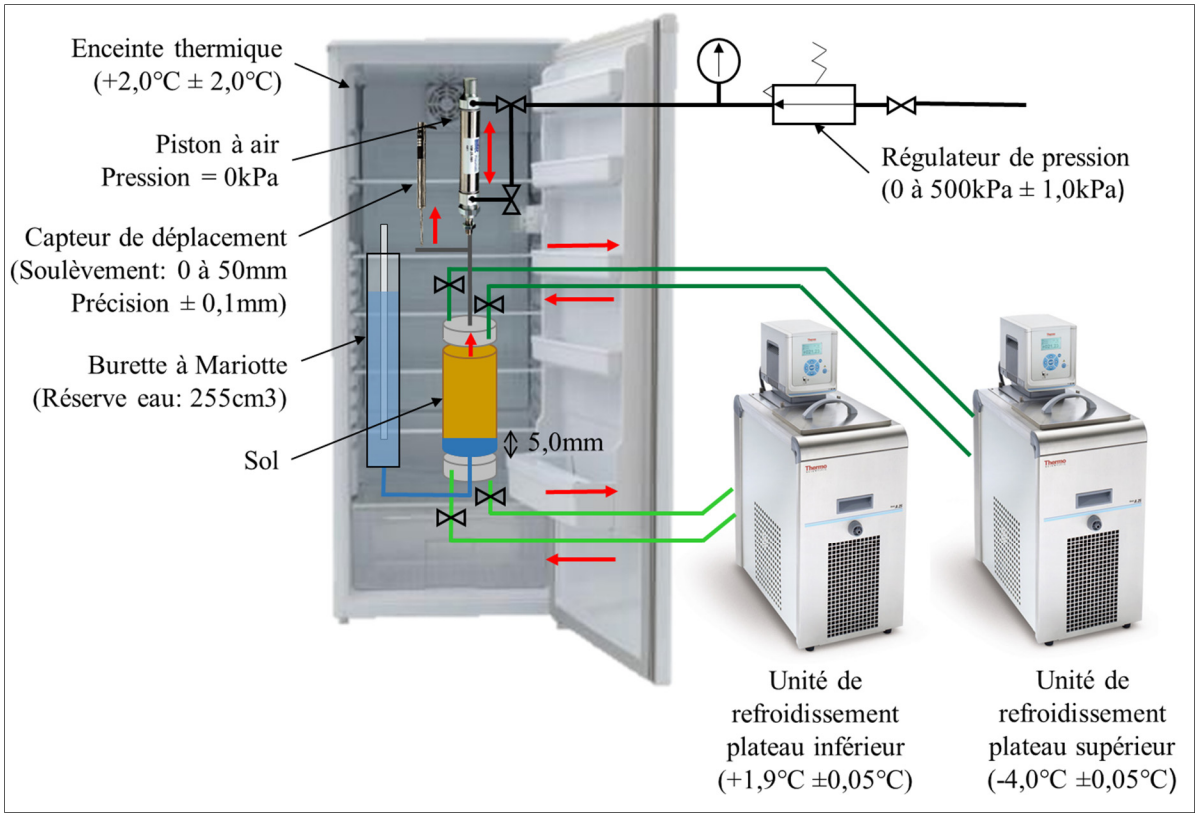


Figure 3.16 Schéma du montage expérimental à l'étape du mode opératoire de l'essai SP_0

3.5.6 Prise de mesures

En cours d'essai, la prise de mesures inclut les températures à travers l'échantillon, la température aux couvercles supérieur et inférieur, la température dans l'enceinte thermique et le déplacement du couvercle supérieur. Des sondes de température d'une précision ±0,05 °C mesurent la température dans l'échantillon, des couvercles et de l'enceinte thermique. Un capteur de déplacement linéaire (LVDT) enregistre le déplacement du couvercle supérieur avec une précision de ±0,1 mm. L'acquisition des données s'effectue selon un intervalle de deux minutes.

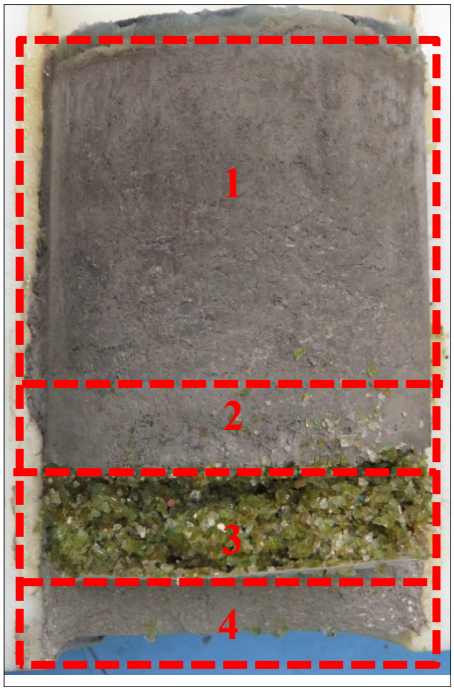
3.5.7 Démontage et prélèvement d'échantillons

Les informations recueillies concernant l'état final de l'échantillon sont la position de la dernière lentille de glace, la hauteur finale de l'échantillon, la teneur en eau et la quantité d'eau consommée.

La température du front de ségrégation est déterminée selon la position de la dernière lentille de glace, la hauteur totale de l'échantillon en fin d'essai et les courbes d'évolution de la température à travers l'échantillon. Les courbes d'évolution de la température à travers l'échantillon sont tirées des mesures enregistrées par les thermistances placées dans la paroi de la cellule. La quantité d'eau consommée pendant l'essai de gel est mesurée selon la diminution du niveau d'eau dans la burette à Mariotte. La teneur en eau est évaluée sur trois sections de l'échantillon de sol uniforme et sans barrière tel que présenté à la Figure 3.17 : (1) la partie supérieure, la zone gelée ; (2) la partie centrale, la zone sous la dernière lentille de glace ; et (3) la partie inférieure, la zone non gelée. Pour un échantillon de sol munie d'une barrière capillaire tel que présenté à la Figure 3.18(a) la teneur en eau est évaluée sur quatre sections : (1) la partie supérieure, la zone gelée ; (2) la partie centrale, la zone sous la dernière lentille de glace ; (3) la barrière capillaire ; et (4) la partie inférieure, la zone non gelée. Pour un échantillon muni de la barrière thermique tel que présenté à la Figure 3.18(b) la teneur en eau est évaluée sur quatre sections : (1) la barrière thermique ; (2) la partie supérieure, la zone gelée ; (3) la partie centrale, la zone sous la dernière lentille de glace ; et (4) la partie inférieure, la zone non gelée.



Figure 3.17 Sections prélevées à la fin de l'essai SP_0 pour un échantillon sans barrière



(a)



(b)

Figure 3.18 Sections prélevées à la fin de l'essai SP_0 pour un échantillon avec une barrière : (a) barrière capillaire et (b) barrière thermique

3.5.8 Calcul du potentiel de ségrégation (SP_0)

Le potentiel de ségrégation est calculé au temps de stabilisation « T_p » lorsque le taux de refroidissement de la frange gelée (dTf/dt) devient inférieur à 0,01°C/h (éq.3.7). Le calcul du taux de refroidissement requiert la connaissance de l'évolution du front de gel et du front de ségrégation à travers l'échantillon en fonction du temps. La température du front de ségrégation est déterminée en fonction de la position de la dernière lentille de glace et du profil de températures à travers l'échantillon, à la fin de l'essai. La pénétration de l'isotherme 0°C et du front de ségrégation à travers l'échantillon sont extraits des données brutes de l'évolution des températures en fonction du temps. Le gradient de température au travers de la frange gelée est déterminé en cours d'essai, selon l'équation 3.7. Le taux de refroidissement de la frange gelée est quant à lui calculé selon l'équation 3.8.

$$Grad(T_f) = \frac{0 - T_{so}}{P_{isotherme\ 0°C} - P_{T_{so}}} \tag{3.7}$$

$$\frac{d(T_f)}{dt} = gradT_f(t + \Delta t) * (\frac{P_{isotherme\ 0°C} - P_{T_{so}}}{\Delta t}) \tag{3.8}$$

Où T_{so} est la température du front de ségrégation (°C), $P_{isotherme\ 0°C}$ est la position du front de gel dans l'échantillon (mm), P_{Tso} est la position du front de ségrégation dans l'échantillon (mm), $gradT_f$ est le gradient de température au travers de la frange gelée (°C /mm) et $d(T_f)/dt$ est le taux de refroidissement de la frange gelée (°C/h). Le potentiel de ségrégation est calculé suivant l'expression des résultats de la norme LC 22-331 présenté à la section 1.5.4.

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats d'essais SP_0 réalisés sur le sol de référence ainsi que la répétabilité des résultats obtenus. Le point de congélation d'équilibre des matériaux étudiés et la température du front de ségrégation obtenue à la fin des essais SP_0 sont mis en comparaison. Les résultats d'essais SP_0 sur les matériaux granulaires relatifs à l'influence de la granulométrie et de la nature granulaire sont présentés. De plus, les résultats d'essais SP_0 incorporant une barrière thermique et capillaire sont aussi exposés où il y est relevé l'influence de la nature granulaire de la barrière. Une analyse approfondie de chacune des phases II, III et IV du projet suit la présentation des résultats SP_0. Dans cette étude, pour des fins de visualisation, les courbes qui affichent les résultats expérimentaux SP_0 sont représentées par un trait plein.

4.1 Résultats de l'essai SP_0 sur le sol de référence

Le sol de référence sélectionné est un silt et argile avec un peu de sable reconstitué en laboratoire. Ce matériau présente une sensibilité au gel dont le niveau de sévérité est élevé. Les caractéristiques et les propriétés géotechniques de ce sol de référence sont présentées aux sections 3.3.3 et 3.4.2.1. Les conditions de mise en place et les paramètres d'essai SP_0 de l'essai de référence SA-3 sont présentés au Tableau 4.1. On y retrouve notamment, les paramètres de mise en place tels que la géométrie de l'échantillon, le degré de saturation (section 3.5.3) et l'état de compaction (section 3.5.2). Les informations relatives à l'étape de conditionnement concernent la pression de surcharge appliquée, la température de l'enceinte, la durée et le tassement de l'échantillon (section 3.5.4). Puis, les informations relatives au mode opératoire impliquent la consommation en eau, la durée du mode opératoire, le soulèvement total et le début du soulèvement de l'échantillon (section 3.5.5). Les Figure 4.1 à 4.3 présentent les résultats SP_0 obtenus sur l'échantillon SA-3 : la pénétration du front de gel, le soulèvement de l'échantillon, le profil des températures à travers l'échantillon au temps T_p et le profil de la teneur en eau en fin d'essai.

Tableau 4.1 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 pour le silt et argile (SA-3)

No. Essai		**SA-3**
Conditionnement	Degré de saturation (%)	93,0
	Précision du degré de saturation (%)	1,1
	Indice des vides	1,01
	Hauteur éprouvette (cm)	12,19
	Masse volumique sèche (g/cm3)	1,34
	Pression de surcharge (kPa)	45,0
	Durée de Conditionnement (heure)	42,5
	Tassement total (mm)	0,3
	Température Enceinte (°C)	+ 4,41
M.O	Début du soulèvement (heure)	7,67
	Consommation en eau (cm3)	149,0
	Durée Mode Opératoire (heure)	117,2
	Soulèvement total (mm)	21,5

La Figure 4.1 présente deux courbes dont l'évolution de la pénétration du front de gel, l'isotherme 0°C à l'intérieur du sol (trait bleu foncé) ainsi que le soulèvement de l'échantillon en fonction du temps, pendant le mode opératoire (M.O.) (trait bleu pâle). À partir de la courbe de l'évolution du front de gel en fonction du temps, on repère les quatre évènements du processus de congélation d'un système sol-eau dont le sur-refroidissement, la nucléation spontanée, la formation de cristaux de glace et la croissance des cristaux de glace tels que présentés à la section 1.4.6.

Durant les premières heures du mode opératoire, on observe un taux de progression du front de gel élevé. Le changement rapide des températures à travers le sol produit un haut niveau de refroidissement associé à l'évènement de sur-refroidissement. Durant, le sur-refroidissement on n'observe aucun soulèvement de l'échantillon. Après 9 heures, on constate une régression du front de gel. Ce recul est causé par le dégagement de la chaleur latente qui élève la température du système sol-eau à la température de congélation. Cette réaction exothermique est associée à la formation des premiers cristaux de glace et elle est accompagnée de l'amorcement du soulèvement de l'échantillon. Au début de la période de cristallisation se produit un taux très élevé de soulèvement de l'échantillon puisque l'eau disponible dans les

pores gèle rapidement. Puis, le front de gel pénètre progressivement à l'intérieur du sol et l'eau est graduellement acheminée au front de ségrégation pour se stabiliser et pour finalement geler. Les conditions thermiques se stabilisent et le front de gel devient stationnaire à une profondeur de 67,28mm dans l'échantillon SA-3. Le temps de stabilisation (T_p) associé à un taux de refroidissement de la frange gelée de 0,01°C/h est déterminé au temps 51,90 heures. Au temps T_p, un taux de soulèvement de 0,173mm/h et un gradient thermique de 0,026°C/mm sont calculés à partir des courbes présentées aux Figure 4.1 et 4.2.

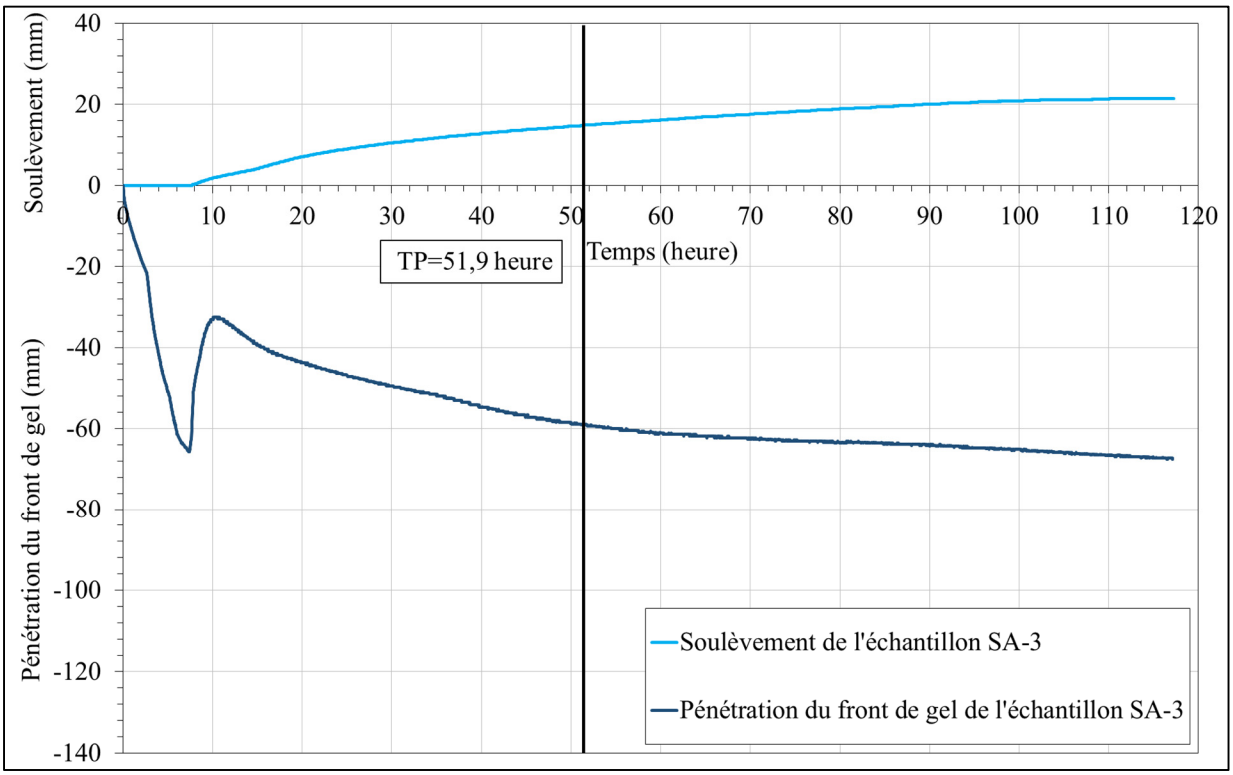


Figure 4.1 Pénétration du front de gel et soulèvement en fonction du temps du sol de référence (SA-3) (Hauteur de l'échantillon initiale 121,9 mm)

À la fin de l'essai SP_0, la teneur en eau est établie sur au moins trois parties de l'échantillon telle que présentée à la Figure 4.3. Deux teneurs en eau sont présentes à l'interface de la partie gelée et non gelée. Le profil de teneur en eau montre une augmentation de 45% de la teneur en eau par rapport à l'état initial dans la partie supérieure de l'échantillon, la partie gelée. En dessous du niveau de stabilisation du front de gel, la teneur en eau est équivalente à celle notée en début d'essai.

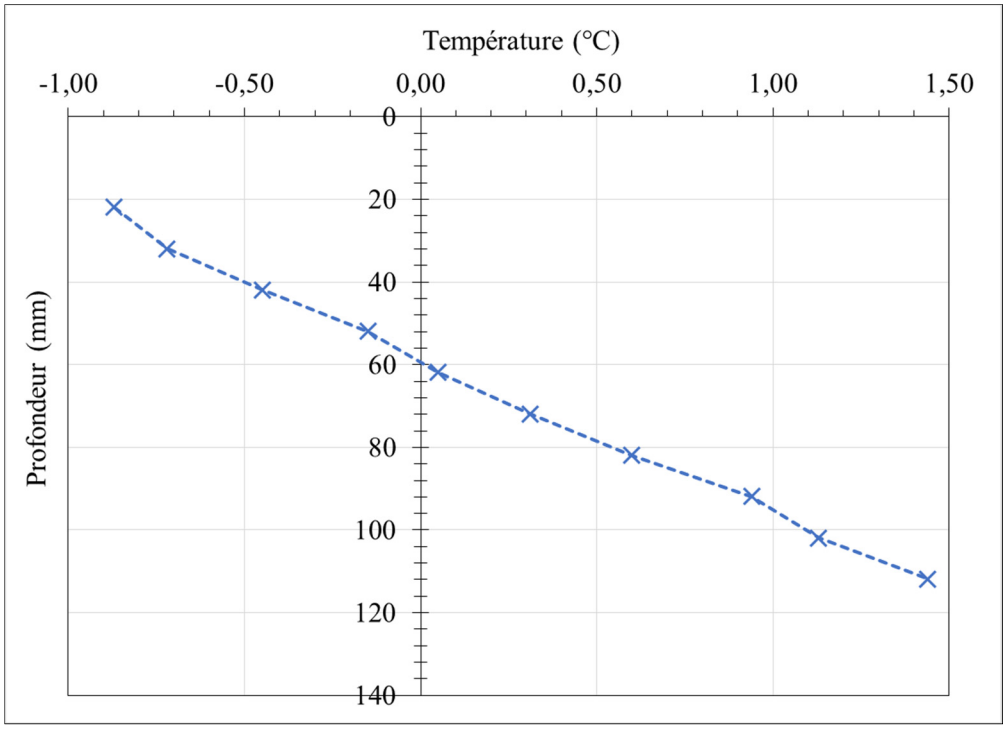


Figure 4.2 Profil de températures en fonction de la profondeur au temps de stabilisation T_P (51,9 heure) du sol de référence (SA-3)

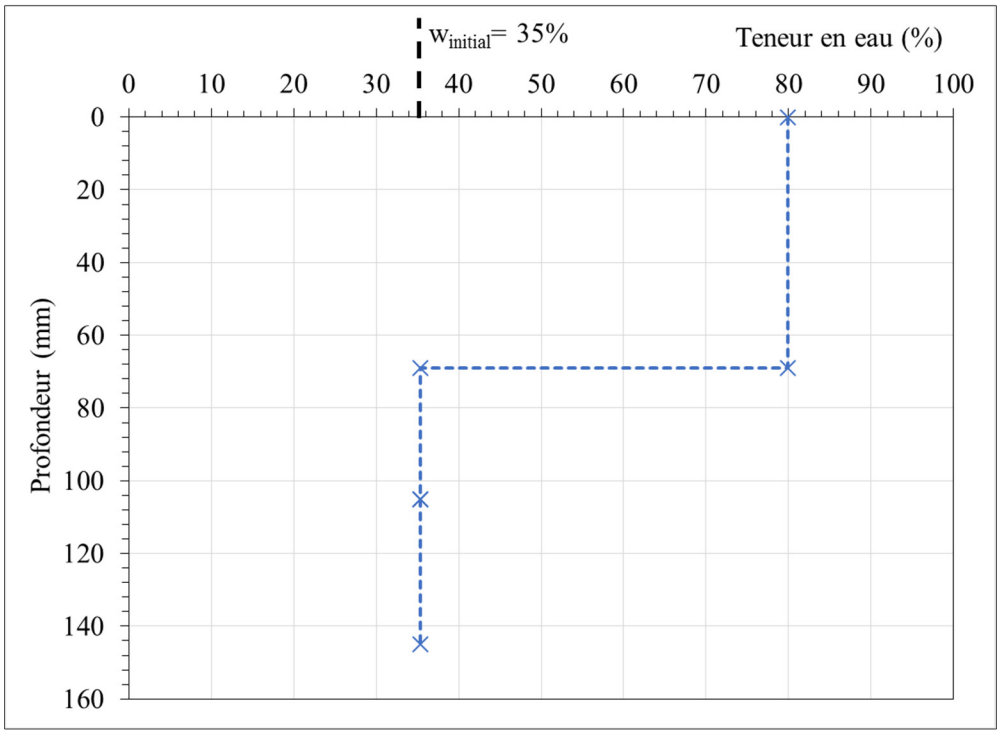


Figure 4.3 Profil des teneurs en eau du sol de référence (SA-3) en fin d'essai

La fidélité des résultats obtenus avec le montage expérimental est vérifiée selon le critère de répétabilité. La répétabilité des résultats d'essais SP_0 consiste à répéter des essais de gel sur un matériau de référence selon des conditions de mise en place et opérationnelles préétablies. Ce critère permet de définir l'écart des résultats du potentiel de ségrégation effectués avec le montage expérimental pour différents échantillons composés du même matériau.

Le Tableau 4.2 montre l'ensemble des résultats des essais SP_0 réalisés sur le sol de référence : le temps de stabilisation T_p qui souligne le début du régime permanent (section 1.5.1) ; la position du front de gel ; la température du front de ségrégation et sa position (section 1.5.5 et 3.5.7) ; la succion moyenne de la frange gelée (section 1.5.2.1) ; le taux de soulèvement, le gradient thermique ; la vitesse d'écoulement d'eau au temps T_p permettant de calculer le potentiel de ségrégation (section 1.5.4) ; la teneur en eau en fin d'essai sur les trois sections de l'échantillon (section 3.5.7) ; et l'échelle de gélivité du potentiel de ségrégation (section 1.5.6).

Tableau 4.2 Résultats d'essai SP_0 du sol de référence (SA)

No. Essai	**SA-1**	**SA-2**	**SA-3**	**SA-4**
Régime thermique (Tp) heures	54,13	55,30	51,90	84,45
Profondeur du front de gel (mm)	61,8 (49,0%)	67,5 (52,9%)	67,3 (55,3%)	75,1 (60,2%)
Température Tso (°C)	-0,48	-0,43	-0,48	-0,52
Profondeur Tso (mm)	43,20	52,98	49,32	50,68
Épaisseur de la frange gelée (mm)	18,5	15,4	18,5	23,6
Succion (cm H_2O)	-59,8	-53,6	-59,8	-64,9
Taux de soulèvement (T_{soul}) mm/h [1]	0,171	0,182	0,173	0,173
Gradient thermique (Φ) °C/mm [1]	0,026	0,028	0,026	0,022
Vitesse d'écoulement d'eau (mm/h)[1]	0,157	0,167	0,159	0,159
Teneur en eau (%) (Haut/Centre/Bas)	74 / 40 / 40	75 / 37 / 39	80 / 35 / 35	82 / 35 / 36
Potentiel de ségrégation (mm^2/°C·h)	6,0	6,0	6,1	7,2
Échelle de gélivité	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé

Note [1] : Résultats représentés tel que présentés dans la méthode d'essai LC 22-331

L'essai SA-3 est considéré le plus représentatif de l'ensemble des essais réalisés sur le sol de référence. Le Tableau 4.3 présente l'écart du taux de soulèvement, du gradient thermique et du potentiel de ségrégation avec les résultats de l'essai SA-3. Un système thermique un peu différent s'est produit pour l'essai SA-4 où le soulèvement a débuté après 30 heures de gel.

Ainsi, l'essai SA-4 n'est pas considéré à titre comparatif pour déterminer l'écart des résultats du montage expérimental. L'écart des résultats déterminé pour le taux de soulèvement est de ±7,7%, de ±5,2% pour le gradient thermique et de ±1,6% pour le potentiel de ségrégation. Un écart des résultats inférieur à 10% était visé. L'ensemble des résultats d'essais SP_0 sur le sol de référence incluant SA-1, SA-2, SA-3 et SA-4 et des photos des échantillons à la fin de l'essai SP_0 sont présentées à l'Annexe VIII.

Tableau 4.3 Écarts des résultats SP_0 du sol de référence par rapport à SA-3

No. Essai	**SA-1 / SA-3**	**SA-2 / SA-3**	**SA-4 / SA-3**
Taux de soulèvement (T_{soul}) mm/h	1,2%	5,2%	0,0%
Gradient thermique (Φ) °C/mm	0,0%	7,7%	15,4%
Potentiel de ségrégation (mm^2/°C·h)	1,6%	1,6%	18,0%

4.2 Température de congélation d'équilibre (Tf) des matériaux étudiés

Les paramètres de mise en place et les résultats des essais de point de congélation d'équilibre (T_f) effectués dans la chambre thermique réalisés sur les trois classes granulaires de VPC (section 3.4), la pierre calcaire (classe GE) et le sol de référence sont donnés aux Tableaux 4.4 et 4.5. Ce Tableau précise également pour chaque essai : la masse volumique sèche (ρ_d), la porosité (n%), la teneur en eau (w%) ainsi que le degré de saturation (Sr). Une variation de ± 2,0°C de la température de l'enceinte thermique a causé une variation régulière de la température de congélation d'équilibre T_f enregistrée. Cette variation de la température a réduit le niveau de précision des résultats d'essai T_f. La précision de la température du point de congélation est affichée au Tableau 4.5. La température du front de ségrégation obtenue à partir des essais SP_0 est affichée au Tableau 4.5 à titre comparatif au point de congélation d'équilibre T_f obtenu. À noter, lors de l'essai SP_0 sur l'échantillon de VPC de la classe GI, la température du front de ségrégation n'a pas été déterminée puisque la partie gelée n'était pas suffisamment solide pour mesurer la hauteur du sol gelé. L'essai de congélation d'équilibre a été réalisé sur deux échantillons du même matériau pour l'ensemble des matériaux à l'étude. Les courbes de refroidissement en fonction du temps de chacun des matériaux à l'étude sont présentées à l'Annexe IX.

Tableau 4.4 Paramètres de mise en place des essais de point de congélation d'équilibre (T_f) des matériaux à l'étude

Matériau	Classe granulaire / no Essai	Profondeur Sonde de temp. (cm)	Masse volumique sèche ρd (g/cm^3)	Porosité n (%)	Teneur en eau w(%)	Degré de saturation (Sr%)
VPC	GE / TCI	3,1	1,74	30,5	13,1	86
	GE / TC2	3,0	1,76	29,6	12,8	87
	GI / TC3	3,2	1,49	40,2	18,8	86
	GI / TC4	3,2	1,48	40,6	19,3	87
	GF / TC5	3,0	1,64	34,5	16,2	92
	GF / TC6	3,2	1,61	35,8	16,5	89
Calcaire	GE / TC7	3,0	1,98	29,1	11,5	89
	GE / TC8	3,0	1,99	28,7	11,4	89
Silt et argile	SA / no.4	3,5	1,25	53,5	39,0	94
	SA / no.5	3,4	1,12	58,3	49,2	97

Tableau 4.5 Résultats des essais de point de congélation d'équilibre (T_f) des matériaux à l'étude

Maté-riau	Classe granulaire / no Essai	Profondeur Sonde de temp. (cm)	Température congélation d'équilibre T_f (°C)	Précision Température T_f (°C)	Temp. Front de ségré-gation Ts (°C)	Écart maximal Temp. (°C) T_f et Ts
VPC	GE / TCI	3,1	-0,42	±0,02	-0,34	-0,08
	GE / TC2	3,0	-0,28	±0,04		
	GI / TC3	3,2	-0,35	±0,02	N/D	N/A
	GI / TC4	3,2	-0,35	±0,04		
	GF / TC5	3,0	-0,44	±0,01	-0,44	-0,04
	GF / TC6	3,2	-0,48	±0,02		
Calcaire	GE / TC7	3,0	-0,21	±0,07	-0,21	-0,06
	GE / TC8	3,0	-0,27	±0,02		
Silt et Argile	SA / no.4	3,5	-0,48	±0,03	-0,48	-0,21
	SA / no.5	3,4	-0,69	±0,02		

Pour les classes granulaires de VPC, la classe GF possède une température de congélation plus froide, comparativement aux classes GE et GI qui présentent des températures de congélation semblables. La classe de VPC GE obtient une température de congélation plus basse que la pierre calcaire.

4.3 Résultats des essais SP_0 selon la taille des granulats de VPC

L'influence de la granulométrie sur la sensibilité au gel du VPC a été évaluée au travers des essais SP_0 effectués sur trois classes granulaires. Les classes GE et GF comportent une distribution granulométrique plus étalée comparativement à la classe GI. Une distribution granulométrique plus étalée favorise la capacité de compaction résultant en une porosité plus basse. La classe GI possède une granulométrie uniforme dans le but d'augmenter la porosité et réduire les contacts entre les grains, ainsi elle comporte une masse volumique sèche plus faible. Les classes granulaires à l'étude ne comportent pas de particules fines (diamètre < 80µm). Les conditions de mise en place et les paramètres d'essais SP_0 pour les trois classes granulaires de VPC sont présentés au Tableau 4.6. Durant les essais SP_0, aucun soulèvement n'a été enregistré pour l'ensemble des classes granulaires de VPC.

Tableau 4.6 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 pour les trois classes granulaires de VPC

No. Essai		**VPC-GE**	**VPC-GI**	**VPC-GF**
Classe granulométrique (mm)		GE (0,08-5,0)	GI (0,63-2,5)	GF (0,08-1,25)
Mise en place	Degré de saturation (%)	94,0	95,0	98,0
	Précision du degré de saturation (%)	1,7	0,7	1,3
	Porosité (%)	24,5	41,1	31,9
	Hauteur éprouvette (cm)	12,75	12,55	12,69
	Masse volumique (g/cm3) (%Proctor)	1,88 (102,0%)	1,47 (99,5%)	1,70 (98,7%)
Cond.	Pression de surcharge (kPa)	15	25	15
	Durée de Conditionnement (heures)	50,5	28,2	24,6
	Tassement total (mm)	0,3	0,4	0,1
	Température Enceinte (°C)	+2,35	+ 2,48	+ 2,48
M. O.	Consommation en eau (cm3)	8,9	8,9	3,1
	Durée Mode Opératoire (heures)	117,6	66,3	46,2
	Soulèvement total (mm)	0,0	0,0	0,1

La Figure 4.4 illustre l'évolution de la pénétration du front de gel en fonction du temps pour les trois classes granulaires. Le front de gel se stabilise à une hauteur de 71,3mm et 75,8mm pour les classes GI et GF, tandis que pour la classe GE, il atteint une profondeur de 83,61mm. Pour les classes granulaires GI et GF, le front de gel se stabilise après respectivement 13 et 12 heures de période de gel, tandis que pour la classe GE, il se stabilise après 53 heures.

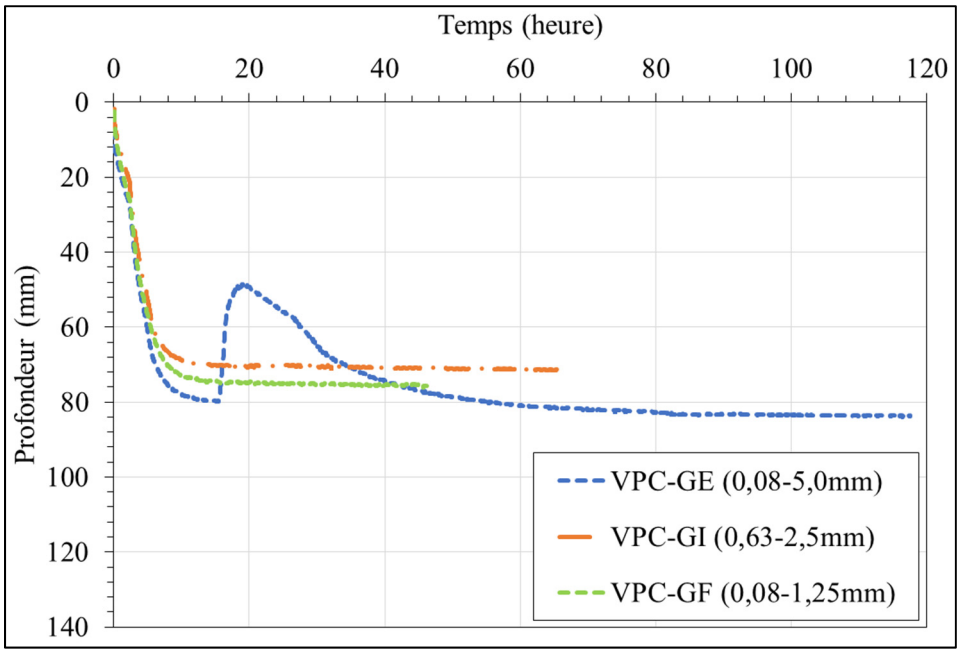


Figure 4.4 Progression du front gel en fonction du temps
sur les trois classes granulaires de VPC

Le profil des températures à travers l'échantillon au temps de stabilisation du front de gel pour les trois classes granulaires de VPC est présenté à la Figure 4.5. Le gradient thermique à travers la frange gelée est de 0,030 °C/mm pour les classes granulaires GE et GF, tandis que pour la classe GI, il est légèrement plus élevé à 0,037°C/mm. La distribution des températures à travers l'échantillon de la classe GE est légèrement plus chaude et étalée comparativement aux profils des températures de la classe GI et GF qui présentent un comportement semblable.

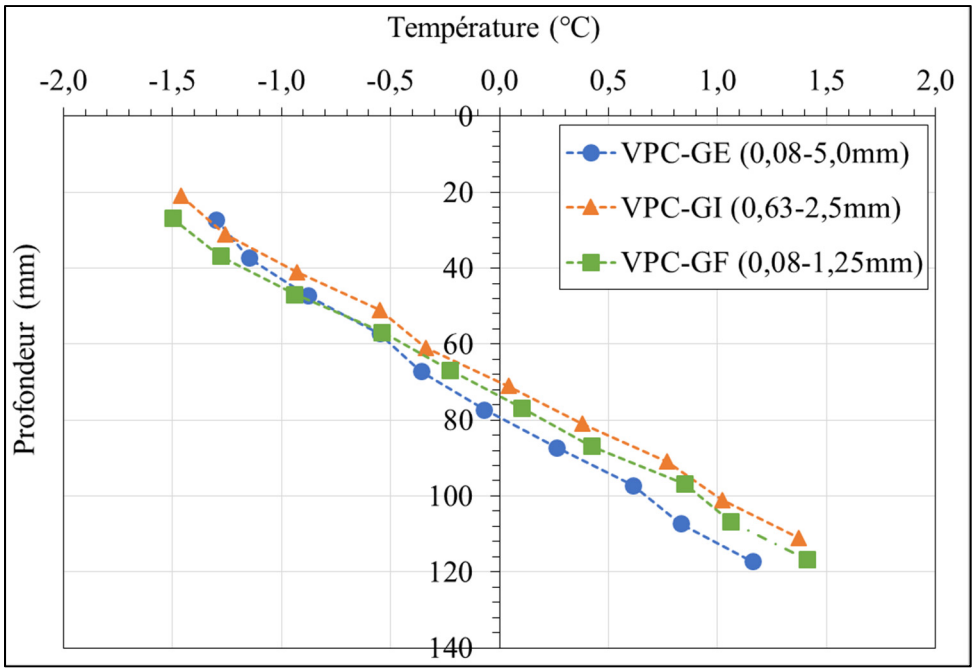


Figure 4.5 Profils de températures en fonction de la profondeur au temps de stabilisation T_P des trois classes granulaires de VPC

La Figure 4.6 présente le profil de teneur en eau en fonction de la profondeur des trois classes granulaires de VPC. Les classes GE et GF affichent une légère augmentation de 3,0% et 2,0% de la teneur en eau à la base de la partie gelée par rapport à l'état initial. Dans le cas de la classe GI, on relève une baisse de la quantité d'eau par rapport à l'état initial. De plus, la quantité d'eau consommée pour les trois classes granulaires durant le mode opératoire est considérée négligeable.

Le Tableau 4.7 regroupe les résultats des essais SP_0 réalisés sur les trois classes granulaires de VPC. Le potentiel de ségrégation est considéré négligeable, étant donné qu'il ne s'est produit aucun soulèvement et la teneur en eau dans les échantillons est plus élevée dans la partie non gelée. À noter, lors de l'essai SP_0 sur l'échantillon de VPC de la classe GI, la température du front de ségrégation n'a pas été déterminée puisque la partie gelée n'était pas suffisamment solide pour mesurer la hauteur du sol gelé. Des photos des échantillons de VPC des trois classes granulaires à la fin de l'essai SP_0 sont présentées à l'Annexe VIII.

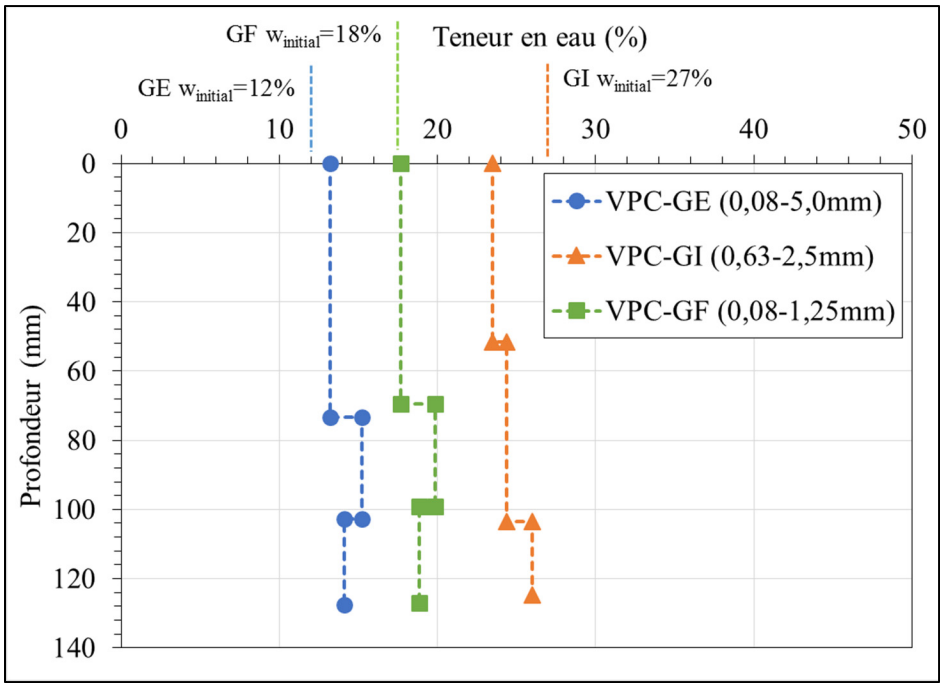


Figure 4.6 Profils de teneurs en eau en fonction de la profondeur en fin d'essai des trois classes granulaires de VPC

Tableau 4.7 Résultats des essais SP_0 sur les trois classes granulaires de VPC

No. Essai	**VPC-GE**	**VPC-GI**	**VPC-GF**
Classe granulométrique (mm)	GE (0,08-5,0)	GI (0,63-2,5)	GF (0,08-1,25)
Régime thermique Tp) heures	53	13	12
Profondeur du front de gel (Ti) (mm)	83,6 (65,6%)	71,3 (58,9%)	75,6 (59,6%)
Température Tso (°C)	-0,34	N/D	-0,44
Profondeur Tso (mm)	68,2	N/D	61,6
Épaisseur de la frange de glace (mm)	11,3	N/D	14,6
Taux de soulèvement (T_{soul}) mm/h [1]	0,0	0,0	0,0
Gradient thermique (Φ) °C/mm [1]	0,030	0,037	0,030
Vitesse d'écoulement de l'eau (mm/h) [1]	0,0	0,0	0,0
Teneur en eau (%) (Haut/Centre/Bas)	13 / 15 / 14	24 / 24 / 26	18 / 20 / 19
Potentiel de ségrégation (mm^2/°C·h)	0,0	0,0	0,0
Échelle de gélivité	Négligeable	Négligeable	Négligeable

Note [1] : Résultats représentés tel que présentés dans la méthode d'essai LC 22-331

4.3.1 Analyse des résultats SP_0 selon la taille des granulats de VPC

La variabilité de la sensibilité au gel d'un matériau à grains grossiers liée à la granulométrie est attribuée aux paramètres décrivant les particules fines (<80µm) comme le diamètre moyen (d_{50}(FF)), la porosité (n_f), la minéralogie et le coefficient d'uniformité (C_u(FF)). La présence de particules fines à l'intérieur d'un corps granulaire grossier influence l'arrangement structural des particules et la porosité du matériau granulaire. En laboratoire, des essais de gel sur des matériaux à grains grossiers comportant différentes teneurs en particules fines ont présenté dans tous les cas des soulèvements dus au gel selon des amplitudes variables (Bilodeau, Dore et Pierre, 2008) (Konrad, 2008; Konrad et Lemieux, 2005) (Spencer Guthrie et Hermansson, 2003). Bilodeau (2008) illustre l'influence de la distribution granulométrique sur la sensibilité au gel pour un matériau de même nature granulaire comme étant principalement reliée à la porosité de la fraction fine (n_f) (Figure 1.16). La porosité de la fraction fine (n_f) quantifie la dispersion et la compaction des fines à l'intérieur des vides du squelette granulaire de la fraction grossière. En fait, la quantité de particules fines qui remplit les vides de la fraction grossière favorise le maintien du réseau de canaux capillaires qui conduit l'eau vers le front de gel. L'établissement de la sensibilité au gel des matériaux à grains grossiers est principalement évalué à partir de la teneur en eau dans les parties gelées et non gelées. La présence de la migration de l'eau induite par le front de gel est signifiée par une augmentation substantielle de la teneur en eau dans la partie gelée.

La comparaison de la réponse au gel des classes granulaires de VPC à l'étude considère comme critères de performance : le soulèvement au gel, le profil de teneur en eau, la conductivité thermique, le gradient de température de la frange gelée et le potentiel de ségrégation.

La sélection des classes granulaires à l'étude vise à l'observation de différents arrangements granulaires dont le comportement au gel est stable. Le retrait des particules fines des classes granulaires diminue le risque de déformations des matériaux granulaires sous des conditions de gel comme représenté à la Figure 1.16. Les résultats expérimentaux soutiennent cette hypothèse où l'ensemble des classes granulaires de VPC n'a enregistré aucun soulèvement dû

au gel. Dans le cas d'un sol non gélif, il est tout de même anticipé un soulèvement normalisé associé au changement volumique de l'eau interstitielle en glace contenue dans la portion de sol gelée, et ce en fonction du degré de saturation (1.5.2). Ces résultats expérimentaux suggèrent que les classes granulaires de VPC disposent d'une porosité suffisante de la matrice granulaire permettant la formation de cristaux de glace dans les pores du sol sans provoquer de déformations de la surface (Spencer Guthrie et Hermansson, 2003).

Une porosité élevée du matériau granulaire entraine une réduction de la capacité de migration de l'eau dans la zone gelée en raison d'une diminution de la continuité du film d'eau. Sans compter qu'un espace poreux vide du squelette granulaire grossier favorise la formation de glace dont les cristaux remplissent complètement les pores (Konrad, 2008). L'absence de particules fines exige l'usage de la porosité de la fraction grossière à titre comparatif des classes granulaires à l'étude. D'après la Figure 4.6, au niveau de la zone gelée, les classes GI et GF (n_{GI}=41,1% ; n_{GF} 31,9%) ne présentent aucun signe de succion au front de gel puisque la teneur en eau de la partie gelée est équivalente ou inférieure à l'état initial. La classe GE dont la valeur de porosité est la plus faible (n_{GE}=24,6%) présente une légère augmentation de 1% par rapport à la teneur en eau initiale. Cependant, une teneur en eau plus élevée de 2,0% dans la partie non gelée de l'échantillon suggère qu'il ne s'est pas produit de succion de l'eau au front de gel. Les profils de teneur en eau des classes granulaires confirment les observations faites par Bilodeau, Dore et Pierre (2008) où le risque de la sensibilité au gel augmente avec une valeur de la porosité qui diminue.

Les propriétés thermiques propres à un matériau influencent le comportement au gel d'un matériau granulaire. La conductivité thermique des classes granulaires de VPC est principalement influencée par la porosité et la teneur en eau volumique (Berraha, 2017), (Farouki, 1986). Dans un état saturé, la profondeur de stabilisation du front de gel est plus grande selon la diminution de la porosité de la classe granulaire telle que présentée à la Figure 4.4. La granulométrie plus étalée des classes GE et GF contribue à l'atteinte d'une masse volumique sèche plus élevée et une porosité plus faible menant à une amélioration de la

conductivité thermique et donc de la pénétration du front de gel telles que mentionnées par Farouki (1986).

Les résultats expérimentaux sur les classes granulaires de VPC suggèrent que ce matériau granulaire est non susceptible au gel puisque sa déformation au gel est inférieure à 1,0% et que la distribution de la teneur en eau est croissante avec la profondeur (Konrad et Lemieux; 2005). Toutefois, en se basant sur la hauteur de pénétration du front de gel moins profonde, le gradient thermique plus élevé et un profil de teneur en eau croissant avec la profondeur, la classe GI présente le comportement le plus stable en condition de gel.

4.4 Résultats des essais SP_0 selon la nature granulaire

L'influence de la nature granulaire sur la sensibilité au gel a été évaluée au travers des essais SP_0 effectués sur le sable de VPC et de pierre calcaire, selon la classe granulaire GE. Le Tableau 4.8 présente les conditions de mise en place et les paramètres d'essais du SP_0 effectués sur le VPC et la pierre calcaire.

Tableau 4.8 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 menés sur le VPC et la pierre calcaire

Matériau		**VPC**	**Calcaire**
Classe granulométrique		GE (0,08-5,0 mm)	
Mise en place	Degré de saturation (%)	94,0	91,0
	Précision du degré de saturation (%)	1,7	0,9
	Porosité (%)	24,5	35,4
	Hauteur éprouvette (cm)	12,75	12,26
	Masse volumique (g/cm3) (%Proctor)	1,88 (102,0%)	1,80 (91,2%)
Cond.	Pression de surcharge (kPa)	15	10
	Durée de Conditionnement (heures)	50,5	51,0
	Tassement total (mm)	0,3	0,0
	Température Enceinte (°C)	+2,35	+ 2,22
M. O.	Consommation en eau (cm3)	8,9	4,9
	Durée Mode Opératoire (heures)	117,6	90,5
	Soulèvement total (mm)	0,0	0,1

Durant les essais SP_0, aucun soulèvement n'a été enregistré pour les sables de VPC et de pierre calcaire. La Figure 4.7 montre la progression du front de gel en fonction du temps dans les échantillons de VPC et de pierre calcaire. Dans les deux cas, on observe une période de super refroidissement, puis une réaction exothermique qui élève la température du système. Ensuite, le front de gel descend plus profondément dans le sable de VPC pour atteindre une profondeur de 83,61mm, tandis que pour la pierre calcaire, il se stabilise à 79,8mm. Le front de gel parcourt aux environs de 65% de la hauteur des échantillons. Le front de gel nécessite 13 heures supplémentaires pour atteindre le régime permanent dans l'échantillon de VPC.

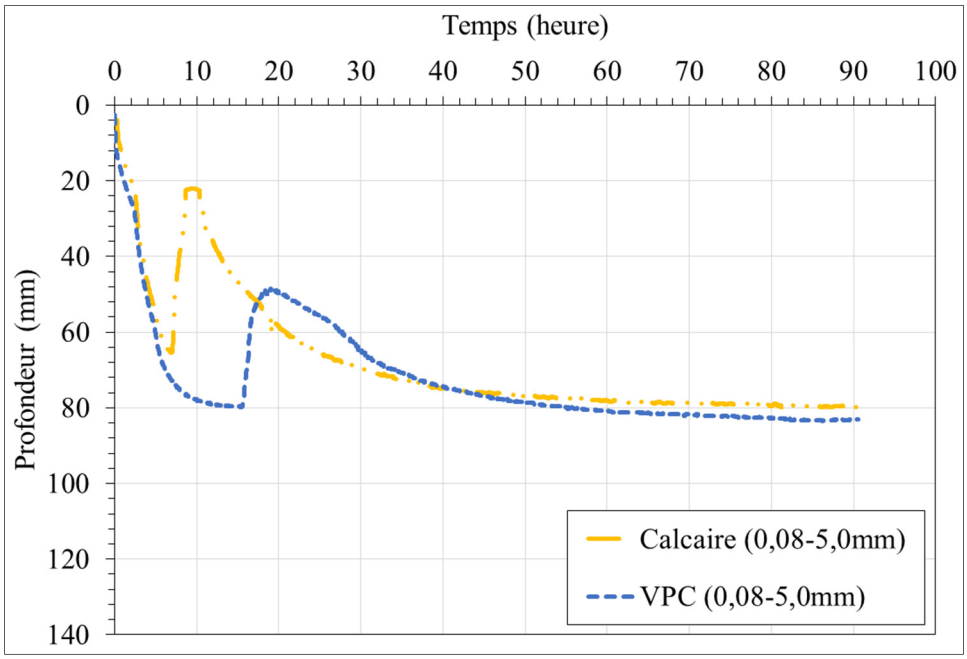


Figure 4.7 Progression du front gel en fonction du temps à travers les échantillons de VPC et de pierre calcaire

Le profil de températures à travers les échantillons de VPC et de pierre calcaire sont présentés à la Figure 4.8. La distribution des températures à travers les échantillons est très similaire et le gradient thermique de la frange gelée est de 0,030 °C/mm pour les deux matériaux. La Figure 4.9 montre le profil de teneurs en eau en fonction de la profondeur, en fin d'essai. Une accumulation d'eau de 2,0% et de 1% par rapport à la teneur en eau initiale est observée dans la partie gelée de l'échantillon de pierre calcaire et de VPC. Dans les deux cas, la consommation en eau à partir de la réserve est plutôt faible. Les résultats d'essai SP_0 sur le

VPC et la pierre calcaire sont présentés au Tableau 4.9. Des photos des échantillons de VPC et de pierre calcaire à la fin de l'essai SP_0 sont présentées à l'Annexe VIII.

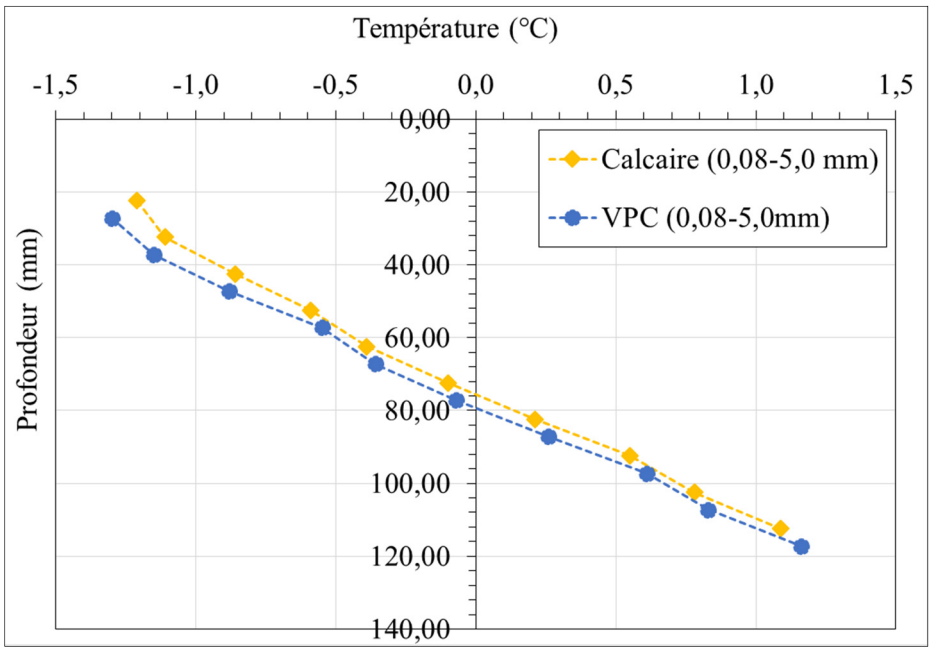


Figure 4.8 Profils de températures en fonction du temps au temps de stabilisation T_P des échantillons de VPC et de pierre calcaire

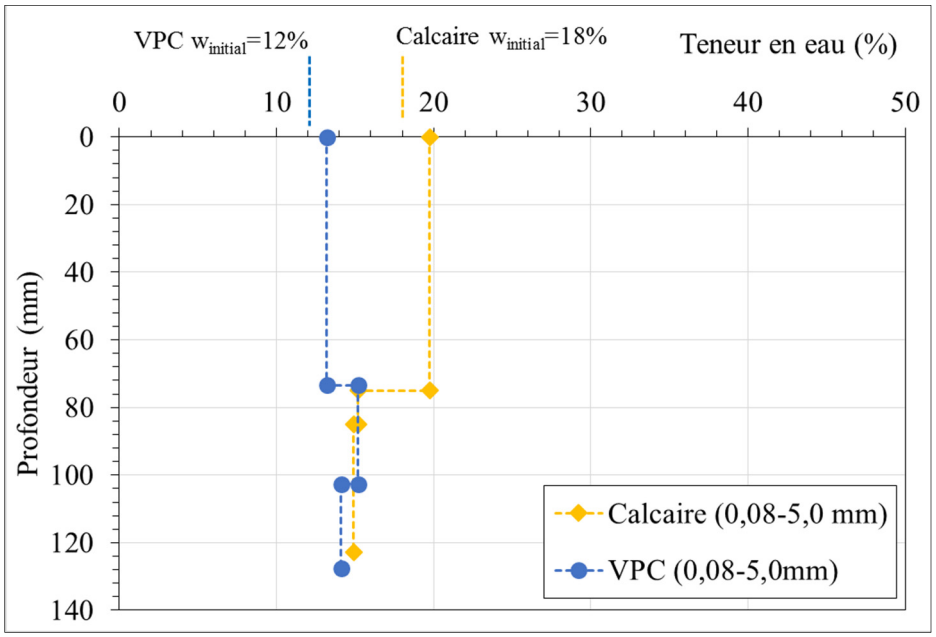


Figure 4.9 Profils de teneurs en eau en fonction de la profondeur en fin d'essai des échantillons de VPC et de pierre calcaire

Tableau 4.9 Résultats des essais SP_0 sur le verre et la pierre calcaire

Matériau	**VPC**	**Calcaire**
Classe granulométrique	GE (0,08-5,0 mm)	
Régime thermique (Tp) heures	53	40
Profondeur du front de gel (Ti) (mm)	83,6 (65,6%)	79,8 (65,0%)
Température Tso (°C)	-0,34	-0,27
Profondeur Tso (mm)	68,2	72,0
Épaisseur de la frange de glace (mm)	11,3	9,0
Taux de soulèvement (T_{soul}) mm/h [1]	0,0	0,0
Gradient thermique (Φ) °C/mm [1]	0,030	0,030
Vitesse d'écoulement de l'eau (mm/h) [1]	0,0	0,0
Teneur en eau (%) (Haut/Centre/Bas)	13 / 15 / 14	20 /15 / 15
Potentiel de ségrégation ($mm^2/°C \cdot h$)	0,0	0,0
Échelle de gélivité	Négligeable	Négligeable

Note [1]: Résultats représentés tel que présentés dans la méthode d'essai LC 22-331

4.4.1 Analyse des résultats SP_0 selon la nature granulaire

La caractérisation au gel en fonction de la nature granulaire est décrite selon les propriétés physiques des particules fines incluant la surface spécifique, le diamètre moyen ($d_{50}FF$), le coefficient d'uniformité (C_uF) et la porosité (n_f) (Bilodeau, Dore et Pierre, 2008). À travers le corps granulaire, le réseau d'eau interstitielle peut se diviser en deux niveaux tels que l'eau adsorbée à la surface des grains et l'eau du réseau capillaire. L'épaisseur du film d'eau adsorbée est fortement influencée par la surface minérale des grains solides. Konrad (1999) et Bilodeau (2008) utilisent la caractéristique de surface spécifique de la fraction fine (SsF) pour quantifier l'eau non gelée maintenue à la surface des grains. L'augmentation de la surface spécifique permet de maintenir le réseau d'eau capillaire à travers le squelette granulaire grossier. Le réseau d'eau capillaire est la source principale d'alimentation en eau au front de gel. Dans les sols grossiers, l'influence de la surface spécifique de la fraction fine augmente avec la diminution de la teneur en fine. L'absence de particules fines dans la classe GE exige la considération des caractéristiques physiques de la fraction grossière (<400µm). La comparaison de la réponse au gel en fonction de la nature granulaire s'appuie sur trois critères

de performance : le profil de teneur en eau, la conductivité thermique et le potentiel de ségrégation.

La caractérisation au gel des sols granulaires grossiers est principalement basée à partir de la redistribution de la teneur en eau sous des gradients de succion à la fin de l'essai de congélation. D'après la Figure 4.9, la teneur en eau dans le haut de l'échantillon de pierre calcaire est 2,0% plus élevée par rapport à l'état initial et 5,0% plus élevée que le sol non gelé. Une augmentation de la teneur en eau dans la partie gelée confirme qu'il s'est produit une succion au front de gel. La diminution de 3,0% de la teneur en eau du sol non gelé par rapport à l'état initial et la faible consommation en eau de 4,9ml, suggère que la source d'alimentation en eau principale au front de gel provient de l'eau interne du corps granulaire. Comme représenté à la Figure 4.10 par Spencer Guthrie et Hermansson (2003), l'eau interne contenue dans le matériau granulaire est une source suffisante pour induire une accumulation de l'eau dans la partie gelée et produire ainsi un soulèvement. L'échantillon de VPC présente une élévation de la teneur en eau de 1,0% dans la partie gelée. Toutefois, la teneur en eau du sol non gelé est 3,0% plus élevée que l'état initial, ce qui confirme la stabilité au gel du matériau granulaire de VPC.

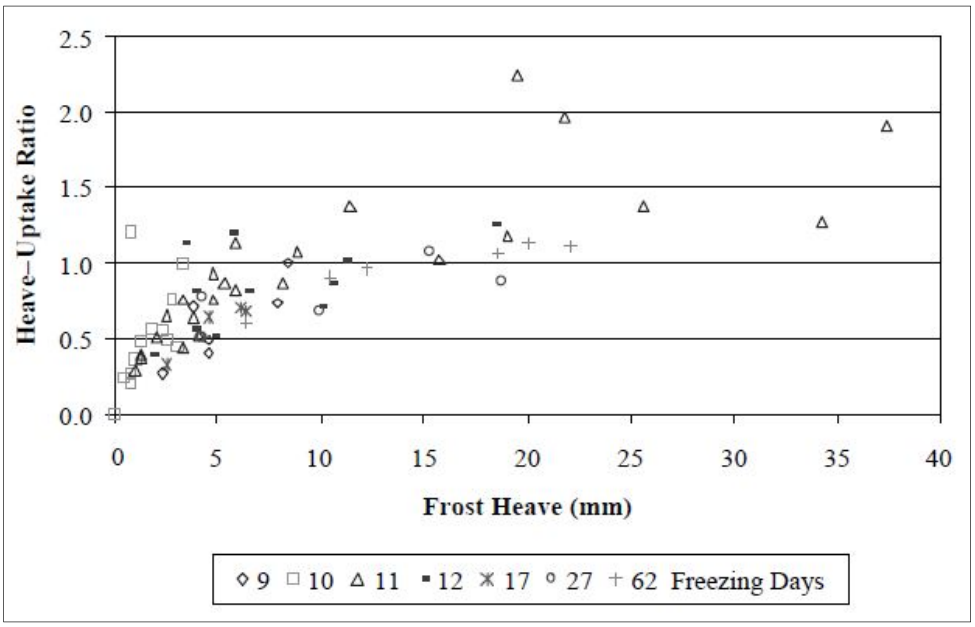


Figure 4.10 Variation du ratio soulèvement-consommation en eau et le soulèvement total
Tirée de Spencer Guthrie et Hermansson (2003)

Les essais de gel réalisés sur le VPC et la pierre calcaire montrent le développement de régimes thermiques très similaires. Ces résultats expérimentaux ne reflètent pas les valeurs obtenues par Berraha (2017) où le VPC possède des propriétés plus isolantes en fonction de la teneur en eau vis-à-vis la pierre calcaire. On suppose que la masse volumique sèche, plus élevée de l'échantillon de VPC, a favorisé le transport du flux thermique. En effet, les deux matériaux de classe GE affichent un gradient thermique de 0,030 °C/mm et une hauteur de stabilisation du front de gel qui parcourt 65,0% de l'échantillon. Une plus grande quantité d'eau s'est écoulée au front de gel pour l'échantillon de pierre calcaire même si le gradient de succion est induit par un gradient thermique de même intensité. On suppose que la surface spécifique de 4,18m^2/g pour la pierre calcaire permet le maintien d'un film d'eau actif plus épais sur les grains, favorisant le transport de l'eau au front de gel. En comparaison, le VPC possède une surface spécifique plus faible de 0,62 m^2/g où l'accumulation d'eau dans la partie gelée est moins importante.

Le potentiel de ségrégation du VPC et de la pierre calcaire pour la classe GE est très faible, voire négligeable, puisqu'aucun soulèvement ne s'est produit et que l'accumulation d'eau dans la partie gelée est plutôt faible. Néanmoins, à titre comparatif, la redistribution de la teneur en eau après la congélation suggère que la pierre calcaire présente un risque plus élevé de sensibilité au gel que pour le granulat de VPC.

4.5 Résultats des essais SP_0 avec les barrières thermiques

L'influence de la présence d'une barrière thermique mise en place dans le sol gélif sur la sensibilité au gel est évaluée au moyen de l'essai SP_0. L'influence de la nature granulaire et de la saturation de la barrière thermique sur la sensibilité au gel sont aussi étudiées. Le Tableau 4.10 présente les conditions de mise en place et les paramètres d'essais SP_0. Les Figure 4.11 à 4.13 présentent les résultats SP_0 obtenus sur les échantillons avec une barrière thermique composée de VPC et de pierre calcaire que sont : la pénétration du front de gel, le soulèvement de l'échantillon, le profil des températures et le profil des teneurs en eau. À titre comparatif, chacune des Figures 4.12 à 4.14 inclut le comportement au gel du sol de référence (SA-3).

Tableau 4.10 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 menés sur les échantillons intégrants une barrière thermique de verre et de pierre calcaire

Type de la barrière granulaire			**Barrière Thermique**			
No. Essai			BT-CI-25-sec	BT-VI-25-sec	BT-CI-25-sat	BT-VI-25-sat
Mise en palce	**Barrière**	Nature granulaire de la barrière	Calcaire	Verre	Calcaire	Verre
		État de la barrière (sèche/saturée)	Sèche	Sèche	Saturée	Saturée
		Épaisseur de la barrière (mm)	25,6	25,8	26,6	28,1
		Masse volumique sèche (g/cm3)	1,61	1,42	1,63	1,52
		Porosité (n%)	42,3	43,0	41,5	39,2
	Sol	Hauteur sol de référence (mm)	105,0	104,9	104,0	104,5
		Masse volumique sèche (g/cm3)	1,34	1,34	1,39	1,38
		Indice des vides	1,00	1,00	0,93	0,92
Conditionnement		Degré de saturation (%)	92,0	96,0	96,0	94,0
		Précision degré de saturation (%)	1,3	1,2	0,9	1,5
		Hauteur éprouvette (mm)	130,6	130,7	130,1	132,6
		Pression de surcharge (kPa)	50	50	50	50
		Durée de Conditionnement (hrs)	43,57	54,28	50,73	52,88
		Tassement total (mm)	0,4	0,4	0,5	0,5
		Température Enceinte (°C)	+2,2	+2,6	+2,5	+2,4
M.O.		Consommation en eau (cm3)	104.8	52,0	84,9	90,1
		Durée Mode Opératoire (hrs)	122,2	117,0	117,7	117,5
		Soulèvement total (mm)	21,8	10,7	16,6	17,1

La Figure 4.11 présente la pénétration du front de gel et le soulèvement des échantillons avec une barrière thermique et celle du sol de référence (SA-3). L'intégration d'une barrière thermique saturée favorise la pénétration du front de gel atteignant une profondeur de 79,8mm et 82,2mm, comparativement à l'échantillon de référence où le front de gel s'est stabilisé à 67,3mm. En revanche, les barrières thermiques de VPC et de pierre calcaire à l'état sec ont ralenti le transfert de chaleur où la pénétration du gel s'est stabilisée aux environs de 50,25 et 55,9mm respectivement. La nature granulaire de la barrière thermique influe légèrement sur la profondeur de stabilisation du front de gel. La position de l'isotherme 0°C en régime permanent s'installe à un niveau légèrement plus bas pour les barrières de pierre calcaire que de VPC dans un état saturé et sec.

Le comportement de soulèvement au gel est réduit par la présence d'une barrière thermique saturée et il varie pour la barrière thermique sèche. Le taux de soulèvement des échantillons avec la barrière thermique saturée est très semblable soit de 0,130 et 0,139mm/h,

comparativement à 0,173mm/h pour le sol de référence. La barrière thermique sèche de VPC a empêché la formation de lentilles de glace dans le sol de référence. Certes, une couche de glace de 10,7mm s'est formée à l'interface du sol de référence et de la barrière à un taux de soulèvement de 0,128mm/h. La barrière thermique sèche de pierre calcaire a produit un taux de progression du front de gel plus lent à travers le sol gélif contribuant à la croissance de lentilles de glace épaisses dans le sol. De ce fait, le taux de soulèvement occasionné est de 0,282mm/h, donc un taux supérieur à celui du sol de référence.

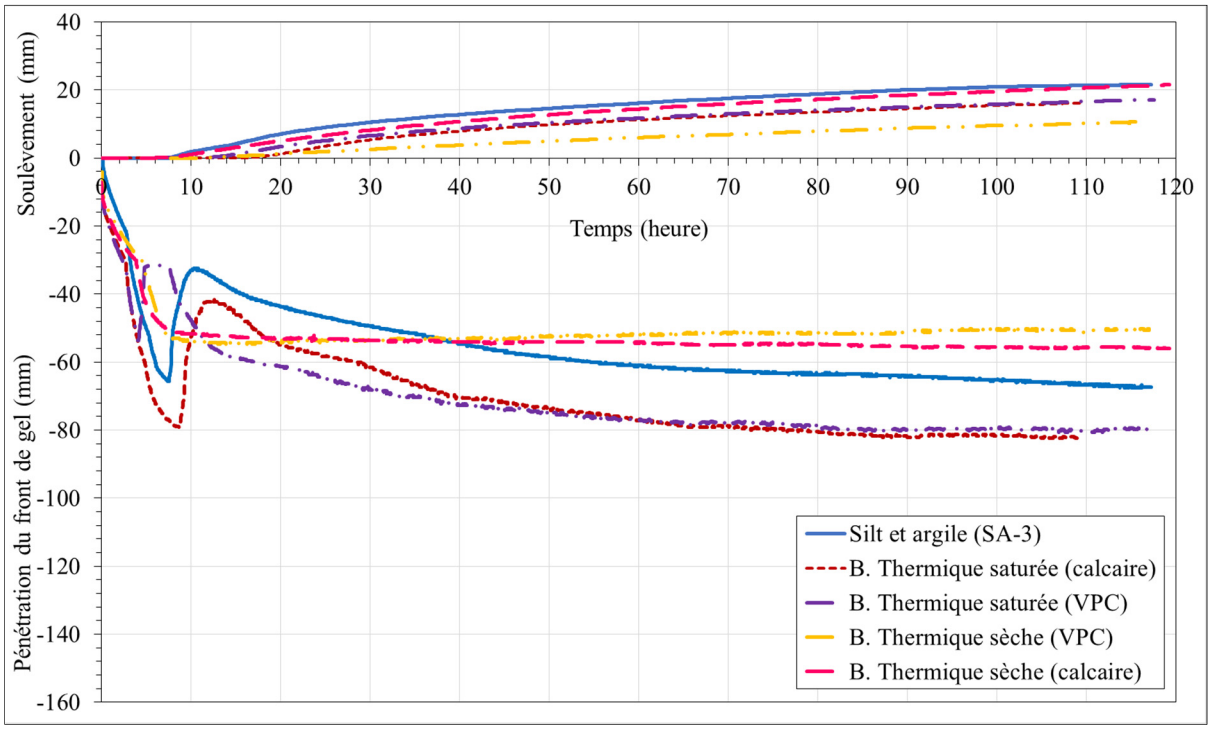


Figure 4.11 Pénétration du front de gel et soulèvement en fonction du temps des échantillons avec une barrière (B.) thermique de VPC et de pierre calcaire et du sol de référence (SA-3)

Selon la Figure 4.12, la distribution des températures dans les échantillons avec une barrière thermique suit un comportement semblable en fonction de l'état de saturation de la barrière. Les échantillons avec une barrière thermique saturée présentent une distribution plus froide des températures que dans le sol de référence. L'écart des températures augmente avec la profondeur, passant de -0,1°C à -0,25°C entre le sol de référence et les échantillons munis d'une barrière saturée. Un léger déphasage des températures est constaté entre les échantillons contenant une barrière saturée. Un écart moyen de -0,7°C des températures est enregistré pour

l'échantillon qui contient la barrière saturée de pierre calcaire en comparaison avec celle de VPC. Au niveau de la frange gelée, un gradient de température de 0,024°C/mm est calculé pour les échantillons avec une barrière saturée.

Pour les échantillons avec une barrière thermique sèche, la distribution des températures est plus chaude dans le haut de l'échantillon en comparaison avec le sol de référence. À l'interface de la barrière sèche et du sol de référence SA-3 un écart moyen de 0,47°C est enregistré, puis il décroit progressivement en fonction de la profondeur pour atteindre -0,1°C à la base de l'échantillon. Une déviation des températures entre les échantillons avec une barrière thermique sèche est observée à l'interface de la barrière et du sol. Un écart de - 0,13°C pour l'échantillon avec la barrière de VPC se justifie par la présence d'une couche de glace à ce niveau. Au niveau de la frange gelée, un gradient thermique de 0,020°C/mm et de 0,019°C/mm sont calculés respectivement pour les échantillons avec la barrière thermique sèche de VPC et de pierre calcaire.

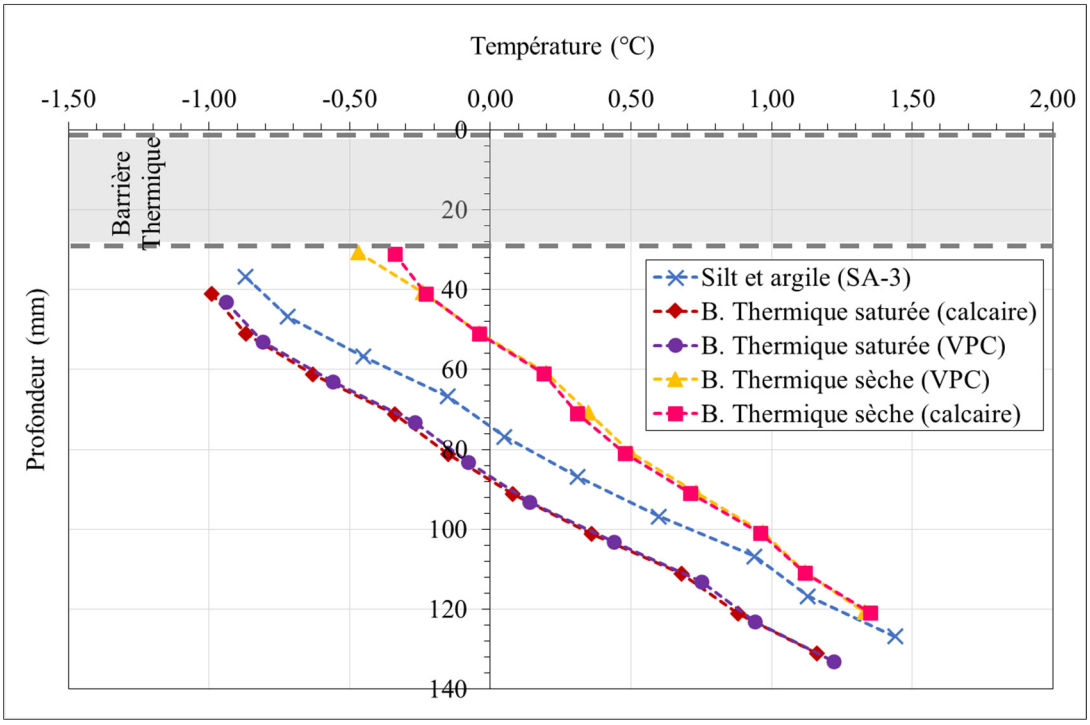


Figure 4.12 Profils des températures en fonction de la profondeur au temps de stabilisation T_P des échantillons avec une barrière thermique de VPC ou de pierre calcaire et du sol de référence

Les profils de teneur en eau en fonction de la profondeur des échantillons avec une barrière thermique et du sol de référence sont présentés à la Figure 4.13. Dans l'ensemble, on observe une accumulation d'eau dans le haut de l'échantillon suivant la pénétration du front de ségrégation et la partie du sol non gelé contient une teneur en eau similaire à la condition de saturation initiale. Dans la partie supérieure, la teneur en eau est légèrement plus élevée pour l'échantillon avec la barrière thermique saturée de pierre calcaire atteignant 82% par rapport à 80% pour le sol de référence. La barrière thermique saturée de VPC a mieux performé en limitant l'accumulation d'eau à 76%. La présence de la barrière thermique saturée a réduit la consommation en eau durant la période de gel. Une consommation en eau de 90,1 et 84,9cm^3 pour les barrières saturées de VPC et de pierre calcaire contre 148,9cm^3 pour le sol de référence (SA-3).

Les barrières thermiques sèches présentent une distribution de la teneur en eau très singulière. La barrière sèche de VPC a empêché la formation de lentilles de glace dans le sol, ainsi on observe la couche de glace formée sous la barrière qui expose une teneur en eau élevée de 98%. Ensuite, le flux de chaleur ralenti par la barrière thermique sèche de pierre de calcaire a produit des lentilles de glace épaisses dans le sol gélif ce qui se traduit par une augmentation de la teneur en eau de 55% dans la partie supérieure par rapport à l'état de saturation initial.

Le Tableau 4.11 présente les résultats d'essais SP_0 effectués sur les échantillons avec une barrière thermique de VPC et de pierre calcaire dans un état saturé et sec. Des photos des échantillons avec une barrière thermique de VPC ou de pierre calcaire à la fin de l'essai SP_0 sont présentées à l'Annexe VIII.

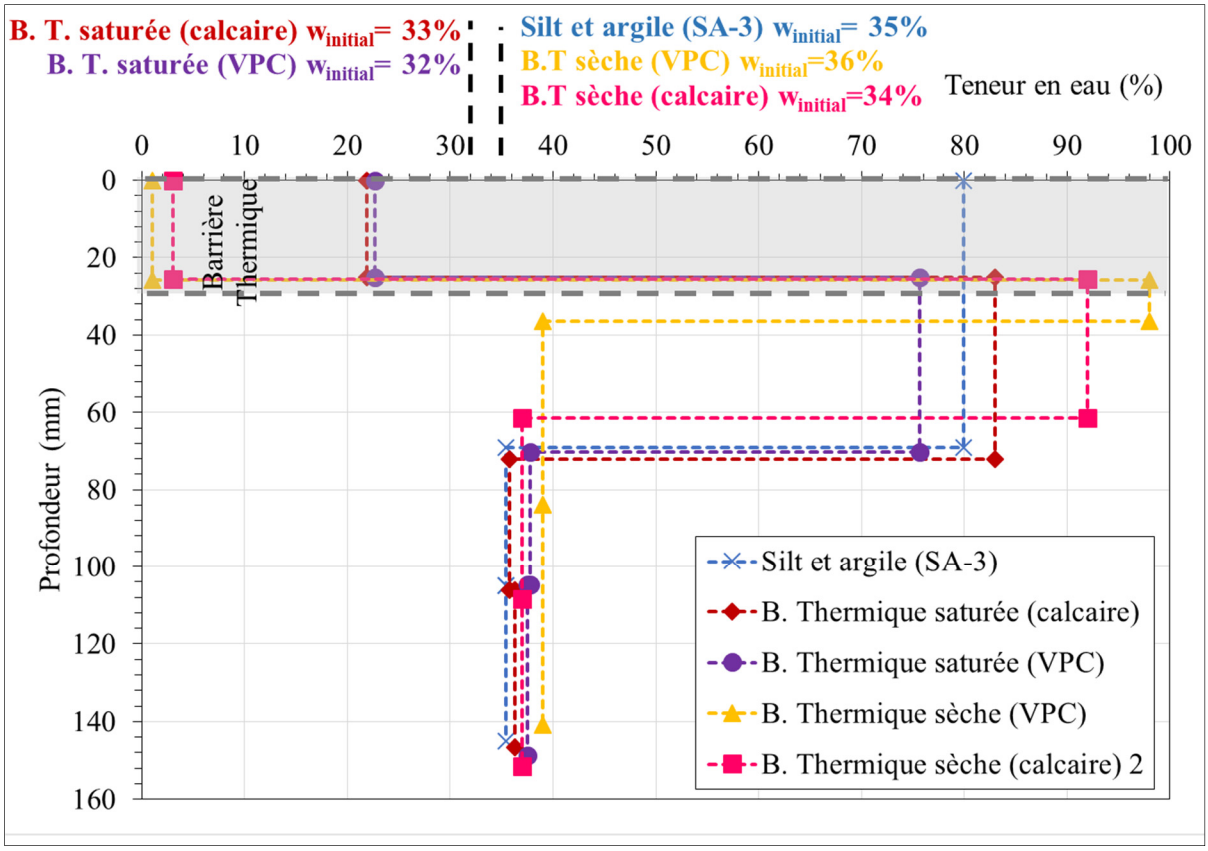


Figure 4.13 Profils des teneurs en eau selon la profondeur des échantillons avec une barrière thermique de VPC ou de pierre calcaire et du sol de référence

Tableau 4.11 Résultats des essais SP_0 des échantillons avec une barrière thermique de VPC et de pierre calcaire

No. Essai	**BT-CI-25-sec**	**BT-VI-25-sec**	**BT-CI-25-sat**	**BT-VI-25-sat**
Régime thermique (Tp) heures	7,97	14,87	58,77	53,50
Profondeur du front de gel Ti (mm)	55,9 (42,9%)	50,3 (38,6%)	82,3 (63,2%)	79,8 (60,4%)
Température Tso (°C)	-0,40°C	-0,21°C	-0,66°C	-0,66°C
Profondeur Tso (mm)	32,9	36,5	55,8	54,1
Épaisseur de la frange gelée (mm)	21,6	10,8	27,5	27,5
Succion de la frange gelée (cm H_2O)	-49,9	-26,2	-82,0	-82,0
Taux de soulèvement (T_{soul}) mm/h [1]	0,282	0,128	0,130	0,139
Gradient thermique (Φ) °C/mm [1]	0,019	0,020	0,024	0,024
Vitesse d'écoulement d'eau (mm/h) [1]	0,259	0,117	0,119	0,127
Teneur en eau (w%) (B.Thermique /Haut /Centre /Bas)	3/ 92/ 37/ 37	1/ 98/ 39/ 39	22/ 82/ 36/ 36	23/ 76/ 38/ 38
Potentiel de ségrégation ($mm^2/°C·h$)	14,0	6,0	5,0	5,3
Échelle de gélivité	Très Élevé	Élevé	Élevé	Élevé

Note [1]: Résultats représentés tel que présentés dans la méthode d'essai LC 22-331

4.5.1 Analyse des résultats SP_0 avec la barrière thermique

La mise en place d'une barrière thermique a modifié le transfert du flux de chaleur entre la température du plateau supérieur et le sol de référence. L'état de saturation de la barrière a davantage modifié le régime thermique que la nature granulaire de la barrière. L'une des relations générales de caractérisation au gel d'un sol est rapportée par Konrad et Morgenstern (1981). Ils établissent que pour une valeur du potentiel de ségrégation donnée, l'évolution du rapport entre le flux d'écoulement d'eau au front de gel et le gradient de température de la frange gelée, progresse de façon linéaire telle que présentée à la Figure 4.14. L'influence de la succion au front de gel (P_u) modifie la pente de la droite et donc le potentiel de ségrégation comme illustré à la Figure 4.14. La relation proposée entre le SP_0 et Pu est que plus la succion est élevée, plus la valeur du potentiel de ségrégation diminue. De plus, selon l'équation (1.13) le potentiel de ségrégation est le rapport entre la vitesse d'écoulement d'eau et le gradient thermique de la frange gelée. Ainsi, pour une vitesse d'écoulement d'eau donnée, le potentiel de ségrégation diminue en fonction d'un gradient thermique de la frange gelée qui augmente. Les barrières thermiques ont réduit le gradient de température et elles ont aussi modifié la succion de la frange gelée, résultant par le fait même à différents flux d'écoulement de l'eau au front de gel (Figure 1.11). La comparaison de la réponse au gel du sol gélif en fonction de l'état de la barrière et de la nature granulaire, considère comme critères de performance : le gradient de température de la frange gelée, la succion du film d'eau de la frange gelée, la vitesse d'alimentation en eau, la position du front de gel et le potentiel de ségrégation.

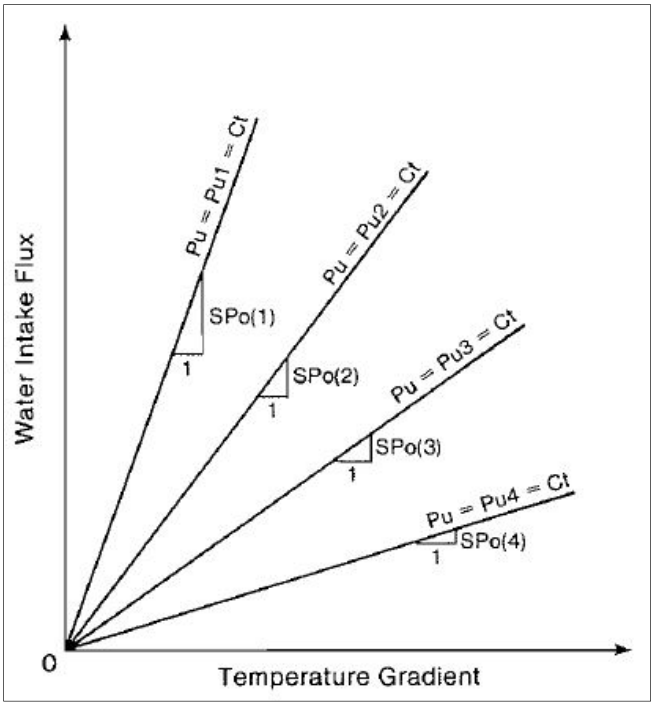


Figure 4.14 Caractérisation conceptuelle d'un sol en congélation lors de la formation de la dernière lentille de glace ($|P_{u1}| < |P_{u2}| < |P_{u3}| < |P_{u4}|$)
Tirée de Konrad et Morgenstern (1981)

À noter, la mise en place d'une barrière modifie fortement les caractéristiques de la frange gelée telles que la température du front de ségrégation (T_{so}), l'épaisseur de la frange gelée et la succion. Konrad (1980) suggère l'utilisation de la succion au front de gel (P_u) pour obtenir un degré de précision plus élevé de l'estimation de la succion (1.6.2.1). Cependant, la grande variabilité de la perméabilité des matériaux à l'étude, la température plus chaude du plateau inférieur (+2,0°C) et la configuration des échantillons avec une barrière ne permettent pas une évaluation précise de la succion au niveau de la frange gelée. Ainsi, la succion utilisée à titre comparatif est la succion moyenne du film d'eau actif à travers la frange gelée (cm d'eau) qui varie essentiellement selon la température du front de ségrégation (1.6.2.1).

Le régime thermique pour les échantillons avec une barrière thermique saturée présente une pénétration du front de gel plus profonde, une distribution des températures plus froides à travers l'échantillon et une température du front de ségrégation (T_{so}) plus basse que le sol de référence SA-3 (Figure 4.12). En début d'essai, l'eau contenue dans les pores de la barrière a

gelé. La conductivité thermique élevée de la glace a favorisé le transfert du flux thermique à travers le sol gélif sous-jacent d'une hauteur de 10,5 cm. Ce qui a résulté en une distribution des températures similaires, mais plus froides que dans le sol de référence puisque l'échantillon possède une hauteur de 12,8mm. Comme illustré par Terzaghi (1952), l'évolution de la conductivité thermique d'un matériau granulaire saturé en condition gelée ou non gelée, est influencée par la porosité telle que présentée à la Figure 4.15. La relation suggère que la conductivité thermique d'un matériau granulaire saturé tend à s'approcher de la conductivité thermique de l'eau liquide pure ou de la glace selon une porosité croissante. Ainsi, la conductivité thermique améliorée de la barrière par la présence de la matrice de glace a contribué au développement d'une frange gelée plus épaisse comportant une température au front de ségrégation (T_{so}) de -0,66°C au lieu de -0,48°C. La température T_{so} influe sur le potentiel de succion de la frange gelée où le sol de référence qui présente une succion de -60 cmH_2O qui est passé à -82 cmH_2O pour les échantillons avec une barrière thermique gelée. Une succion croissante de la frange gelée diminue la vitesse d'écoulement d'eau au front de gel et le potentiel de ségrégation comme présenté par Konrad et Morgenstern (1982b) à la Figure 1.11. De plus, selon la Figure 4.11 on remarque que la présence de la barrière granulaire saturée a favorisé un taux de refroidissement plus élevé de l'échantillon de sol gélif. Un taux de refroidissement plus élevé tend à diminuer la capacité de succion de la frange gelée tel que présenté par Konrad et Morgenstern (1982b) à la Figure 4.17. Toutefois, la dernière lentille de glace s'est formée au même niveau que le sol de référence SA-3 puisque c'est la température du plateau inférieur qui contrôle la hauteur du sol non gelé (Konrad et Morgenstern, 1980).

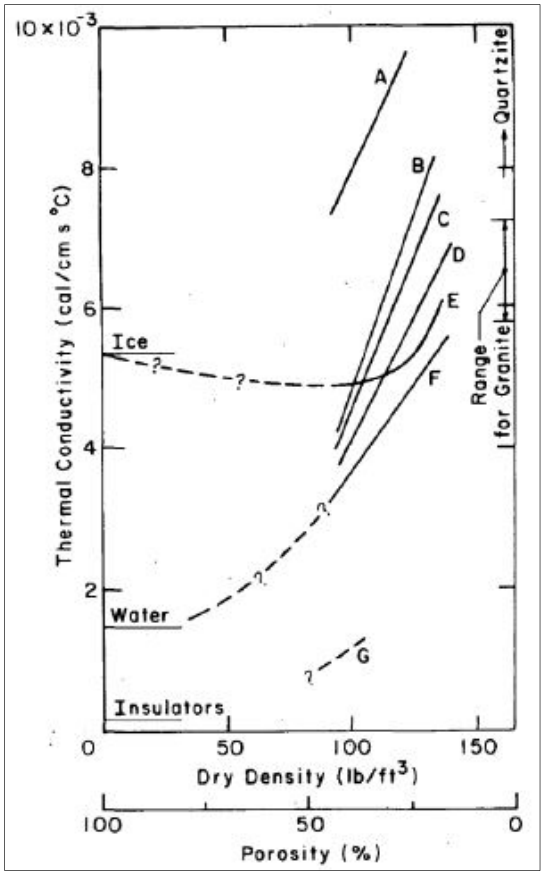


Figure 4.15 Conductivité thermique du sable et d'argile en condition gelée et non gelée en fonction de la masse volumique sèche : A- sable gelé et saturé, B- sable non gelé et saturé, C- sable gelé et Sr=75%, D-sable non gelé et Sr=50%, E-argile gelée et saturée, F-argile non gelée et saturée
Tirée de Farouki (1981)

La mise en place de barrières thermiques sèches a limité la pénétration du front de gel et a réduit le gradient de température. La barrière thermique sèche de pierre calcaire a diminué le gradient thermique, mais le potentiel de succion de la frange gelée a quant à lui augmenté. L'effet couplé, de la diminution du gradient de température de la frange gelée et de la succion du film d'eau, a produit un taux de soulèvement plus élevé que celui du sol de référence SA-3. Ce comportement au gel s'accorde avec la relation présentée à la Figure 4.14 où le flux d'entrée d'eau varie en fonction du gradient thermique et de la succion de la frange gelée. En fait, la barrière thermique sèche de pierre de calcaire a ralenti la vitesse de pénétration du front de gel et le taux de changement des températures à travers le sol gélif. Un front de gel qui avance lentement permet à l'eau de s'accumuler à un niveau donné pour une durée de temps

suffisante pour former des lentilles de glace plus épaisses. Comme observé à la fin de l'essai de congélation, l'éprouvette de sol ne montre pas la formation de lentilles de glace rythmiques où elles s'épaississent avec un espacement croissant (Figure 1.7). Le chemin de congélation présente des lentilles de glace très épaisses et ancrées dans la partie supérieure de l'échantillon tel que présenté à la Figure 4.16 . Konrad et Morgenstern (1982b) ont observé un phénomène similaire où le potentiel de ségrégation augmente selon la diminution du taux de refroidissement de la frange gelée, et ce pour une succion donnée telle que présentée à la Figure 4.17.



Figure 4.16 Échantillon avec une barrière thermique sèche
de pierre calcaire à la fin de l'essai SP_0

Dans le cas de la barrière thermique sèche de VPC, elle montre des propriétés isolantes qui ont empêché la pénétration du front de ségrégation dans le sol gélif. Le développement d'un substrat de glace à l'interface de la barrière et du sol gélif témoigne d'un écoulement de l'eau

à travers la frange gelée. La barrière thermique sèche de VPC a réduit davantage le soulèvement au gel en comparaison avec le sol de référence SA-3 et elle a protégé le sol gélif du développement de lentilles de glace dans sa structure granulaire. Toutefois, le régime thermique très similaire à celui de l'échantillon avec la barrière thermique sèche de pierre calcaire indique un risque de potentiel de ségrégation de niveau très élevé s'il y a formation de lentilles de glace dans le sol gélif. Des essais SP_0 supplémentaires sont nécessaires pour vérifier qu'il ne s'est pas produit une condition d'interface favorisant la formation de lentilles de glace à ce niveau.

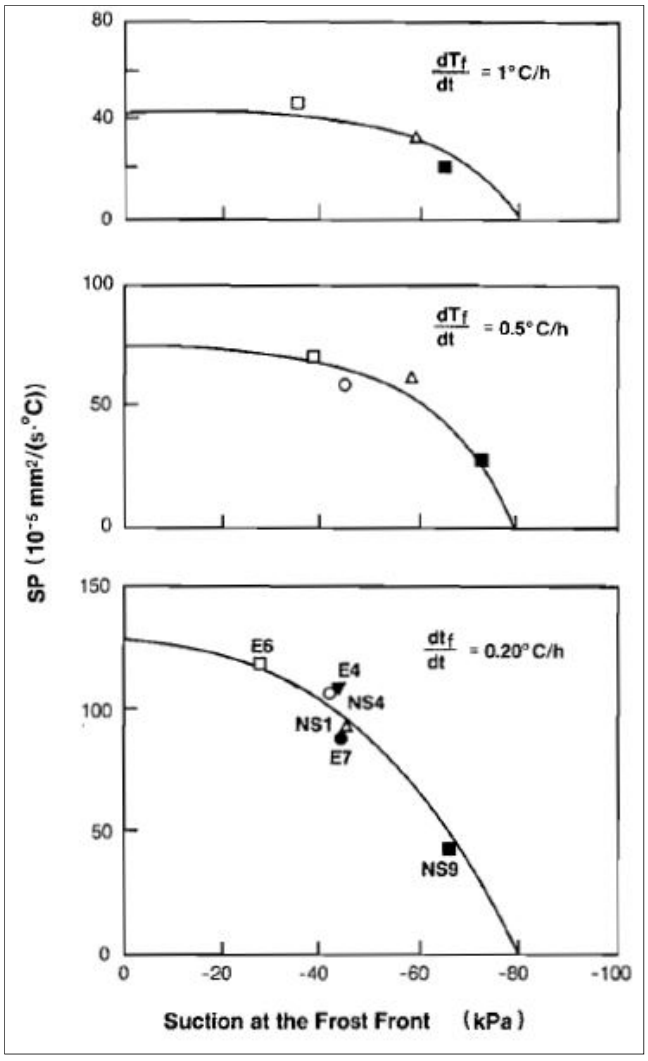


Figure 4.17 Évolution du potentiel de ségrégation en fonction de la succion selon le taux de refroidissement pour le Devon silt
Tirée de Konrad et Morgenstern (1982b)

4.6 Résultats des essais SP_0 avec les barrières capillaires

L'influence de l'insertion dans un sol gélif d'une barrière capillaire sur la sensibilité au gel est évaluée au moyen d'essais SP_0. De même, l'influence de la nature granulaire de la barrière capillaire sur la sensibilité au gel est aussi examinée. Le Tableau 4.12 présente les conditions de mise en place et les paramètres d'essais SP_0 appliqués sur les échantillons incorporant une barrière capillaire. Les Figure 4.18 à 4.19 présentent les résultats SP_0 obtenus sur les échantillons avec une barrière capillaire tels que la pénétration du front de gel, le soulèvement de l'échantillon, le profil des températures et le profil des teneurs en eau. À des fins de comparaison, chacune des Figures 4.18 à 4.19 inclut le comportement au gel du sol de référence (SA-3).

Tableau 4.12 Conditions de mise en place et paramètres d'essai SP_0 menés sur les échantillons intégrants une barrière capillaire de VPC et de pierre calcaire

Type de la barrière granulaire			**Barrière Capillaire**	
No. Essai			BC-CI-25	BC-VI-25
Mise en place0	**Barrière**	Nature granulaire de la barrière	Calcaire	VPC
		Épaisseur de la barrière (mm)	25,4	25,0
		Masse volumique sèche (g/cm3)	1,73	1,41
		Porosité (n%)	38,1	43,4
	Sol	Hauteur sol de référence (mm) (H/B)	79,0 / 26,4	83,6 / 22,4
		Masse vol. sèche (g/cm^3) (H/B)	1,29 / 1,51	1,36 / 1,47
		Indice des vides (H/B)	1,08 / 0,78	0,95 / 0,79
Conditionnement		Degré de saturation (%)	94	88
		Précision degré de saturation (%)	1,3	2,5
		Hauteur éprouvette (mm)	130,8	131,0
		Pression de surcharge (kPa)	50	50
		Durée de Conditionnement (heures)	52,13	42,80
		Tassement total (mm)	0,4	0,8
		Température Enceinte (°C)	+ 2,4°C	+ 2,2°C
M.O.		Consommation en eau (cm^3)	50,0	61,9
		Durée Mode Opératoire (heures)	115,6	118,2
		Soulèvement total (mm)	18,7	13,5

La Figure 4.18 présente la pénétration du front de gel et le soulèvement. L'intégration d'une barrière capillaire favorise la pénétration du front de gel atteignant une profondeur de 90,5mm et 84,5mm, respectivement pour l'échantillon avec une barrière de VPC et de pierre calcaire en comparaison au sol de référence où le front de gel s'est stabilisé à 67,28mm. La nature granulaire de la barrière capillaire influe sur la profondeur de stabilisation du front de gel. Le front de gel parcourt 69,1% (90,5mm) de la hauteur de l'échantillon avec la barrière de VPC par rapport à 64,8% (84,5mm) pour la barrière de pierre calcaire. Dans les deux cas, le front de gel s'est stabilisé légèrement au-dessus du niveau de la barrière capillaire.

Le comportement de soulèvement au gel des échantillons est similaire pour les premières 24 heures de congélation, puis on observe une baisse significative du taux de soulèvement pour les échantillons avec une barrière capillaire. Une réduction plus significative du taux de soulèvement est observée pour l'échantillon avec la barrière capillaire de VPC.

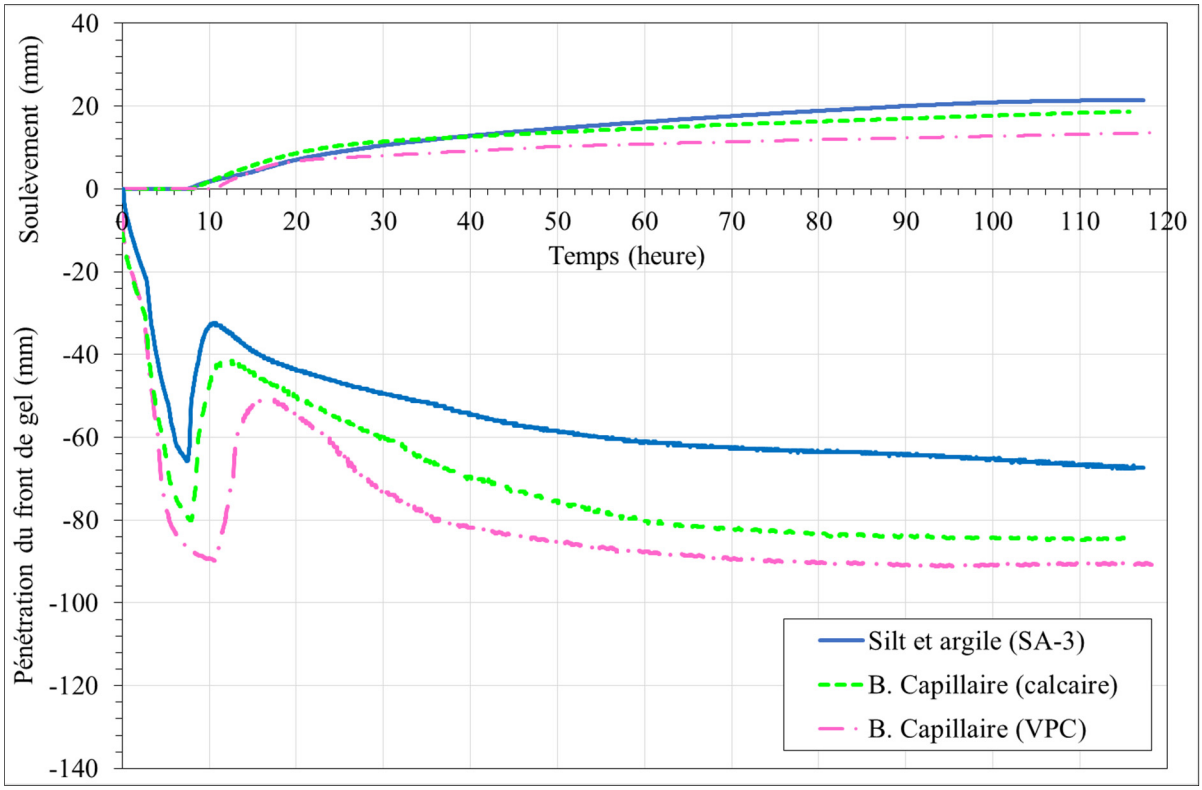


Figure 4.18 Pénétration du front de gel et soulèvement en fonction du temps du sol de référence et des échantillons intégrant une barrière capillaire de VPC ou de pierre calcaire

Selon la Figure 4.19, les profils de température affichent des températures plus basses et un gradient thermique plus élevé pour les échantillons avec une barrière capillaire par rapport au sol de référence. L'échantillon comportant la barrière capillaire de VPC montre une distribution des températures plus froides dans la partie supérieure de l'échantillon, soit un écart de -0,33°C avec les températures enregistrées dans l'échantillon avec la barrière de pierre calcaire. Au niveau de la barrière capillaire, la distribution des températures tend à se rapprocher avec la profondeur. Au niveau de la frange gelée, le gradient thermique de 0,021°C/mm de l'échantillon avec la barrière de pierre calcaire est légèrement plus faible que celui avec la barrière capillaire de VPC. Le gradient thermique de l'échantillon avec la barrière capillaire de VPC est du même ordre de grandeur que celui du sol de référence de 0,026°C/mm.

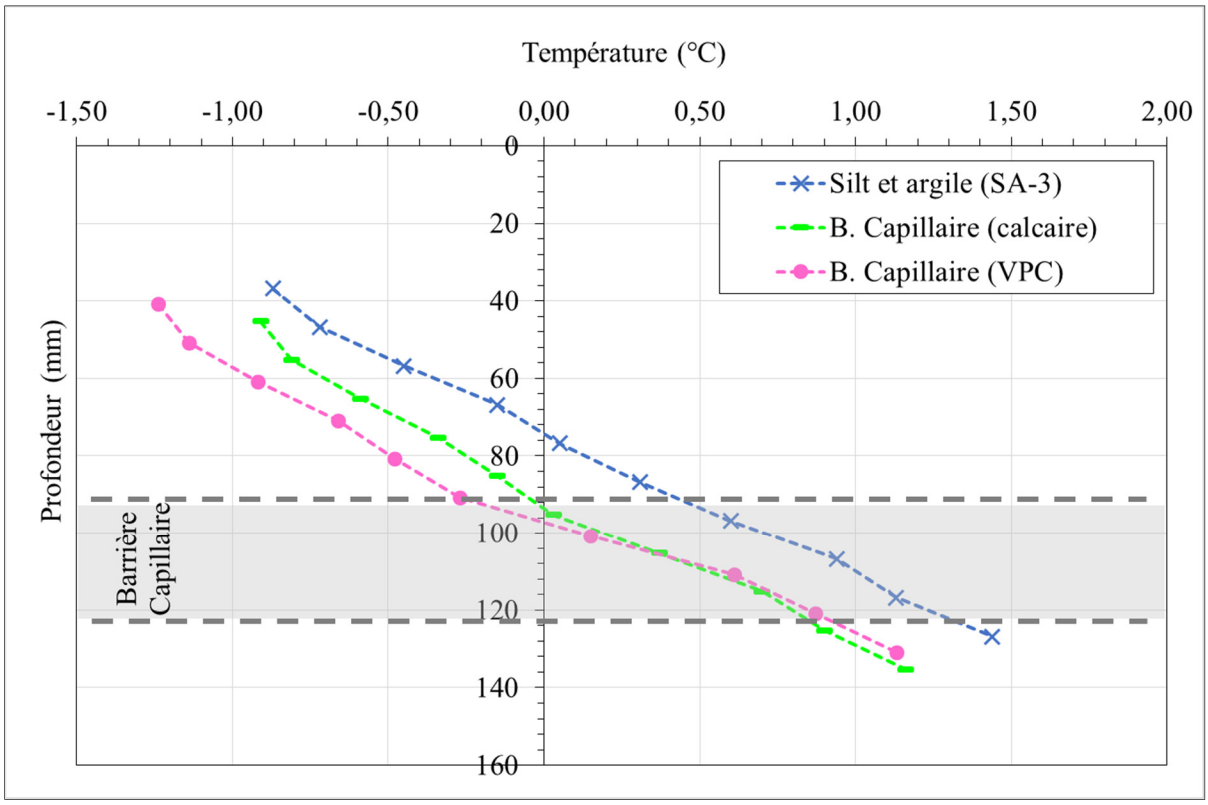


Figure 4.19 Profils des températures en fonction de la profondeur au temps de stabilisation du sol de référence et des échantillons incorporant une barrière capillaire de VPC ou de pierre calcaire

Selon la Figure 4.20, on observe une augmentation de la teneur en eau dans la partie gelée de 27%, 38% et 45% en comparaison avec les conditions de saturation initiales, respectivement

pour les barrières capillaires de VPC, de pierre calcaire et du sol de référence. Pour l'ensemble des échantillons, la portion du sol non gelé comporte une teneur eau équivalente aux conditions initiales. La barrière capillaire contient une teneur en eau très basse aux environs de 3,0% pour la pierre calcaire et de 9,0% pour le VPC. À la base des échantillons sous la barrière capillaire, le sol possède une teneur en eau de 38%.

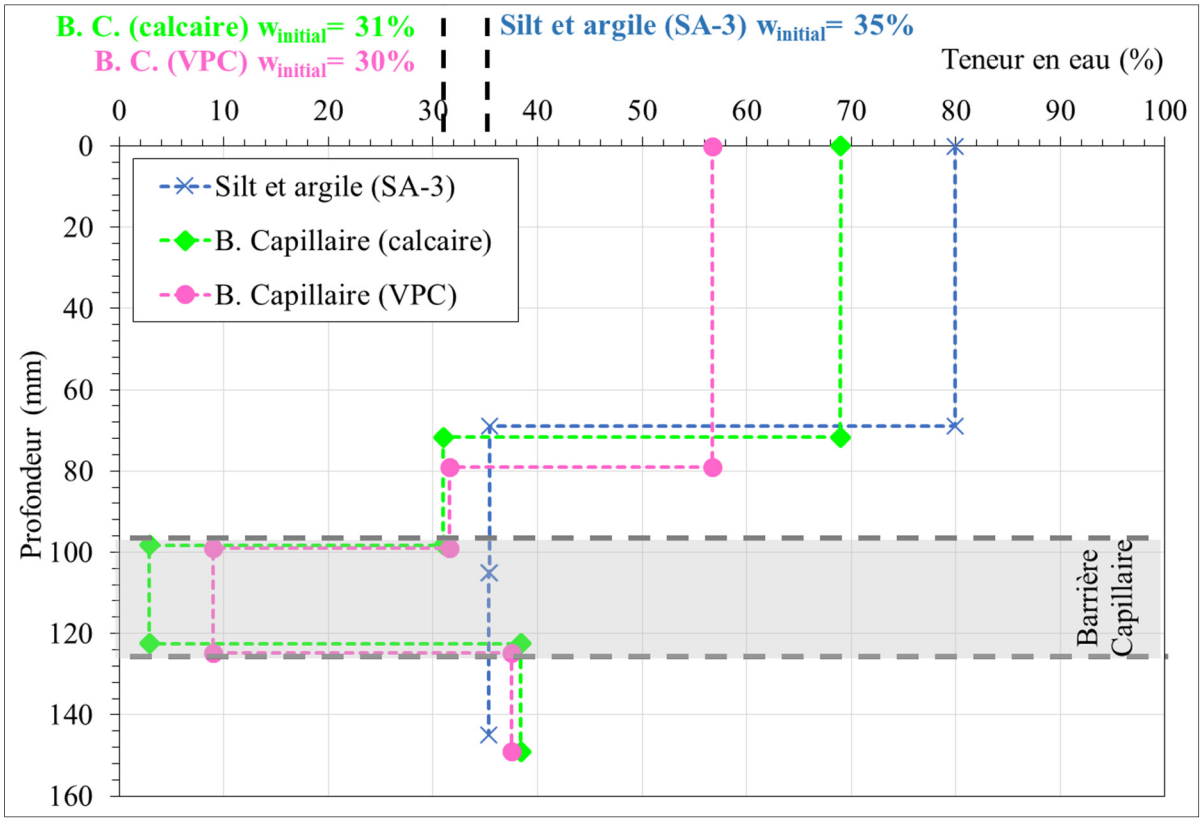


Figure 4.20 Profils des teneurs en eau selon la profondeur du sol de référence et des échantillons incorporant une barrière capillaire de VPC ou de pierre calcaire

Le Tableau 4.13 présente les résultats d'essais SP_0 effectués sur les échantillons avec une barrière capillaire. L'intégration d'une barrière capillaire a réduit le potentiel de ségrégation, mais plus particulièrement pour la barrière de VPC où le niveau de sévérité a été abaissé à un risque catégorisé de moyen au lieu d'un risque élevé. Des photos des échantillons avec une barrière capillaire de VPC ou de pierre calcaire à la fin de l'essai SP_0 sont présentées à l'Annexe VIII.

Tableau 4.13 Résultats des essais SP_0 sur les échantillons incorporant une barrière capillaire de VPC et de pierre calcaire

No. Essai	**BC-CI-25**	**BC-VI-25**
Régime thermique (Tp) heures	57,63	56,23
Profondeur du front de gel Ti (mm)	84,5 (64,8%)	90,5 (69,1%)
Température Tso (°C)	-0,77°C	-0,77°C
Profondeur Tso (mm)	52,1	65,5
Épaisseur de la frange de glace (mm)	32,0	30,8
Succion de la frange gelée (cm H_2O)	-96,0	-96,0
Taux de soulèvement (T_{soul}) mm/h [1]	0,096	0,062
Gradient thermique (Φ) °C/mm [1]	0,021	0,025
Vitesse d'écoulement de l'eau (mm/h) [1]	0,088	0,057
Teneur en eau (w%) (Haut /Centre /B. Capillaire/Bas)	69 / 31 / 3 / 38	57/ 32/ 9/ 37
Potentiel de ségrégation ($mm^2/°C·h$)	4,2	2,3
Échelle de gélivité	Élevé	Moyen

Note [1]: Résultats représentés tel que présentés dans la méthode d'essai LC 22-331

4.6.1 Analyse des résultats SP_0 avec une barrière capillaire

La mise en place d'une barrière capillaire a modifié le transfert du flux de chaleur et de masse à travers le sol gélif en condition de gel. La comparaison de la réponse au gel du sol gélif en fonction de la nature granulaire de la barrière capillaire considère comme critères de performance : le gradient de température de la frange gelée, la succion du film d'eau de la frange gelée, le profil de teneur en eau et la vitesse d'écoulement d'eau au front de gel.

Les résultats d'essais SP_0 des échantillons munis une barrière capillaire présentent plusieurs différences en comparaison avec le comportement au gel du sol de référence SA-3 comme : une augmentation de la vitesse de pénétration du front de gel, une distribution des températures plus froides dans la partie supérieure, une diminution du taux de soulèvement et une teneur en eau plus faible dans la partie de sol gelé. La conductivité thermique des matériaux granulaires grossiers étant plus basse que celle du sol gélif a produit un refroidissement de la couche de sol superposée à la barrière capillaire. Côté (2001) a étudié le potentiel de refroidissement de surface observé dans les chaussées comportant un isolant thermique. En fait, l'isolant

thermique coupe l'apport de chaleur provenant de la couche de sol sous-jacente à l'isolant, ainsi refroidissant davantage la couche de surface.

La conductivité thermique plus faible du granulat de VPC est observée pour cette configuration de mise en place de barrière, où elle intensifie le phénomène de refroidissement de surface produisant un gradient de température plus élevé pour l'échantillon avec la barrière de VPC que celle de pierre calcaire. Les échantillons avec une barrière capillaire possèdent une succion au front de gel équivalente de -96 cm d'eau. Le flux d'écoulement d'eau est estimé plus faible pour un gradient thermique plus élevé, et ce pour une succion au front de gel équivalente selon l'équation 1.24 du potentiel de ségrégation et la relation présentée à la Figure 4.14. Ainsi, l'échantillon avec la barrière de VPC présente un taux de soulèvement et un potentiel de ségrégation plus bas ce qui témoigne de l'efficacité plus élevée de la barrière capillaire de VPC à réduire la vitesse d'alimentation en eau au front de gel.

Henry et Holtz (2001) établissent les facteurs qui influencent l'efficacité d'une barrière capillaire tels que la hauteur d'ascension capillaire et la capacité de rétention d'eau. D'après Holtz et Kovacs (1991), la hauteur d'ascension capillaire est estimée à partir du diamètre effectif des pores. L'arrangement des particules influence la distribution du diamètre des pores d'un matériau granulaire. Les barrières capillaires testées possèdent la même granulométrie (classe GI). Cependant, le granulat de VPC présente une capacité de compactage moins élevé que la pierre calcaire (Bernard et al.; 2015). La porosité de la barrière de VPC de 43,4% est légèrement plus élevée que celle de pierre calcaire qui est de 38,1%. L'écart peu marqué entre les porosités des barrières capillaires suggère l'influence plus importante de la capacité de rétention de l'eau du corps granulaire. La capacité de rétention de l'eau des matériaux granulaires n'a pas été déterminée dans le cadre de cette étude. Toutefois, à la section 4.3.2, on constate une accumulation d'eau au front de gel plus importante pour la pierre calcaire que le granulat de VPC, et ce pour une même granulométrie. L'analyse de la section 4.3.2 est basée sur l'influence de la surface des grains qui est caractérisée par la surface spécifique. La surface spécifique permet d'estimer l'épaisseur du film d'eau maintenu à la surface des granulats. L'hypothèse émise propose que la surface spécifique plus élevée pour la pierre calcaire permet

le transport d'une plus grande quantité d'eau dans la partie gelée ce qui se traduit par une sensibilité au gel supérieure.

Henry et Holtz (2001) ont réalisé une étude en laboratoire pour déterminer l'efficacité du géosynthétique comme barrière capillaire réalisée à l'aide d'une cellule de gel (1.8.3.1). Le géocomposite utilisé comme barrière capillaire présente de meilleures performances à réduire l'écoulement d'eau au front de gel que le géotextile. En fait, les résultats montrent que la barrière capillaire de géocomposite placée dans un échantillon de sol gélif a empêché le soulèvement au gel (Figure 1.20). Toutefois, ces résultats sont obtenus lorsque l'échantillon de sol gélif est partiellement saturé. La partie de sol qui recouvre la barrière capillaire possède un degré de saturation de 75% et moins. Selon Konrad et Roy (2000), la valeur du SP est estimée négligeable pour un sol dont le degré de saturation est inférieur à 70 %. Ces conditions de saturation réduisent grandement la continuité du film d'eau actif à travers l'échantillon. Ainsi, les résultats obtenus par Henry et Holtz (2001) sont attribuables principalement à l'état de saturation du sol plutôt qu'à la capacité de réduction de l'alimentation en eau au front de gel par la présence d'une barrière capillaire.

Les conditions critiques au gel sont rencontrées lorsque le sol est complètement saturé puisque le réseau d'eau capillaire est connecté à travers l'échantillon et à la source en eau externe. En comparaison avec les résultats de Henry et Holtz (2001), la barrière capillaire de VPC a réduit le niveau de sévérité du potentiel de ségrégation à un niveau moyen, et ce dans un état de saturation supérieur à 80%. D'autre part, on observe un comportement au gel similaire où la pénétration du front de gel s'est stabilisée plus profondément pour les échantillons avec une barrière capillaire et qui ont montré un soulèvement au gel moindre tel que constaté dans cette étude (Figure 1.17).

CONCLUSION

La revue de l'état des connaissances et de la pratique expose les enjeux liés au recyclage du VPC et à l'effet du gel entrainant la dégradation prématurée des structures de chaussées. L'une des principales avenues de valorisation du VPC est le domaine de la construction. L'introduction du VPC dans les chaussées nécessite l'étude de son comportement en condition de gel pour le dimensionnement des chaussées situées dans un climat nordique. Les notions théoriques et expérimentales du potentiel de ségrégation ont permis d'examiner la réponse au gel des matériaux étudiés. L'objectif principal de ce projet de recherche est de mesurer et de comparer le comportement au gel du VPC et de la pierre calcaire comme matériau granulaire de chaussée. Trois sous-objectifs découlent de cet objectif principal : 1) l'évaluation de la sensibilité au gel des granulats de VPC et de pierre calcaire comme matériau granulaire de chaussée ; 2) la détermination des performances des granulats de VPC et de pierre calcaire en tant que barrière thermique ; 3) la détermination du potentiel des granulats de VPC et de pierre calcaire en tant que barrière capillaire.

1) Évaluation de la sensibilité au gel des granulats de VPC et de pierre calcaire comme matériau granulaire de chaussée

Le montage expérimental dans les laboratoires de l'ÉTS pour la détermination du potentiel de ségrégation est assemblé à la phase I. La phase II du plan expérimental consiste à étudier l'effet de la classe et de la nature granulaire sur la sensibilité au gel. Les trois classes granulaires de VPC étudiées regroupent deux distributions granulométriques plus étalées (GE, GF) et une distribution de type uniforme (GI). La distribution granulométrique influence les paramètres tels que la masse volumique sèche et la porosité. La sensibilité au gel d'un matériau granulaire grossier dans un état saturé est principalement influencée par sa porosité. Une valeur décroissante de la porosité diminue la taille des vides et favorise le maintien du réseau d'eau capillaire qui est la source principale d'alimentation en eau au front de gel. L'effet de la porosité en contexte de gel est observé à plusieurs niveaux tels que la conductivité thermique, le gradient thermique, le profil de teneur en eau, le soulèvement au gel et le potentiel de ségrégation.

La classe granulaire GE est celle la plus étalée ce qui favorise une porosité plus faible. Cette caractéristique augmente le nombre de contacts entre les grains et agit à deux niveaux : i) une conductivité thermique plus élevée ; ii) le maintien de la continuité du film d'eau actif à travers le squelette granulaire. Ces conditions favorisent le phénomène de succion de l'eau interstitielle au front de gel. La classe granulaire GE affiche une légère augmentation de la teneur en eau de 1% dans la partie gelée par rapport à l'état initial. Toutefois, la teneur en eau du sol non gelé plus élevée suggère qu'il ne s'est pas produit de succion de l'eau au front de gel. La classe granulaire GI dont la valeur de la porosité est la plus importante présente le comportement en condition de gel le plus stable. Une grande porosité favorise un gradient thermique supérieur, un profil de teneur en eau croissant avec la profondeur et une hauteur de stabilisation du front de gel moins profonde.

Des essais SP_0 comparatifs entre le granulat de VPC et de pierre calcaire sont exécutés avec la classe granulaire la plus à risque en condition de gel, la classe GE. L'influence de la nature granulaire sur la sensibilité au gel est évaluée selon la caractéristique de surface spécifique. La surface spécifique est utilisée pour quantifier l'épaisseur du film d'eau actif adsorbé à la surface des grains. Une valeur croissante de la surface spécifique contribue au maintien du réseau d'eau adsorbée et donc du réseau d'eau capillaire à travers le corps granulaire grossier. Pour la fraction passant le tamis 400 microns de la classe granulaire GE, la pierre calcaire possède une surface spécifique supérieure à celle du granulat de VPC.

Les résultats SP_0 expérimentaux pour la pierre calcaire et le VPC présentent des régimes thermiques similaires où le gradient thermique de la frange gelée est équivalent, et où le front de gel se stabilise à 65% de la hauteur de l'échantillon. Toutefois, une augmentation de la teneur en eau dans la partie gelée par rapport au sol non gelé de 5% est observée pour la pierre calcaire, tandis que le VPC affiche une diminution de 3%. La redistribution de la teneur en eau en fin d'essai suggère que dans l'échantillon de pierre calcaire, il y a eu présence du phénomène de succion au front de gel. La valeur accrue de la surface spécifique pour la pierre calcaire contribue à l'acheminement d'une plus grande quantité d'eau au front de gel. Ainsi, la pierre calcaire présente un risque de sensibilité au gel supérieur au granulat de VPC.

L'absence de particules fines dans les classes granulaires à l'étude a permis d'observer un comportement stable en condition de gel. L'ensemble des échantillons de matériaux granulaires grossiers de VPC et de pierre calcaire n'a produit aucun soulèvement. Ainsi, le niveau de sévérité du potentiel de ségrégation des matériaux granulaires grossiers est négligeable.

2) Détermination des performances des granulats de VPC et de calcaire en tant que barrière thermique

La phase III du plan expérimental consiste à étudier l'effet d'une barrière thermique sur le potentiel de ségrégation d'un sol gélif. La mise en place d'une barrière thermique (BT) placée au-dessus du sol gélif a pour objectif de limiter la pénétration du front de gel et de protéger le sol gélif. Des barrières thermiques de VPC et de pierre calcaire dans un état sec et saturé ont été testées au sein d'une cellule de gel. Les résultats montrent que l'état de saturation de la barrière thermique modifie davantage le régime thermique de la frange gelée dans le sol gélif.

Les barrières thermiques saturées de VPC et de pierre calcaire présentent des caractéristiques au gel très similaires. La congélation de l'eau interstitielle de la barrière thermique a favorisé le transfert du flux de chaleur du plateau supérieur au sol gélif sous-jacent. La conductivité thermique améliorée de la barrière thermique congelée a développé une frange gelée plus épaisse, comportant une température au front de ségrégation (T_{so}) plus basse que le sol de référence. La température T_{so} plus froide a généré un potentiel de succion de la frange gelée plus élevé, ce qui a pour effet de diminuer la vitesse d'écoulement d'eau au front de gel, le taux de soulèvement et le potentiel de ségrégation.

La barrière thermique sèche a modifié davantage le comportement au gel par rapport au sol de référence. Les barrières thermiques sèches ont réduit le transfert de chaleur entre le plateau supérieur et le sol gélif résultant en un gradient thermique plus bas. L'effet isolant de la barrière thermique a développé une frange gelée plus mince comportant une température T_{so} plus élevée dans le sol de référence. Une température T_{so} plus chaude a généré un potentiel de succion de la frange gelée plus bas. La barrière thermique sèche de pierre calcaire a ralenti la vitesse de

progression du front de gel dans le sol gélif produisant des lentilles de glace très épaisses. En revanche, la barrière thermique sèche de VPC a empêché la formation de lentilles de glace dans le sol gélif. À l'interface de la barrière thermique de VPC et du sol gélif, il s'est formé un substrat de glace.

Les indices de performance au gel suggèrent que la barrière thermique composée de VPC a mieux performé que celle de pierre calcaire. La barrière thermique saturée de VPC présente une teneur en eau dans la partie gelée inférieure à celle du sol de référence et celle de la barrière saturée de pierre calcaire. La barrière thermique sèche de VPC a produit moins de soulèvements au gel et a protégé le sol gélif de la formation de lentilles de glace, en comparaison avec le sol de référence et la barrière thermique sèche de pierre calcaire.

3) Détermination du potentiel des granulats de VPC et de calcaire en tant que barrière capillaire

La phase IV du plan expérimental consiste à étudier l'effet d'une barrière capillaire sur le potentiel de ségrégation d'un sol gélif. La mise en place d'une barrière capillaire (BC) placée entre le niveau d'eau libre et la hauteur de stabilisation du front de gel du sol de référence a pour objectif de réduire la vitesse d'écoulement d'eau au front de gel. Des barrières capillaires de VPC et de pierre calcaire ont été testées au sein d'une cellule de gel. Les résultats montrent que la barrière capillaire de VPC et de pierre calcaire contribue à une diminution du taux de soulèvement, du potentiel de succion de la frange gelée et de la teneur en eau dans la partie gelée.

La barrière capillaire composée de VPC est celle qui a permis de réduire davantage la vitesse d'écoulement d'eau au front de gel et par le fait même le taux de soulèvement. La conductivité thermique plus faible du granulat de VPC a produit un refroidissement plus accentué de la partie supérieure de l'échantillon. Ce refroidissement produit un gradient thermique plus élevé, ce qui diminue le potentiel de ségrégation. Par conséquent, on pose l'hypothèse que la caractéristique de la surface spécifique plus faible du granulat de VPC réduit la capacité à conduire l'eau dans la partie supérieure de l'échantillon. En condition saturée, les barrières

capillaires de VPC et de pierre calcaire ont permis de réduire le taux de soulèvement, ce qui n'est pas le cas pour les barrières capillaires géosynthétiques.

En conclusion, les essais SP_0 suggèrent une tendance du comportement au gel selon les différentes configurations d'échantillons à l'étude :

- la classe granulaire GI de VPC est la plus stable en condition de gel;
- le granulat de VPC présente un risque moins élevé de sensibilité au gel que la pierre calcaire, et ce pour la classe granulaire GE;
- la mise en place d'une barrière thermique ou capillaire a réduit le taux de soulèvement au gel dans le sol gélif, à l'exception de la barrière thermique sèche de pierre calcaire;
- les barrières de VPC ont davantage atténué les effets du gel que les barrières de pierre calcaire;
- la barrière capillaire de VPC demeure la configuration qui réduit au minimum le taux de soulèvement.

À noter que les tendances observées suggèrent que l'introduction de granulat de VPC dans le corps granulaire de chaussée améliorerait la stabilité en condition de gel. Le granulat de VPC affiche un comportement stable en condition de gel. La mise en place de barrière thermique ou de barrière capillaire est un système de protection au gel qui permet d'atténuer le gonflement des sols d'infrastructure gélifs. Les résultats SP_0 réalisés indiquent qu'une barrière granulaire placée à l'interface du sol d'infrastructure et de la structure de chaussée peut agir à deux niveaux tels que protéger le sol d'infrastructure de la pénétration du gel et de réduire l'ascension d'eau dans la structure granulaire de chaussée.

De manière générale, des essais SP_0 supplémentaires seraient une avenue à considérer pour confirmer les tendances observées précédemment énumérées. Les résultats de potentiel de ségrégation pour les différents matériaux à l'étude peuvent servir pour des modélisations par éléments finis, afin de prévoir le comportement au gel des chaussées incorporant des granulats de VPC. Ces comportements au gel notés en laboratoire et des résultats de modélisation par éléments finis permettraient de réaliser une conception de chaussée incorporant des granulats

de VPC. Ainsi, les conditions thermiques pourraient être par la suite observées à l'échelle de la chaussée par le biais d'une planche d'essai instrumentée.

ANNEXE I

APPLICATION DU VPC EN CONSTRUCTION ROUTIÈRE

Plusieurs projets de recherche de provenance internationale ont porté sur l'étude des propriétés mécaniques du verre postconsommation issu des centres de récupération. Le Tableau-A I-1 présente certaines propriétés physiques des particules de verre recyclées étudiées par différents auteurs (Mohsenian Hadad Amlashi, Vaillancourt et Carter, 2015). La distribution granulométrique du granulat de verre concassé provenant du recyclage est comparable à un sable bien calibré avec peu de particules fines tel que SW, SP ou SM, selon la classification USCS (Holtz et Kovacs, 1991). L'étude des propriétés mécaniques de l'agrégat de verre se divise selon la taille maximale des particules passant le tamis 9,5 mm et 4,75 mm respectivement pour les échantillons considérés moyens (MRG) et fins (FRG). En effet, la variation de la distribution granulométrique et la teneur en particules fines influencent les propriétés géotechniques (Disfani et al., 2012). La densité des solides du verre concassé varie généralement de 1,96 g/cm^3 à 2,54 g/cm^3. Wartman, Grubb et Nasim (2004) constatent que la densité des solides du verre concassé de 2,48 et 2,49 est 10 à 15 % inférieure à la densité de la plupart des agrégats naturels utilisés dans le domaine du génie civil.

Tableau-A I-1 Propriétés physiques de base du verre recyclé
Tiré de Mohsenian Hadad Amlashi et al. (2015)

Reference	USCS Soil classification	Maximum particle size (mm)	Coefficient of uniformity (C_u)	Coefficient of curvature (C_c)	Fine content (≤0.075mm) %	Sand content (0.075mm-4.75mm) %	Gravel content (≥4.75mm) %	Specific gravity (G_s)
((FHWA), 1998)	SP	25.4	4.5	1.7	0.6	63	36.4	1.96-2.41
((CWC), 1997; 1998)	SW	19.2	9.8	1.5	2	70	28	2.49
(Su et Chen, 2002)	SP	4.75	4.4	1.2	1	99	0	2.54
(Wartman et al., 2004b)	SW	9.5	6.2-7.2	1.1-1.3	1.2-3.2	70-91.3	5.5-28.8	2.48-2.49
(Grubb et al., 2006)	SP	9.5	4.5	1.2	0.4	70.4	29.2	2.48
(Ooi et al., 2008)	SP-SM	9.5	13	0.8	6	91	3	2.5
(Ali et Arulrajah, 2012)	SW	5	6.2	1.5	2.8	71.2	26	2.49
(Disfani et al., 2012)	FRG SW-SM	4.75	7.6	1.3	5.4	90	10	2.48
(Disfani et al., 2012)	MRG SW-SM	9.5	16.3	2.2	5.2	48	52	2.5

Résistance à l'abrasion

La mesure de la résistance à l'abrasion et aux impacts des granulats est déterminée à l'aide de l'essai Los Angeles (ASTM C 131, 2003). Les spécifications du FHWA (2006) requièrent un taux d'abrasion maximal des particules de 45 % pour la couche de fondation en projet routier. Le Tableau-A I-2 comptabilise l'ensemble des résultats de compactage et d'abrasion des granulats de VPC concassés réalisés par différentes études. La perte de masse par abrasion des particules de verre concassé répertoriée varie de 24,0 % à 42,0 %. Disfani et al. (2011) estime que la valeur à l'abrasion LA des échantillons de VPC de 24,8% et 25,4% présente une durabilité semblable aux agrégats naturels (24%) et au béton concassé recyclé (28%) tel que rapporté par Arulrajah, Vuong et Wilson (2009).

Compactage

Les essais de compactage d'un sol ou matériau granulaire en laboratoire visent à déterminer la relation entre la teneur en eau optimale permettant d'atteindre la masse volumique sèche

maximale. Deux méthodes de compaction sont appliquées sur le granulat de VPC concassé et les résultats de différentes études sont comptabilisés au Tableau-A I-2. L'essai du Proctor Standard ASTM D698 (ASTM, 2012) produit des valeurs de densité sèche de 1,59 à 1,84 g/cm^3 pour des teneurs en eau de 8,0 à 12,8 %. Tandis que l'essai de Proctor modifié ASTM D1557 (ASTM, 2015) quant à lui donne des valeurs de densité sèche légèrement plus élevées de 1,83 à 1,99 g/cm^3 pour des teneurs en eau légèrement plus faibles de 5,7 à 8,8 %. La granulométrie bien étalée des échantillons de verre peut influencer sur la capacité de compactage. À cet effet, Bernard et al. (2015) obtiennent une valeur de masse volumique sèche beaucoup plus faible de 1,59 g/cm^3 pour l'essai modifié puisque la courbe granulométrique de son échantillon était très uniforme. D'autre part, la forme convexe des courbes de l'essai Proctor pour le verre recyclé est comparable à celles obtenues sur des agrégats naturels, telles que montrées à la Figure-A I-1. Cependant, la forme affaissée de la courbe de compactage du verre comparativement à celle du granulat naturel indique que la compaction du VPC est moins sensible à la présence d'eau.

Tableau-A I-2 Comptabilisation des résultats de compactage et d'abrasion du VPC
Adapté de Mohsenian Hadad Amlashi et al. (2015)

Références	Taille maximale des particules (mm)	Proctor Standard		Proctor Modifié		L.A. Abrasion (%)
		Masse volumique sèche (g/cm3)	Teneur en eau optimale (%)	Masse volumique sèche (g/cm3)	Teneur en eau optimale (%)	
(Dames et Moore, 1993)	6,4	1,59	---	1,78	---	30,0
	19,0	1,72	---	1,89	---	42,0
(Henry et Hunnewell, 1997)	9,50	1,64	---	---	---	---
(FHWA, 1998)	25,4	---	---	1,83 - 1,93	5,7 - 7,5	30,0 - 42,0
(CWC,1998)	19,2	---	---	---	---	29,9 - 41,7
(Wartman et al, 2004)	9,5	1,71	12,8	1,87	9,7	24,0
(Grubb et al, 2006)	9,5	1,74	8,0	1,91	8,0	---
(Ooi et al, 2008)	FRG (4,5)	---	---	1,89	9,7	27,0
	MRG (9,5)					33,0
(Disfani et al, 2011)	FRG (4,5)	1,70	12,5	1,78	10	24,8
	MRG (9,5)	1,84	9,0	1,99	8,8	25,4
(Arulrajah et al, 2014)	5,0	---	---	1,88	9,2	27,0
(Bernard et al. 2015)	1,25	---	---	1,59	13,0	---

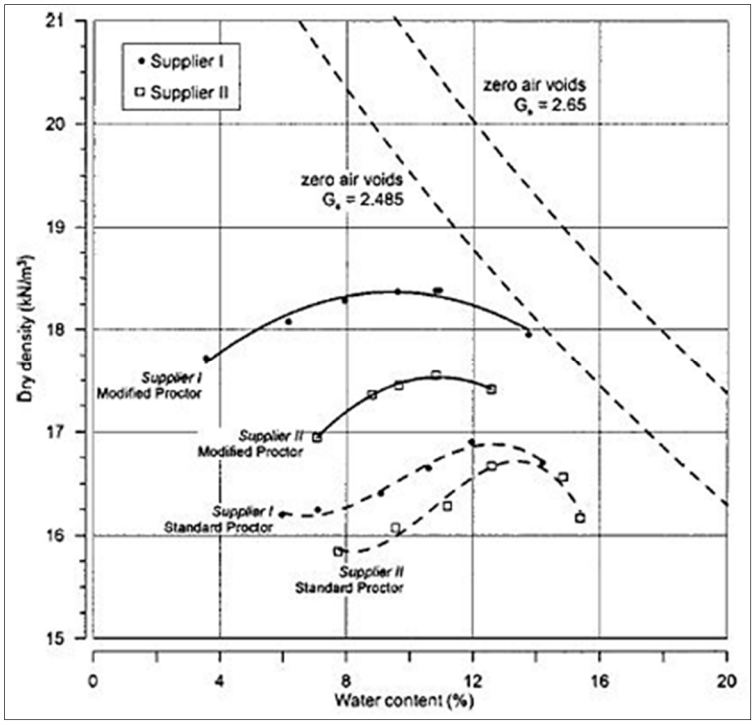


Figure-A I-1 Les résultats d'essai de compaction de Proctor standard et modifié sur le verre concassé
Tirée de Wartman, Grubb et Nasim (2004)

Résistance au cisaillement

L'évaluation des caractéristiques de résistance au cisaillement du VPC est basée sur les résultats aux essais de cisaillement direct et de compression triaxiale drainée. Les essais sont réalisés sur des échantillons de verre compacté à 90 % ±2,4 % des résultats de Proctor modifié. La résistance au cisaillement selon différents auteurs est comptabilisée au Tableau-A I-3 tiré de Mohsenian Hadad Amlashi et al. (2015). La classe granulaire moyenne (MRG) composée de particules plus grossières possède un angle de friction interne supérieure à la classe granulaire fine (FRG). Les échantillons plus grossiers possèdent un meilleur contact entre les particules (Disfani et al., 2011). En général, le verre concassé montre un comportement dilatant similaire à un matériau granulaire naturel.

Tableau-A I-3 Résistance au cisaillement du verre recyclé
Adapté de Mohsenian Hadad Amlashi et al. (2015)

Références	Cisaillement direct		Cisaillement triaxial
	Contrainte normale (kPa)	Angle de frottement interne ϕ (°)	Angle de frottement interne drainé ϕ (°)
(FHWA, 1998)	---	51-53	---
(CWC,1998)	49-98-196	49-53	42-46
(Wartman et al., 2004)	0-60	59-63	48
	60-120	55-61	
	120-200	47-68	
(Grubb et al., 2006)	45-160	42	---
(Ooi et al., 2008)	46,1-262	41	---
(Disfani et al., 2011) (FRG)	30-120	45-47	40
	60-240	42-43	38
	120-480	40-41	35
(Disfani et al., 2011) (MRG)	30-120	52-53	42
	60-240	50-51	41
	120-480	---	41
(Arulrajah et al., 2014)	---	---	38

Conductivité hydraulique

En conception de chaussée, l'un des rôles des couches granulaires est d'évacuer l'eau vers l'extérieur de la structure. Les propriétés influençant la conductivité hydraulique sont la distribution granulométrique, la forme des particules, la porosité et la surface spécifique. D'après plusieurs auteurs, la conductivité hydraulique est plus élevée pour les particules de VPC plus grossières (FHWA, 2006) (CWC, 1996) (Wartman, Grubb et Nasim, 2004) (Disfani et al., 2011). Les performances de conductivité hydraulique sont équivalentes à un matériau granulaire naturel compacté de type SW, pouvant servir pour des applications de filtration ou de couche drainante, voir la Figure-A I-2.

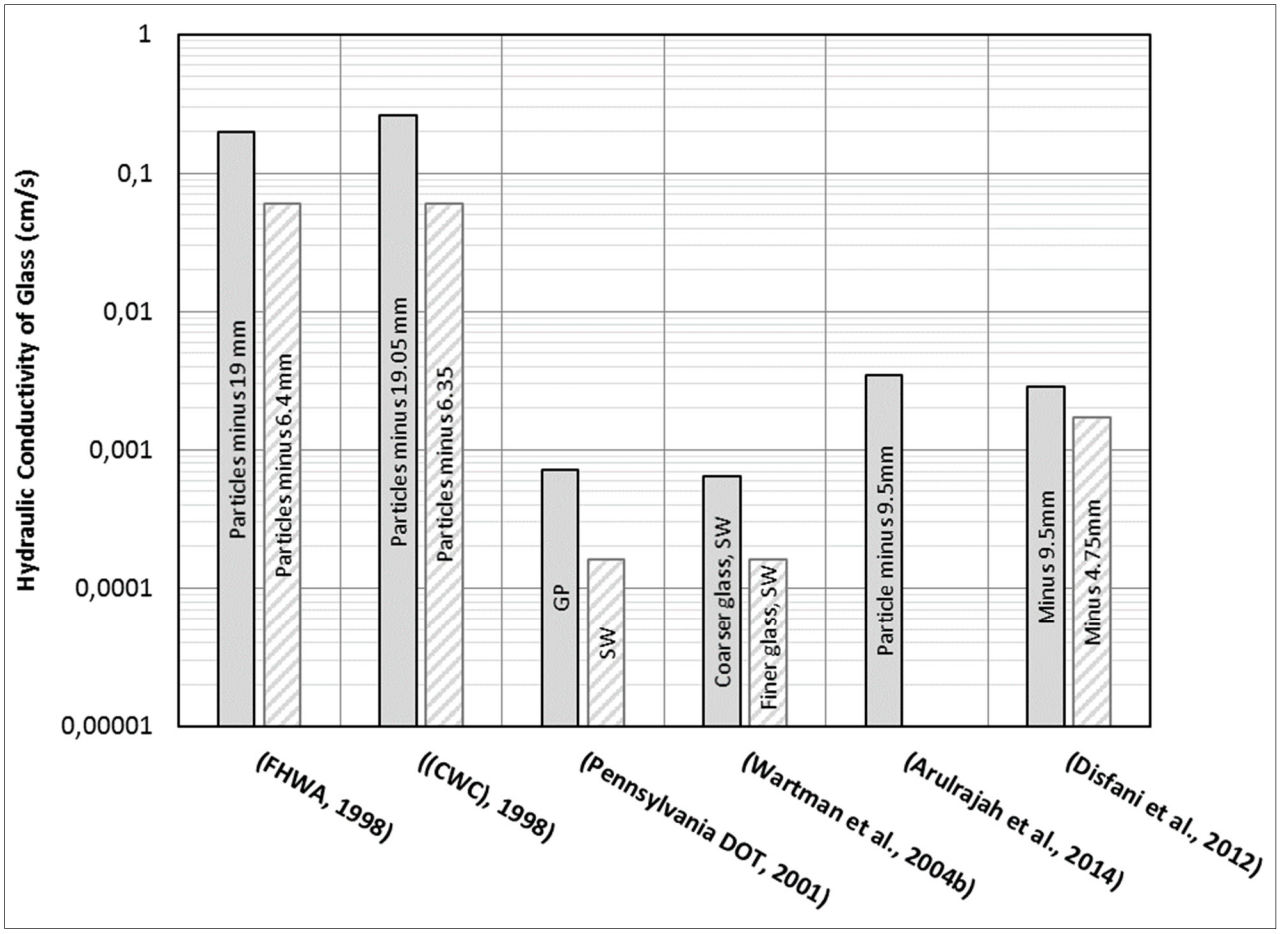


Figure-A I-2 Les résultats de conductivité hydraulique
sur les particules de verre selon différents auteurs
Tirée de Mohsenian Hadad Amlashi et al. (2015)

ANNEXE II

DIMENSIONNEMENT AU GEL DES CHAUSSÉES SOUPLES AU QUÉBEC

La stratégie de conception au gel d'une chaussée dépend des risques de détérioration considérés comme ayant la plus grande incidence sur la structure de chaussée soit, la fissuration du revêtement de surface causée par le soulèvement au gel soit, la perte de la capacité portante du sol support en période de dégel ou la combinaison de ces deux dégradations. Le dimensionnement au gel peut se faire suivant trois étapes : le choix de la stratégie de conception, les mesures de mitigation et la gestion de risques.

La première étape est d'établir la stratégie de conception au gel adoptée pour contrer l'apparition des détériorations associées à l'action du gel. Une approche de conception élaborée pour limiter le soulèvement au gel tend à contrôler les mécanismes de gel selon trois facteurs qui sont la gélivité du sol, le régime thermique au voisinage de l'isotherme 0 °C et la condition hydrique du site. D'autre part, une approche de conception visant à restreindre la perte de capacité portante printanière du sol support doit faire une évaluation de la variation de la température saisonnière et de la condition hydrique du site.

La deuxième étape du dimensionnement au gel cherche à établir le type d'intervention permettant de contrer les effets du gel, soit par une adaptation de la structure de chaussée ou par la neutralisation de l'action du gel. L'adaptation de la structure de chaussée appliquée pour résister aux effets du gel est une technique de dimensionnement permettant d'anticiper les déformations saisonnières ceci afin de contrer les conséquences du soulèvement différentiel. Le revêtement de la structure de chaussée peut être assoupli par l'emploi d'un bitume plus mou permettant une plus grande déformation avant rupture (Doré, 1997). De même, l'utilisation d'additifs tels que les polymères ou les fibres augmente la résistance en tension et rend l'enrobé moins susceptible à la fissuration (Doré, 1997). Afin de limiter les dégradations associées à la perte de capacité portante attribuable à la période de dégel, des mesures visant à augmenter la rigidité de l'ensemble de la structure sont prises (Lalonde Renaud, 2015). Les techniques

utilisées sont l'usage d'un revêtement bitumineux plus épais, l'installation de dalles de béton ou encore la stabilisation à la chaux de la couche de fondation (Doré, 1997). La neutralisation de l'action du gel tend à contrôler les mécanismes de formation de lentilles de glace. La technique la plus couramment employée est le surépaississement de la couche de sous-fondation, afin de répartir les contraintes, d'absorber les déformations et de protéger de la pénétration du gel le sol d'infrastructure (Doré, 1997).

À la troisième étape, le concepteur détermine une gestion de risques par la mise en place d'une protection au gel partielle ou totale. Une protection partielle tolère l'apparition de détériorations et une perte de la durabilité de la chaussée. La protection partielle au gel d'une structure de chaussée requiert un plan d'entretien. Le choix de la protection totale nécessite que la structure de chaussée soit dimensionnée à partir des conditions de gel les plus critiques de la région. La protection totale assure que la structure ne subit aucun changement de comportements ou de pertes de service durant l'année causée par la variation de la température (Doré, 1997).

Approche de dimensionnement au gel du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports

La méthode de conception de chaussée au gel du MTMDET est la seule étudiée dans le cadre de ce projet. D'abord parce qu'il s'agit de l'approche utilisée présentement au Québec et ensuite parce qu'elle applique le concept du potentiel de ségrégation. CHAUSSÉE 2 est un logiciel de dimensionnement de chaussée souple développé par le MTMDET basé sur une approche empirique. Le logiciel possède deux volets de calcul pour évaluer la protection au gel requise. Le premier calcul est basé sur l'expérience et le second sur une approche mécanistique. La stratégie de dimensionnement au gel adoptée par CHAUSSÉE 2 est concentrée sur la réduction de l'endommagement du revêtement (St-Laurent, 2007).

Le premier volet de protection au gel qui est basé sur l'expérience, porte sur le critère de «GEL(1994) ». La méthode conventionnelle de dimensionnement au gel propose un critère de protection partielle qui se traduit par une épaisseur minimale de l'ensemble de la structure de

chaussée permettant de résister à l'action du gel dans une mesure acceptable. La protection partielle est établie à partir d'une courbe développée par le Département fédéral des Transports du Canada (DFTC) mettant en relation l'épaisseur de la chaussée en fonction de l'indice de gel de la région (Figure-A II-1). L'épaisseur de la chaussée proposée correspond à la moitié de la profondeur du front de gel. Ce critère de gel estime que pour des sols dont la susceptibilité au gel est modérée, les déformations engendrées par la pénétration du gel se limitent aux seuils admissibles. Le critère de gel 1994 conduit à un dimensionnement de chaussée procurant une protection partielle, car la protection totale peut être très dispendieuse considérant que la pénétration du gel peut atteindre de 1,5 à 3,0 mètres de profondeur (St-Laurent, 2012 ; 2006).

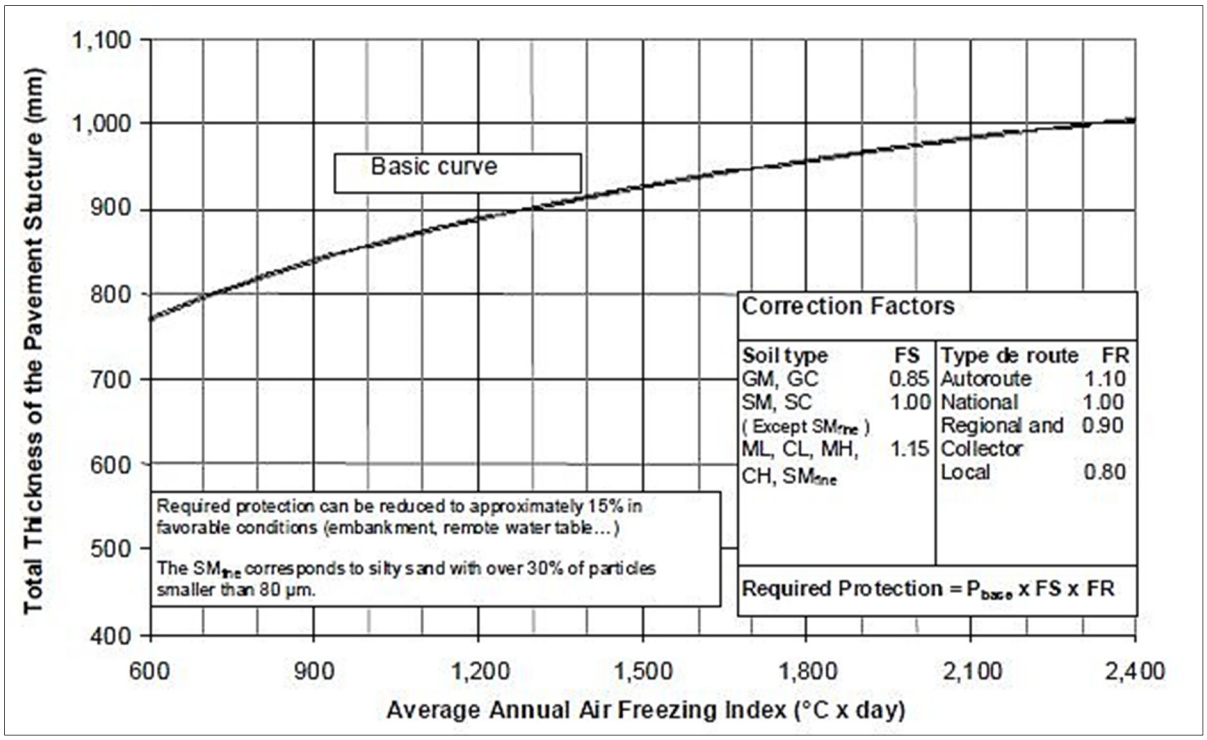


Figure-A II-1 Critère 1994 de Protection partielle contre le gel
Tirée de St-Laurent (2012)

Le deuxième volet de protection au gel repose sur une approche mécanistique. Le système de prédiction de la profondeur du gel et du soulèvement de la chaussée est basé sur le concept du potentiel de ségrégation et du régime thermique, notamment au niveau de l'isotherme 0 °C. Les indicateurs principaux de performance au gel sont les soulèvements de la chaussée et le

différentiel de l'indice IRI puisqu'ils sont mesurables. Par défaut, CHAUSSÉE 2 établit qu'un soulèvement inférieur à 50 mm n'affecte pas le confort de roulement, mais il devient problématique lorsqu'il excède 80 mm. Le seuil admissible du différentiel de l'indice IRI doit être inférieur à 1m/km.

Description du modèle mathématique

Le modèle mathématique traite de deux aspects du gel soit, la profondeur du gel (z) et le soulèvement (h). Le calcul de la pénétration du front de gel se base sur l'équilibre du bilan thermique (W/m^2) qui procède par incrémentation pour chaque jour de l'hiver (dt), afin d'évaluer le rythme de progression dans la structure de chaussée (d_{zo}) (A II-1). La détermination du taux de progression du front de gel en fonction du temps permet aussi d'évaluer le soulèvement causé par le changement de volume dû à la solidification de l'eau (h_0) (St-Laurent, 2012).

$$q_- = q_+ + q_f + q_s \qquad \text{(A II-1)}$$

L'équation du bilan thermique regroupe les variables principales associées aux flux thermiques (W/m^2) qui se développent dans une structure de chaussée durant la pénétration d'un front de gel. La variable q_- est associée au flux thermique qui s'échappe vers la surface traversant l'intervalle gelé, q_+ représente le flux géothermique, q_f est le flux thermique généré par la nucléation de l'eau interstitielle et q_s est le flux thermique généré par l'approvisionnement en eau causé par la formation de lentilles de glace. Le flux thermique q- se calcule selon (k_f) la conductivité thermique du sol gelé au front de gel (W/°Cm) et selon le gradient de température du sol gelé au front de ségrégation (°C/m) (A II-2).

$$q_- = k_f * gradT \qquad \text{(A II-2)}$$

Le flux thermique q+ est une fonction empirique développée par Côté et Konrad (2009) (A II-3). Où T_{ma} est la température moyenne annuelle de l'air pendant la période hivernale (°C) et

C_q est un facteur de correction applicable lors de la présence d'isolation dans la structure de chaussée.

$$q_+ = \left\{\frac{(250 - t)[9.62 + 1.44\ln(T_{ma})]}{250 + [5.78 - 1.62\ln(T_{ma})] * t} + 1.2\right\} * C_q \quad \text{(A II-3)}$$

Le flux thermique q_f généré par le processus de nucléation prend en compte la chaleur latente du sol gelé au front de ségrégation (Wh/m^3) et le taux de progression du front de gel (A II-4). Le flux thermique q_s représente la chaleur latente de fusion de l'eau (Wh/m^3) selon le potentiel de ségrégation sous charge (m^2/Kh) et le gradient thermique au front de ségrégation (A II-5).

$$q_f = L * \frac{dz_o}{dt} \quad \text{(A II-4)}$$

$$q_s = L_w * SP * gradT \quad \text{(A II-5)}$$

Le soulèvement total (dh) regroupe deux composantes, le changement volumique de l'eau interstitielle passant à la phase solide (dh_o) (A II-6) et l'expansion volumique causée par la formation de lentilles de glace (dhs) (A II-7).

$$dh_o = \frac{dVi * w * \rho_d}{\rho_w * dz_o} \approx dVi * (Sr * n) * dz_o \quad \text{(A II-6)}$$

$$dh_s = 1.09 * SP * dt(gradT) = 1.09 * SP * dt(\frac{T_f - T_p}{k_{fz} * R_{fz}}) \quad \text{(A II-7)}$$

Le calcul du soulèvement total est le cumul des soulèvements pour chacun des incréments de calcul de la pénétration du front de gel (A II-8). La profondeur de gel (dz) comprend la progression du front de gel et une correction appliquée en fonction de l'évolution du soulèvement (A II-9).

$$dh = (dh_s + dh_0); h = \sum(dh) \quad \text{(A II-8)}$$

$$dz = (dz_0 + dh); z = \sum(dz) \quad \text{(A II-9)}$$

Les résultats des simulations ont été validés par l'étude de 18 sections de chaussées instrumentées dont sept disposants d'une couche isolante. Le suivi du comportement des sections de chaussée s'est échelonné sur un à huit hivers. L'intervalle de confiance de la simulation des caractéristiques au gel à 85% correspond à un soulèvement de ±11 mm et à 99% de ±22 mm de soulèvement. L'inexactitude peut être causée par le modèle de calcul, mais aussi par la justesse des paramètres d'entrées au logiciel. Le modèle intègre des facteurs influençant la pénétration du gel et le soulèvement tels que le type de matériaux, l'épaisseur des couches et la teneur en eau du sol support. L'exactitude des résultats est très sensible à la qualité des données initiales, mais plus particulièrement à la valeur du potentiel de ségrégation du sol d'infrastructure (St-Laurent, 2012) (St-Laurent, 2007).

ANNEXE III

BILAN THERMIQUE DU SYSTÈME D'ISOLATION DE LA CELLULE

Le calcul du bilan thermique du système isolant de la cellule permet de vérifier la résistivité thermique du système à limiter la formation de pont thermique. Une cellule en polyéthylène haute densité (PE-HD) sous forme de «I» est utilisée dont la paroi est constituée d'une épaisseur de 25,26 à la partie supérieure et 63,26mm à la base. La norme LC 22-331 (BNQ, 2010) recommande une cellule de chlorure de polyvinyle (PVC) dont la paroi a une épaisseur de 20mm. La conductivité thermique du PE-HD est de 0,5 W/K*m, comparativement au PVC qui est de 0,17W/K*m. Un système d'isolation est mis en place pour contrer la différence de résistivité thermique. Le système d'isolation est composé de deux bandes de néoprène et de panneaux de polystyrène tel qu'illustré à la Figure-A III-1.

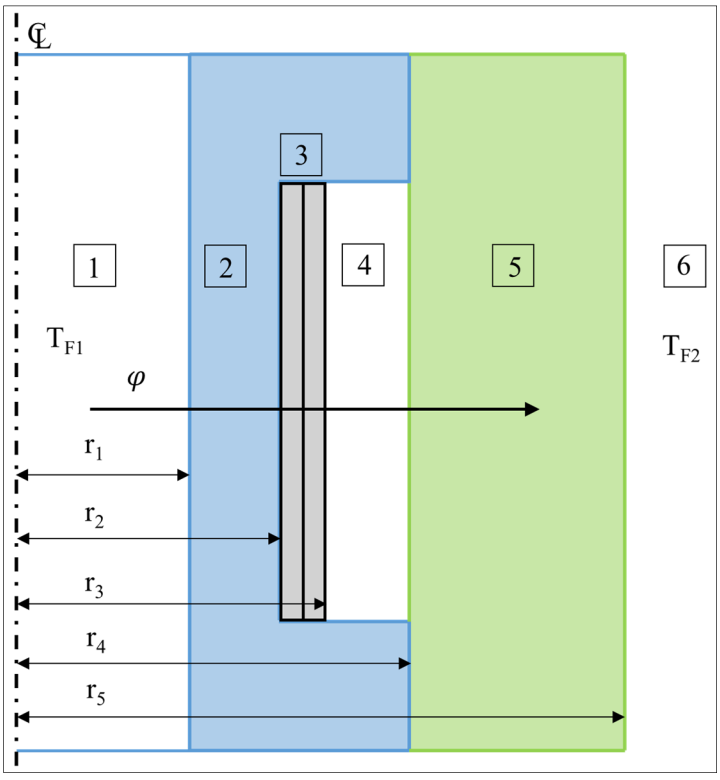


Figure-A III-1 Schéma des transferts de chaleur d'un cylindre multicouches;
1-Eau liquide, 2- Polyéthylène, 3- Bandes de néoprène, 4- Air à T=275,15K,
5- Polystyrène expansé, 6- Air à T=275,15K

Tableau-A III-1 Paramètres des composantes du système d'isolation

Position	Matériau	Épaisseur (m)	Rayon (m)	Conductivité thermique λ (W/m*K)	Longueur L (m)
r1	Eau (Liquide)	0,051	0,051	0,600	0,200
r2	Polyéthyène Haute densité (Paroi mince)	0,025	0,076	0,500	0,200
r4	Polyéthyène Haute densité (Paroi épaisse)	0,038	0,114	0,500	0,074
r3	Néoprène	0,013	0,089	0,230	0,126
r4	Air à 275,15K	0,025	0,114	0,024	0,126
r5	Polystyrène expansé	0,062	0,176	0,035	0,200

Le bilan thermique du système d'isolation de la cellule est traité comme un cylindre recouvert de plusieurs couches de matériaux différents et où l'on connait les températures interne et externe des faces du cylindre. En régime permanent, le flux de chaleur (φ) traversant chacune des couches est calculé selon l'équation A III-1 tirée de (Jannot, 2012).

$$\varphi = \frac{T_{F1} - T_{F2}}{\frac{1}{h_1 * 2\pi * r_1 * L} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi * \lambda_a * L} + \frac{\ln(\frac{r_x}{r_2})}{2\pi * \lambda_b * L} + \frac{\ln(\frac{r_y}{r_x})}{2\pi * \lambda_z * L} + \frac{1}{h_2 * 2\pi * r_y * L}} \quad \text{(A III-1)}$$

Où φ est le flux de chaleur (W), h est le coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m^2*K), λ est la conductivité thermique (W/m*K), r est le rayon (m), L est la longueur (m), T_{F1} est la température interne du cylindre (K) et T_{F2} est la température externe du cylindre (K). Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre les fluides et les faces internes et externes est déterminé à partir de l'équation A III-2.

$$h = N_u * (\frac{\lambda}{L_C}) \quad \text{(A III-2)}$$

où Nu, le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les transferts thermiques entre un fluide et une paroi et Lc est la longueur du tube (m). L'équation A III-3 est la corrélation du nombre de Nusselt pour traduire la convection entre un fluide statique et un solide.

$$Nu = 2 + 1.8 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{1/3} \quad \text{(A III-3)}$$

Où Re correspond au nombre de Reynolds, un nombre sans dimension qui caractérise le type d'écoulement (A III-4) et Pr, le nombre de Prandtl est un nombre sans dimension qui caractérise la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide (A III-5).

$$Re = \frac{\rho * V * L}{\mu} \quad \text{(A III-4)}$$

$$Pr = \frac{\mu * Cp}{\lambda} \quad \text{(A III-5)}$$

Pour le calcul de h_1 on applique l'hypothèse que le cylindre contient de l'eau sous forme liquide. Les valeurs utilisées pour le calcul de h1 sont présentées au Tableau-A III-2. La valeur h_2 utilisée est de 5W/m*K correspondant à un transfert de chaleur pour un environnement où l'air est calme, faisant référence à l'enceinte thermique.

Tableau-A III-2 Valeurs pour le calcul de h1

h_l	6,685 W/m*K
Nu	2,228
Re	$4{,}416*10^{-3}$
Pr	6,975
ρ	1000 kg/m^3
V	$4{,}416*10^{-8}$ m/s
L	0,1m
Cp	4185 J/kg*K
λ	0,6 W/m*K
μ	$1{,}00*10^{-3}$Pa*s

Le transfert de flux de chaleur calculé est de -0,101W pour le système d'isolation illustré à la Figure-A III-1. Le transfert de flux de chaleur pour une cellule de PVC avec une paroi de 20mm équivaut à -0,624W. Une valeur négative du flux de chaleur représente le passage d'une température initiale qui traverse vers un milieu plus chaud.

ANNEXE IV

PROGRAMME LABVIEW POUR L'ACQUISITION DES DONNÉES

LabVIEW est une plateforme de conception de programmes pour la mesure par acquisition de données et l'automatisation du système de contrôle. La conception de programmes utilise un langage graphique.

Le programme d'acquisition de mesures pour le montage expérimental SP_0 automatise la prise de mesures de 14 thermistances et un LVDT. Les fonctions principales du programme LabVIEW sont : la prise de mesure du voltage sortant (Vo) de chacun des canaux du système d'acquisition; l'application d'une moyenne du signal reçu pour chacun des canaux; l'application de l'équation de traduction du signal en température; l'application de l'équation de calibration; l'enregistrement des valeurs calculées dans un document Excel. Ce programme est répété en boucle selon un intervalle déterminé de deux minutes. Le diagramme principal du programme est présenté à la Figure-A IV-1. Le voltage d'alimentation de 5 volts est envoyé dans le circuit seulement lors de la prise de mesure (Figure-A IV-2). Un échauffement des thermistances enrobées d'époxy est perçu lors d'une alimentation du voltage continue. De plus, l'intervalle de prise de mesure est déterminé pour minimiser ce phénomène d'échauffement. La programmation d'icône SubVI est réalisée pour les équations de traduction du signal et de calibration telle que présentée aux Figures-A IV-3 et A IV-4. L'automatisation de la prise de mesure et l'enregistrement des données sont configurés selon quatre structures présentées à la Figure-A IV-5. L'interface du programme permet d'exécuter le programme, d'activer l'enregistrement des valeurs calculées et de faire le suivi en temps réel de la température et du déplacement du LVDT (Figure-A IV-6).

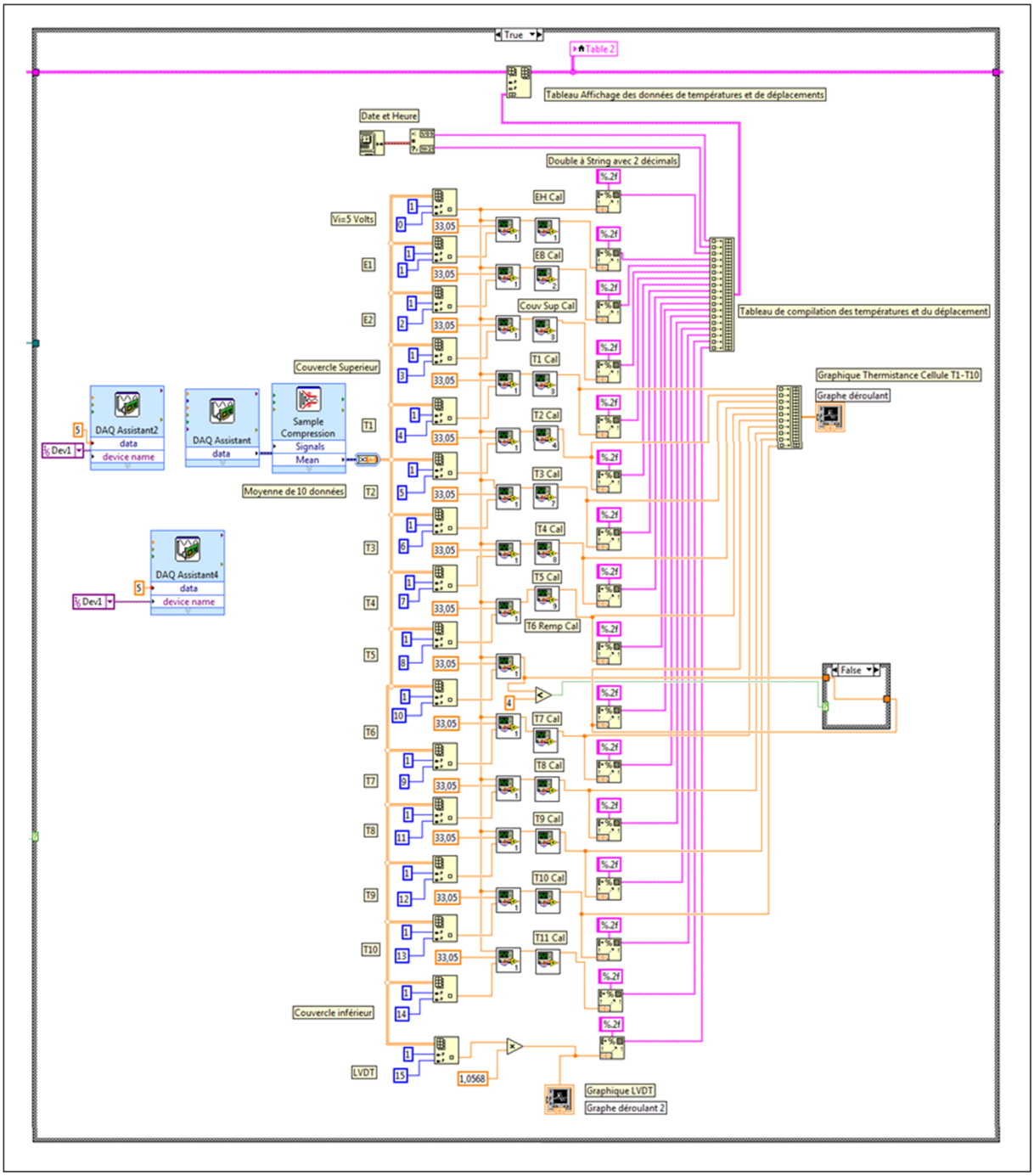


Figure-A IV-1 Diagramme principal de la programmation

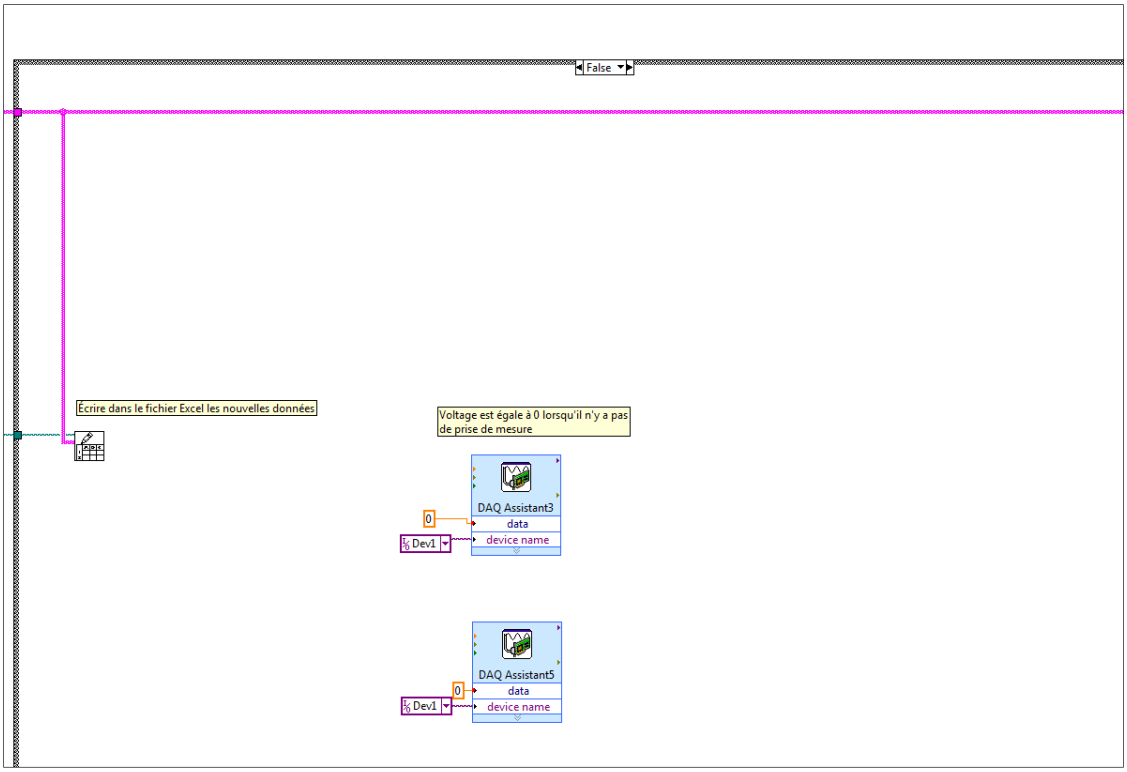


Figure-A IV-2 L'arrêt du voltage d'alimentation entre l'intervalle de prise de mesure

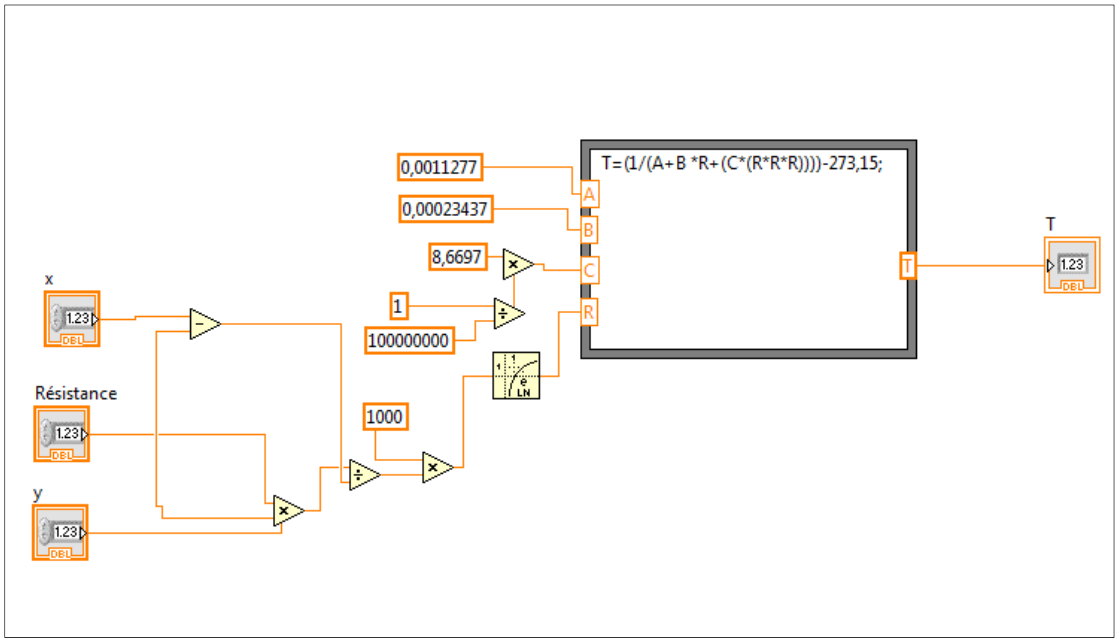


Figure-A IV-3 Exemple de programmation de l'équation de conversion du signal en tension en température

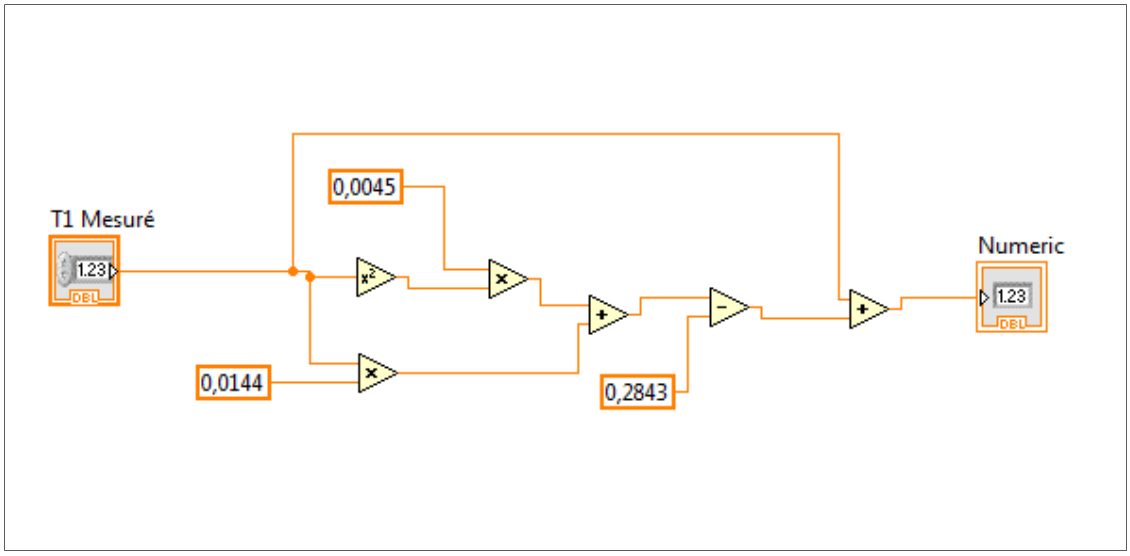


Figure-A IV-4 Exemple de programmation de l'équation de calibration d'une thermistance

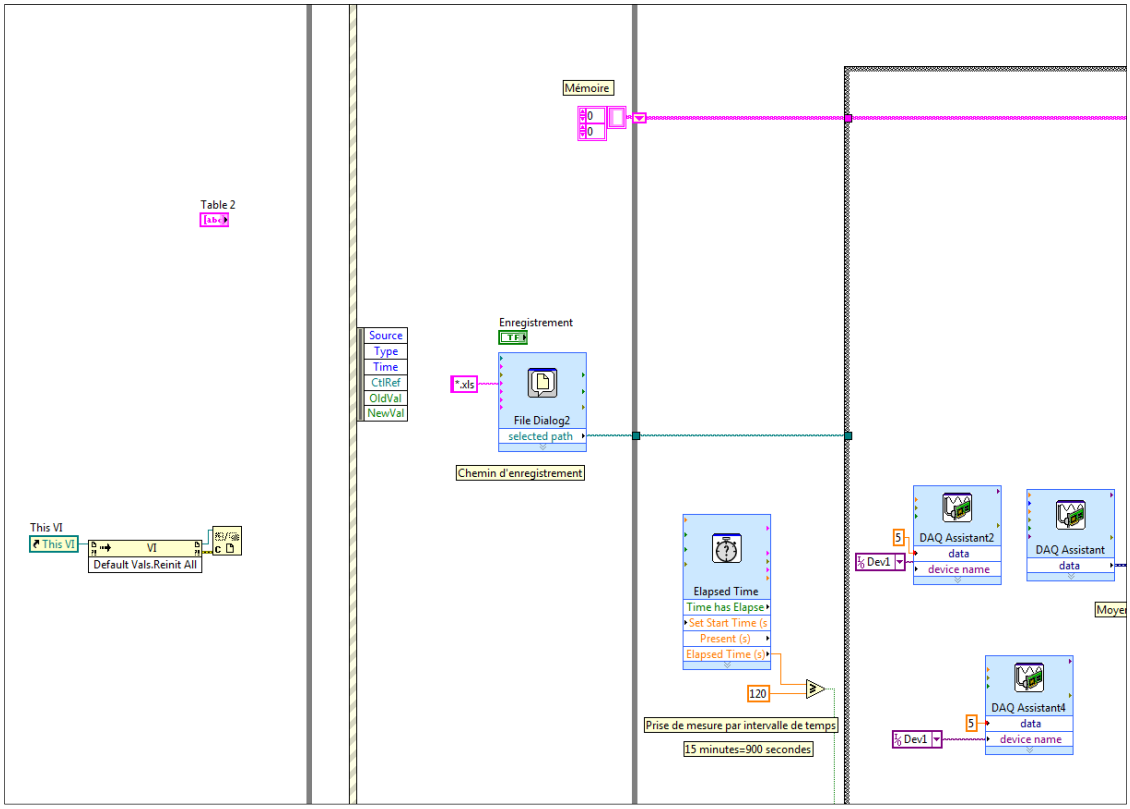


Figure-A IV-5 Structures du programme et automatisation de la prise de mesure

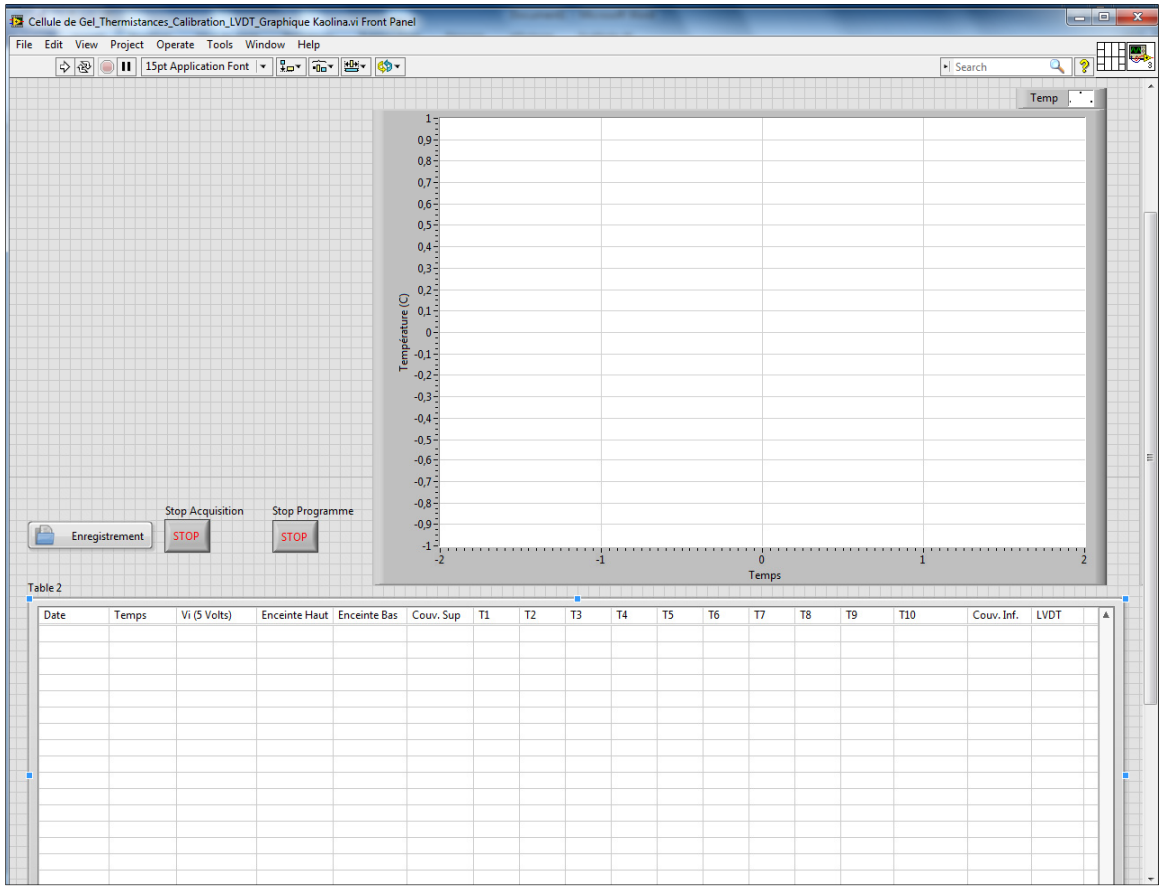


Figure A IV-6 Interface du programme d'acquisition de donnée

ANNEXE V

CALIBRATION DES SONDES DE TEMPÉRATURE

Calibration des thermistances du montage expérimental SP_0

Les Figures-A V-1 à A V-3 présentent les courbes de calibration des thermistances calibrées pour le montage expérimental du potentiel de ségrégation. Les courbes de calibration montrent la température calculée avec l'équation 3.1, en fonction de l'écart entre la température calculée et la température mesurée par le thermomètre de calibration. Une courbe de tendance est tracée suivant les points de calibration pour estimer l'erreur en fonction de la température calculée. Le Tableau-A V-1 présente les équations de calibration des thermistances calibrées.

Tableau-A V-1 Équations de calibration des thermistances tirées des courbes de calibration

No. Thermistance	Équation de calibration
T1	$y(x)=0,0045x^2+0,0144x-0,2843$
T2	$y(x)=0,0028x^2+0,086x-0,4656$
T3	$y(x)=0,0022x^2+0,031x-0,3998$
T4	$y(x)=0,0029x^2+0,0287-0,4699$
T5	$y(x)=0,0038x^2+0,00543x+0,6165$
T6	$y(x)=0,0082x^2+0,0345x-0,6924$
T7	$y(x)=0,0078x^2+0,0378x-0,5426$
T8	$y(x)=0,0038x^2+0,497x-0,3782$
T9	$y(x)=-0,0005x^2+0,0636x-0,3462$
T10	$y(x)=-0,0011x^2+0,0692x-0,447$
T11 (Couvercle inf.)	$y(x)=-0,0021x2+0,0945x-0,4951$
Couvercle supérieur	$y(x)=0,0588x-0,8585$
EH (Enceinte Haut)	$y(x)=0,248x-1,3004$
EB (Enceinte Bas)	$y(x)=0,2896x-2,57$

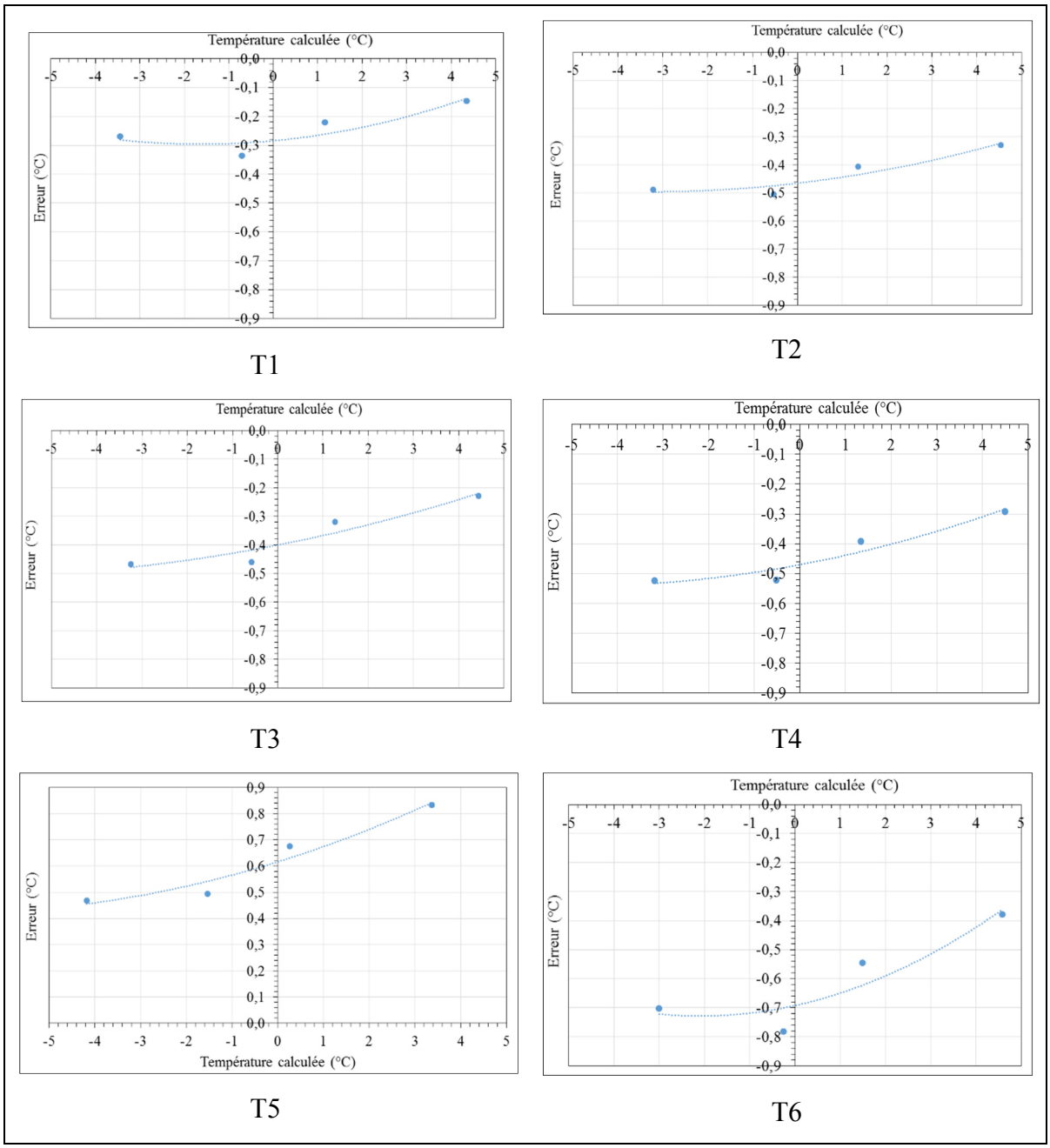


Figure-A V-1 Courbes de calibration des thermistances T1 à T6

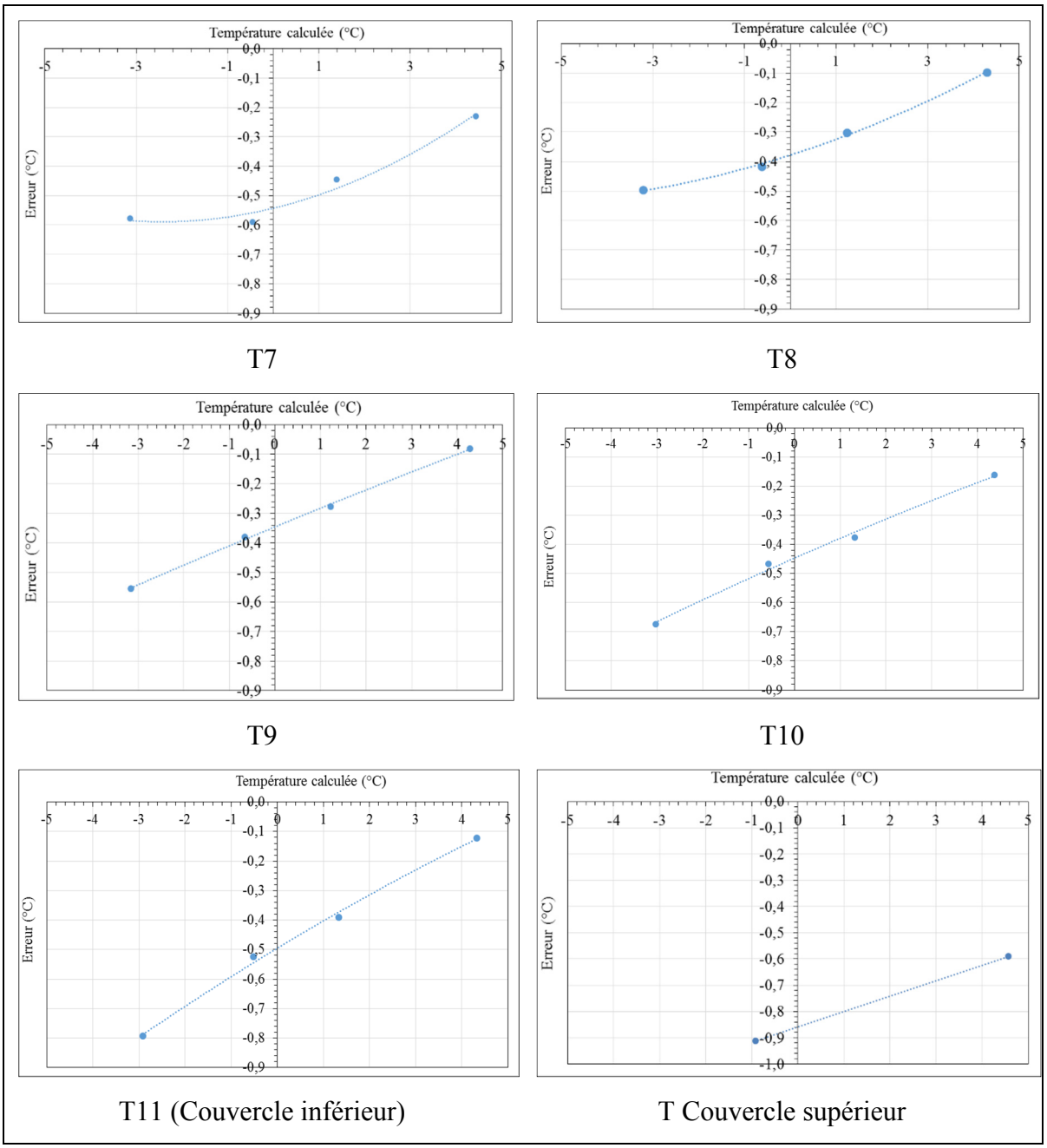


Figure-A V-2 Courbes de calibration des thermistances T7 à T11 et du couvercle supérieur

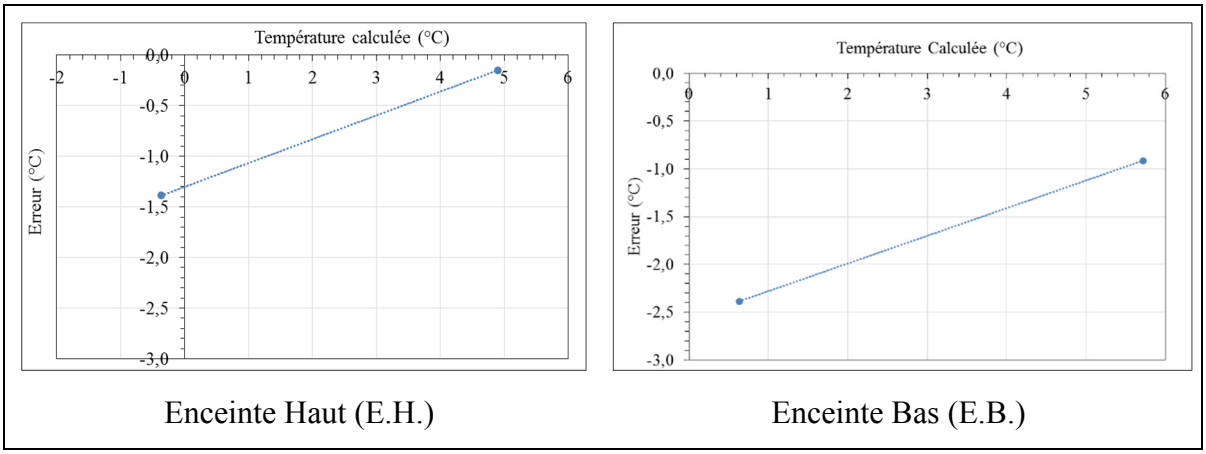


Figure-A V-3 Courbes de calibration des thermistances placées dans l'enceinte thermique

Le Tableau-A V-2 présente, pour les thermistances T1 à T11, la température calculée, la température corrigée et la précision des températures corrigées par rapport à la température mesurée par le thermomètre de calibration (4,20 °C ; 0,94°C ; -1,04 °C ;-3,71°C). Selon la norme LC 22-331 (BNQ, 2010) la précision des thermistances requise est de ± 0,05°C.

Tableau-A V-2 Précision de la température corrigée des thermistances T1 à T11

No. Thermistance	Température Calculée (°C)	Température Corrigée (°C)	Différence de température (°C)
T1	4,35	4,21	-0,01
	1,16	0,90	0,04
	-0,70	-1,00	-0,04
	-3,44	-3,72	0,01
T2	4,53	4,21	-0,01
	1,35	0,91	0,03
	-0,53	-1,01	-0,03
	-3,22	-3,72	0,01
T3	4,43	4,21	-0,01
	1,26	0,90	0,04
	-0,58	-1,00	-0,04
	-3,24	-3,72	0,01
T4	4,49	4,21	-0,01
	1,33	0,91	0,04
	-0,52	-1,00	-0,04
	-3,19	-3,72	0,01
T5	3,37	4,21	-0,01
	0,27	0,90	0,04
	-1,53	-0,99	-0,05
	-4,18	-3,72	0,01
T6	4,43	4,21	-0,01
	1,39	0,91	0,03
	-0,45	-1,01	-0,03
	-3,13	-3,72	0,01
T7	4,58	4,22	-0,02
	1,49	0,86	0,08
	-0,26	-0,96	-0,08
	-3,01	-3,73	0,02
T8	4,30	4,20	0,00
	1,24	0,93	0,01
	-0,62	-1,03	-0,01
	-3,21	-3,71	0,00
T9	4,28	4,20	0,00
	1,22	0,95	-0,01
	-0,66	-1,05	0,01
	-3,15	-3,71	0,00
T10	4,36	4,20	0,00
	1,32	0,96	-0,02
	-0,57	-1,06	0,02
	-3,04	-3,70	-0,01
T11 (Couvercle inférieur)	4,32	4,20	0,00
	1,33	0,96	-0,02
	-0,52	-1,06	0,02
	-2,92	-3,70	-0,01

Calibration des thermocouples du montage expérimental T_f

La calibration des thermocouples du montage expérimental pour la détermination du point de congélation T_f est déterminée pour une température de calibration de +2,0°C. Le Tableau-A V-3 présente la calibration des thermocouples pour l'essai du point de congélation sur les matériaux à l'étude.

Tableau-A V-3 Calibration des thermocouples pour l'essai du point de congélation T_f

No. Thermocouple	Position	Échantillon	Écart de température (°C)
TC1	VPC	GE	-0,39
TC2			-0,10
TC3		GI	-0,20
TC4			-0,24
TC5		GF	-0,32
TC6			-0,37
TC7	Calcaire	GE	-0,29
TC8			-0,03
TC60	Enceinte thermique	N/A	0,30
TC56			0,21
TC63			0,22

ANNEXE VI

PROCÉDURE DE RECONSTITUTION DES ÉCHANTILLONS

Le Tableau-A VI-1 présente les masses requises à la préparation d'un mélange de 1000g de la classe GE, GI et GF.

Tableau-A VI-1 Masse de matériau retenue par tamis pour la préparation de 1000g de mélange granulaire

Tamis (mm)	**Classe (g)**		
	GE	**GI**	**GF**
2,5	250	0	0
1,25	250	500	0
0,63	250	500	500
0,315	100	0	200
0,16	100	0	200
0,08	50	0	100

ANNEXE VII

RAPPORT DE LABORATOIRE EXP

La valeur au bleu de méthylène des matériaux à l'étude a été déterminée par le laboratoire EXP suivant la norme LC 21-255 (BNQ, 2013). Les Figures-A VII-1 à VII-3 exposent l'évolution de l'auréole de la tâche en fonction du dosage de bleu de méthylène réalisé sur les échantillons de silt et argile, de pierre calcaire et de verre. Le rapport de laboratoire EXP affiche les résultats de l'essai au bleu de méthylène sur le silt et argile (Figure-A VII-4), la pierre calcaire (Figure-A VII-5) et le verre (Figure-A VII-6).

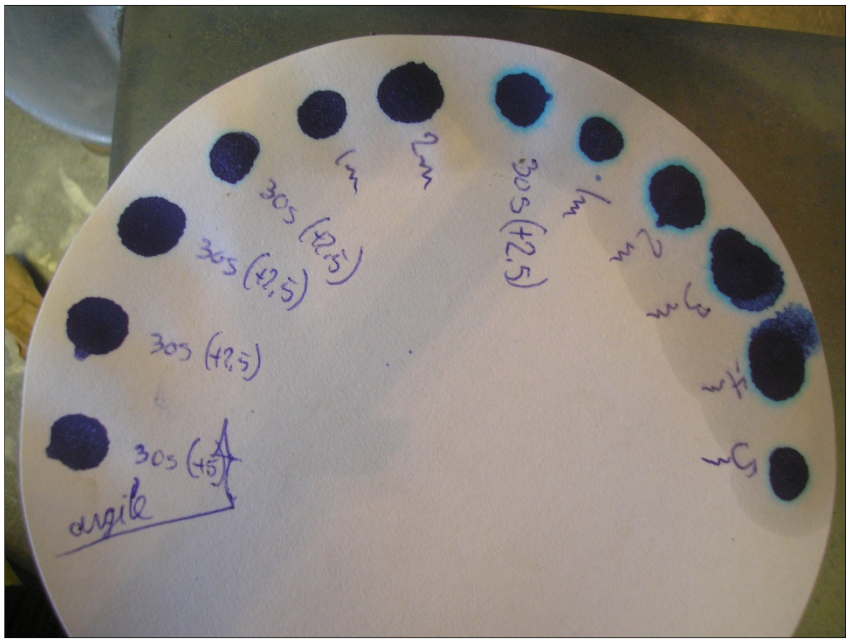


Figure-A VII-1 Évolution de l'auréole de la tâche en fonction du dosage de bleu de méthylène pour le silt et argile

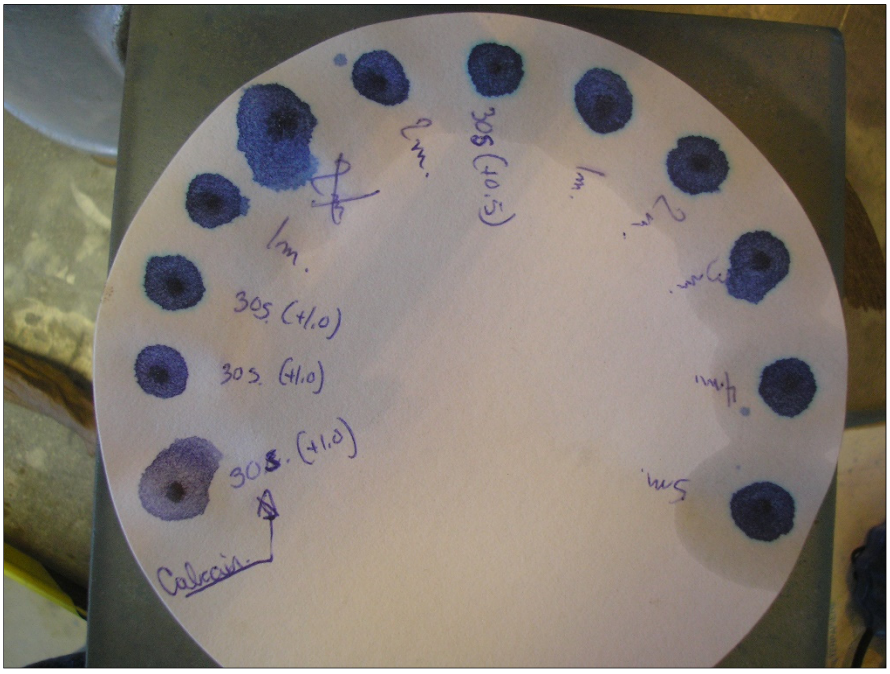


Figure-A VIII-2 Évolution de l'auréole de la tâche en fonction du dosage de bleu de méthylène pour la pierre calcaire

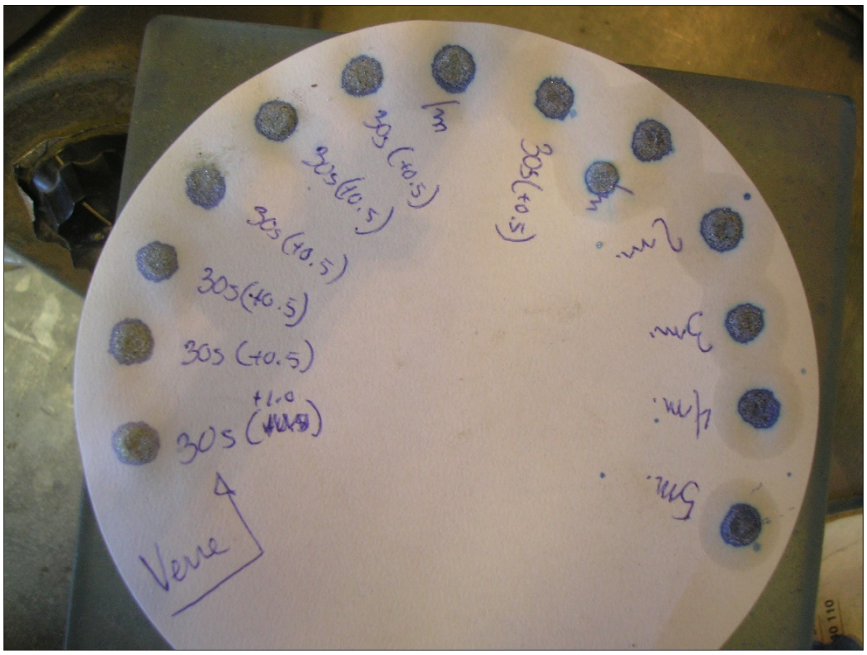
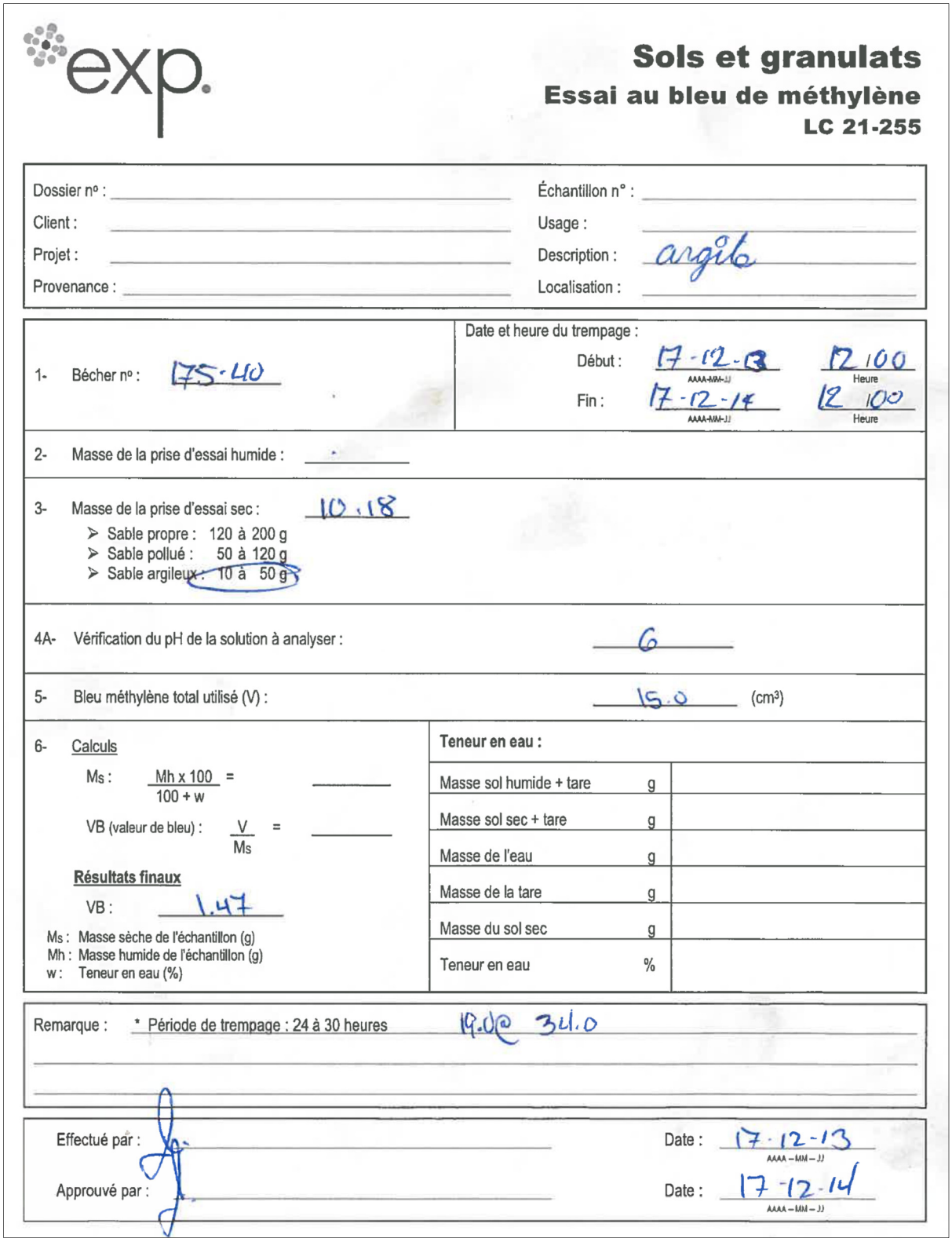


Figure A VIII-3 Évolution de l'auréole de la tâche en fonction du dosage de bleu de méthylène pour le verre



exp.

Sols et granulats

Essai au bleu de méthylène

LC 21-255

Dossier nº : _____ Échantillon n° : _____

Client : _____ Usage : _____

Projet : _____ Description : argile

Provenance : _____ Localisation : _____

1- Bécher nº : 175-40

Date et heure du trempage :

Début : 17-12-13 (AAAA-MM-JJ) 12 100 Heure

Fin : 17-12-14 (AAAA-MM-JJ) 12 100 Heure

2- Masse de la prise d'essai humide : _____

3- Masse de la prise d'essai sec : 10.18

- Sable propre : 120 à 200 g
- Sable pollué : 50 à 120 g
- Sable argileux : 10 à 50 g

4A- Vérification du pH de la solution à analyser : 6

5- Bleu méthylène total utilisé (V) : 15.0 (cm³)

6- Calculs

Ms : $\frac{Mh \times 100}{100 + w}$ = _____

VB (valeur de bleu) : $\frac{V}{Ms}$ = _____

Résultats finaux

VB : 1.47

Ms : Masse sèche de l'échantillon (g)
Mh : Masse humide de l'échantillon (g)
w : Teneur en eau (%)

Teneur en eau :

Masse sol humide + tare	g	
Masse sol sec + tare	g	
Masse de l'eau	g	
Masse de la tare	g	
Masse du sol sec	g	
Teneur en eau	%	

Remarque : * Période de trempage : 24 à 30 heures 19.0@ 34.0

Effectué par : _____ Date : 17-12-13 (AAAA-MM-JJ)

Approuvé par : _____ Date : 17-12-14 (AAAA-MM-JJ)

Figure-A VII-4 Résultats de l'essai au bleu de méthylène sur le silt et argile du laboratoire EXP

exp.

Sols et granulats

Essai au bleu de méthylène

LC 21-255

Dossier nº : _____ Échantillon n° : _____

Client : _____ Usage : _____

Projet : _____ Description : calcaire

Provenance : _____ Localisation : _____

1- Bécher nº : 175-47

Date et heure du trempage :

Début : 17-12-13 (AAAA-MM-JJ) 12 100 (Heure)

Fin : 17-12-14 (AAAA-MM-JJ) 12 18 (Heure)

2- Masse de la prise d'essai humide : —

3- Masse de la prise d'essai sec : 17.79

- Sable propre : 120 à 200 g
- ~~Sable pollué : 50 à 120 g~~
- Sable argileux : 10 à 50 g

4A- Vérification du pH de la solution à analyser : 7

5- Bleu méthylène total utilisé (V) : 3.5 (cm³)

6- Calculs

Ms : $\frac{Mh \times 100}{100 + w}$ = _____

VB (valeur de bleu) : $\frac{V}{Ms}$ = _____

Résultats finaux

VB : 0,20

Ms : Masse sèche de l'échantillon (g)
Mh : Masse humide de l'échantillon (g)
w : Teneur en eau (%)

Teneur en eau :

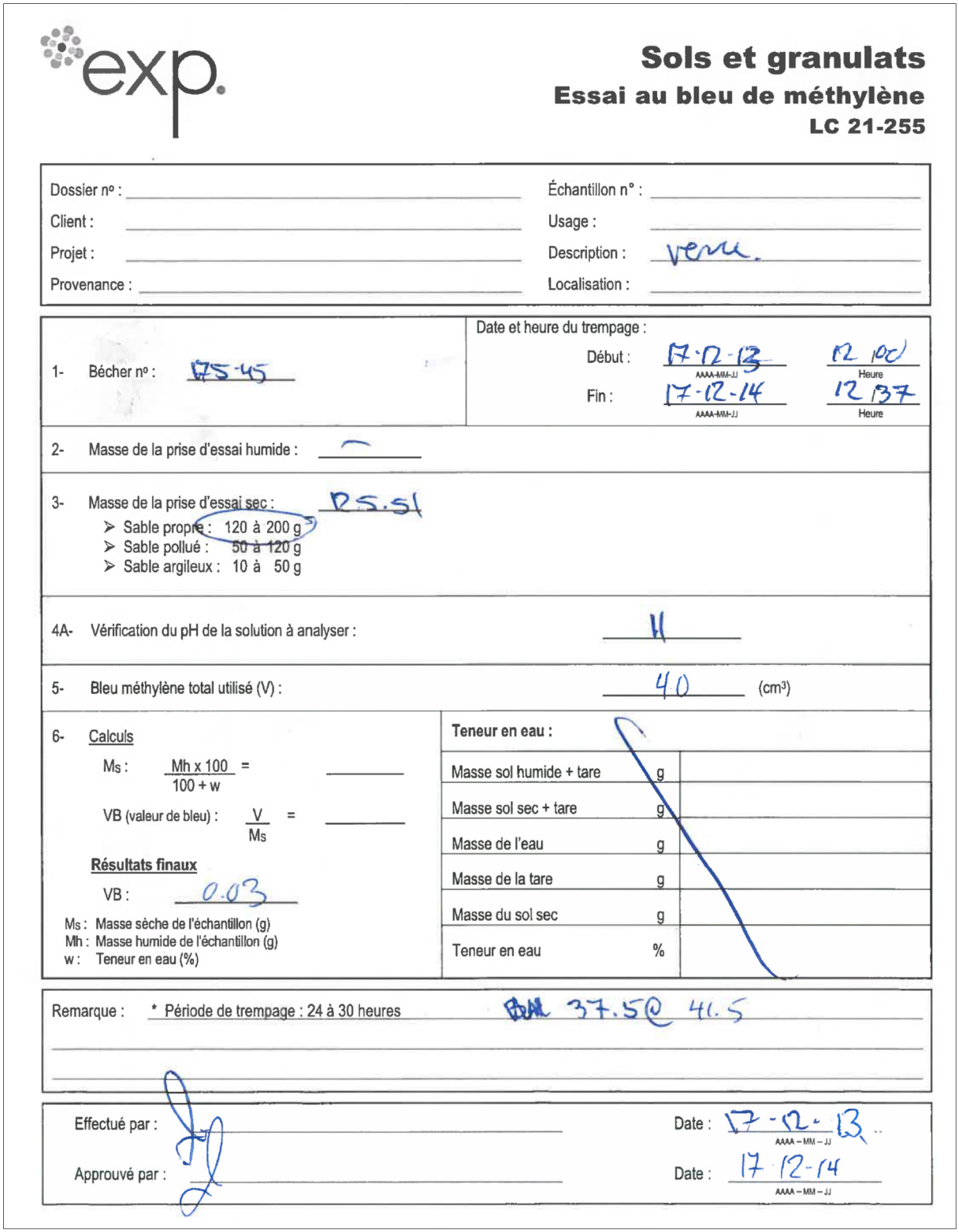
Masse sol humide + tare	g	
Masse sol sec + tare	g	
Masse de l'eau	g	
Masse de la tare	g	
Masse du sol sec	g	
Teneur en eau	%	

Remarque : * Période de trempage : 24 à 30 heures 34.0 37.5

Effectué par : _____ Date : 17-12-13 (AAAA – MM – JJ)

Approuvé par : _____ Date : 17-12-14 (AAAA – MM – JJ)

Figure-A VII-5 Résultats de l'essai au bleu de méthylène sur la pierre calcaire du laboratoire EXP



exp.

Sols et granulats

Essai au bleu de méthylène

LC 21-255

Dossier nº : _____ Échantillon n° : _____

Client : _____ Usage : _____

Projet : _____ Description : verre.

Provenance : _____ Localisation : _____

1- Bécher nº : 175-45

Date et heure du trempage :

Début : 17-12-13 (AAAA-MM-JJ) 12 100 (Heure)

Fin : 17-12-14 (AAAA-MM-JJ) 12 137 (Heure)

2- Masse de la prise d'essai humide : —

3- Masse de la prise d'essai sec : 25.51

- Sable propre : 120 à 200 g
- Sable pollué : ~~50 à 120 g~~
- Sable argileux : 10 à 50 g

4A- Vérification du pH de la solution à analyser : H

5- Bleu méthylène total utilisé (V) : 40 (cm³)

6- Calculs

Ms : $\frac{Mh \times 100}{100 + w}$ = _____

VB (valeur de bleu) : $\frac{V}{Ms}$ = _____

Résultats finaux

VB : 0.03

Ms : Masse sèche de l'échantillon (g)
Mh : Masse humide de l'échantillon (g)
w : Teneur en eau (%)

Teneur en eau :		
Masse sol humide + tare	g	
Masse sol sec + tare	g	
Masse de l'eau	g	
Masse de la tare	g	
Masse du sol sec	g	
Teneur en eau	%	

Remarque : * Période de trempage : 24 à 30 heures BM 37.5@ 41.5

Effectué par : _____ Date : 17-12-13 (AAAA – MM – JJ)

Approuvé par : _____ Date : 17-12-14 (AAAA – MM – JJ)

Figure-A VII-6 Résultats de l'essai au bleu de méthylène sur le VPC du laboratoire EXP

ANNEXE VIII

RÉSULTATS ESSAIS SP_0 SUR LE SOL DE RÉFÉRENCE ET PHOTOS DES ÉCHANTILLONS À LA FIN DES ESSAIS SP_0

Tableau-A VIII Résultats des essais SP_0 sur le sol de référence

Matériau		Silt et argile			
No. Essai		SA-1	SA-2	SA-3	SA-4
Conditionnement	**Degré de saturation (%)**	95	94	93	95
	Précision degré de saturation (%)	0,79	0,94	1,08	1,43
	Indice des vides (e%)	0,90	1,03	1,01	1,00
	Hauteur éprouvette (cm)	12,60	12,80	12,19	12,48
	Masse volumique sèche (g/cm3)	1,41	1,32	1,34	1,34
	Pression de surcharge (kPa)	15	0	45	50
	Durée de Conditionnement (heures)	70,1	27,6	42,5	47,7
	Tassement total (mm)	0,0	0,5	0,3	0,20
	Température Enceinte (°C)	+ 2,67°C	+ 2,18°C	+ 4,41°C	+ 2,99°C
M.O	**Début du soulèvement (heure)**	4,27	13,20	7,67	30,87
	Consommation en eau (cm3)	151,4	119,1	148,7	143,0
	Durée Mode Opératoire (heures)	71,5	91,8	117,2	142,43
	Soulèvement total (mm)	24,9	20,9	21,5	26,3
Calcul	**Régime thermique (T_p) heure**	54,13	55,30	51,90	84,45
	Profondeur du front de gel (mm)	40 (32%)	48 (38%)	46,7 (38%)	49,1 (39%)
	Temp. front de ségrégation T_{so} (°C)	-0,48	-0,43	-0,48	-0,52
	Prof. front de ségrégation T_{so} (mm)	43,20	52,98	49,32	50,68
	Épaisseur frange de glace (mm)	18,5	15,4	18,5	23,6
	Succion à l'interface 0°C (cm H_2O)	-60,0	-54,0	-60,0	-65,0
	Taux de soulèvement (T_{soul}) mm/h	0,171	0,182	0,173	0,173
	Gradient thermique (Φ) °C/mm	0,026	0,028	0,026	0,022
	Vitesse écoulement de l'eau (mm/h)	0,157	0,167	0,159	0,159
	Teneur en eau (Haut /Centre/Bas)	74 /40 / 40	75 /37 /39	80 /35 /35	81 /35 /36
	Potentiel de ségrégation ($mm^2/°C·h$)	6,0	6,0	6,1	7,2
	Échelle de gélivité	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé

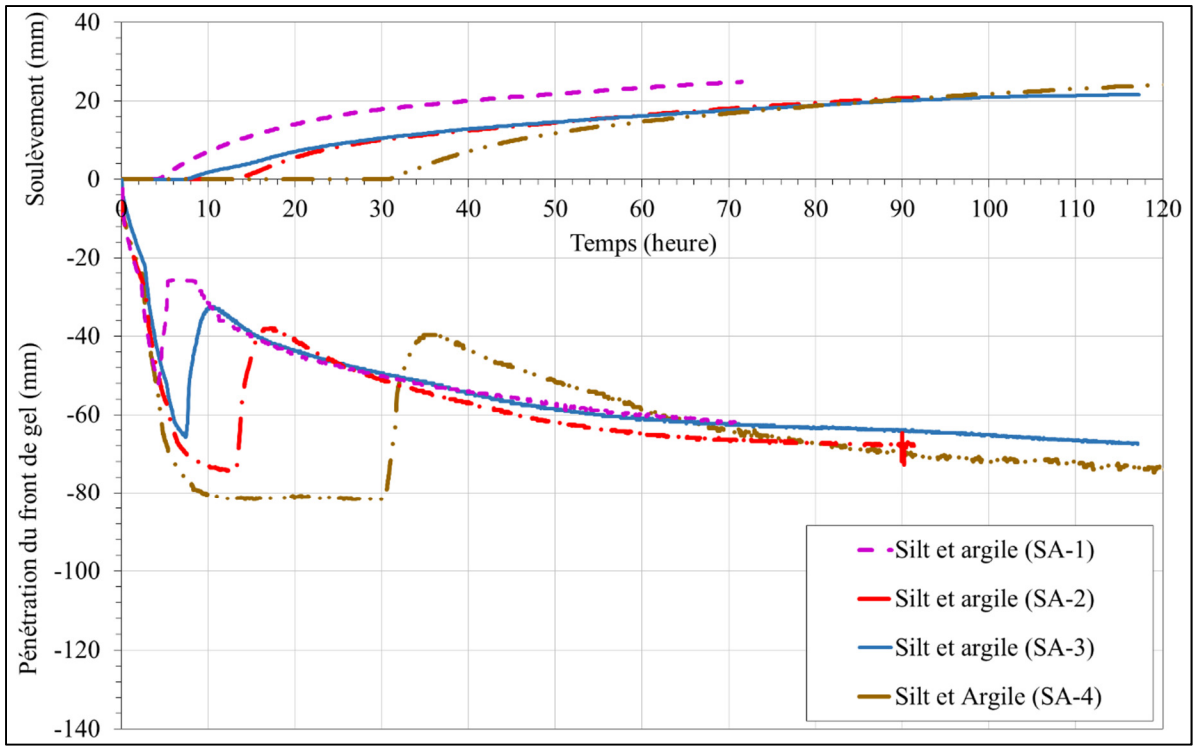


Figure-A VIII-1 Pénétration du front de gel et soulèvement en fonction du temps du sol de référence (SA-1, SA-2, SA-3 et SA-4)

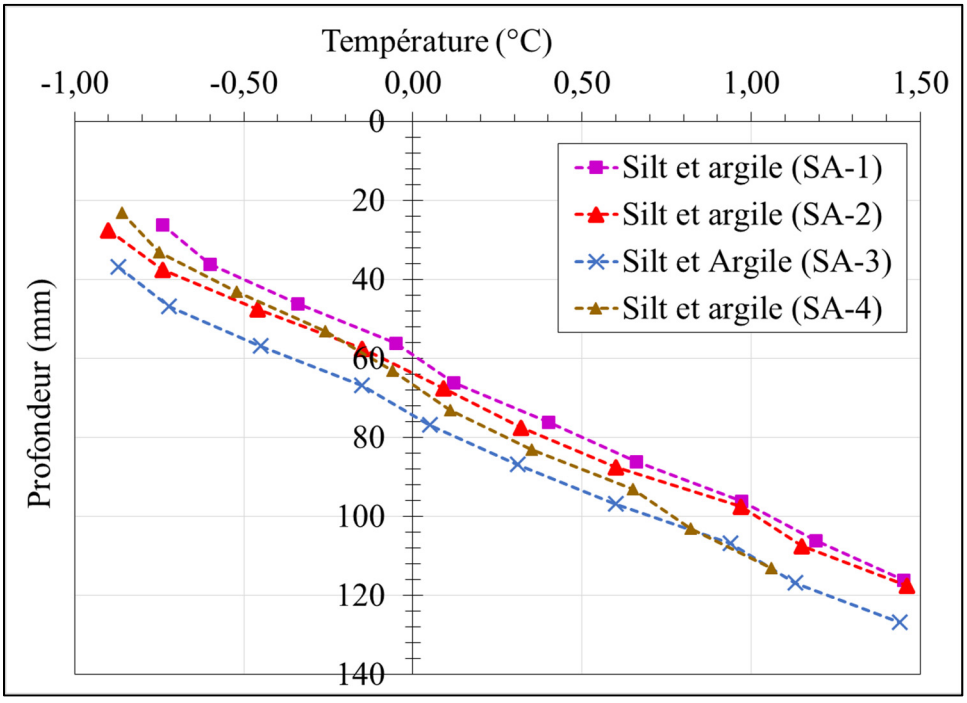


Figure-A VIII-2 Profils de température en fonction de la profondeur au temps de stabilisation T_P du sol de référence (SA-1, SA-2, SA-3 et SA-4)

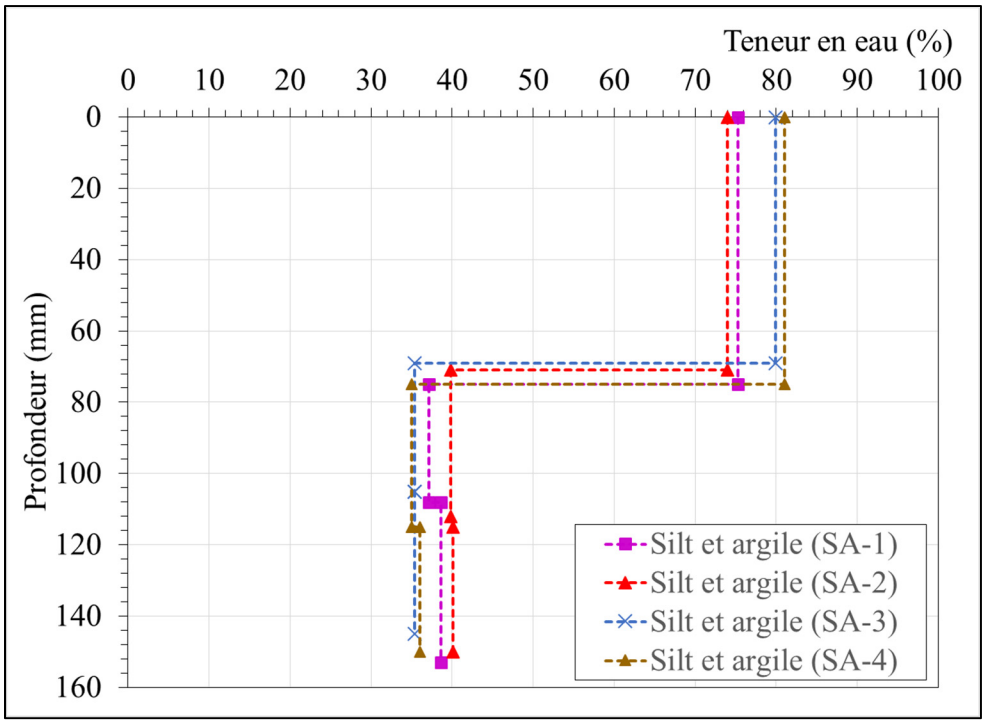


Figure-A VIII-3 Profils de teneurs en eau du sol de référence (SA-1, Sa-2, SA-3 et SA-4) en fin de l'essai SP_0

Photos des échantillons à la fin des essais SP_0



Silt et Argile no.1



Silt et Argile no.2



Silt et Argile no.3



Silt et Argile no.4

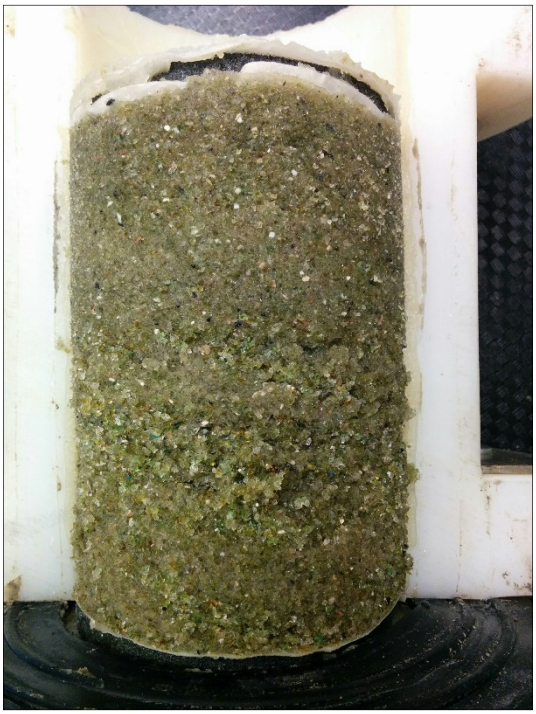
Figure-A VIII-4 Photos des échantillons de silt et argile à la fin de l'essai SP_0



VPC Classe GE



VPC Classe GI



VPC Classe GF



Pierre calcaire Classe GE

Figure-A VIII-5 Photos des échantillons de VPC et de pierre calcaire à la fin de l'essai SP_0



Barrière thermique de VPC sèche



Barrière thermique de calcaire sèche

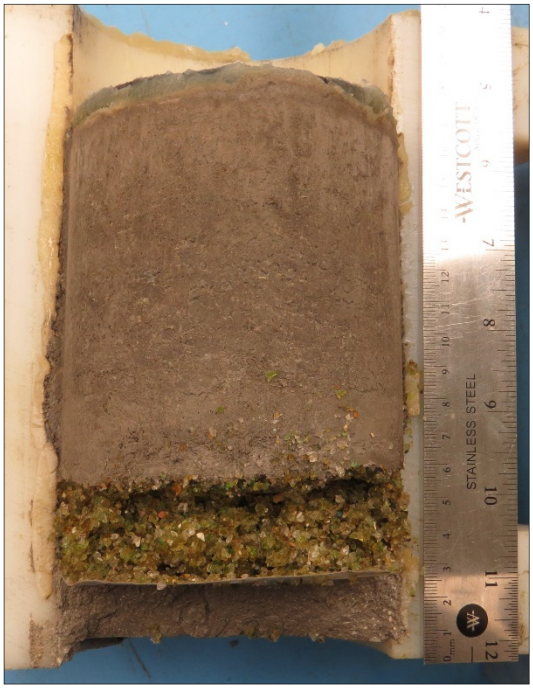


Barrière thermique de VPC saturée



Barrière thermique de calcaire saturée

Figure-A VIII-6 Photos des échantillons avec une barrière thermique à la fin de l'essai SP_0



Barrière capillaire de VPC



Barrière capillaire de calcaire

Figure-A VIII-7 Photos des échantillons avec une barrière capillaire à la fin de l'essai SP_0

ANNEXE IX

RAPPORT D'ESSAI DU POINT DE CONGÉLATION T_f

Tableau-A IX-1 Conditions de mise en place des essais de congélation d'équilibre T_f

Sol	Classe	Haut (cm)	Dia. moule (cm)	Vol. moule (cm3)	M_1 Masse du moule (g)	M_e Masse du moule + eau (g)	M_{total} Moule + sol + eau (g)	M_{ms} Masse du sol humide (g)	M_s Masse du sol sec (g)	M_w Masse de l'eau (g)	w (%)
Verre	GE	10,16	5,11	208,44	24,27	230,29	438,83	416,52	361,98	54,54	13,1
		10,15	5,10	207,06	24,26	230,41	441,30	417,50	364,25	53,24	12,8
	GI	10,17	5,11	208,14	24,33	231,86	406,89	382,71	310,87	71,84	18,8
		10,16	5,07	205,26	24,27	230,73	403,33	377,41	304,66	72,75	19,3
	GF	10,15	5,09	206,19	24,27	230,65	428,06	403,15	337,77	65,38	16,2
		10,15	5,13	209,97	24,14	230,61	424,95	403,85	337,09	66,76	16,5
Calcaire	GE	10,15	5,13	209,79	24,27	230,44	490,00	468,89	414,78	54,11	11,5
		10,14	5,11	208,19	24,31	231,50	490,63	466,86	413,69	53,16	11,4
Silt et Argile	---	8,96	5,13	184,95	---	---	---	---	231,80	90,30	39,0
		8,54	5,14	177,00	---	---	---	---	199,10	98,00	49,2

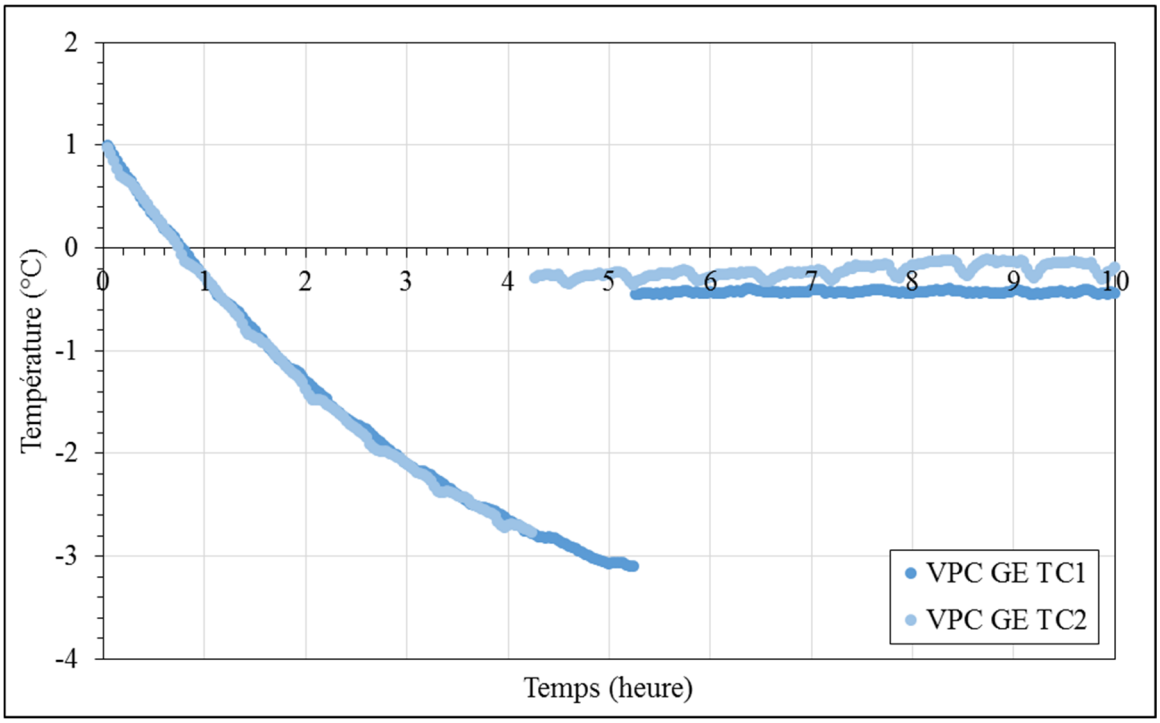


Figure-A IX-1 Courbe de refroidissement du VPC de la classe granulaire GE

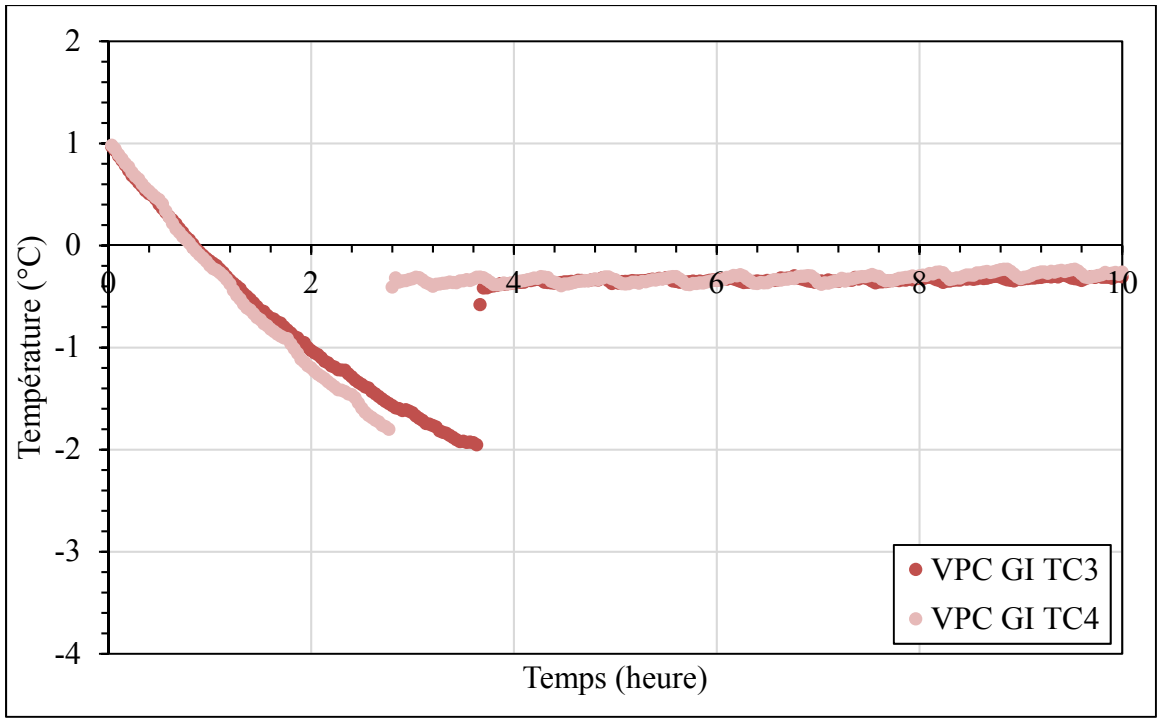


Figure-A IX-2 Courbe de refroidissement du VPC de la classe granulaire GI

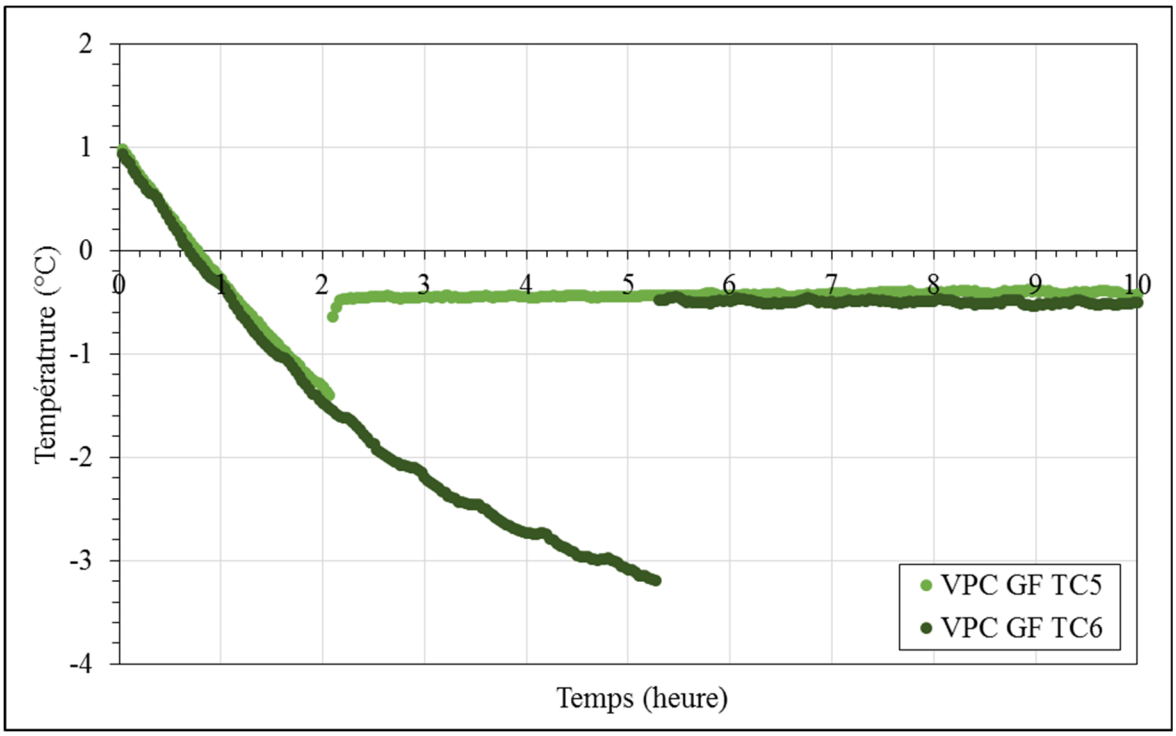


Figure-A IX-3 Courbe de refroidissement du VPC de la classe GF

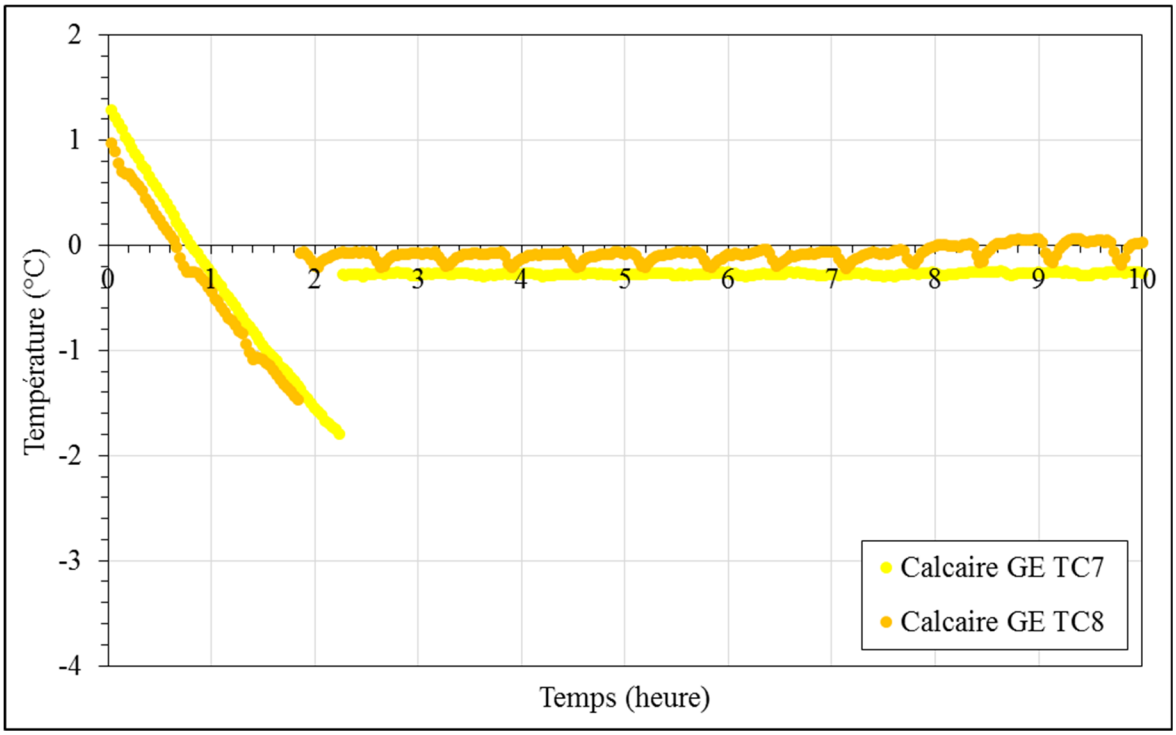


Figure-A IX-4 Courbe de refroidissement de la pierre calcaire de la classe granulaire GE

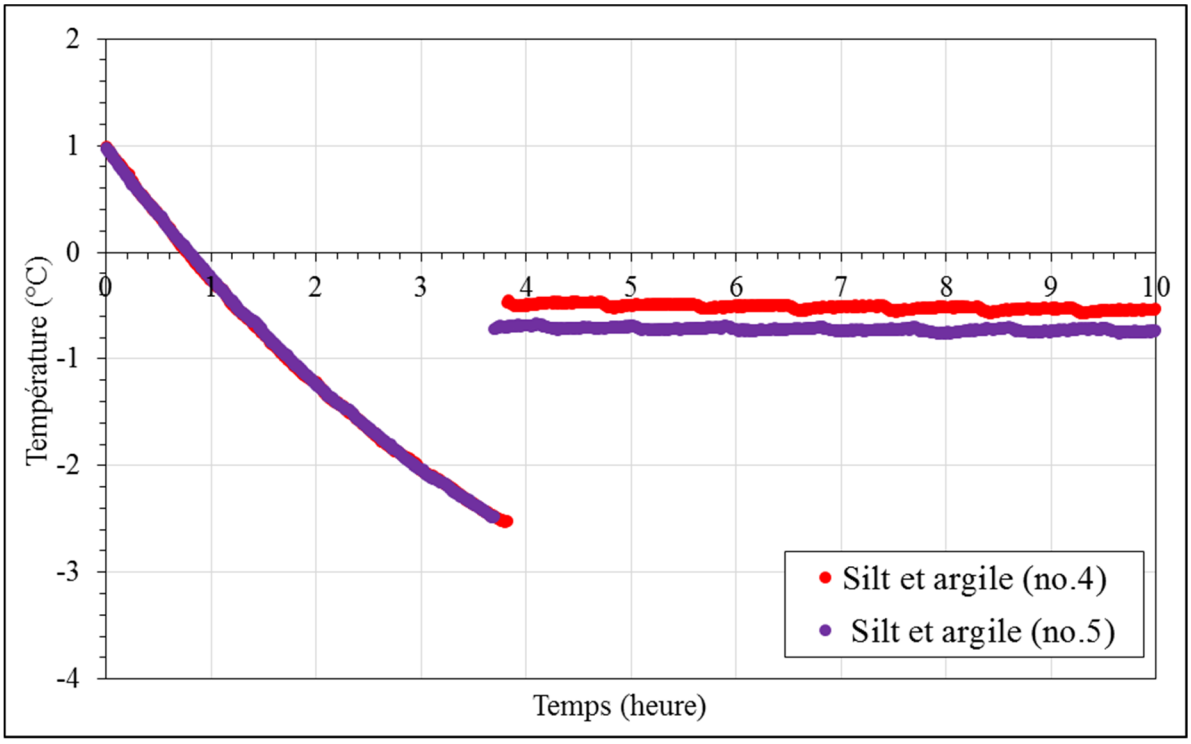


Figure-A IX-5 Courbe de refroidissement du silt et argile

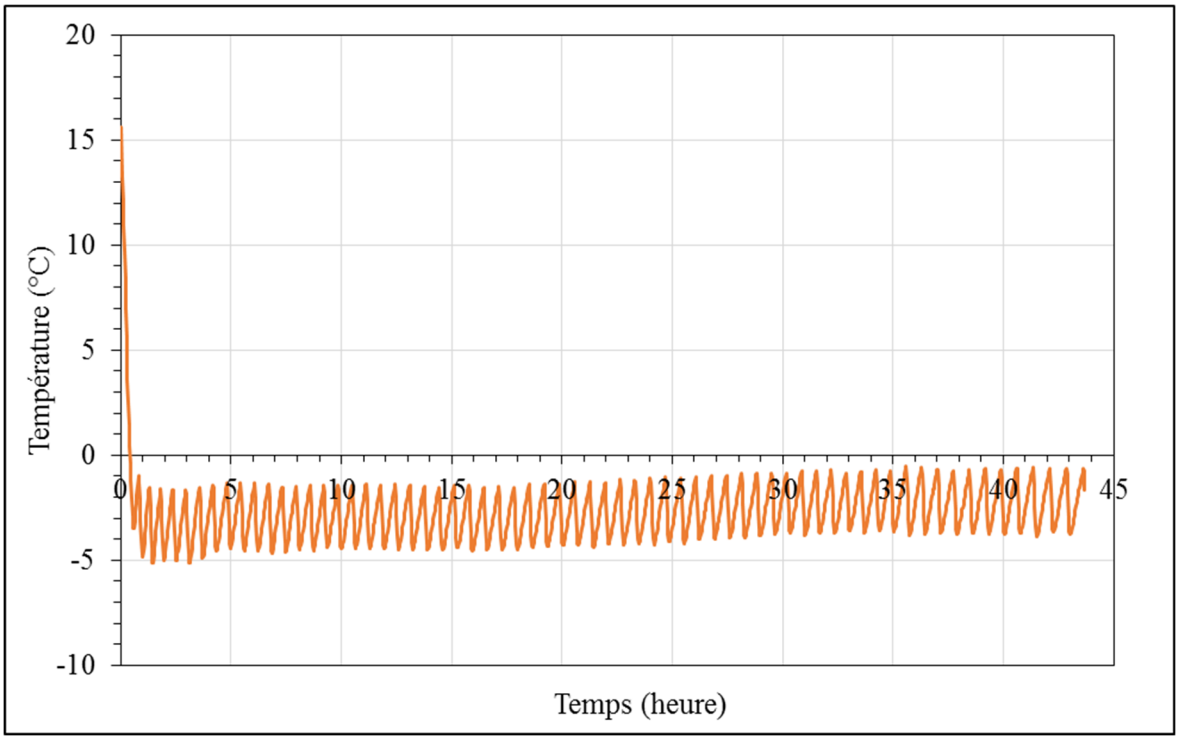


Figure-A IX-6 Variations de la température de l'enceinte en fonction du temps enregistrées par le thermocouple TC56

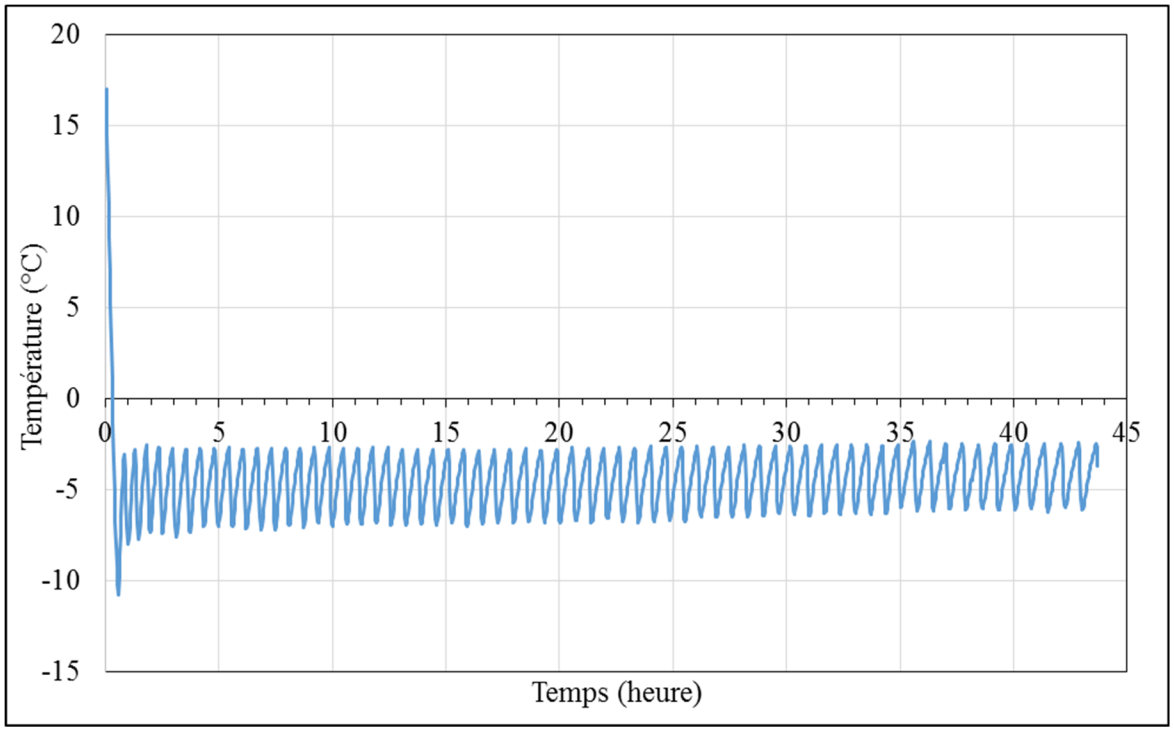


Figure-A IX-7 Variations de la température de l'enceinte en fonction du temps

enregistrées par le thermocouple TC60

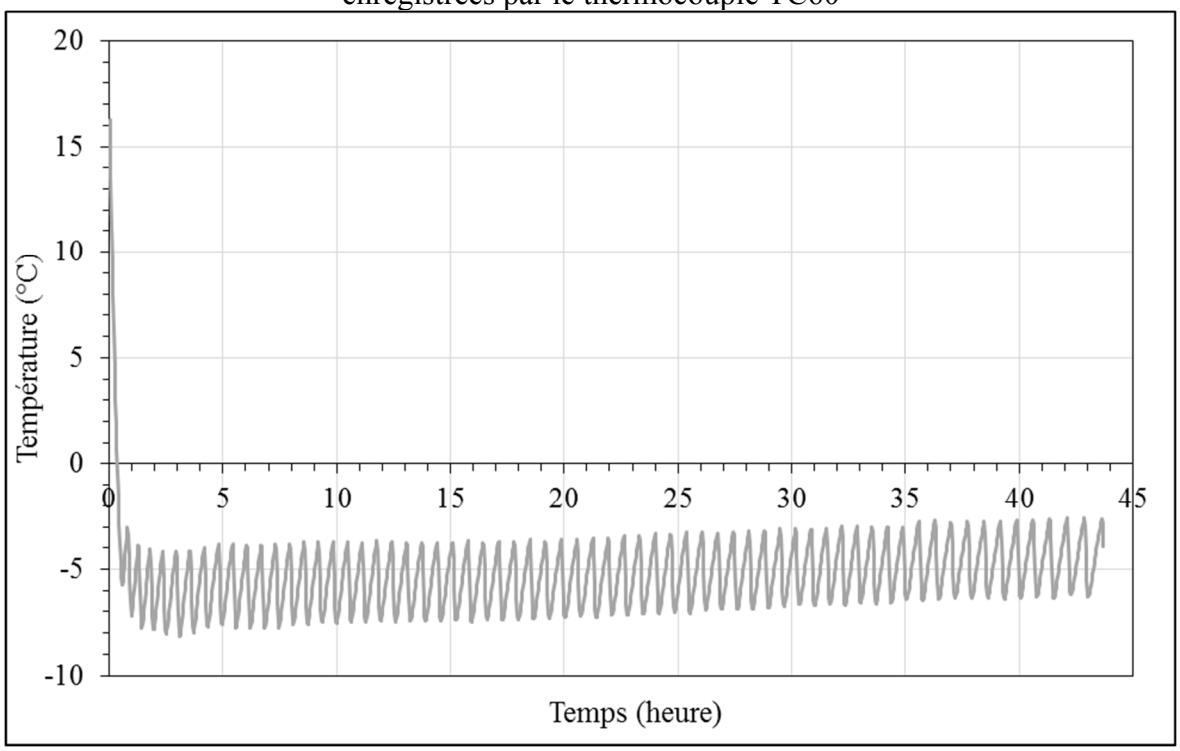


Figure-A IX-8 Variations de la température de l'enceinte en fonction du temps enregistrées par le thermocouple TC63

BIBLIOGRAPHIE

Akyurt, M, G Zaki et B Habeebullah. 2002. « Freezing phenomena in ice–water systems ». *Energy conversion and management,* vol. 43, nº 14, p. 1773-1789.

Anderson, Duwayne M. 1967. « Ice nucleation and the substrate-ice interface ». *Nature,* vol. 216, nº 5115, p. 563-566.

Arulrajah, A, B Vuong et J Wilson. 2009. « Laboratory testing of reclaimed demolition materials for footpaths and shared paths ». *Swinburne University of Technology Report for Municipal Association of Victoria, Victoria*.

APSAM, 2018, <https://www.apsam.com/clientele/cols-bleus/aqueduc-et-egouts/degel-des-tuyaux/profondeurs-de-protection-contre-le-gel>. Enligne. Consulté le 5 Février 2018.

ASTM International. 2014. *Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.* www.astm.org.Technical report.

ASTM international. (2000). *Standard Test Method forPermeability of Granular Soils (Constant Head).* Norme ASTM D2434-68. www.astm.org. Technical report.

ASTM international. (2013). *Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils1.* Norme ASTM D5918-13. www.astm.org. Technical report.

ASTM international. (2016).*Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.* Norme ASTM D854-14. www.astm.org. Technical report.

ASTM international. (2017). *Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems1.* Norme ASTM D5101-12. www.astm.org.

Berraha, Youness. 2017. « *Caractérisation expérimentale des propriétés thermiques de granulats de verre postconsommation et analyse par simulation numérique du comportement thermique d'une structure de chaussée avec couche de verre postconsommation* ». Mémoire de maîtrise.École de technologie supérieure. 236p.

Bilodeau, Jean-Pascal, et Guy Dore. 2013. « Flexible pavement design for frost protection taking into account subgrade soils variability ». In *2013 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, September 25, 2013*. (Winnipeg, MB, Canada). Coll. « 2013 TAC Conference and Exhibition - Transportation: Better - Faster - Safer, TAC/ATC 2013 »: Transportation Association of Canada (TAC).

Bilodeau, Jean-Pascal, Guy Dore et Pascale Pierre. 2008. « Gradation influence on frost susceptibility of base granular materials ». *International Journal of Pavement Engineering,* vol. 9, nº 6, p. 397-411.

Bing, Hui, et Wei Ma. 2011. « Laboratory investigation of the freezing point of saline soil ». *Cold Regions Science and Technology,* vol. 67, nº 1, p. 79-88.

Chamberlain, Edwin J. 1981. « *Frost susceptibility of soil, review of index tests* ». DTIC Document.

Chapuis, Robert P, Karsten Baass et Luc Davenne. 1989. « Granular soils in rigid-wall permeameters: method for determining the degree of saturation ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 26, nº 1, p. 71-79.

Côté, Jean. 2001. «*Influence d'un isolant thermique sur la sensibilité au verglas des routes*», PhD Thèse, Université Laval, 386p.

Cote, Jean, et Jean-Marie Konrad. 2007. « Indirect methods to assess the solid particle thermal conductivity of Quebec marine clays ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 44, nº 9, p. 1117-1127.

CWC, Clean Washington Centre 1996. « Typical geotechnical parameters of glass aggregate ». *BP-GL4-01-02*, nº Seattle, USA.

Disfani, M. M., A. Arulrajah, M. W. Bo et R. Hankour. 2011. « Recycled crushed glass in road work applications ». *Waste Management,* vol. 31, nº 11, p. 2341-2351.

Disfani, M. M., A. Arulrajah, M. W. Bo et N. Sivakugan. 2012. « Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications ». *Journal of Cleaner Production,* vol. 20, nº 1, p. 170-179.

Dore, Guy. 1997. « Détérioration des chaussées en conditions de gel: Une nouvelle approche ». Thèse. Université de Laval, 393 p.

Dore, Guy. 2004. « Development and validation of the thaw-weakening index ». *International Journal of Pavement Engineering,* vol. 5, nº 4, p. 185-192.

Doré, Guy, et Hannele K Zubeck. 2009. *Cold regions pavement engineering*.

Dysli, Michel. 1991b. *Le gel et son action sur les sols et les fondations* (1991). Coll. « Le gel ». Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes, viii, 250 p. p.

ÉEQ, Éco Entreprises Québec. 2017. « Recyclage du verre, une matière aux multiples facettes».<*http://www.eeq.ca/le-bac-de-recuperation-un-modele-deconomie-circulaire/deuxieme-vie-matieres/verre/>*, vol. En ligne, nº Consulté le 6 octobre 2017.

Evans, Mark D, Karen S Henry, Scott A Hayden et Morgan Reese. 2002. « The use of geocomposite drainage layers to mitigate frost heave in soils ». In *Cold Regions Engineering: Cold Regions Impacts on Transportation and Infrastructure*. p. 323-335.

Farouki, Omar T. 1986. « Thermal properties of soils ». Number Monograph 81-1. Hanover (N.H.): U.S. Army Corps Engineers, Cold Regions Research And Engineering Laboratory.

FHWA, UD. 2006. « Geotechnical Aspects of Pavements ». *Report FHWA NHI–05–037*.

Gagnon, L. 2010. « Le verre Fiches informatives ». *En ligne,* vol. https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-verre.pdf >, nº Consulté le 4 octobre 2017.

Gouvernement du Québec. 2011. « Politique québécoise de gestion des matières résiduelles Plan d'action 2011-2015 ». *En ligne,* vol. Politique québécoise de gestion des matières résiduelles Plan d'action 2011-2015, nº Consulté le 4 octobre 2017, p. 34.

Gouvernement du Québec. 2012. Office québécois de la langue française. Fiche terminologique.En ligne. http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8358375 Consulté le 9 octobre 2018.

Gustafson, Kent. 1981. *Road icing on different pavement structures. investigations at test field linkoeping 1976, over the period 1976-1980*.

Henry, Karen. 1996. « Geotextiles to mitigate frost effects in soils: A critical review ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nº 1534, p. 5-11.

Henry, Karen S, et Robert D Holtz. 2001. « Geocomposite capillary barriers to reduce frost heave in soils ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 38, nº 4, p. 678-694.

Henry, Karen S., et Susan Hunnewell Morin. 1997. « Frost susceptibility of crushed glass used as construction aggregate ». *Journal of Cold Regions Engineering,* vol. 11, nº 4, p. 326-333.

Hestin, M., S. Veron et C. Devauze. 2017. *Bilan National du Recyclage 2005-2014*. En ligne: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, ADEME, 103 p. < http://www.ademe.fr/bilan-national-recyclage-2005-2014 >.

Holtz, Robert D, et William D Kovacs. 1991. *Introduction à la géotechnique*. Presses inter Polytechnique.

Humphrey, Dana, et Michael Blumenthal. 2010. « The use of tire-derived aggregate in road construction applications ». In *Green Streets and Highways 2010: An Interactive*

Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes, November 14, 2010 - November 17, 2010. (Denver, CO, United states) Vol. 389, p. 299-313. Coll: American Society of Civil Engineers.

Jannot, Yves. 2012. « Transferts thermiques ». *Cours transferts thermiques 2ème année, Ecole des Mines Nancy*.

Janoo, Vincent C. 2002. « Performance of base/subbase materials under frost action ». In *Cold Regions Engineering: Cold Regions Impacts on Transportation and Infrastructure*. p. 299-310.

Kang, JM, J Lee, YS Kim et SS Hong. 2013. « Frost Heave Protection Using Soil-Shredded Tire Mixture ». In *Poromechanics V: Proceedings of the Fifth Biot Conference on Poromechanics*. p. 1314-1319.

Konovalov, AA. 2015. « Relation Between the Supercooling and Crystallization Temperatures of Moist Soil and its Strength in the Frozen State ». *Journal of Engineering Physics and Thermophysics,* vol. 88, nº 5, p. 1074-1081.

Konrad, J-M. 1980. «*Frost heave mechanics»*. PhD Thèse, University of Alberta.

Konrad, Jean-Marie, et Norbert R Morgenstern. 1980. « A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 17, nº 4, p. 473-486.

Konrad, Jean-Marie, et Norbert R Morgenstern. 1981. « The segregation potential of a freezing soil ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 18, nº 4, p. 482-491.

Konrad, J-M, et NR Morgenstern. 1982a. « Effects of applied pressure on freezing soils ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 19, nº 4, p. 494-505.

Konrad, J-M, et NR Morgenstern. 1982b. « Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 19, nº 3, p. 250-259.

Konrad, J-M. 1983. « Frost susceptibility of soils in terms of their segregation potential ». In *4th Int. Conf. On Permafrost*. p. 660-665.

Konrad, Jean-Marie. 1999. « Frost susceptibility related to soil index properties ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 36, nº 3, p. 403-417.

Konrad, Jean-Marie, et Marius Roy. 2000. « Flexible pavements in cold regions: a geotechnical perspective ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 37, nº 3, p. 689-699.

Konrad, J-M. 2001. « Cold region engineering ». In *Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook*. p. 593-613. Springer.

Konrad, J. M., et N. Lemieux. 2005. « Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 42, nº 2, p. 515-527.

Konrad, Jean-Marie. 2005. « Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils ». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 42, nº 1, p. 38-50.

Konrad, J. M. 2008. « Freezing-induced water migration in compacted base-course materials». *Canadian Geotechnical Journal,* vol. 45, nº 7, p. 895-909.

Kozłowski, T. 2009. « Equilibrium and non-equilibrium freezing of water in clay-water systems ». *Civil and Environmental Engineering Reports*, p. 77-91.

Kozlowski, Tomasz. 2004. « Soil freezing point as obtained on melting ». *Cold regions science and technology,* vol. 38, nº 2, p. 93-101.

Kozlowski, Tomasz. 2009. « Some factors affecting supercooling and the equilibrium freezing point in soil–water systems ». *Cold Regions Science and Technology,* vol. 59, nº 1, p. 25-33.

Laboratoire des Chaussées (2010) *Détermination du potentiel de ségrégation des sols.* Méthode d'essai. Secteur – sols et fondations. LC 22-331. 14p.

Laboratoire des Chaussée. (2007) *Détermination de la valeur au bleu de méthylène des sols et des granulats.* Méthode d'essai. Secteur – granulats. LC 21-255. 8p.

Lachance Tremblay, Éric. 2014. « Incorporation de particules de verre post-consommation dans un enrobé bitumineux de type ESG14 ». École de technologie supérieure.

Lafleur, J, J MLYnarek, Y Savard, B Cormier, JM Konrad, M Shen, M Roy, G Dore, N Rioux et Y Provencher. 1994. « L'effet du gel sur les chaussées ». In *Les infrastructures de transport au service de l'intermodalité. Expose des communications, 29E Congres Annuel de l'AQTR, du 10 au 12 avril 1994, Hotel Valleyfield-DELTA, Salaberry-de-Valleyfield, Québec, TOME 1*. Vol. 1.

Lalonde Renaud, Olivier. 2015. « Influence de la rigidité du revêtement sur les prédictions de soulèvement au gel ». École de technologie supérieure.
< http://espace.etsmtl.ca/1480/1/LALONDE_RENAUD_Olivier.pdf >.

Leroueil, S., J. Tardif, M. Roy, P. La Rochelle et J. M. Konrad. 1991. « Effects of frost on the mechanical behaviour of Champlain Sea clays ». *Canadian geotechnical journal,* vol. 28, nº 5, p. 690-697.

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. 2002. « Le potentiel de ségrégation SP et la gélivité des sols ». *Info DCL Technical Information Bulletin,* vol. 7, p. 2.

Mohsenian Hadad Amlashi, S , M Vaillancourt et A Carter. 2015. « Current State of the Art Practice of Use of Glass in Pavement Structures ». In *Innovation in Pavement Materials and Surfacing Technology*. (2015 Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown, PE).

Mrawira, Donath, et Joseph Luca. 2002. « Thermal properties and transient temperature response of full-depth asphalt pavements ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nº 1809, p. 160-171.

Oiseth, E., R. Aaboe et I. Hoff. 2007. « Field test comparing frost insulation materials in road construction ». In *13th International Conference on Cold Regions Engineering 2006, July 23, 2007 - July 26, 2007*. (Orono, ME, United states), p. 62. Coll. « Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering »: American Society of Civil Engineers. < http://dx.doi.org/10.1061/40836(210)62 >.

Industrie et Commerce au Québec. 2002. « L'industrie québécoise des isolants pour le bâtiment »., vol. En ligne, nº Consulté le 6 octobre 2017, p. 35. < *http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs59248 >*

Recyc-Québec. 2017. « Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec ». *En ligne,* vol. < https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2015.pdf >, nº Consulté le 4 octobre 2017, p. 39.

Rengmark, Folke. 1963. « Highway pavement design in frost areas in Sweden ». *Highway Research Record*, nº 33.

Roth, Kurt. 2006. « Soil physics », *Institute of Environmental physics, University of Heidelberg.*

Rouquès, Gilles, L Caniard, E Leflaive, A Philippe, M Boutonnet et E Faure. 1975. « Gel et degel des chaussees ». *Note d'information technique*.

Segui, Pauline, Guy Doré, JP Bilodeau et S Morasse. 2016. « Innovative materials for road insulation in cold climates: Foam glass aggregates ». In *TAC 2016: Efficient Transportation-Managing the Demand-2016 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada*.

Spencer Guthrie, W, et Ake Hermansson. 2003. « Frost heave and water uptake relations in variably saturated aggregate base materials ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nº 1821, p. 13-19.

St-Laurent, D. 2007. « CHAUSSÉE 2: Conception des chaussées en tenant compte des soulèvements au gel ». In *42e congrès annuel de l'Association Québécoise des Transports* sous la dir. de Québec, Ministere des transports du québec (MTMDET), p. 20.

St-Laurent, D. 2012. « Routine mechanistic pavement design against frost heave ». In *15th International Specialty Conference on Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment, August 19, 2012 - August 22, 2012*. (Quebec City, QC, Canada), p. 144-154. Coll. « Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering »: American Society of Civil Engineers (ASCE).

Suzuki, Shinji. 2004. « Verification of freezing point depression method for measuring matric potential of soil water ». *Soil Science and Plant Nutrition,* vol. 50, nº 8, p. 1277-1280.

Terzaghi, K. 1952. « Permafrost ». *Boston Society of Civil Engineers -- Journal,* vol. 39, nº 1, p. 1-50.

Wartman, Joseph, Dennis G. Grubb et A. S. M. Nasim. 2004. « Select engineering characteristics of crushed glass ». *Journal of Materials in Civil Engineering,* vol. 16, nº 6, p. 526-539.

Zhang, L, W Ma et C Yang. 2015. « Pore water pressure changes of supercooling and ice nucleation stages during freezing point testing ». *Géotechnique Letters,* vol. 5, nº 1, p. 39-42.