

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Amélioration des propriétés géotechniques des matériaux de fondations
routières par un procédé de calcification**

JOANDERSON JAMES OLIVEIRA MORAIS

Département de génies civil, géologique et des mines

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*

Génie civil

Août 2023

© Joanderson James Oliveira Morais, 2023.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Cette thèse intitulée :

Amélioration des propriétés géotechniques des matériaux de fondations routières par un procédé de calcification

présentée par **Joanderson James OLIVEIRA MORAIS**

en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

Samuel YNIESTA, président

Benoît COURCELLES, membre et directeur de recherche

Antoine JACQUEY, membre

François DUHAIME, membre externe

DÉDICACE

Je dédie cette thèse

*À Mariana, ma source d'amour,
de confiance et encouragements infinis.*

*À mes parents, pour leur affection
et soutien inconditionnel.*

*A mes grands-pères, Antonio et José,
pour leurs enseignements et motivations.*

*En particulier, à ma belle-mère pour
son animation et son bonheur fantastiques.*

Je suis docteur pour vous et grâce à vous.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Dieu et Notre-Dame de Fatima de m'avoir accordé le discernement et la persévérance pour terminer le travail. Ma foi et ma confiance seront toujours inébranlables pour vous.

À Mariana Mendonça pour tout l'amour, la confiance et la compréhension tout au long de ce cheminement. Durant ces 4 années, nous avons vécu des moments très difficiles et sans ta compagnie rien de tout cela ne serait possible. Je suis profondément reconnaissant à mon père, José Morais, et à ma mère, Bernadete Oliveira, mes grands supporters et meilleurs exemples professionnels, qui m'ont toujours soutenu dans les moments les plus difficiles. Je vous remercie pour les plus beaux mots dans les moments tristes et les sourires dans les moments de conquête.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon directeur de recherche, le professeur Benoît Courcelles, de m'avoir fait confiance depuis le Brésil et de m'avoir donné l'opportunité de travailler dans cette incroyable université. Votre patience et vos conseils ont été fondamentaux pour le développement de cette recherche, sûr qu'un chapitre important de ma vie s'est construit grâce à votre aide.

Je suis très reconnaissant aux techniciens du laboratoire, Éric et Samuel, pour tous les conseils importants et le soutien dans diverses adversités techniques. Beaucoup de moments et d'histoires drôles m'ont rendu plus calme dans les moments de grand stress. Sans toute cette aide, je n'aurais certainement pas réussi ce travail.

Je tiens également à remercier mes collègues, Elissar et Jean-Louis, pour leur contribution dans le développement de cette recherche. Je suis sûr qu'ensemble nous formons une belle équipe, nos échanges d'informations et d'expériences ont été extrêmement enrichissants.

Enfin, je voudrais remercier toute ma grande famille (Recife, Garanhuns, Carpina, São Paulo et Sertão do Cariri) qui, même loin, m'ont toujours mis dans leurs prières et m'ont envoyé une grande motivation pour ne jamais abandonner mes rêves. À mes amis du Brésil et du Canada, merci beaucoup de toujours m'envoyer des énergies positives, des messages drôles et des mots gentils, vous êtes sensationnels.

« De ce passage, l'apprentissage est le seul bagage emporté... »

RÉSUMÉ

Le développement accéléré des grandes villes a produit une série de nouveaux défis, affectant la planification, la construction et l'entretien des infrastructures. La dégradation des routes du Québec est un des sujets qui a été largement discuté au cours des dernières années en raison de l'augmentation des dégâts, de la pression de la population et, surtout, du coût élevé de l'entretien. Parmi l'ensemble des techniques d'amélioration des performances des routes, nombreuses sont celles qui portent sur le développement de nouveaux revêtements routiers ou de procédures de réparation. Malgré leur bons résultats techniques, l'application de la plupart de ces méthodes est assez complexe et nécessite des sommes importantes pour être mise en place. Afin de présenter une alternative aux solutions traditionnelles, ce projet introduit la calcification chimique comme outil de contrôle et de réduction des dégâts routiers. Cette technique offre une résistance à la compression simple supérieure à celle d'un béton conventionnel et un potentiel supplémentaire d'auto-réparation, ce qui permet d'envisager des applications dans un contexte de gel-dégel.

La calcification chimique est une technique de précipitation induite de carbonates de calcium à partir de l'ajout d'un ou plusieurs produits chimiques au sol. Les précipités forment des liens extrêmement solides entre les particules de sol offrant une résistance et un comportement mécanique améliorés. Afin de fournir le résultat le plus efficace pour la technique, la réaction chimique de base a été retracée et plusieurs optimisations ont été effectuées, notamment en ce qui concerne le temps et la température de cure.

Les travaux sur ce projet ont commencé par la sélection de réactifs de base, en examinant le rôle de chacun d'eux dans le potentiel de calcification du sol. À la recherche d'un protocole optimal de traitement du sol, un plan expérimental basé sur la durée de cure, le type et la concentration du réactif, la méthode de préparation et la minéralogie du sol a été mis en pratique. Pour chaque variation effectuée dans les propriétés du protocole, des séries de essais de compression simple ont été effectuées afin de définir les chemins les plus efficaces. Ces optimisations ont généré des échantillons de sol très résistants et homogènes avec une texture proche du béton. À partir du protocole optimal, de nouvelles séries d'échantillons ont été préparées afin de montrer le potentiel de calcification chimique dans des situations proches de la réalité. Des sollicitations comme des cycles gel-dégel, immersions et précipitations ont été appliqués aux échantillons améliorés. Les résultats des essais ont confirmé la faisabilité technique du traitement : une résistance à

compression optimale après 30 jours de cure de 37 MPa, une conservation de la rigidité après 30 cycles de gel-dégel, une solidité préservée après 72 heures d'immersion et une résistance à l'érosion pluviale trois fois supérieure à un sol non traité. Les résultats de résistance à la compression sont environ 10 fois supérieurs à un procédé d'amélioration avec ciment. De plus, après 30 cycles gel-dégel, ils représentent une résistance 9 fois supérieure au mélange sol-ciment soumis à 12 cycles.

ABSTRACT

The accelerated development of large cities has produced a series of new challenges, affecting the planning, construction and maintenance of infrastructure. The deterioration of Quebec's roads is one of the topics that has been widely discussed in recent years due to the increase in damage, population pressure and, above all, the high cost of maintenance. Many of the techniques for improving road performance involve the development of new road surfaces or repair procedures. Despite their good technical results, the application of most of these methods is quite complex and requires large budgetary sums to be implemented. In order to present an alternative to traditional solutions, this project introduces chemical calcification as a tool to control and reduce road damage. This technique offers simple compressive strength greater than that of conventional concrete and additional self-healing potential, which makes it possible to consider applications in a freeze-thaw context.

Chemical calcification is a technique of induced precipitation of calcium carbonates from the addition of one or more chemicals to the soil. The precipitates form extremely strong bonds between soil particles providing improved strength and mechanical behavior. In order to provide the most effective result for the technique, the basic chemical reaction has been traced and several optimizations have been made, especially with regard to cure time and temperature.

The activities of this project began with the selection of basic reagents, examining the role of each of them in the potential for soil calcification. In search of an optimal soil treatment protocol, an experimental plan based on curing time, reagent type and concentration, the preparation method and soil mineralogy was put into practice. For each variation made in the properties of the protocol, series of simple compression tests were carried out in order to define the most efficient paths. These optimizations generated very resistant and homogeneous soil samples with a texture close to concrete. From the optimal protocol, new series of samples were prepared in order to show the potential of chemical calcification in situations close to reality. Stresses such as freeze-thaw cycles, immersions and simulated precipitation were applied to the improved samples. The results of the tests confirmed the technical feasibility of the treatment: optimum compressive strength after 30 days of curing at 37 MPa, retention of rigidity after 30 freeze-thaw cycles, preserved solidity after 72 hours of immersion and resistance to rain erosion three times greater than untreated soil. Compressive strength results are approximately 10 times better than cement improvement. In

addition, after 30 freeze-thaw cycles, they are 9 times greater than the soil-cement mixture subjected to 12 cycles.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XX
LISTE DES ANNEXES.....	XXIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.2 Objectifs	3
1.2.1 Objectif général	3
1.2.2 Objectifs spécifiques	3
1.3 Démarche et cheminement de la thèse	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Routes du Québec.....	6
2.1.1 Généralités.....	6
2.1.2 Types de chaussées au Québec.....	9
2.1.3 Caractérisation géotechnique des matériaux de fondation et sous-fondation	12
2.2 Dégradation routière.....	16
2.2.1 Parc automobile.....	17
2.2.2 Les conditions climatiques	18

2.2.3	Susceptibilité au gel	19
2.2.4	Érosion externe.....	21
2.2.5	Résultat des dégradations routières	23
2.3	Stabilisation des sols	28
2.3.1	Stabilisation mécanique.....	28
2.3.2	Stabilisation chimique	29
2.3.3	Stabilisation par calcification biologique	35
2.3.4	Stabilisation par calcification chimique	45
2.3.5	Impact environnemental potentiel de la technique de calcification	55
2.3.6	Développement de la calcification à Polytechnique de Montréal	57
CHAPITRE 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES		64
3.1	Matériaux	64
3.1.1	Sol à traiter	64
3.1.2	Carbonate de sodium	71
3.1.3	Chlorure de calcium	73
3.1.4	Moules	74
3.2	Plan expérimental	79
3.2.1	Définition du protocole optimal	81
3.2.2	Caractérisation du sol après traitement	96
CHAPITRE 4 RÉSULTATS		111
4.1	Effet de la minéralogie du sol sur la calcification chimique	111
4.2	Effet du type de réactif sur le processus de calcification chimique	112
4.3	Effet de la concentration des réactifs sur la calcification chimique	116
4.4	Effet du lieu et de la durée de la cure sur la résistance à la compression du sol traité	118

4.5	Effet du temps de préparation des échantillons sur la résistance à la compression du sol traité.....	121
4.6	Effet des conditions de dégradation sur la résistance à la compression du sol traité...	122
4.6.1	Immersion.....	122
4.6.2	Cycles de gel-dégel	123
4.6.3	Simulation de Pluie	126
4.7	Effet de la granulométrie sur la résistance à la compression du sol traité	132
CHAPITRE 5	DISCUSSION	136
CHAPITRE 6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	141
RÉFÉRENCES.....		144
ANNEXES		156

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 – Évolution de l'état des chaussées du réseau routier (MTQ, 2021c).....	7
Tableau 2.2 – Exigences granulométriques pour la fondation MG-20 et sous-fondation MG-112	13
Tableau 2.3 – Caractéristiques de l'essai Proctor modifié (NQ 2501-250) et de l'essai Proctor normal (NQ 2501-255).....	14
Tableau 2.4 – Résultats de l'évaluation de l'érosion externe (Adaptée de Amin et al., 2017)	43
Tableau 3.1 - Paramètres des sols utilisés dans le projet	65
Tableau 3.2 - Résultats des coefficients et d'uniformité de la courbe granulométrique du sol	70
Tableau 3.3 – Résumé des propriétés physicochimiques du carbonate de sodium (CNESST - Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité, 2022a).....	71
Tableau 3.4 – Synthèse des principales caractéristiques des deux types de carbonate de sodium	72
Tableau 3.5 – Propriétés des échantillons testés dans l'évaluation des deux types de Na_2CO_3	90
Tableau 3.6 – Propriétés des échantillons dans l'évaluation de différents types de sol	92
Tableau 3.7 – Propriétés des échantillons testés dans l'évaluation de la concentration de Na_2CO_3	93
Tableau 3.8 – Propriétés des échantillons testés dans l'évaluation de la concentration de CaCl_2 .	93
Tableau 3.9 – Propriétés des échantillons testés dans l'évaluation du lieu de cure.....	95
Tableau 3.10 – Propriétés des échantillons dans l'évaluation de la dégradation par immersion..	102
Tableau 3.11 – Propriétés des échantillons dans l'évaluation de la dégradation par cycle gel-dégel en fonction de la durée de cure.....	104
Tableau 3.12 – Propriétés des échantillons dans l'évaluation de la dégradation par cycle gel-dégel en fonction de la quantité des cycles	104
Tableau 4.1 – Évaluation de la teneur en eau après 1 heure de réaction chimique.....	116
Tableau 4.2 – Évolution de la résistance en fonction du temps de cure.	119
Tableau 4.3 - Évolution de la résistance en fonction du temps de cure.	134

Tableau A.1 – Échantillons essayés à compression simples en fonction de la concentration de traitement.	156
Tableau B.2 – Calcul des paramètres de compactage.	159

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Pourcentage de voie pavée en bon ou très bon état (Ville de Montréal, 2019)	7
Figure 2.2 – Coût annuel en dollars par province des routes par véhicule (CAA, 2021)	8
Figure 2.3 – Évolution du déficit de maintien d’actifs (Adaptée de Gagnon, 2019; Gagnon, 2021; SCT, 2022)	8
Figure 2.4 – Coupe type de chaussée souple (MTQ, 2010)	10
Figure 2.5 – Coupe type de chaussée rigide (Dupuis, 2014).....	11
Figure 2.6 – Coupe type de chaussée non revêtue (Latrémouille, 2013)	11
Figure 2.7 – Fuseau granulométrique : (a) fondation MG-20 et (b) sous-fondation MG-112	13
Figure 2.8 – Courbes de compactage des essais Proctor normal et modifié	15
Figure 2.9 – Structure assemblée de l’essai de compression simple	16
Figure 2.10 – Classification de Köppen-Geiger (McKenney & Gerardin, 2001)	18
Figure 2.11 – Normal climatique de la station Montréal entre 1981-2010 (Adaptée de Gouvernement du Canada, 2022).....	19
Figure 2.12 – Bulbe de gel-dégel entre le début et la fin d’un hiver (Ewane, 2019)	20
Figure 2.13 – Gonflement attribuable au gel (MTQ, 2010)	20
Figure 2.14 – Affaiblissement au dégel et fonte d’une lentille de glace (MTQ, 2010, 2021b)	21
Figure 2.15 – Érosion externe sur les pentes latérales d’une route (Lévesque, 2022)	22
Figure 2.16 – Ruissellement massif lors d’un événement pluvieux (Hilaire & Guhur, 2016).....	23
Figure 2.17 – Exemples de dégradations de chaussées (Hassan, 2015; LCPC, 1998; MTQ, 2002)	27
Figure 2.18 – États typiques des agrégats avant stabilisation mécanique (Khanna & Justo, 2011)	29
Figure 2.19 – Stabilisation du sol avec ciment pour la construction de chaussées (Mir, 2018)	31

Figure 2.20 – Stabilisation du sol avec chaux pour la construction de routes (Hyslip & McCarthy, 2000).....	32
Figure 2.21 – Précipitation de CaCO_3 grâce à l'environnement chimique propice (Pickrell, 2013; Thomas, 1999).....	35
Figure 2.22 – Corrélations entre la teneur en CaCO_3 et UCS (Van Paassen et al., 2010)	40
Figure 2.23 – Variation de la porosité en fonction de la teneur en calcite (V. Whiffin et al., 2007)	41
Figure 2.24 – UCS d'échantillons de sable fin traités par biocalcification et ciment avant et après 10 cycles de gel-dégel (Cheng et al., 2013)	41
Figure 2.25 – Perméabilité mesurée sur des colonne de sable traitées par biocalcification à différents degrés de saturation pour (a) un sable grossier et (b) un sable fin (Cheng et al., 2013)	42
Figure 2.26 – Résultats de l'évaluation de l'érosion externe en fonction du Contrainte de cisaillement hydraulique (Amin et al., 2017).....	43
Figure 2.27 – Réacteur utilisé pour synthétiser les particules de PCC (Onimisi et al., 2016)	46
Figure 2.28 – Réaction de double décomposition (Adaptée de Liendo et al., 2022)	48
Figure 2.29 – Illustration de l'équilibre calco-carbonique (Adaptée de Verrecchia, 2002).....	49
Figure 2.30 – Comportement des polymorphes en fonction de la température (Chu et al., 2013)	51
Figure 2.31 – Pourcentage d'aragonite dans les précipités formés à 52°C (Zeller & Wray, 1956).....	53
Figure 2.32 - Principales études sur la calcification biologique et chimique réalisée à Polytechnique Montréal	58
Figure 2.33 – Compression simple en fonction de la variation de la concentration de traitement (Ozeir, 2021)	63
Figure 3.1 – Courbes granulométriques des 3 poussières de roche utilisées	65
Figure 3.2 – Courbe de compactage de la poussière de roche 1 selon Proctor modifié.....	66
Figure 3.3 – Courbe de compactage de la poussière de roche 2 selon Proctor modifié.....	67

Figure 3.4 – Courbe de compactage de la poussière de roche 3 selon Proctor modifié.....	67
Figure 3.5 - Résultat du test DRX sur la poussière de roche 3 à prédominance de dolomite	68
Figure 3.6 – Évaluation de la courbe granulométrique de la pierre concassée utilisée par rapport aux limites (maximum et minimum) du MTQ.....	69
Figure 3.7 – Courbe de compactage de la pierre concassée (MG-20) selon Proctor modifié.....	70
Figure 3.8 – Carbonate de sodium de deux marques différentes utilisé	72
Figure 3.9 – État du CaCl_2 après 30 minutes de contact avec le sol et l'humidité de l'air	74
Figure 3.10 – Moule en tuyaux d'ABS et plaque métallique utilisée pour le compactage de la poussière de roche	75
Figure 3.11 – Équipement d'extraction utilisé pour la poussière de roche.....	76
Figure 3.12 – Moule, support de compactage et marteau électrique utilisés	77
Figure 3.13 – Moule en acier galvanisée et plaque métallique utilisé pour compacter le MG-20.	78
Figure 3.14 – Équipement d'extraction utilisé pour la pierre concassée	79
Figure 3.15 – Plan expérimental du projet	80
Figure 3.16 – L'évolution des précipitations de carbonate de calcium à l'intérieur du sol	83
Figure 3.17 – Types de traitement idéalisés	83
Figure 3.18 – Exemples des problèmes rencontrés lors de l'utilisation de la méthode de percolation : (a) bouillonnement, (b) précipitation concentrée à la surface, (c) blocage de la percolation et (d) dommage à la surface de l'échantillon	84
Figure 3.19 – Étapes de l'injection par mélange préalable	85
Figure 3.20 – Étapes de la méthodologie de déclenchement par l'eau	85
Figure 3.21 – Séquence de préparation du sol : (a) Sol juste après séchage; (b) Ajout de réactifs; (c) malaxage et humidification; (d) sol prêt à être compacté	86
Figure 3.22 – Outils de compactage.....	87
Figure 3.23 – Carrières de calcaire de la région du Grand Montréal (MRNF - Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023).....	89

Figure 3.24 – Stratégie de définition des quantités de réactifs.....	92
Figure 3.25 – Étape de cure thermique ($45^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$) du traitement de calcification chimique	94
Figure 3.26 – Exemple de disposition des échantillons dans la cure à température ambiante.....	95
Figure 3.27 – Procédure de préparation des échantillons pour le test de compression simple	97
Figure 3.28 – Chacune des presses utilisées lors des essais de compression simple : (a) ELE, (b) Instron et (c) Amsler	98
Figure 3.29 – Méthode d'acquisition des données pour chacune des presses disponibles : (a) ELE, (b) Instron et (c) Amsler.....	99
Figure 3.30 – Mise en page de la base de données et ses 15 colonnes	101
Figure 3.31 – Type de conteneur utilisé et moment de l'exécution des tests d'immersion	102
Figure 3.32 – Les équipements utilisés pour l'exécution des essais de cycle gel-dégel.	103
Figure 3.33 – Échantillons sans aucun traitement juste après le compactage.....	106
Figure 3.34 – Échantillons traités par calcification chimique juste après le compactage	106
Figure 3.35 – Échantillons préparés pour le test d'érosion après 30 jours de cure.....	107
Figure 3.36 – Disposition de la structure pour l'essai de simulation de pluie	108
Figure 3.37 – Jet conique réalisé par la buse de pulvérisation.....	108
Figure 3.38 – Échantillons préparés pour l'évaluation de l'effet du temps de préparation sur le comportement mécanique	110
Figure 4.1 – Comparaison entre les résultats de compression simple des poussières 1, 2 et 3	111
Figure 4.2 – Comparaison entre la moyenne des résultats de compression simple des 3 types de poussières de roche.....	112
Figure 4.3 – Comparaison des résistances moyennes des échantillons avec Solvay Light et A&H	113
Figure 4.4 – Texture des carbonates de sodium Solvay Light (à gauche) et A&H (à droite).....	113
Figure 4.5 – Courbe de température en fonction du temps pour le mélange de poussière de roche 3 et carbonate de sodium (réaction 1)	114

Figure 4.6 – Courbe de température en fonction du temps pour le mélange de poussière 3, carbonate de sodium et avec l'ajout de CaCl_2 (réaction 2)	115
Figure 4.7 – Comparaison de la texture des deux sols, 1 heure du début de la réaction.....	115
Figure 4.8 – Résultats des résistances moyennes de la variation de la teneur en carbonate de sodium	117
Figure 4.9 – Résultats des résistances moyennes de la variation de la teneur en chlorure de calcium	118
Figure 4.10 – Résultats moyenne par lieu et durée de cure.....	119
Figure 4.11 – Évolution de la résistance des sols traités par la technique de calcification chimique	120
Figure 4.12 – Résistance à la compression simple en fonction du temps de préparation	121
Figure 4.13 – Comparaison d'un échantillon testé 3 heures après le cycle gel-dégel avec un autre testé 24 heures après le cycle	122
Figure 4.14 – Test d'immersion d'échantillons traités par calcification chimique	123
Figure 4.15 – Test de cycle gel-dégel en fonction du temps de cure	124
Figure 4.16 – Résultats de résistance après réalisation de 30 cycles gel-dégel	125
Figure 4.17 – Comparaison entre les échantillons E-1 et E-4 après l'essai d'érosion	126
Figure 4.18 – Masses érodées de l'échantillon traité E-5	127
Figure 4.19 – Masses érodées de l'échantillon non traité E-3	127
Figure 4.20 – Texture des échantillons après 15 jours de cure	128
Figure 4.21 – Comparaison entre la rigidité des échantillons E-3 et E-5.....	128
Figure 4.22 – État de la couche la plus externe des échantillons E-3 et E-5 avant et après essai	129
Figure 4.23 – Masse accumulée de sol érodé par minute.....	131
Figure 4.24 – Taux de perte du sol testé en grammes par minute.....	131
Figure 4.25 – Échantillons de pierre concassée avant et après compactage dans le moule en acier	133

Figure 4.26 – Échantillons de pierre concassée avant et pendant l'exécution des essais de compression simple	133
Figure 4.27 – Le moule du sol MG-20 après quelques mois d'utilisation.....	135
Figure 5.1 – Concept d'un scarimalaxeur pour traitement des sol par calcification chimique (Adapté de Infociments, 2018).....	139
Figure B.1 – Plan du moule de retenue utilisé dans l'étape de compactage.	157
Figure B.2 –Plan du marteau utilisé dans l'étape de compactage.	158
Figure C.3 – Évolution de l'érosion du sol dans les échantillons non traités en fonction du temps (E-1 à E-3).	160
Figure C.4 – Évolution de l'érosion du sol dans les échantillons traités en fonction du temps (E4 à E-6).....	161
Figure C.5 – Masse de sol érodée à partir d'échantillons non traités (E1 à E-3).....	162
Figure C.6 – Masse de sol érodée à partir d'échantillons traités (E-4 à E-6)	163

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAA	<i>Canadian Automobile Association</i>
Ca^{2+}	Ion calcium
CaCl_2	Chlorure de calcium
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	Bicarbonate de calcium
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Nitrate de calcium
CaO	Oxyde de calcium
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hydroxyde de calcium
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CCDG	Cahier des charges et devis généraux
CCP	Carbonate de calcium précipité
CCN	Carbonate de calcium naturel
CO_2	Dioxyde de carbone
CO_3^{2-}	Ion carbonate
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	Urée
CS	Essai de compression simple
CTAB	Bromure de cétyltriméthylammonium
EDTA	Acide Éthylène Diamine Tétra-Acétique
H_2O	Molécule d'eau
HCO_3^-	Ion bicarbonate
I_p	Indice de plasticité
MEB	Microscopie Électronique à balayage

MG112	Matériel granulaire de taille maximale 112 mm dans la classification du MTQ
MG20	Matériel granulaire de taille maximale 20 mm dans la classification du MTQ
MgCl ₂	Chlorure de magnésium
MICP	Microbially Induced Calcite Precipitation
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MTQ	Ministère des Transports de Québec
NaCH ₃ COO	Acétate de sodium
Na ₂ CO ₃	Carbonate de sodium
NaCl	Chlorure de sodium
NaHCO ₃	Bicarbonate de sodium
NaNO ₃	Nitrate de sodium
NaOH	Hydroxyde de sodium
NH ₃	Ammoniac
NH ₄ ⁺	Ion ammonium
OH ⁻	Ion hydroxyde
OS	Objectif spécifique
PAA	Acide polyacrylique
PEG	Polyéthylène glycol
pH	Potentiel hydrogène
S	Surface totale transversale de l'échantillon (m ²)
SAAQ	Société de l'Assurance Automobile du Québec
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
w	Teneur en eau (%)
w _{opt}	Teneur en eau optimale de l'essai Proctor (%)

ZnCl_2	Chlorure de zinc
ρ_d	Masse volumique sèche (kg/m^3)
ρ_{dmax}	Masse volumique sèche maximale (kg/m^3)
Ω	Taux de sursaturation
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Récapitulatif des échantillons du PROJET	156
Annexe B Équipements de compactage	157
Annexe C Images du test d'érosion externe	160

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Les routes représentent le principal moyen de transport pour les personnes, les animaux et les marchandises dans le monde entier. Les premières grandes connexions routières ont commencé à l'époque de l'Empire romain, où le pavage de mortier et de pierres a été utilisé pour faciliter le commerce et la mobilité de la population entre les régions du continent européen (Lay, 2009).

Entre les voies romaines et le modèle actuel, il y a environ 2 000 ans et de nombreuses avancées, comme l'asphalte et des structures de béton. Malgré cela, les impacts du parc automobile et des intempéries sur les routes restent prépondérants. Même avec l'évolution des structures de drainage, du renforcement des chaussées et la protection des talus, les routes du monde entier continuent d'être gravement dégradées.

Au Québec, la qualité des routes est principalement liée à la combinaison de l'action des intempéries avec la croissance démographique accélérée de la région. C'est-à-dire, un climat rigoureux avec des pluies et des neiges abondantes associé à un parc automobile important et en pleine croissance (MTQ, 2014; SAAQ, 2021; Statistique Canada, 2022). Ce contexte se traduit par la situation actuelle de réseau routier québécois : chaussées extrêmement vulnérables à la dégradation offrant des risques économiques et sécuritaires à la population.

Des études ont démontré que 50% des routes au Québec sont en mauvais ou en très mauvais état (MTQ, 2021c). Ce cas est le pire au Canada et entraîne un coût routier d'entretien d'environ 258 \$ par voiture, tandis que la moyenne fédérale n'est que de 126 \$. Face à cette situation, le ministère provincial des transports a procédé à des investissements totalisant 865,1 millions de dollars pour la conservation des chaussées en 2020-2021 (MTQ, 2021c). Bien que ces budgets puissent paraître assez élevés, le déficit de maintien d'actifs¹ est beaucoup plus important et n'a cessé d'augmenter ces dernières années. Il est ainsi passé de 11,81 milliards en 2015 (Gagnon, 2019) à 17,90 milliards en 2021 (Gagnon, 2021), c'est-à-dire que la capacité à réduire les déficits est bien inférieure aux

¹ Déficit de maintien d'actifs : Représente le coût des travaux pour réparer les infrastructures routières en mauvais et très mauvais état et les remettre à un niveau au moins satisfaisant.

effets externes conduisant à leur augmentation. Par conséquent, il est essentiel de trouver une solution capable de réduire les coûts d'entretien et d'augmenter la résistance aux intempéries, sans oublier le volet environnemental.

La stabilisation des sols est un domaine de la géotechnique qui se concentre sur la transformation et l'amélioration des propriétés d'un sol, le rendant adéquat au projet auquel il est destiné (Kézdi & Rétháti, 1988). Présentant des méthodes de différentes natures (physiques, chimiques ou biologiques), la stabilisation peut être appliquée dans plusieurs configurations et le choix dépend des besoins de l'ouvrage, de la fonction que jouera le sol amélioré (Khanna & Justo, 2011) et de sa nature. Au cours des dernières années, plusieurs techniques ont été présentées dans le but d'augmenter la durée de vie et la performance des chaussées. Parmi celles-ci, on retrouve la biocalcification (Balihuta, 2018; Haouzi, 2019; St-Onge, 2016; Waldschmidt, 2017), qui est une technique capable de générer une précipitation des carbonates de calcium par des bactéries (par exemple *Sporosarcina pasteurii*), entraînant une amélioration significative de plusieurs propriétés géomécaniques, comme la résistance, la cohésion et la réduction des risques de liquéfaction (Liang et al., 2013; Chou et al., 2011; Van Paassen et al., 2010; Whiffin et al., 2007). Malgré ces nombreux points positifs, la complexité d'application sur chantier, liée à la compatibilité avec les sols, l'hétérogénéité des précipités, les connaissances nécessaires en microbiologie et la génération d'ammoniac en tant que coproduit, rend, pour l'heure, difficile l'application de la technique à grande échelle (Dejong et al., 2013; Esnault-Filet et al., 2012; Frigaszy et al., 2011; Gomez et al., 2015; Martinez, 2012; Wang et al., 2017). La combinaison de ces facteurs a ainsi conduit les chercheurs à explorer de nouvelles voies alternatives de stabilisation, dont la calcification chimique. Ce procédé a pour principe la précipitation induite chimiquement de carbonates de calcium à partir de produits plus simples que les cultures bactériennes et facilement disponibles sur le marché conventionnel. L'ajout des produits au sol, combiné à une petite quantité d'eau, génère une réaction chimique capable de créer des liaisons rigides de CaCO_3 entre les particules. Le résultat de cette réaction chimique est un sol beaucoup plus cohésif, résistant à l'action de l'eau et avec une rigidité élevée. Cette étude présente les optimisations réalisées, en laboratoire, dans la réaction chimique de base, ainsi que l'évaluation des performances d'échantillons traités en fonction du temps de cure et sous conditions de dégradation variées. Ultimement, cette étude propose des pistes d'application de la technique dans l'entretien, mais également la construction ou la réfection de tronçons routiers entiers.

1.2 Objectifs

1.2.1 Objectif général

L'objectif général du projet est d'évaluer l'applicabilité d'un traitement par calcification chimique comme alternative pour l'amélioration des propriétés mécaniques de sols granulaires dans le but de réduire la dégradation des chaussées routières.

1.2.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques suivants sont proposés pour atteindre l'objectif général de la thèse :

- ❖ OS1 – Définir, en laboratoire, un protocole optimal de calcification chimique en se basant sur la quantité de ressources, les étapes dans l'application de la technique et les caractéristiques physiques, mécaniques et minéralogiques du sol et des réactifs ;
- ❖ OS2 – Évaluer, en laboratoire, l'effet de la calcification chimique sur la résistance à la compression simple d'un sol traité en fonction du temps de cure des échantillons ;
- ❖ OS3 – Analyser, en laboratoire, le comportement d'échantillons traités par calcification chimique dans des conditions extrêmes de dégradation (immersion, pluie et cycles gel-dégel) ;
- ❖ OS4 – Proposer des recommandations de base pour l'application de la technique sur site, notamment l'intégration de la technique dans le processus de construction et d'entretien des routes, la viabilité économique et environnementale, en plus de l'attention portée aux aspects techniques liés au protocole optimal.

1.3 Démarche et cheminement de la thèse

L'élaboration de cette recherche vise à établir un lien entre un problème réel de la population et une solution issue d'une technique alternative. À cette fin, le projet s'est appuyé sur une approche empirique et quantitative pour prouver l'efficacité de la calcification chimique dans la résolution du problème. Des tests expérimentaux ont été réalisés afin d'assurer une répétabilité et assurer la fiabilité des quantifications et du traitement empirique des résultats.

Pour atteindre les objectifs spécifiques mentionnés, la thèse sera divisée en 4 parties :

Partie 1: Revue de la littérature

La première partie consistera à examiner la littérature générale. Cette recherche sera axée sur la caractérisation des sols de fondation des routes, en détaillant les caractéristiques géotechniques des principaux matériaux utilisés et les essais les plus importants liés à cette recherche. Il sera essentiel d'approfondir également les principaux types de dégradation routière, démontrant la raison de l'état critique des routes du Québec. Ensuite sera présentée la compréhension des principes fondamentaux de la stabilisation des sols, où seront détaillées les méthodes les plus populaires du marché et les plus récentes découvertes de la calcification chimique et leurs applications.

Partie 2: Plan expérimental

La deuxième partie abordera la préparation et l'exécution des essais en laboratoire. La planification de cette recherche a été divisée en deux grandes sections : (1) définition du protocole optimal et (2) caractérisation des performances. La première section va des étapes initiales (définition de la réaction chimique de base et choix du type de réactifs) à l'optimisation du protocole (Mode d'addition des réactifs et cure des échantillons). La deuxième section se concentre sur les performances des échantillons en fonction du temps de cure et du type de dégradation.

Le plan expérimental sera traité dans le chapitre 3, matériaux et méthodes, en tenant compte de l'OS 1.

Partie 3 : Analyse et discussion des résultats

L'importante quantité de données générées par les essais de ce projet sera analysée et discutée dans cette troisième partie. Le traitement de ces résultats permettra d'expliquer et de comprendre les réactions chimiques induites par le processus de calcification. Le comportement de la réaction en fonction du temps, les effets de la température sur l'évolution de la résistance, l'influence de la granulométrie et de la minéralogie du sol, ainsi que la quantité et le type de réactifs utilisés, sont quelques-unes des analyses réalisées à partir des résultats présentés. L'ensemble des réponses obtenues servira d'outil pour optimiser le protocole de traitement pour l'application de la technique sur le terrain.

Le chapitre 4, résultats et discussion, est réservé à l'analyse et à la discussion des résultats à l'égard des OS2 et OS3.

Partie 4 : Clôture

L'élaboration de cette thèse n'est qu'une étape dans le processus de conception d'une technique originale et innovante. Pour cette raison, il nécessite une clôture concise des informations, en précisant les contributions et les avancées réalisées. Il sera important d'indiquer des pistes pour les recherches futures afin d'améliorer le processus de calcification chimique. Parmi les points principaux figurent les perspectives de transformation de la recette en produit industriel commercialisable et, par conséquent, d'application efficace sur un chantier.

Le Chapitre 5, Conclusion et recommandations, dresse un bilan de l'étude et formule des recommandations quant aux essais, selon l'OS4.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de ce chapitre est de présenter un état de l'art sur le cycle de vie d'une structure de chaussées, de la conception à la nécessité de stabilisation. D'abord, un aperçu des routes du Québec et des matériaux de fondation nécessaires à leur construction sera présenté. Ensuite, les principales formes de dégradation seront détaillées, révélant les types de séquelles sur la chaussée après une longue exposition aux intempéries. Afin d'expliquer comment éviter l'impact des conditions climatiques et de l'action humaine, les techniques de stabilisation seront brièvement décrites par la suite. À la fin, un historique des recherches développées à Polytechnique sur la calcification chimique et biologique sera présenté. De cette façon, il sera possible de comprendre le cheminement de la calcification chimique jusqu'à présent.

2.1 Routes du Québec

2.1.1 Généralités

Selon le Ministère de Transports du Québec (MTQ, 2017), il y a environ 325 000 kilomètres de routes dans la province du Québec. De ce total, seuls 31 023 km sont de la compétence du ministère, en plus des quelques 11 000 structures qui composent le réseau routier. Les autres, près de 294 000 km, sont gérés par d'autres organismes gouvernementaux, tels que les municipalités (107 000 km), le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs - MFFP (186 000 km), Hydro-Québec (100 km) et le gouvernement fédéral (500 km). Le MFFP a la plus grande proportion parce qu'il s'agit de voies d'accès aux territoires naturels, majoritairement des routes non asphaltées et très peu achalandées. Les municipalités sont responsables de la gestion, construction et de l'entretien des rues, avenues et chemins locaux.

Les gestionnaires de ces structures ont été chargés, année après année, de réaliser de nouvelles interventions et les investissements ont été considérablement augmentés. Le rapport de gestion du MTQ 2020-2021 a présenté un budget de 865,1 millions pour la conservation du réseau routier, une hausse de 19,9 % par rapport à la période 2018-2019. Malgré cela, la qualité des chaussées est restée pratiquement la même, 29% en très mauvais état et 21% en mauvais état. L'évolution de ces résultats peut être vue dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 – Évolution de l'état des chaussées du réseau routier (MTQ, 2021c)

	INDICE D'ÉTAT	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Selon le nombre	A, B et C (très bon, bon et satisfaisant)	55	55	51	55	53	50	50	50	49	50
	D (mauvais)	18	20	20	24	25	24	23	22	22	21
	E (très mauvais)	27	25	29	21	22	26	27	28	29	29
	Indice d'état médian	C	C	C	C	C	C	C	C	D	C

Des résultats similaires se retrouvent dans les évaluations des chaussées de la ville de Montréal. Selon les indicateurs de performance des voiries de la ville, seuls 39,48% sont en bon ou très bon état. Malgré une évolution importante ces dernières années, passant d'environ 70% à 60% de routes de mauvaise qualité, ce nombre est encore très élevé.

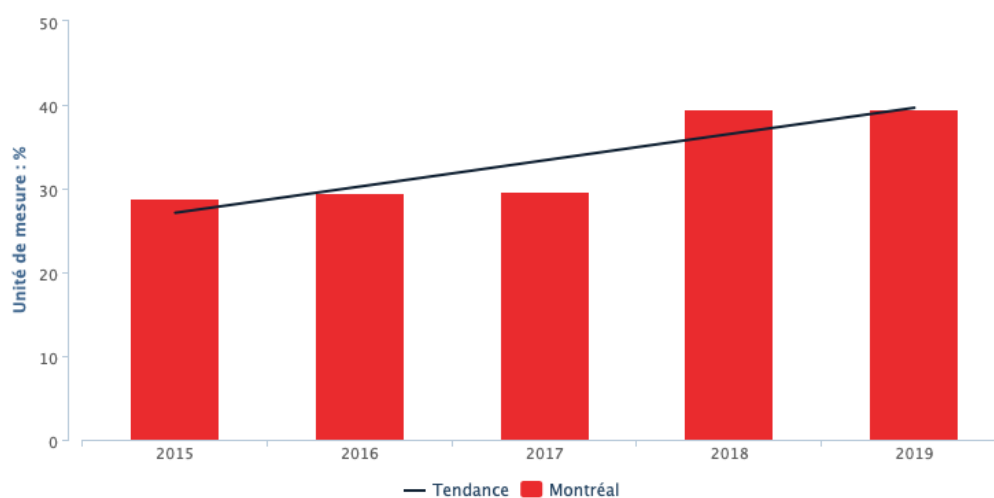


Figure 2.1 – Pourcentage de voie pavée en bon ou très bon état (Ville de Montréal, 2019)

L'un des principaux résultats du mauvais état des routes est l'impact sur la population. Une étude réalisée en 2021 par l'Association Canadienne des automobilistes (CAA) en partenariat avec le *Canadian Pacific Consulting Services* (CPCS) a révélé que la qualité de la route influence directement le coût annuel d'un véhicule. Par exemple, plus les routes sont cahoteuses, plus les pneus s'usent, plus les dépenses de réparation des véhicules s'élèvent et plus le carburant a un rendement réduit, entre autres coûts. Selon l'étude, l'ensemble de ces facteurs entraîne aux conducteurs canadiens des frais supplémentaires d'utilisation des routes de 126 \$ par année. Pour les conducteurs québécois, ce coût est de 258 \$, le plus élevé au pays, près de 3 fois la valeur de l'Alberta (64 \$). Les coûts impactent même ceux qui ne possèdent pas de voiture : du fait de la faible productivité des camions (temps de parcours, dépréciation et coût de l'entretien), les

entreprises de transport n'ont d'autre choix que d'augmenter les coût du fret (CAA, 2021; Trajectoire Québec, 2017). La conséquence est une influence directe sur le prix des marchandises, en particulier dans le secteur de l'alimentation.

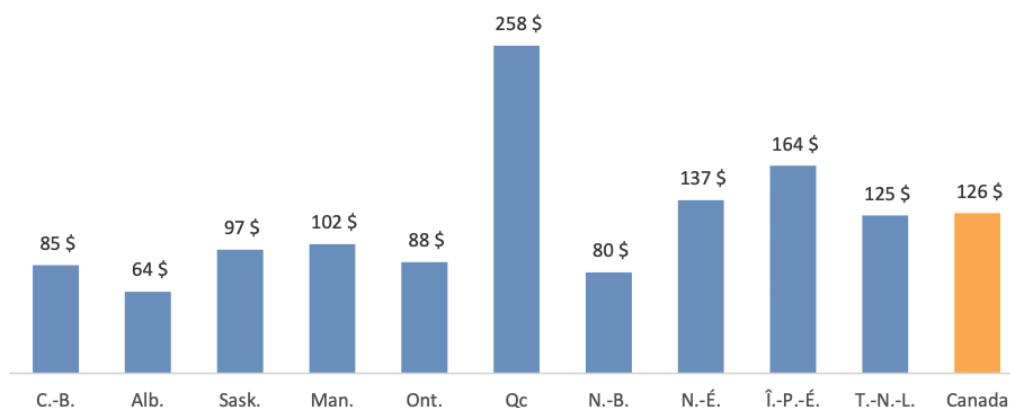


Figure 2.2 – Coût annuel en dollars par province des routes par véhicule (CAA, 2021)

Le constat du principal problème lié à ces données a été discuté par Gagnon (2021). L'auteur rapporte que la capacité du gouvernement à réparer les infrastructures routières est bien inférieure à l'impact de la dégradation annuelle des routes. Que ce soit par l'action des intempéries, par le parc automobile ou l'action humaine, le déficit financier lié aux ouvrages en très mauvais et mauvais état ne cesse d'augmenter. Au cours des dernières années, il est passé de 11,8 milliards en 2015 (Gagnon, 2019) à 19,4 milliards en 2022 (Gagnon, 2021; SCT, 2022). La Figure 2.1 montre l'évolution des déficits au Québec.

DÉFICIT DE MAINTIEN D'ACTIFS			
Routes, ponts et ponceaux sous la responsabilité du ministère des Transports			
ANNÉE	DÉFICIT	HAUSSE\$	HAUSSE %
2022-2023	19,4 G\$	+1,52 G\$	+8,4 %
2021-2022	17,9 G\$	-800 M\$	-4,3 %
2020-2021	18,7 G\$	+2,20 G\$	+13,3 %
2019-2020	16,5 G\$	+1,79 G\$	+12,2 %
2018-2019	14,7 G\$	+1,83 G\$	+14,8 %
2017-2018	12,8 G\$	+3 M\$	+0,2 %
2016-2017	12,8 G\$	+990 M\$	+8,4 %
2015-2016	11,8 G\$		

Figure 2.3 – Évolution du déficit de maintien d'actifs (Adaptée de Gagnon, 2019; Gagnon, 2021; SCT, 2022)

Malgré le scénario catastrophique des dernières années, le gouvernement du Québec a présenté un plan d'investissement ambitieux pour restructurer et développer divers secteurs de la province. Le plan québécois des infrastructures (PQI) 2022-2032 a été présenté en mars 2022 avec un budget de 142,5 milliards de dollars. De ce total, 30,7 milliards de dollars ont été consacrés au réseau routier, dont environ 24 % pour le développement de nouvelles structures et 76 % pour le contrôle et la réduction du déficit : une somme très importante qui contribuera certainement à améliorer la situation des routes.

Les investissements sont importants, mais ils ne constituent pas la seule voie vers l'amélioration d'un réseau routier. La plupart des ressources ne sont destinées qu'à l'entretien des tronçons routiers dégradés, c'est-à-dire à transformer les routes en mauvais état en très bon état. Une procédure axée uniquement sur la remédiation s'avère ainsi inefficace si on analyse ces dernières années. Une autre approche est de se concentrer sur des solutions capables de prolonger la durée de vie utile de la chaussée, en utilisant des techniques qui améliorent non seulement le revêtement mais aussi les performances des couches inférieures. Pour illustrer ce propos, une couche d'asphalte bien faite, avec une fondation fragile et sensible aux impacts climatiques, est inutile. Dans ce contexte, il est nécessaire de comprendre comment les couches d'une route sont disposées et se comportent.

2.1.2 Types de chaussées au Québec

La chaussée est une structure routière construite au-dessus d'une surface de terrassement compactée (appelée infrastructure), au moyen de couches multiples de matériaux granulaires et ayant des épaisseurs finies (Brockenbrough & Boedecker, 2003). La fonction principale de l'ensemble de couches est de résister et de répartir sur l'infrastructure les efforts produits par le trafic, en assurant la sécurité et le confort des véhicules et des personnes (O'Flaherty, 2002). Constituant une interface entre le sol sous-jacent et les sollicitations externes, la structure routière doit avoir une qualité satisfaisante pour résister à l'impact des intempéries (pluie, gel-dégel ou chaleur excessive), en minimisant le nombre de déformations et en garantissant une longue durée de vie.

Le réseau routier du Québec présente 3 principaux types de chaussées : rigides (en béton), souples (en enrobé) et non-revêtue (en gravier). Selon Poulin (2010), parmi les routes gérées par le gouvernement du Québec, la chaussée la plus prédominante est de type non revêtue, avec environ 150 000 km (ou 45%). Dans le cas des réseaux municipaux et privés, ce chiffre atteint 90% du

total. Selon le MTQ (2012), sur les 31 000 km gérés par le ministère, environ 4 % ont été construits en revêtement rigide, 87 % en revêtement enrobé et 9 % sont en chaussées non revêtues. Voici une description de chacun des types de chaussées présentes au Québec :

- Les chaussées routières souples : Nommées aussi flexibles, elles comportent un revêtement constitué de granulats concassés liés entre eux par un bitume lui attribuant une certaine stabilité et étanchéité (Khanna & Justo, 2011). Elles s'adaptent facilement aux tassements possibles des sous-couches et aux déformations imposées par l'action des charges de trafic (Brockenbrough & Boedecker, 2003). Pour effectuer une répartition efficace des charges reçues, les chaussées souples comportent des couches multiples et plus épaisses. Elles sont habituellement la première option pour le pavage, en raison de la vitesse d'exécution et l'entretien facile et rapide. Elles sont conçues avec une durée de vie maximale de 10 ans.

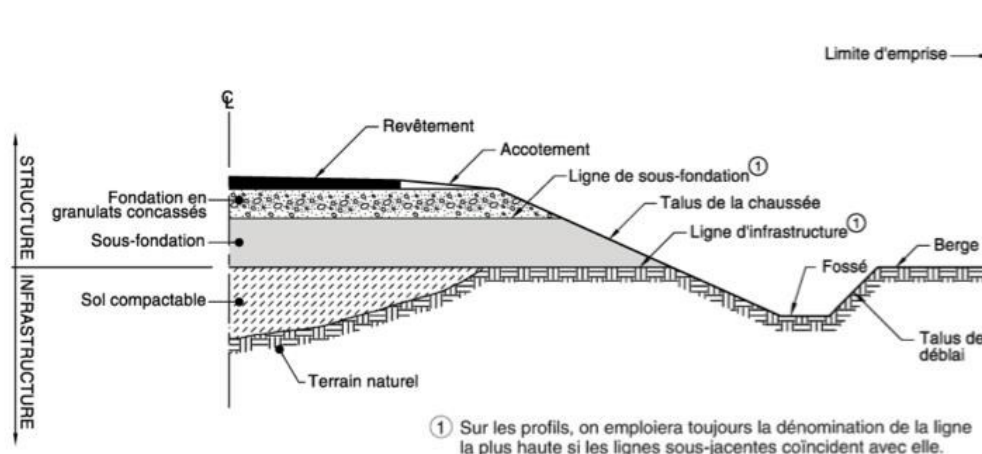


Figure 2.4 – Coupe type de chaussée souple (MTQ, 2010)

- Les chaussées rigides : Chaussée réalisée essentiellement avec un matériau rigide, comportant généralement des dalles en béton. Le revêtement a une rigidité élevée par rapport aux couches inférieures et absorbe donc pratiquement toutes les contraintes résultant du chargement appliqué (O'Flaherty, 2002). Pour cette raison, ce type de chaussée est composé uniquement d'une dalle de béton et de la couche de sous-fondation. La couche de béton assure le rôle de la couche de fondation et de surface. De plus, la construction en béton a des formes variées : elle peut être armée ou non, avec enrobé bitumineux et avec/sans joints de dilatation (Nikolaides, 2014). Ce sont des ouvrages normalement dimensionnés pour une durée de vie minimale de 20 ans, ce qui réduit le besoin d'entretien.

Le gros problème est lorsqu'il y a un besoin d'entretien, car il est nécessaire d'arrêter le trafic de la route et refaire toute la dalle de béton (au moins 20 jours).

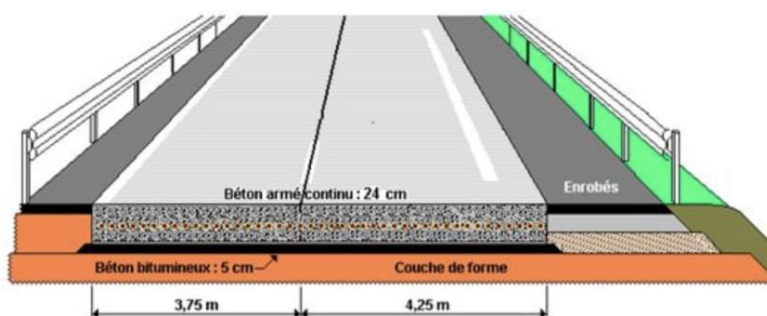


Figure 2.5 – Coupe type de chaussée rigide (Dupuis, 2014)

- Les chaussées non-revêtues : Par définition, il n'a pas de couche de surface qui protège son corps des intempéries ou des charges imposées par le trafic. De ce fait, la couche de roulement est exposée à un contact direct avec des agents de dégradation (Le Vern, 2016). Ces chaussées se trouvent généralement sur des routes de campagne, utilisées par des compagnies forestières et minières, par des résidents de secteurs éloignés ou des touristes de loisirs de plein air (Poulin, 2010). Malgré un trafic réduit, les charges imposées, principalement par les camions d'exploitation, génèrent une usure importante, exigeant une construction et un entretien bien faits. Les structures de ces routes peuvent aller d'une simple couche granulaire sur le sol naturel à des structures plus complexes composées d'une couche de roulement granulaire, d'une fondation et d'une sous-fondation reposant sur le sol d'infrastructure (Le Vern, 2016; Poulin, 2010).

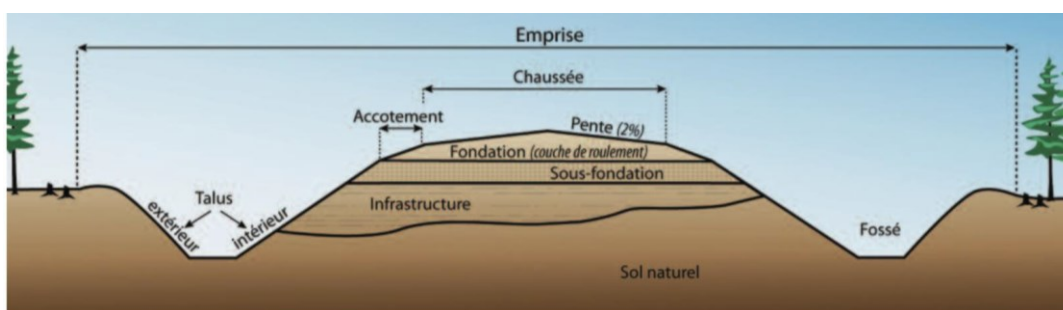


Figure 2.6 – Coupe type de chaussée non revêtue (Latrémouille, 2013)

À partir de ces descriptions, il est possible de comprendre que la couche de roulement représente une couverture de la route avec des composants résistants, complexes et évolués. Les couches

inférieures ne sont que des sols compactés dans le but de soutenir l'ensemble de la structure routière. Lorsque la fondation s'affaiblit, elle génère des défauts récurrents, entraînant des reprises des travaux et des dépenses constantes dans la couche de roulement. Selon CAA (2021), un dollar investi aujourd'hui, dans la planification et la préservation de la chaussée, est en mesure d'éliminer des dépenses de 6 à 10\$ en travaux de reconstruction. D'après ces informations et comme il s'agit des types prédominants dans la province, cette recherche portera spécifiquement sur l'amélioration des couches de fondation et de sous-fondation des chaussées souples et non revêtues.

2.1.3 Caractérisation géotechnique des matériaux de fondation et sous-fondation

Les fondations et sous-fondations sont considérées par de nombreux auteurs comme l'élément le plus important du dimensionnement d'une route, car le soin apporté à la qualité des matériaux est fondamental pour éliminer les risques d'érosion, de déformation ou de cisaillement. Selon Holtz and Kovacs (1991), les propriétés géotechniques des matériaux utilisés pour la construction d'une chaussée, tels que la résistance, la rigidité, la compressibilité, la perméabilité et la susceptibilité au gel ont une grande influence sur sa performance et sa durée de vie.

Afin de garantir la qualité des matériaux, il est donc nécessaire de répondre aux critères présentés dans les normes du MTQ et dans le cahier des Charges et Devis Généraux (Poupart, 2018). Dans ce contexte, le ministère des Transports du Québec exige de nombreux essais en laboratoire qui sont capables de déterminer si un sol est conforme pour être utilisé comme matériau de fondation ou comme sous-fondation d'une chaussée. Les tests utilisés tout au long du présent projet sont présentés ci-après.

2.1.3.1 Essai de granulométrie

Le premier, et l'un des principaux requis par le MTQ, est l'évaluation granulométrique, en raison de sa simplicité d'exécution et du grand nombre d'informations résultant de ce test. L'essai granulométrique permet de déterminer le pourcentage en poids de chaque taille des particules dans la masse totale testée. Grâce aux résultats de cet essai, il est possible de construire la courbe de distribution granulométrique, importante pour la classification des sols ainsi que pour l'estimation de paramètres tels que la perméabilité et la capillarité.

Le MTQ a défini un fuseau granulométrique dans la norme NQ 2560-114 (BNQ, 2014) à l'intérieur duquel toutes les courbes granulométriques des matériaux de fondation et de sous-fondation doivent se situer. Les paramètres suivants peuvent être visualisés à la Figure 2.7 et au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Exigences granulométriques pour la fondation MG-20 et sous-fondation MG-112

	MG-20							MG-112								
Diamètre (mm)	31.5	20	14	5	1.25	0.315	0.08	112	56	20	14	5	1.25	0.315	0.16	0.08
% passant minimum	100	90	68	35	19	9	2	100	-	-	-	35	-	-	-	0
% passant maximum	100	100	93	60	38	17	7	100	-	-	-	100	-	-	-	10

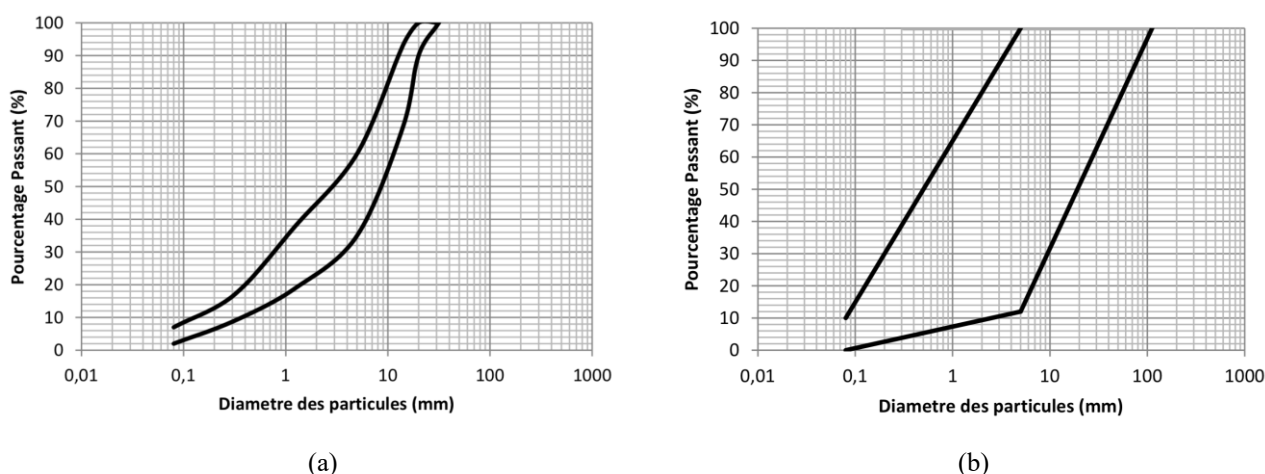


Figure 2.7 – Fuseau granulométrique : (a) fondation MG-20 et (b) sous-fondation MG-112

2.1.3.2 Essai Proctor et Proctor modifié

Connu sous le nom d'essai de compactage Proctor, définie pour Ralph Proctor en 1933, il s'agit de l'une des procédures les plus importantes pour l'étude et le contrôle de la qualité des remblais compactés (barrages, bâtiments, ponts et routes). Le compactage est fonction de quatre variables : la masse volumique du sol sec, la teneur en eau, l'énergie de compactage et le type de sol (Holtz & Kovacs, 1991).

Les essais consistent en une humidification du sol et en un compactage ultérieur. À mesure que la teneur en eau augmente, les grains sont lubrifiés, ils sont réarrangés de sorte que, avec l'énergie appliquée, le volume des vides diminue et que la masse spécifique augmente. Ce comportement est observable du «côté sec». La teneur en eau et la densité augmentent jusqu'au maximum, puis le sol se trouve du «côté humide», où l'humidité atteint un point tel que les espaces entre les grains sont

remplis par de l'eau, qui absorbe une partie de l'énergie de compactage, de sorte que la masse spécifique apparente dans le sol diminue également. Il est important de noter que cet essai n'est applicable que sur des matériaux ayant une dimension de la plus grande particule inférieure à 20 mm ($D_{\max} < 20 \text{ mm}$).

Deux types de tests Proctor sont normalisés: le test dit « normal » et le test « modifié ». Cette distinction est principalement due à la quantité d'énergie utilisée au moment du compactage. L'exécution de la méthode modifiée donne quatre fois et demi plus d'énergie dans l'effort de compaction que pour le test standard Proctor, développé (Das, 2010), comme on peut le voir dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 – Caractéristiques de l'essai Proctor modifié (NQ 2501-250) et de l'essai Proctor normal (NQ 2501-255)

Type	Masse du marteau (kg)	Hauteur de chute (cm)	Nbr de couches	Nbr de coups par couches	Diamètre du moule (cm)	Hauteur du moule (cm)	Énergie kN.m/m^3
Normal	2,490	30,5	3	25	10,15	11,65	593
Modifié	4,535	45,7	5	56	15,20	11,60	2700

Pour évaluer les matériaux d'une chaussée, il est préférable d'utiliser l'essai Proctor modifié parce qu'il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec les rouleaux à pieds de mouton ou les rouleaux à pneus lourds modernes. Cet essai consiste à compacter le sol en 5 couches avec 56 coups sur chacune d'elles, tout en augmentant sa teneur en eau. Pour chacune des teneurs en eau considérées, la masse volumique sèche du sol est déterminée. La courbe des variations de la masse volumique en fonction de la teneur en eau est alors tracée. On obtient une courbe sous forme de cloche comme illustré sur la Figure 2.8. Le sommet de cette courbe présente la masse volumique maximale du sol sec ($\rho_{d \max}$) à laquelle correspond la teneur en eau optimale (w_{opt}). Le MTQ recommande que tous les matériaux pour la fondation et sous-fondation de chaussées souples répondent à la norme NQ 2560-114 – Travaux de Génie Civil - Granulat (BNQ, 2014).

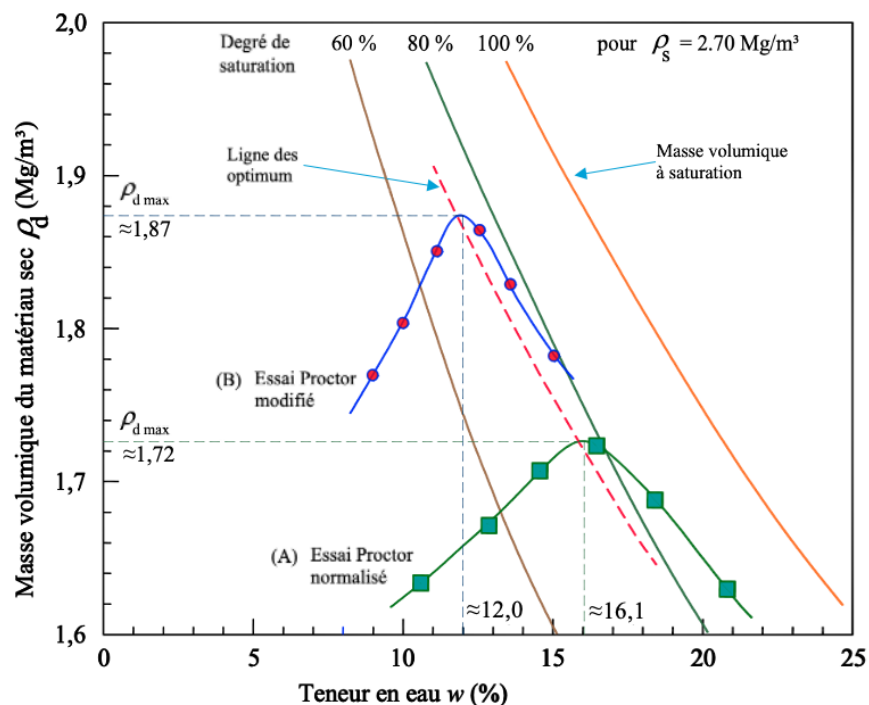


Figure 2.8 – Courbes de compactage des essais Proctor normal et modifié

2.1.3.3 Compression simple

Cet essai vise à déterminer la résistance à la compression non confinée (ou simple) d'éprouvettes cylindriques constituées de sols naturellement ou artificiellement cohésifs, en appliquant une charge axiale avec contrôle de vitesse et en enregistrant les déformations subies (ASTM D2166-06, 2010). Ce test a été retenu dans la recherche en raison de son caractère pratique et rapide, mais également parce qu'il constitue un test de base pour évaluer les sols améliorés (i.e. mélanges sol-ciment ou sols biocalcifiés). Face à la planification de centaines d'échantillons, un essai à court terme mais efficace était nécessaire.

Un matériau est considéré comme résistant à la compression lorsque la contrainte uniaxiale ne dépasse pas la limite de rupture complète. Le seul cas où la rupture ne se produit pas est lorsqu'il s'agit de matériaux ductiles, car ils ne se briseront jamais mais se déformeront de manière irréversible. La résistance à la compression simple est déterminée par la relation :

$$R_c = \frac{F_{max}}{S}$$

Avec R_c (résistance à compression) en Pa, F_{max} (charge axiale) en Newton et S (surface d'application) en m^2 .

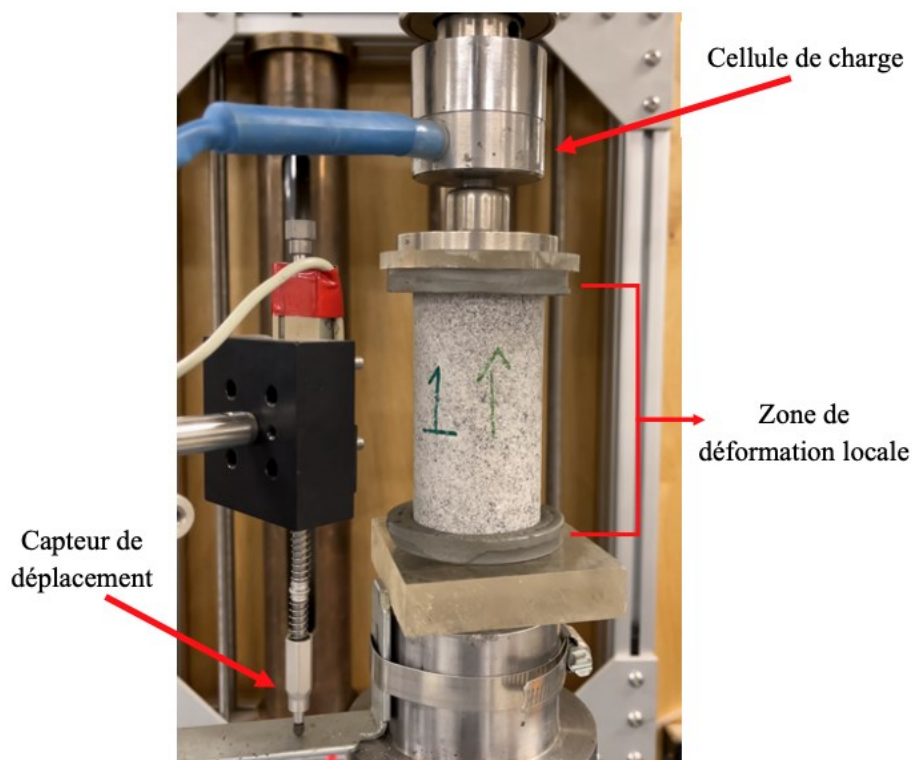


Figure 2.9 – Structure assemblée de l'essai de compression simple

La Figure 2.10 montre un exemple de test de compression simple. Le capteur de déplacement mesure tout changement qui se produit dans la zone de déformation locale, c'est-à-dire la mesure en millimètres selon laquelle l'échantillon a été comprimé jusqu'à ce qu'il atteigne la rupture. La cellule de charge permet de mesurer et d'enregistrer la variation de la force appliquée à l'échantillon. Les 2 données sont transférées vers l'ordinateur et compilées automatiquement en fonction de la durée du test. Il est possible de créer des graphiques selon les 3 variables : temps, force et déformation.

2.2 Dégradation routière

L'origine des chaussées en mauvais et très mauvais état au Québec s'explique principalement par deux facteurs importants de dégradation : les conditions climatiques et le parc automobile qui les emprunte. Le premier facteur est assez complexe car il mélange l'action du climat hivernal, avec les pluies et les vents intenses qui se produisent à l'automne et au printemps. À cette condition

climatique critique s'ajoute la croissance rapide du parc automobile de la province au cours des dernières années, particulièrement la circulation des véhicules lourds.

2.2.1 Parc automobile

Le parc automobile qui circule sur le réseau routier est un facteur important dans la détérioration des chaussées. Il est à noter que le volume et la nature du parc doivent être considérés. De 2010 à 2020, le nombre total de véhicules (promenade et commerciaux) circulant sur le réseau routier québécois a progressé de 5 913 950 à 6 834 681, soit une augmentation de 15,6% selon les données de 2020 de la Société d'Assurance Automobile du Québec (SAAQ, 2021). La croissance annuelle est assez constante et on enregistre environ 100 000 à 120 000 voitures de plus par an. Malgré un nombre constant au cours des dernières années, Statistique Canada a enregistré un nombre important de nouvelles immatriculations et, en 2021, 413 680 voitures neuves ont été mises en circulation au Québec.

Cette augmentation importante du nombre de véhicules qui empruntent les routes du Québec chaque année a pour effet d'accélérer le rythme de dégradation des chaussées. Les camions lourds sont les principaux contributeurs à la détérioration des chaussées. En effet, l'impact du passage d'un camion lourd sur la chaussée n'est pas comparable à celui d'un véhicule de promenade. Selon le MTQ (2021b), le passage d'un camion chargé (5 essieux) cause un dommage équivalant au passage de 30 000 à 40 000 véhicules de promenade. La dégradation est encore pire lorsque les camions se déplacent de manière irrégulière, avec des charges excessives. Une étude réalisée par l'Université Laval détaille qu'un essieu de camion circulant avec une charge excédentaire de 5% fait 22% de dégâts de plus sur la chaussée ; quand l'excédent est de 10%, ces dégâts sont augmentés de 46%; et quand cet excès est de 20%, les dégâts augmentent de 107%, c'est-à-dire que la route durerait deux fois moins longtemps (Farlane, 2014; MTQ, 2021b).

La SAAQ a enregistré en 2020 un total de 162 064 camions lourds circulant sur les routes du Québec, soit une augmentation de 32,2 % par rapport à l'année 2010 (SAAQ, 2021). Bien que le nombre de véhicules lourds ne représente que 2,4 % du parc automobile, il est équivalent à environ 3 millions de véhicules de promenade.

2.2.2 Les conditions climatiques

Le climat du Québec est défini comme nordique, en variant du tempéré froid au sud à polaire au nord. Pour Köppen et Geiger, la province possède 3 grandes classifications climatiques : Polaire de Toundra (ET), Continental Subpolaire (Dfc) et Continental Froid et Humide (Dfb) (McKenney & Gerardin, 2001). Avec une température moyenne annuelle d'environ 6°C et 4 saisons de l'année bien définies, chacune avec des caractéristiques très particulières (Figure 2.10). Pendant les mois chauds, il est possible d'obtenir des températures maximales supérieures à 30 degrés, alors qu'en hiver, il est possible d'enregistrer des minimums de -30°C. L'effet de froid rigoureux est un gel du sol variant entre 1,2 et 3,0 mètres et une durée du gel comprise entre 147 et 218 jours/an.

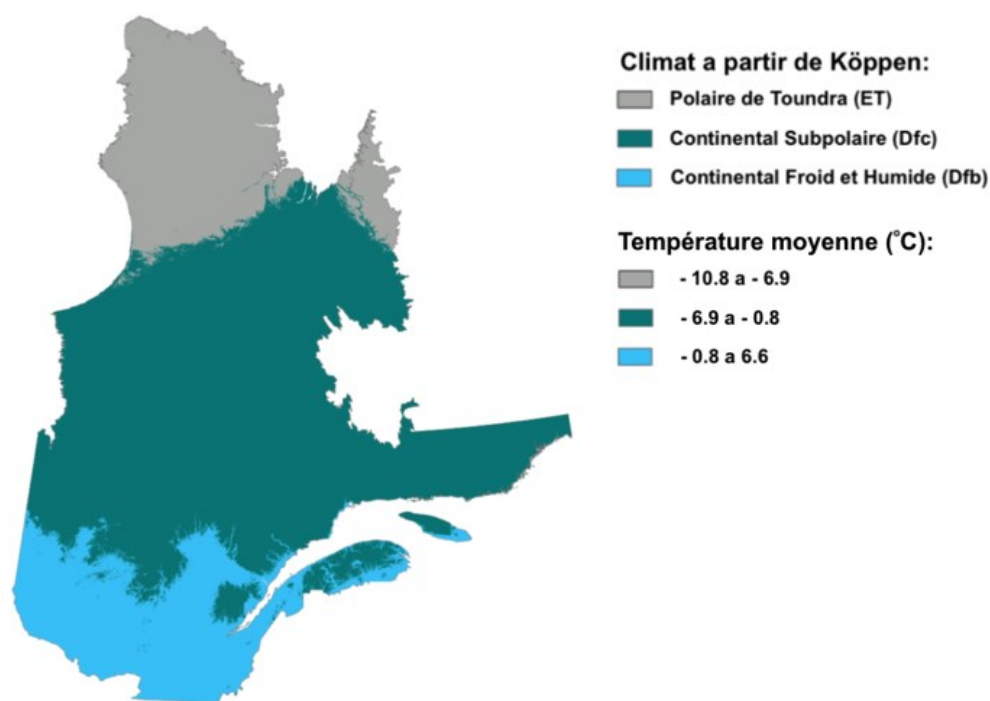


Figure 2.10 – Classification de Köppen-Geiger (McKenney & Gerardin, 2001)

Les précipitations sont plus importantes dans le sud du pays, même dans les régions les plus sèches, avec des moyennes supérieures à 1 100 mm/an. La Figure 2.11 présente la normale climatologique de Montréal/St-Hubert, situé à l'aéroport Saint-Hubert de Longueuil, dans le Grand Montréal. Cette figure montre la relative constance pluviométrique sur l'année, avec des pics d'intensité en juillet et en décembre. Cette base de données présente également les températures extrêmes maximales et minimales de la région. Sur l'ensemble de la base de donnée pour la station Montréal/St-Hubert, la température minimale historique a été enregistrée en décembre 1933, avec une valeur de -37,2°C,

tandis que le maximum pluviométrique était en novembre 1996, avec 106 mm/jour, et l'extrême chute de neige était en mars 1971, avec 51 cm/jour (Gouvernement du Canada, 2022).

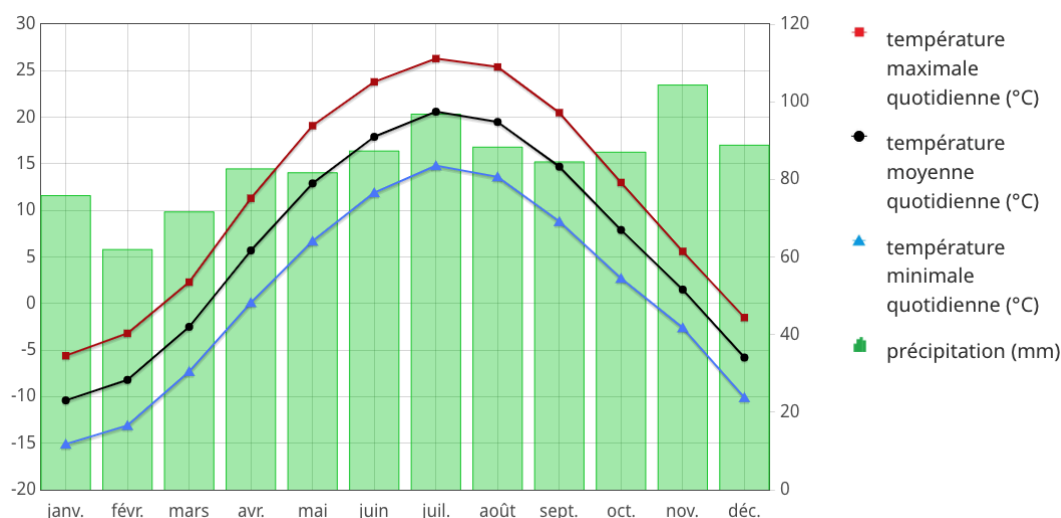


Figure 2.11 – Normal climatique de la station Montréal entre 1981-2010 (Adaptée de Gouvernement du Canada, 2022)

2.2.3 Susceptibilité au gel

L'effet du froid dans des régions comme le Québec doit être largement pris en compte dans tous les domaines du génie civil et particulièrement dans la construction routière. La succession de cycles de gel-dégel est peut-être l'un des effets les plus néfastes sur les routes, contribuant largement à la dégradation des chaussées. L'action du froid est progressive et commence des couches les plus superficielles jusqu'aux plus profondes, pouvant atteindre 3 mètres sous la surface (MTQ, 2021b).

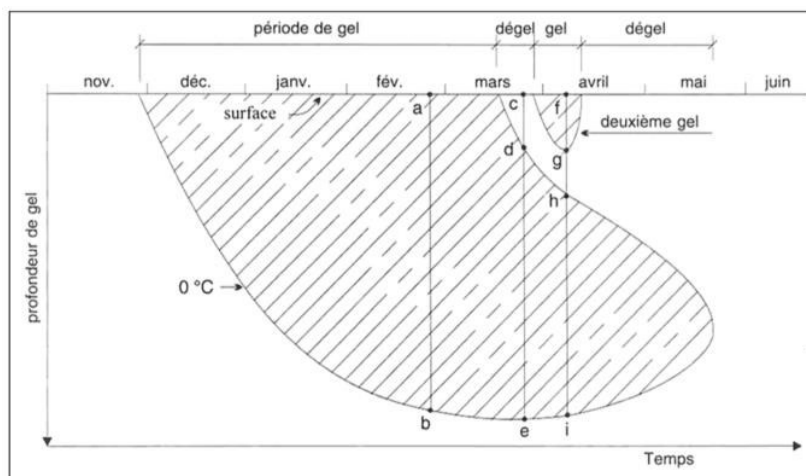


Figure 2.12 – Bulbe de gel-dégel entre le début et la fin d'un hiver (Ewane, 2019)

Pendant l'automne, une grande quantité d'eau s'accumule dans les couches souterraines et, à l'approche de l'hiver, de l'eau des couches non gelées peut migrer, par capillarité, vers la zone de gel. Cette migration d'eau de la nappe phréatique peut alors engendrer, dans les cas les plus problématiques, la formation de lentilles de glace qui se traduisent par un soulèvement de la chaussée. Selon Holtz and Kovacs (1991), la formation de lentilles nécessite trois conditions bien spécifiques : la présence de températures inférieures au point de congélation, la présence d'une source d'eau et la présence d'un sol gélif. Dans les cas extrêmes, le soulèvement de la chaussée peut atteindre 20 cm (Konrad & Lemieux, 2005).



Figure 2.13 – Gonflement attribuable au gel (MTQ, 2010)

La hausse des températures lors de la période printanière entraîne la fonte de la neige en surface et la fonte des lentilles de glace formées dans les différentes couches de la structure de chaussée. Ces

eaux de fonte se combinent aux précipitations saisonnières pour saturer les couches granulaires de la chaussée (cf. Figure 2.14). Les parties fortement gelées de la structure du sol fonctionnent comme des barrières imperméables et l'eau ne peut pas s'écouler librement. Cette accumulation d'eau se traduit par une augmentation des pressions interstitielles dans le corps de la chaussée, notamment lorsqu'elle est soumise à l'action des charges dynamiques des poids lourds (Sylvestre, 2017). Les pressions et les charges se produisant plusieurs fois entraînent la réduction des contraintes effectives et la rigidité des sols, ce qui se traduit par une réduction significative de la capacité portante du sol. Selon les données du MTQ (2015), une chaussée ne présente que 30 à 70 % de sa résistance d'origine pendant le printemps et, pour cette raison, des restrictions de charges sont imposées aux véhicules lourds en période de dégel.

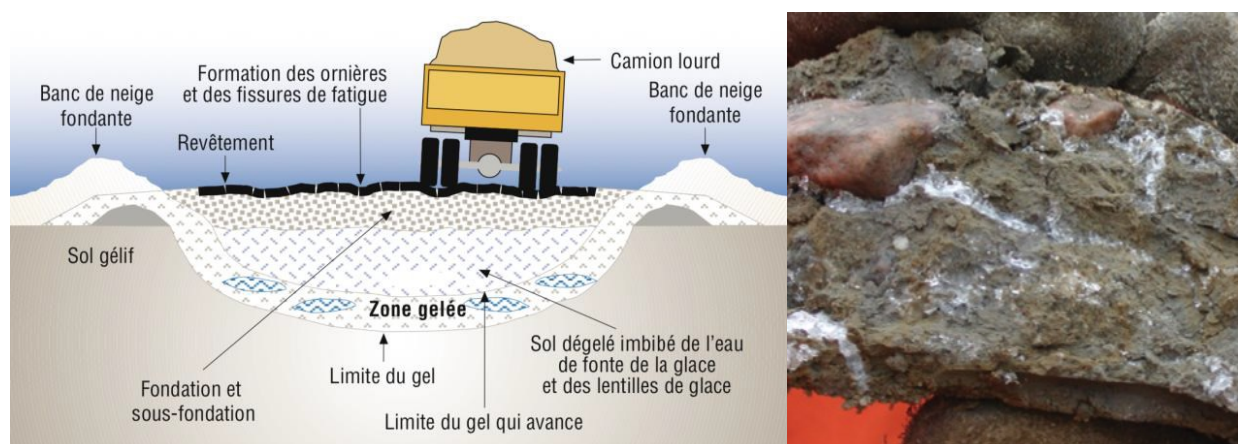


Figure 2.14 – Affaiblissement au dégel et fonte d’une lentille de glace (MTQ, 2010, 2021b)

2.2.4 Érosion externe

Une des grandes questions de la géotechnique actuelle est de savoir comment réduire les processus érosifs et les mouvements de masse, des obstacles mondiaux, coûteux, dangereux et avec différents agents initiateurs (Zhao et al, 2013). L'action humaine représentée par la croissance démographique, l'urbanisation accélérée et la déforestation est, aujourd’hui, la principale responsable de l'intensification de l'érosion dans le monde. Un ensemble de conséquences capables de rendre le sol plus vulnérable à la dégradation et à une rupture ultérieure, c'est-à-dire offrant des risques économiques et de vie à la population (Jiang et al., 2019).

L'érosion externe est la déstructuration de surface par arrachement et déplacement des particules d'un sol ou d'une roche sous l'action d'un agent extérieur naturel (eau, air, froid, chaleur,

hygrométrie, gel, dessiccation etc.) ou anthropique. Trois types d'érosion externe dues à l'eau sont essentiellement identifiables : l'érosion pluviale, l'érosion fluviale et l'érosion marine (Pham, 2008).

L'érosion externe par l'action de l'eau est le principal agent d'endommagement des routes non revêtues. Ritter (2018) subdivise l'érosion hydrique externe en quatre phases: impact, désagrégation, transport et dépôt. Dans les situations où l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité d'infiltration dans le sol, le résultat est la production de ruissellement de surface, qui, en plus de faire glisser les matériaux désagrégés par l'impact des gouttes de pluie, provoque le détachement de particules du sol. Cette capacité d'écoulement superficiel est proportionnelle à l'augmentation de la profondeur du ruissellement et à la pente (Huang et al., 1983).

Sur les routes revêtues, il est fréquent que l'absence d'un drainage efficace se traduise par une évolution des caractéristiques érosives plus intense et que les sédiments provenant des cycles érosifs soient tous transportés au pied des pentes latérales, créant des « bassins de sédimentation ». Ce processus a tendance à influencer principalement les cours d'eau, atteignant des cas extrêmes comme celui de la Figure 2.15, où les bords de la rivière ont été totalement endommagés jusqu'à la rupture de la route.



Figure 2.15 – Érosion externe sur les pentes latérales d'une route (Lévesque, 2022)

En plus des problèmes déjà mentionnés, le contact des gouttes de pluie avec le sol engendre l'arrachement de particules en cassant toutes les liaisons (Fattet et al., 2011). Avec la saturation du sol, l'eau de pluie commence à former un ruissellement. À ce moment, les particules du sol sont transportées et déposées ailleurs, complétant le cycle érosion. Le pouvoir érosif de l'eau en

mouvement possède 4 variables importantes : la vitesse avec laquelle la pluie touche le sol, la nappe phréatique, la pente de la route et la qualité du compactage à la décharge. La combinaison de ces facteurs dans un événement pluvieux extrême peut entraîner une dégradation massive des sols.



Figure 2.16 – Ruissellement massif lors d’un événement pluvieux (Hilaire & Guhur, 2016)

2.2.5 Résultat des dégradations routières

Lorsque les effets du trafic lourd se combinent aux agents climatiques (gel-dégel et érosion de surface), il en résulte une augmentation exponentielle et récurrente de l'endommagement des infrastructures de transport. Habituellement présentés dans la couche la plus externe de la chaussée, les résultats des dégradations sont des signes précoces de détérioration structurelle de la fondation et de la sous-fondation de la route. En effet, ils alertent sur un début d'affaiblissement de la chaussée et la nécessité d'une remédiation dès que possible pour éviter une rupture de la structure. La résolution de ces problèmes va bien au-delà du resurfaçage de la couche d'asphalte. Il est nécessaire de réaliser une étude pour évaluer l'origine, les causes et les conséquences des dégradations, en plus d'énumérer les actions de rectification. Une recherche détaillée assure une longue durée de vie et le bon fonctionnement du réseau routier.

Les dégradations des chaussées peuvent être classées en quatre grandes catégories selon la nature de la détérioration : fissuration, déformation, usure du revêtement et érosion par l'action d'eau. Elles peuvent se manifester sur les routes revêtues et non revêtues, sous différentes formes (défaut de mise en œuvre, qualité du matériau ou agents climatiques). Les plus fréquentes sont listées ci-après (Hassan, 2015; LCPC, 1998; MTQ, 2002).

2.2.5.1 Fissuration

Les fissures sont des ouvertures d'épaisseur variable qui se développent dans la couche d'asphalte. Elles peuvent commencer par n'affecter que la surface et progresser sur tout ou partie du corps de chaussée. Les 3 principaux types sont présentés ci-dessous :

- Fissures transversales – Rupture du revêtement dans le sens perpendiculaire à la route, s'étendant d'un bord à l'autre. Elles peuvent être dues au retrait thermique, au vieillissement et à la fragilisation du bitume, et même à la remontée des fissures suite à des travaux de resurfaçage.
- Fissures longitudinales – Parallèles à la direction de la route, elles peuvent être situées sur les pistes de roues, à l'écart de la trajectoire des roues ou exactement au centre de la route. Lorsqu'elles suivent la trajectoire des roues, la raison principale est la fatigue due au trafic important de véhicules lourds. Lorsqu'elles apparaissent dans la région centrale avec un aspect lézardé, cela est dû aux soulèvements et à l'infrastructure gélive. Lorsqu'elles apparaissent dans d'autres parties de la route, il s'agit généralement de joints de construction mal exécutés le long de la travée adjacente, en raison de la ségrégation de l'asphalte à la pose.
- Fissures en carrelage – Appelées aussi faïences, elles se propagent de manière aléatoire dans la couche de revêtement, se croisent et forment des mailles polygonales de dimensions variables (appelée peau de crocodile). Plusieurs causes combinées conduisent à ce mode de fissuration : fatigue à cause des camions lourds, sous-dimensionnement du corps de chaussée et vieillissement de la chaussée. Il s'agit généralement d'une évolution de fissures longitudinales et transversales.

2.2.5.2 Déformation

Les déformations sont des dépressions ou ondulations de la route qui trouvent généralement leur origine dans le corps de chaussée ou dans le sol support et qui se manifestent sur la couche de roulement (Loko, 2012). La forme et la localisation sont les moyens de différencier ces types de dégradation.

- Ornières – C'est un phénomène de dépressions dans la couche de roulement similaires à de traces de pneus résultant du passage des véhicules. Elles sont présentes sur les routes

revêtues et non revêtues. Les ornières de l'ordre de 250 mm de largeur représentent un problème structurel sérieux dans la chaussée causée par le vieillissement, un compactage insuffisant, un mauvais drainage ou en raison de la période de dégel (comme indiqué sur la Figure 2.14). Dans les cas où la largeur ne dépasse pas 120 mm, les problèmes sont liés à l'enrobage (sous-dimensionnement, compactage insuffisant ou usure) et seul le changement de la couche de surface suffit pour la correction.

- **Soulèvement différentiel** – Il s'agit de gonflements localisés sur la chaussée en raison d'un temps froid. Aussi appelés ondulations, les soulèvements apparaissent le plus souvent perpendiculairement à l'axe de la route, mais peuvent aussi, dans certains cas, apparaître parallèlement à l'axe de la chaussée. Ces soulèvements sont principalement causés par des sols gélifs, des matériaux sensibles à l'humidité et des nappes phréatiques élevées, combinées à une période de basses températures.
- **Affaissement** – Dépressions très prononcées du profil en bordure de la chaussée ou au voisinage de conduites souterraines, habituellement causées par l'instabilité d'un remblai, un mauvais compactage et la présence de matériaux inadaptés. Cette dégradation, lorsqu'elle n'est pas réparée, favorise l'accumulation des eaux de ruissellement en flaques. Cette eau provoque, pendant longtemps, un affaiblissement et de graves dommages à la structure.

2.2.5.3 Usure du revêtement

Il s'agit de phénomènes de perte d'adhérence entre éléments ou parties de la route, généralement suivis de leur disparition. Ce type de dégradation n'affecte que la couche de roulement au début de son apparition, mais peut s'aggraver en affectant les couches sous-jacentes au revêtement.

- **Nids-de-poule** - Les plus connues du grand public, ce sont des désagréations dans le revêtement, sur toute son épaisseur, formant des cavités arrondies majeures avec une taille et une profondeur variable, apparaissant sur le revêtement par arrachement de matériaux. Les nids-de-poule sont présents sur les routes revêtues et non revêtues, en plus d'avoir comme cause l'évolution de défauts tels que les fissures et déformations ou une faiblesse ponctuelle de la fondation.

- Pelades – Il s’agit d’un arrachement par plaque de la couche de roulement, qui se différencie du nid de poule par la faible épaisseur du trou formé sur le revêtement. Les causes probables de telles formes de dégradation sont la mauvaise adhérence de la couche de surface ou l’épaisseur insuffisante de celle-ci.
- Désenrobage et arrachement – Ce phénomène est défini comme la séparation entre le gravillon et le mastic qui l'enrobe. Le mélange de bitume et de grains fins minéraux est appelé de mastic et cette séparation rend le gravillon « dévêtu », donc très fragile au décollement et susceptible à l'effet conjugué du trafic et climat. Parmi les causes de cette dégradation figurent l’usure par trafic intense, le surchauffage ou vieillissement de l’enrobé, et le sous-dosage du bitume.

2.2.5.4 Érosion par action d’eau

Toutes les chaussées sont sensibles à cette érosion, bien que les chaussées non revêtues aient des impacts structuraux plus importants. La force de l'eau est capable de former de petits canaux ou même de rendre complètement impossible la circulation des véhicules en raison d'un effondrement structurel.

- Ravinement – C’est une érosion longitudinale ou transversale de la chaussée induite par un écoulement d’eau la traversant ou par le ruissellement de la pluie. L’intensité de cette érosion dépend forcément de la quantité et de la vitesse de l’eau mise en jeu. L’érosion transversale est souvent causée par l'absence de tuyau de drainage, tandis que l’érosion longitudinale est davantage liée à un mauvais compactage.
- Érosion de remblai et déblai – Cela se produit lorsque l'eau de pluie forme un chemin préférentiel sur le talus de déblai (ou remblai). Sans protection de surface adéquate, le sol commence à être transporté. L’évolution du ruissellement forment des rigoles et, par conséquent, les risques d'effondrement sont aggravés. Les principales causes de cette dégradation sont le drainage inefficace ou la protection des végétaux et de géomembranes.
- Érosion d’un cours d’eau – Ce type correspond à l'érosion des berges. Il peut suivre la direction de la route ou la traverser à un moment donné, parfois en présence d'un pont ou d'un ponceau. L'érosion des berges se produit généralement en raison d'une augmentation inattendue du débit de la rivière combinée à une fragilité du remblai de la route.



Figure 2.17 – Exemples de dégradations de chaussées (Hassan, 2015; LCPC, 1998; MTQ, 2002)

2.3 Stabilisation des sols

Les sols dans leur état le plus pur et le plus naturel ont souvent des propriétés physiques inappropriées à une utilisation dans des projets de construction (Kézdi & Rétháti, 1988). Pour cette raison, la stabilisation apparaît comme une solution essentielle pour améliorer leurs caractéristiques et réduire la vulnérabilité aux intempéries (O'Flaherty, 2002). Présentant différentes méthodes de natures les plus variées (physiques, chimiques ou biologiques), la stabilisation peut être appliquée dans différents chantiers géotechniques et le choix de la méthode dépend des besoins de l'ouvrage et de la fonction que jouera le sol amélioré (Khanna & Justo, 2011). Dans le domaine routier, de nombreuses recherches ont été menées dans le but de trouver de nouvelles méthodes capables d'augmenter la durée de vie et la performance des ouvrages. Une route en bon état et plus durable garantit non seulement la meilleure circulation des personnes, mais aussi de leurs marchandises, ce qui se traduit par une économie forte, un tourisme facilité et un bien-être pour la population (Rodrigue et al., 2017).

2.3.1 Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est une méthode d'amélioration des propriétés d'un sol qui modifie la disposition de ses particules et sa granulométrie. Cette approche implique une densification par mélange de particules suivie de l'application d'énergie mécanique par différentes méthodes de compactage (Little, 1995). Par exemple, la stabilité d'un sol à grains fins peut être considérablement améliorée en mélangeant une portion appropriée de matériaux granulaires pour obtenir une granulométrie bien étalée. Après cette étape, il est recommandé d'utiliser des machines telles que les rouleaux, les marteaux, les vibreurs et, occasionnellement, le dynamitage, en visant une expulsion d'air et, par conséquent, la réduction du volume des vides (Khanna & Justo, 2011).

Le résultat de l'amélioration est un sol avec une capacité portante et une cohésion élevée, réduisant le risque de déformation et de tassements. De plus, la réduction des vides entraîne une diminution de la perméabilité, un point très négatif pour le fonctionnement des routes (O'Flaherty, 2002). Un autre problème de cette méthode est lié au pourcentage de sol à ajouter, puisqu'un excès de particules fines ou grossières suffit à désorganiser la structure (Figure 2.18). Afin d'éviter ces problèmes, certains auteurs recommandent l'utilisation de chlorures (CaCl_2 et NaCl) dans ce procédé (O'Flaherty, 2002; Yoder & Witczak, 1991). La capacité lubrifiante et hygroscopique de

ces produits entraîne dans un meilleur compactage (densité sèche élevée) et une plus grande rétention d'humidité (réduction de l'émission de poussières). De plus, dans les régions au climat tempéré, les chlorures présents dans la chaussée réduisent l'impact de la pénétration du froid et, par conséquent, la formation de lentilles de glace à l'intérieur du sol.

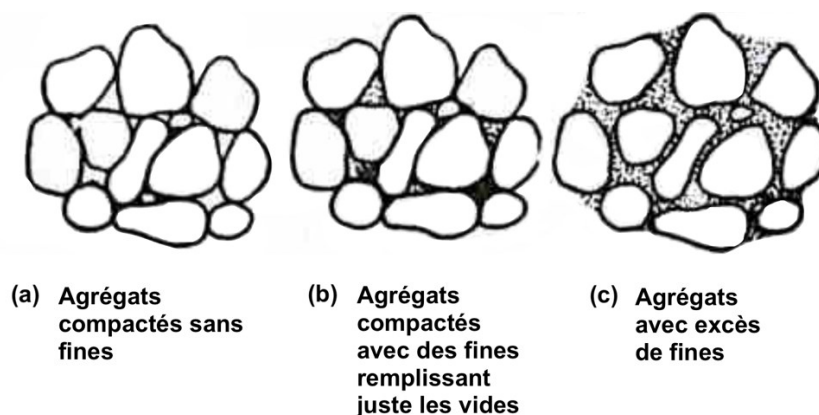


Figure 2.18 – États typiques des agrégats avant stabilisation mécanique (Khanna & Justo, 2011)

Appelée stabilisation granulaire ou stabilisation sol-granulats, cette technique a un meilleur comportement lorsqu'elle est utilisée dans la préparation des fondations routières et, aussi, dans l'amélioration des routes non revêtues où le trafic et l'impact des précipitations sont minimales. Parmi les principales méthodes de stabilisation des sols, la stabilisation mécanique est la plus pratique et la plus économique. Selon Das (2010), lorsque la densification et le compactage ne sont pas réalisables ou ne présentent pas un résultat satisfaisant, la stabilisation chimique est recommandée.

2.3.2 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique est une méthode capable de modifier les propriétés d'un sol naturel par ajout d'un ou plusieurs produits chimiques. Aussi appelés liants, ils assurent la formation de réactions physico-chimiques entre les particules du sol et l'eau, en créant un nouveau matériau, avec une structure et un comportement mécanique très différents de l'original (Winterkorn & Pamukcu, 1991). Les résultats obtenus par ce procédé dépendent principalement des réactions entre le stabilisant et les minéraux présents dans le sol. Parmi ces résultats, les principaux sont les réactions de cimentation et d'échange d'ions, l'amélioration des propriétés de surface du sol, le colmatage des vides et l'enrobage des particules du sol (Sherwood, 1993).

Considérée comme la technique d'amélioration des sols la plus ancienne et la plus connue, la stabilisation chimique est connue depuis l'histoire romaine. La route la plus célèbre de la Rome antique, la *Via Appia*, dont la construction a commencé en 312 av. J.-C. et qui est toujours fonctionnelle aujourd'hui, a été construite à partir d'un mélange sol-chaux. Elle est considérée comme la première route chimiquement stabilisée (Nicholson, 2014). Aujourd'hui, la stabilisation chimique est souvent utilisée en génie civil, présentant des incréments dans plusieurs propriétés intrinsèques du sol, telles que la plasticité, la compressibilité, la perméabilité et, principalement, la résistance. Les stabilisants utilisés peuvent être du bitume, du ciment portland, de la chaux, des cendres volantes, des produits industrialisés ou encore des déchets industriels (Sherwood, 1993; Winterkorn & Pamukcu, 1991). Les 3 types de stabilisation les plus utilisés actuellement sont détaillés dans les prochaines sections.

2.3.2.1 Stabilisation au ciment

La stabilisation du sol avec du ciment fait référence au mélange du sol, du ciment portland et de l'eau, suivi du compactage et du durcissement. Bien qu'il soit nécessaire de mélanger le ciment avec le sol, la réaction de stabilisation ne dépend que de la présence d'eau. Pour cette raison, le ciment est appelé liant hydraulique. Les principaux produits de la réaction d'hydratation du ciment sont des silicates de calcium hydratés, l'alite (C3S) et la bélite (C2S). Le premier est responsable du gain de résistance initial et le second de la résistance à long terme (Khanna & Justo, 2011; Yoder & Witczak, 1991).

L'utilisation du ciment dans le sol dépend beaucoup des objectifs et des besoins de stabilisation, variant selon la granulométrie et la quantité de ciment ajouté. Dans les sols granulaires, l'ajout de ciment crée des liaisons aux contacts intergranulaires, augmentant la force de cohésion ; dans les sols fins, la floculation se produit autour du grain de ciment, liant le sol par cimentation. En termes de quantité, ils sont définis comme (Khanna & Justo, 2011; O'Flaherty, 2002; Sherwood, 1993) :

- Sol modifié au ciment - mélange à faible teneur en ciment destiné à corriger des propriétés telles que la gonflabilité, la plasticité ou la capacité portante.
- Sol au ciment traditionnel - mélange à teneur homogène cherchant une augmentation de la durabilité et de la résistance à la compression simple. Après 28 jours de cure, il présente des résistances supérieures à 4 MPa.

Ces deux techniques sont fréquemment utilisées dans la stabilisation des fondations et sous-fondations routières. Cependant, comme le matériau a une faible résistance aux chocs et à l'abrasion, il n'est pas recommandé d'utiliser cette méthode pour les couches de surface. D'autres inconvénients sont également observés dans cette technique, tels que l'influence de la température ambiante, de la taille maximale des particules (2.0 mm), de la surface spécifique du sol. Il faut aussi considérer le coût élevé par kilomètre, le temps de cure lent et les émissions importantes de GES (O'Flaherty, 2002; Sherwood, 1993; Winterkorn & Pamukcu, 1991; Yoder & Witczak, 1991).



Figure 2.19 – Stabilisation du sol avec ciment pour la construction de chaussées (Mir, 2018)

2.3.2.2 Stabilisation à la chaux hydratée

La chaux est un liant obtenu à partir de la calcination de roches constituées majoritairement de carbonate de calcium (CaCO_3). Il existe des traces de son utilisation comme stabilisateur de sol datant de plus de deux mille ans, à l'époque de l'Empire romain, mais ce n'est qu'à partir du XXe siècle que son utilisation a commencé à se répandre et elle s'est consolidée après la Seconde Guerre mondiale. La stabilisation sol-chaux consiste à mélanger terre, chaux et eau dans des proportions déterminées par des essais en laboratoire. Cette stabilisation est recommandée pour améliorer les propriétés des sols argileux ou très silteux, qui ont une plasticité et une expansion élevées, en plus d'une faible capacité portante (Little, 1995; Rogers & Glendinning, 1996).

Le processus de calcination, application d'une température supérieure à 900°C au calcaire, génère de la chaux vive (CaO). Le mélange contrôlé d'eau et de chaux vive donne le produit le plus utilisé dans les travaux de stabilisation des sols : la chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). L'ajout de ce liant hydraulique au sol déclenche une série de réactions. La première, et la plus rapide (quelques

minutes), est l'échange de cations minéraux argileux faibles avec les cations de calcium (Ca^{2+}) forts apportés par la chaux hydratée. Ces modifications de la surface du minéral argileux induisent la formation de floculation, où les particules fines argileuses s'agglomèrent en éléments plus grossiers, entraînant un changement de texture, une réduction de la variation de volume et une augmentation de la limite de plasticité du sol (Khanna & Justo, 2011; Little, 1995; O'Flaherty, 2002). De plus, l'état du sol montre d'autres modifications à long terme (mois ou années) après la première addition de chaux. La réaction de cimentation (ou pouzzolanique) est un processus résultant de la formation d'un gel de silicate de calcium et d'aluminates de calcium entre les particules de sol. Ceux-ci sont capables d'améliorer la capacité portante et la résistance mécanique du sol mais nécessitent un pH élevé et dépendent de la réactivité du sol (Little, 1995).

En ce qui concerne les points négatifs de la technique, la chaux reste un matériau non écologique en raison des importantes émissions de dioxyde de carbone induites lors de sa production dans les usines. En plus de ce fait, la chaux hydratée peut créer des problèmes de poussières et ne doit pas être utilisée dans les zones urbaines, en particulier dans des conditions venteuses. Comme la chaux est un irritant chimique pour la peau et les yeux, il faut faire très attention à sa manipulation et à la façon dont elle sera déposée dans le sol. Ainsi, pour des raisons de sécurité, les travailleurs doivent porter des vêtements de protection et des masques lors de l'épandage et du mélange (Birchal et al, 2000; O'Flaherty, 2002).



Figure 2.20 – Stabilisation du sol avec chaux pour la construction de routes (Hyslip & McCarthy, 2000)

2.3.2.3 Stabilisation avec bitume

Les principes de base de cette méthode sont l'amélioration des propriétés du sol à partir de l'ajout des liants bitumineux. Les agents stabilisants peuvent se présenter sous la forme de ciment bitumineux, d'asphalte fluidifié ou d'émulsions d'asphalte. Leur utilisation comme matériau stabilisant dépendent généralement de l'objectif de la construction, des conditions météorologiques et, principalement, du type de sol à stabiliser (Yoder & Witczak, 1991).

Deux concepts principaux sont utilisés en fonction des finalités d'utilisation. La première consiste à diminuer le taux d'absorption d'eau ou l'imperméabilisation. Selon Yoder and Witczak (1991), avec un ajout de 10% de liants bitumineux, il est possible de réduire de 7 fois l'absorption d'eau. L'autre concept est associé à la cimentation et à la résistance du sol. Les résultats de cette technique conduisent à une augmentation de la résistance de plus de 1,5 MPa, soit environ 4 fois celle d'un sol naturel. Il s'agit d'un excellent résultat, mais il est souvent peu économique par rapport au ciment et à la chaux, avec lesquels il est possible d'atteindre ces valeurs pour des coûts bien inférieurs (Mojtaba et al., 2013).

Si nous évaluons la technique de stabilisation en termes de type de sol, de grandes différences peuvent être observées entre les sols granulaires et fins. La stabilisation des sols granuleux repose sur le phénomène d'imperméabilisation et d'adhérence. L'adhérence est le résultat de la pénétration du bitume dans les vides du sol, qui agit comme liaison rigide entre les particules. En créant une membrane sur les grains, le bitume garantit non seulement l'imperméabilisation mais également une cohésion élevée et, par conséquent, une augmentation de la résistance de ce type de sol (O'Flaherty, 2002; Winterkorn & Pamukcu, 1991).

Dans le cas d'un sol déjà cohésif, le matériau bitumineux est mélangé pour imperméabiliser le sol et maintenir la résistance existante. L'objectif est d'empêcher l'infiltration d'eau en ajoutant suffisamment de matériau bitumineux pour (a) envelopper les particules de sol avec de fines membranes bitumineuses et (b) boucher les « canaux » vides du sol (O'Flaherty, 2002; Winterkorn & Pamukcu, 1991).

En ce qui concerne les conditions climatiques, la stabilisation bitumineuse est plus appropriée dans les zones à climat chaud. Dans les régions froides ou avec des précipitations régulières, dans la plupart des cas, il est bon d'éviter cette technique (sensibilité élevée aux basses températures). Lorsque cela n'est pas possible, du liquide supplémentaire est ajouté au sol au moment de la

construction pour assurer un mélange et un compactage appropriés (O'Flaherty, 2002; Sherwood, 1993).

Comme détaillé ci-dessus, la stabilisation des sols au bitume, malgré ses bonnes propriétés, présente de nombreux inconvénients dont il faut tenir compte lors des travaux. Certaines de ces limitations sont résumées ci-dessous (O'Flaherty, 2002; Saleh, 2007; Winterkorn & Pamukcu, 1991) :

- Diminution de la résistance au cisaillement initial : l'utilisation dans des sols fortement saturés entraîne une diminution de la résistance initiale. Cependant, dans une région très pluvieuse, la résistance optimale ne sera jamais atteinte (Saleh, 2007);
- Impact environnemental : en raison de sa base pétrolière, le bitume n'est pas considéré comme une méthode de stabilisation écologiquement correcte;
- Risques de brûlure : tout comme la chaux hydratée présente un risque pour la peau, le bitume présente un risque de brûlures pour les manipulateurs. Pour fonctionner efficacement comme additif de stabilisation d'un sol, il doit être à au moins 180 °C;
- Coût : le coût d'utilisation du bitume est relativement élevé par rapport au coût d'utilisation d'autres additifs courants de stabilisation comme le ciment et la chaux, environ 20% de plus;
- Types de sols et conditions climatiques particulières : le bitume ne doit être présent que dans des sols stables. Il est considéré comme efficace seulement sur les sols limoneux ou sableux et dans les climats secs avec des températures chaudes.

Les méthodes de stabilisation des sols sont donc nombreuses et présentent plusieurs possibilités pour améliorer les performances mécaniques et prolonger la durée de vie utile des routes. Malgré cela, la nécessité d'avoir un plus grand respect de l'environnement a fait que de nombreuses méthodes ont cessé d'être utilisées. De plus, de nombreuses études alternatives et innovantes ont émergé au fil des années, délivrant des stabilisateurs plus durables, économiques et moins impactant. L'une de ces techniques est la calcification biologique, un procédé en voie de développement capable d'induire la précipitation de calcite par voie microbiologique

2.3.3 Stabilisation par calcification biologique

La calcification biologique, également appelée biocalcification, est l'induction biologique d'un processus naturel de précipitation du carbonate de calcium. La tendance actuelle, à utiliser des matériaux plus durables, a stimulé la communauté scientifique à développer des techniques d'amélioration des sols plus écologiques et avec une meilleure interaction à l'environnement (DeJong et al., 2010). Ainsi, au début des années 2000, des équipes de microbiologistes ont présenté au monde le MICP (*Microbial Induced Carbonate Precipitation*), une technique résultant des réactions physicochimiques induites par des bactéries capables de produire une calcite naturelle (Mitchell & Santamarina, 2005; Whiffin, 2004).

Cette procédure est basée sur la production naturelle de biominéraux trouvés dans la nature sous diverses formes : coraux, dent, rocs, entre autres. Des exemples de telles occurrences naturelles peuvent être trouvés dans le Pinacles et le lac Thétis en Australie (Figure 2.21). Selon, Haouzi (2019), ils constituent le résultat extracellulaire de l'activité métabolique des microorganismes dans des conditions et un environnement propices.



Figure 2.21 – Précipitation de CaCO_3 grâce à l'environnement chimique propice (Pickrell, 2013; Thomas, 1999)

Les biominéraux naturels ont suscité l'intérêt des chercheurs en raison de leur potentiel de reproduction dans le domaine de l'ingénierie. Au cours des 20 dernières années, diverses

possibilités de précipitation induite de CaCO_3 ont été développées dans plusieurs domaines. Parmi les principales figurent la restauration des pierres calcaires, le stockage de CO_2 , le traitement des eaux usées, la bioremédiation, le renforcement du béton ou le colmatage de fissures (Castanier et al., 2000; Ferris et al., 2000; Fujita et al., 2000; Hammes, 2003; Ramachandran et al., 2001; Stocks-Fischer et al., 1999)

Dans le domaine de la géotechnique, la biocalcification est considérée comme un processus de stabilisation biologique ayant pour objectif la densification du sol par la précipitation de minéraux induits contrôlés par l'activité bactérienne. Elle constitue ainsi une solution alternative employée pour diverses applications telles que la prévention contre la liquéfaction, le contrôle de l'érosion interne et externe, et l'atténuation des poussières (Suer et al., 2009).

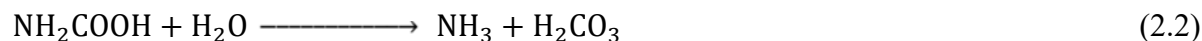
2.3.3.1 Précipitation du CaCO_3 par calcification biologique

La réaction de précipitation est l'un des types de réaction les plus courants survenant en solution aqueuse. Celle-ci est caractérisée par la formation d'un produit insoluble, c'est-à-dire un solide qui se sépare de la solution et est incapable de se mélanger à nouveau avec elle. La précipitation du carbonate de calcium peut être induite par plusieurs processus : hydrolyse de l'urée (Benini et al., 1999; Ciurli et al., 1999); dénitrification (Van Paassen et al., 2010); réduction de sulfates, induisant la précipitation de dolomite (Warthmann et al., 2000); réduction du fer, induisant la précipitation de l'anquerite et d'autres minéraux (Roden & Urrutia, 2002; Weaver et al., 2011).

L'hydrolyse enzymatique de l'urée est le procédé de précipitation de CaCO_3 le plus économe en énergie parmi ceux mentionnés précédemment (DeJong et al., 2010). En premier lieu, elle consiste à injecter dans un milieu riche en urée, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, des bactéries capables de les hydrolyser par leur activité enzymatique, donnant une molécule d'ammoniac et un acide carbamique (équation 2.1).



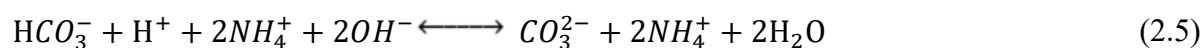
Ce dernier se décompose spontanément en une mole supplémentaire d'ammoniac et une mole d'acide carbonique (équation 2.2).



L'acide carbonique s'équilibre dans l'eau, donnant naissance au bicarbonate et à l'ion hydrogène (équation 2.3), ainsi que les deux molécules d'ammoniac qui forment 2 moles d'ammonium et deux ions hydroxyde (équation 2.4).



Une augmentation du pH est favorisée suite à la libération des ions hydroxydes (OH^-). Le pH élevé entraîne une sursaturation permettant la formation d'ions carbonates (équation 2.5).



En présence d'ions calcium (à partir de chlorure de calcium, par exemple), la production de carbonate de calcium commence spontanément par combinaison avec les ions carbonates (Burbank et al., 2013; Chou et al., 2011) par l'équation (2.6).



2.3.3.2 Critères influençant la biocalcification

Sans une attention particulière à certains paramètres importants, les performances de la biocalcification peuvent varier considérablement. Ces dernières dépendent notamment de la morphologie des cristaux (type, forme et taille), de l'état de sursaturation et du type de carbonates de calcium (calcite, vaterite ou aragonite) (Al-Thawadi, 2013; Dhami et al., 2013). Pour que le traitement soit optimum, il est nécessaire que certains critères soient remplis:

a) Choix de la bactérie

La production de CaCO_3 est possible avec plusieurs souches de bactéries. Barabesi et al. (2007), par exemple, ont montré que la précipitation de calcite peut être induite par la bactérie *Bacillus subtilis*. Mais selon V. S. Whiffin (2004), la *Sporosarcina pasteurii* est la bactérie la plus productive dans un milieu ammoniacal et qui ne présente aucun risque pour l'être humain. Elles peuvent produire de plus grands cristaux lors de l'étape de nucléation, par opposition à d'autres bactéries rencontrées dans les eaux souterraines comme le *Bacillus subtilis* (Mitchell & Ferris, 2006).

b) Degré de saturation

Les conditions non saturées représentent un milieu plus favorable que les conditions saturées. Cheng et al. (2013) ont étudié l'efficacité du traitement MICP à différents degrés de saturation, de 20, 40, 60 et 100%. L'étude a révélé qu'à un faible degré de saturation, les cristaux sont formés autour des particules de sol. À l'inverse, à un degré de saturation de 100%, les cristaux peuvent se former à des endroits inutiles, sans créer de liaisons fortes, réduisant ainsi l'efficacité du traitement. Le résultat de Cheng et al. (2013) est que le MICP fonctionne mieux à un degré de saturation de moins de 20% avec des meilleures valeurs de résistance à la compression simple par rapport à une saturation complète.

c) Température

La température a un effet direct sur l'activité enzymatique de la bactérie, la croissance et le taux de nucléation des cristaux de CaCO_3 , ainsi que sur leur solubilité. En effet, Nemati et Voordouw (2003) ont démontré qu'un passage d'une température de 20°C à une température de 50°C permet d'améliorer la production du CaCO_3 à partir de la réaction enzymatique, ce qui affecte la taille et la forme des cristaux créés. Des études menées par Cheng et al. (2014) montrent qu'à une température élevée (50°C), les cristaux de CaCO_3 formés sont faibles et recouvrent entièrement les surfaces des grains de sable, ce qui affecterait la résistance du sable traité par MICP à haute température (60% plus petite que celle des échantillons traités à 24°C).

d) pH élevé

Le principe de la biocalcification réside essentiellement dans l'augmentation locale du pH en utilisant les bactéries comme catalyseur. Cette variation est due à la formation des ions hydroxydes (OH^-) générés par la production des ions d'ammonium (NH_4^+), permet de créer un environnement alcalin approprié pour la précipitation de CaCO_3 (DeJong et al., 2010). La présence des ions OH^- augmente le pH autour des cellules. Stocks-Fischer et al. (1999) ont confirmé que le MICP produisait de bons résultats en milieu alcalin, entre 8 et 9,2.

e) Solution de cimentation

La qualité de la solution de cimentation est un autre point qui altère l'efficacité de la formation de cristaux de CaCO_3 . Okkwadha et Li (2010) ont identifié qu'une solution de cimentation très

concentrée produisait des cristaux rapidement. Cette vitesse de réaction entraîne une distribution désorganisée, limitée aux vides du sol. Qabany et Soga (2013) ont conclu à un résultat similaire, après l'analyse de différentes concentrations (0,1, 0,25, 0,5 et 1 M) dans un sable traité. L'échantillon avec une concentration plus faible de solution de cimentation produisait une distribution plus homogène de cristaux et présentait par conséquent une résistance très élevée.

Il convient également de noter que malgré une résistance plus élevée, l'obtention d'une même quantité de précipités avec de faibles concentrations nécessite un nombre infiniment plus élevé d'injections dans le sol.

2.3.3.3 Avantages de la biocalcification

L'amélioration des propriétés géotechniques des sols à partir de la biocalcification est le principal avantage recherché par ces études. L'amélioration de la qualité d'un sol à partir de cette technique peut varier considérablement et, en général, les principaux paramètres affectés par ce processus de stabilisation sont les suivants: perméabilité, rigidité, compressibilité, résistance au cisaillement et comportement volumétrique.

2.3.3.3.1 Rigidité

Chou et al. (2011) ont effectué des essais CBR (*California Bearing Ratio*) sur des échantillons de sable traités par biocalcification et ont trouvé que les propriétés géomécaniques ont été améliorées. Le ratio CBR a effectivement augmenté suite à l'injection de bactéries *Sporosarcina pasteurii* en croissance. En particulier, le processus de biocalcification a augmenté le CBR du sable dense jusqu'à 6,8 fois, comparativement à 2 fois pour un sable lâche.

2.3.3.3.2 Résistance à la compression simple

L'essai de compression simple (UCS) est le plus couramment utilisé parce qu'il permet de tester un grand nombre d'échantillons en peu de temps (Qabany & Soga, 2013). V. S. Whiffin (2004) a présenté un résumé de plusieurs valeurs obtenues par d'autres auteurs avec le test de résistance à la compression simple. Elle a observé que les valeurs varient considérablement en fonction du type de méthode de traitement MICP, entre 150 kPa et 34 MPa.

Une série d'essais exécutés par Van Paassen et al. (2010) a permis la reproduction d'une courbe exponentielle qui est la relation entre la teneur en CaCO_3 et les valeurs de résistance à la

compression simple des sols biocalcifiés. Dans ce cas, l'équipe a obtenu des résultats compris entre 1 MPa et 13 MPa.

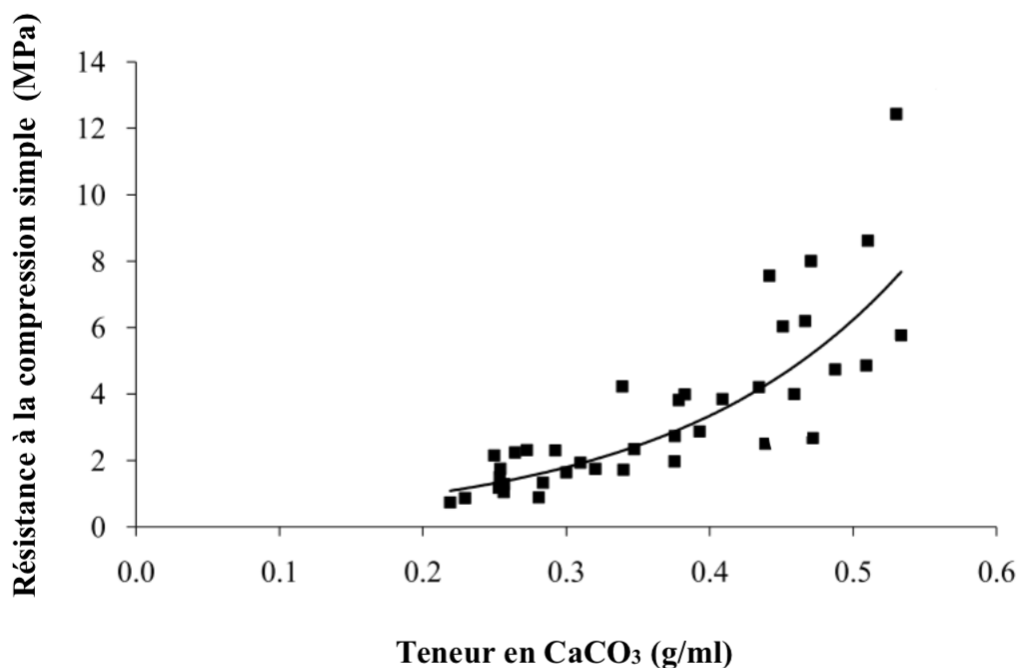


Figure 2.22 – Corrélations entre la teneur en CaCO_3 et UCS (Van Paassen et al., 2010)

2.3.3.3.3 Porosité

Selon V. Whiffin et al. (2007), la biocalcification influence les vides à l'intérieur de la structure du sol en réduisant leur volume, ce qui a pour conséquence de limiter le passage de l'eau. Pour réaliser l'évaluation de la porosité, les auteurs ont décidé de simuler les mêmes conditions de terrain en utilisant une colonne de sol de 5 mètres. La Figure 2.23 montre le résultat de cette expérience en fonction de la teneur en carbonate de calcium, de la diminution de la porosité et de la distance du point d'injection. L'utilisation de l'essai triaxial pour évaluer les colonnes de sable traité a été l'étape suivante de cette procédure, la porosité, la résistance et la rigidité ont été significativement modifiées en fonction de l'augmentation teneur en calcite. En résumé, la diminution de la porosité du sol était d'environ 90 %. Dans les études réalisées par L. Van Paassen (2009), la porosité diminuait de 33% pour une quantité précipitée de calcite maximale lors de son essai pilote sur une colonne de 5 m.

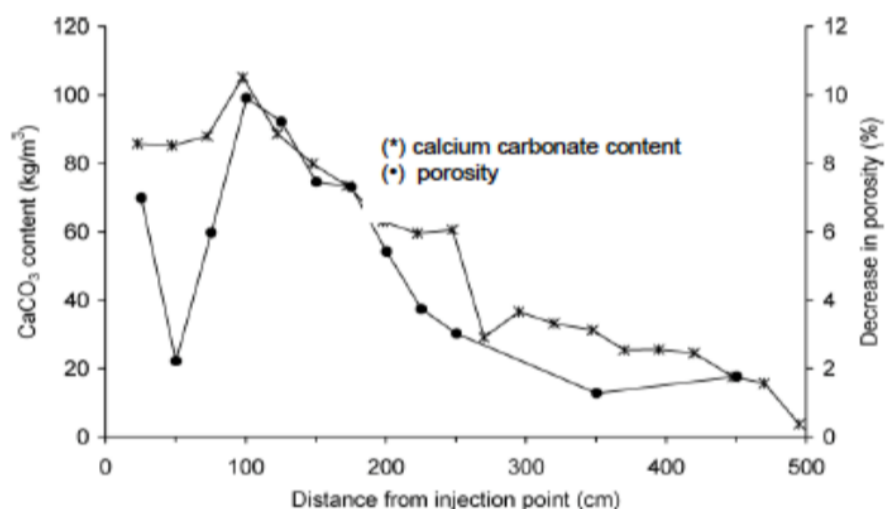


Figure 2.23 – Variation de la porosité en fonction de la teneur en calcite (V. Whiffin et al., 2007)

2.3.3.3.4 Résistance aux cycles gel-dégel

Cheng et al. (2013) ont effectué une comparaison entre les résistances à la compression simple d'échantillons traités par MICP et d'échantillons traités avec du ciment après l'application de cycles gel-dégel. Cette comparaison a montré que les échantillons traités par MICP ont subi une diminution de 10% de la résistance tandis que ceux traités avec du ciment ont subi une plus forte diminution, d'environ 40% de leur résistance (Figure 2.24).

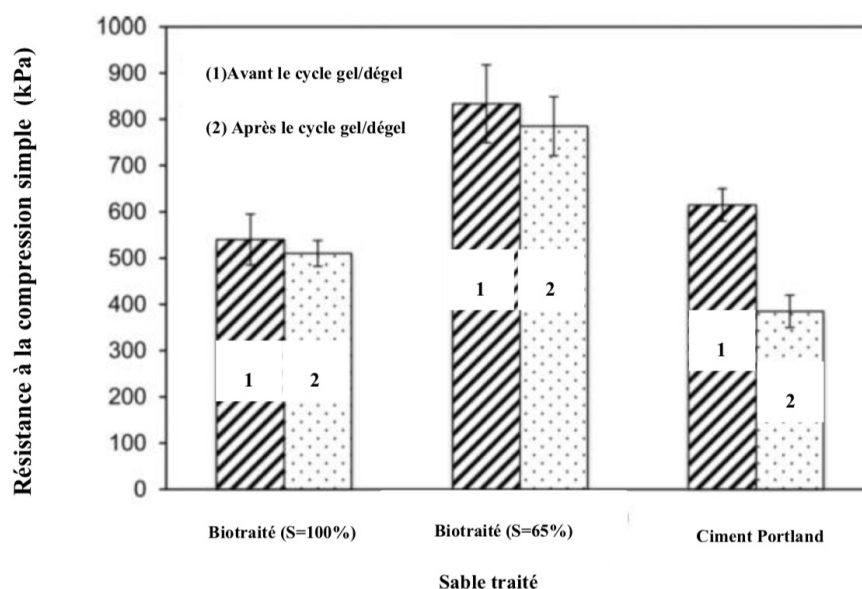


Figure 2.24 – UCS d'échantillons de sable fin traités par biocalcification et ciment avant et après 10 cycles de gel-dégel (Cheng et al., 2013)

2.3.3.3.5 Perméabilité

Considérant que la biocalcification effectue un remplissage dans les pores d'un échantillon de sol, Ferris et al. (1996) ont observé expérimentalement une réduction de l'ordre de 15 à 20% par rapport à la perméabilité initiale. Par ailleurs, V. Whiffin et al. (2007) ont observé, quant à eux, une réduction allant de 22 à 75% par rapport à la perméabilité initiale. Les résultats sont similaires aux réductions de porosité mentionnées dans l'article précédent.

Les Figure 2.25 a et b présentent les résultats de Cheng et al. (2013) sur la mesure de la perméabilité de sols sableux biocalcifiés. Quels que soient le type de sol et le degré de saturation, la teneur en CaCO_3 varie en fonction de la diminution de la perméabilité. On peut donc en conclure que le degré de saturation n'a pas d'influence sur la quantité de calcite dans le sol, bien que Cheng et al. (2013) recommandent l'utilisation de la teneur en eau la plus faible afin de bénéficier d'une localisation optimale des précipités pour le comportement mécanique.

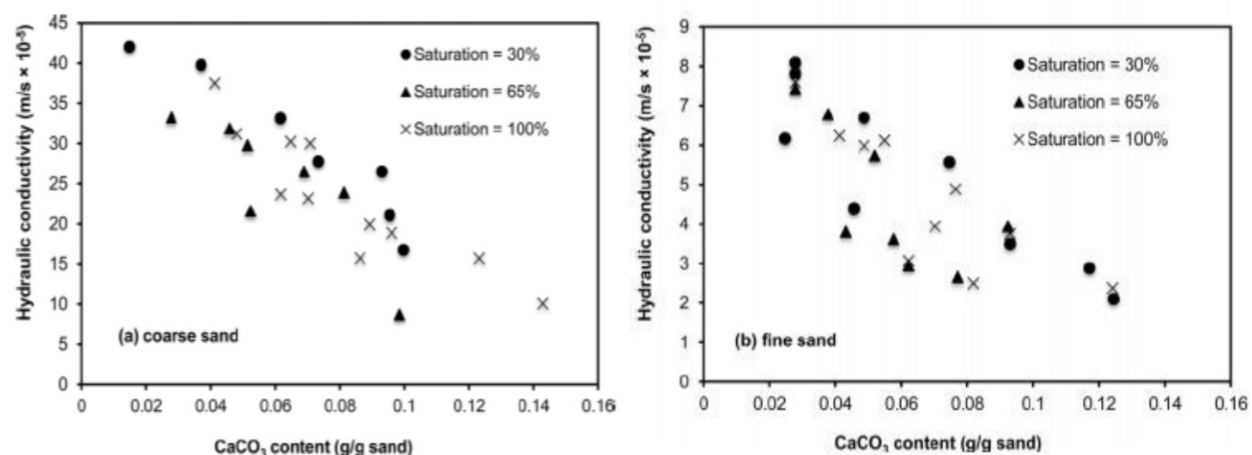


Figure 2.25 – Perméabilité mesurée sur des colonne de sable traitées par biocalcification à différents degrés de saturation pour (a) un sable grossier et (b) un sable fin (Cheng et al., 2013)

2.3.3.3.6 Érosion externe

En 2013, Geosyntec, une entreprise basée aux Etats-Unis, a effectué plusieurs essais sur un sol biocalcifié. Ces essais ont vérifié les points discutés ci-dessus et ont mis en valeur l'amélioration de la résistance contre l'érosion externe (Gomez et al., 2013). Le test d'érosion effectué n'était pas basé sur des normes précises et un jet d'eau de 22.7 litres/min était appliqué au sol à une distance de 107 cm au-dessus de la surface. Suite à l'évaluation de la quantité de sol perdu, ce test a montré

une augmentation de la résistance à l'érosion du sol avec l'augmentation de la concentration en CaCO_3 .

Amin et al. (2017) ont également effectué une série d'essais pour évaluer l'érosion externe après un traitement de biocalcification dans 8 échantillons. Différents niveaux de solution de cimentation, de durée du traitement et différentes étapes de drainage ont été utilisés. Les résultats ont montré une réduction considérable de l'érosion, principalement pour les échantillons ayant reçu une double injection de MICP (Tableau 2.4 et Figure 2.26).

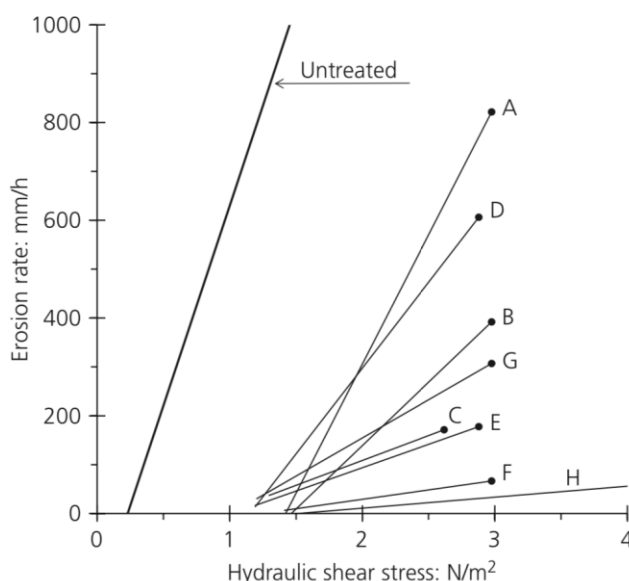


Figure 2.26 – Résultats de l'évaluation de l'érosion externe en fonction du Contrainte de cisaillement hydraulique (Amin et al., 2017)

Tableau 2.4 – Résultats de l'évaluation de l'érosion externe (Adaptée de Amin et al., 2017)

MICP Traitement	Contrainte de cisaillement critique N/m ²	Coefficient d'érodabilité (mm/h)/(N/m ²)	% Réduction de l'érodabilité	Drainage/ Aération	Nombre d'injections
Non-traité	0.23	818	0		
A	1.42	528	35	Unique / Oui	1 (0.5 M)
B	1.46	259	68	Unique / Oui	1 (0.5 M)
C	1.12	101	87.7	Unique / Oui	2 (0.5 M)
D	1.15	351	57	Unique / Oui	2 (0.5 M)
E	1.02	95	88.4	Unique / Oui	2 (0.75 M)
F	1.23	38	95	Double/ Oui	2 (0.5 M)
G	1.11	156	81	Double/ Oui	2 (0.5 M)
H	1.51	22	97	Double/ Oui	2 (0.5 M)

2.3.3.4 Facteurs limitants et défis du MICP

Malgré les nombreux points positifs de la technique, la complexité d'application limite fortement cette technique. Certaines des difficultés pratiques de son application sont énumérées ci-dessous :

- **Production d'ammoniac (NH_4^+)** – L'hydrolyse de l'urée génère 2 moles d'ammoniac par mole d'urée. Les concentrations élevées d'ammoniac sont nocives sur l'environnement et la santé humaine (Van Paassen et al., 2010; V. S. Whiffin, 2004). Au contact de cette substance, à fortes concentrations, l'humain peut avoir des brûlures aux yeux et aux poumons. Le processus de dénitrification (nécessitant l'ajout d'une source de carbone) ou le lessivage du sol peuvent aider à atténuer le problème (V. S. Whiffin, 2004). Dans le cas du lessivage, il est possible de récupérer cet ammoniac pour l'utiliser dans la production d'engrais et le traitement des eaux usées (DeJong et al., 2013; Herrero & Stuckey, 2015).
- **Compatibilité des sols** – La pénétration des bactéries, et par conséquent leur activité, est limitée dans les sols fins (L. Van Paassen, 2009). Les bactéries ont une taille de 0,5 à 5 μm et ne peuvent pas être transportées à l'intérieur des sols limoneux ou argileux (Mitchell & Santamarina, 2005).
- **Homogénéité du traitement** – C'est aujourd'hui le principal problème lié au processus de biocalcification. Avec la difficulté de pénétration à l'intérieur du sol, la réaction de cimentation peut se concentrer à proximité des points d'application et bloquer, dans de nombreux cas, le passage d'autres réactifs (Harkes et al., 2010).
- **Application sur le terrain** – La complexité de traiter des sols complètement différents, la possibilité d'impacts environnementaux et l'incertitude de l'homogénéité rendent difficile une application à grande échelle. De plus, le stockage, le transport des réactifs et des formes d'injection entraînent une augmentation du coût d'application sur plusieurs kilomètres de route (DeJong et al., 2013; Van Paassen et al., 2010).

En bref, la biocalcification présente de bons résultats au laboratoire, où les conditions sont très contrôlées, mais avec de grandes difficultés à la rendre industriellement favorable à une application dans les travaux d'entretien ou la construction de routes. Malgré cela, l'idée de précipiter des carbonates de calcium à l'intérieur des fondations routières est encore très envisageable, mais il est nécessaire de remplacer certains réactifs. La technique utilisée dans ce projet de recherche sera

présentée ci-après, en présentant les possibilités de la calcification chimique par rapport à la calcification biologique.

2.3.4 Stabilisation par calcification chimique

La stabilisation par calcification chimique est la précipitation induite de carbonates de calcium à partir de l'ajout d'un ou plusieurs réactifs dans un sol. Le carbonate de calcium précipité chimiquement, quant à lui, est un additif minéral résultant d'au moins 4 réactions, toutes facilement retrouvées dans la nature et reproduites de manière industrielle (Onimisi et al., 2018; Xiang et al., 2002). Également connu sous le nom de PCC, le carbonate de calcium précipité est un produit avec un indice de blancheur élevé, une grande pureté, une faible densité et se trouvant dans différentes tailles et morphologies. En raison du grand nombre d'avantages, le carbonate de calcium précipité est largement utilisé dans les domaines technologiques et médicaux, par exemple dans la production de plastiques, de peintures, de papiers, de caoutchoucs, d'aliments et de produits pharmaceutiques (Domingo et al., 2006; Onimisi et al., 2018; Song et al., 2009).

A partir des éléments facilement accessibles sur le marché canadien, la calcification chimique consiste à une alternative à la biocalcification, plus pratique, rapide et éventuellement économique. Très répandue dans la conception de produits industriels, le défi est de rendre la technique de stabilisation des sols industriellement viable, que ce soit d'un point de vue technique, économique et environnemental. Une fois la réaction produite dans le sol, elle est capable de former des ponts reliant les particules du sol, de la même manière que dans la biocalcification, permettant de créer une cohésion entre les grains et ainsi augmenter la résistance du sol traité.

2.3.4.1 Précipitation du CaCO_3 par calcification chimique

Le carbonate de calcium est devenu l'un des minéraux les plus consommés au monde. Il peut être utilisé aussi bien sous forme naturelle (CCN - carbonate de calcium naturel) que sous forme précipitée (CCP). Comparé à la forme naturelle, le CCP a de meilleures propriétés physiques, y compris une surface spécifique, une brillance, une opacité, une pureté et une absorption élevées (Chen & Nan, 2011; Hubbe & Gill, 2016). Sous sa forme naturelle, le CaCO_3 est souvent extrait de roches calcaires massives, de marbre ou de craie. Il est présent sous trois polymorphes : la calcite, l'aragonite ou la vaterite, la première étant la forme la plus stable (Xiang et al., 2002). Le

CCP peut même être trouvé dans la nature, mais en petites quantités. Sa principale production provient de procédés chimiques industriels (Onimisi et al., 2018).

De nombreux procédés chimiques capables de générer une précipitation de carbonate de calcium sont répertoriés dans la littérature. Dans les sous-chapitres suivants, seront décrites trois réactions avec des caractéristiques et des impacts uniques sur la précipitation de CaCO_3 .

2.3.4.1.1 Carbonatation

Selon Barhoum et al. (2015), la méthode de carbonatation, également connue sous le nom de la voie solide-liquide-gaz, est largement utilisée dans les industries en raison de sa procédure simple, de son faible coût, de son rendement plus élevé et de sa pureté supérieure. La procédure consiste en la purification de l'hydroxyde de calcium (ou chaux éteinte) suivie de l'application de bulles de dioxyde de carbone. Le gaz est généralement refroidi et lavé avant d'être comprimé et acheminé vers le réacteur de carbonatation.

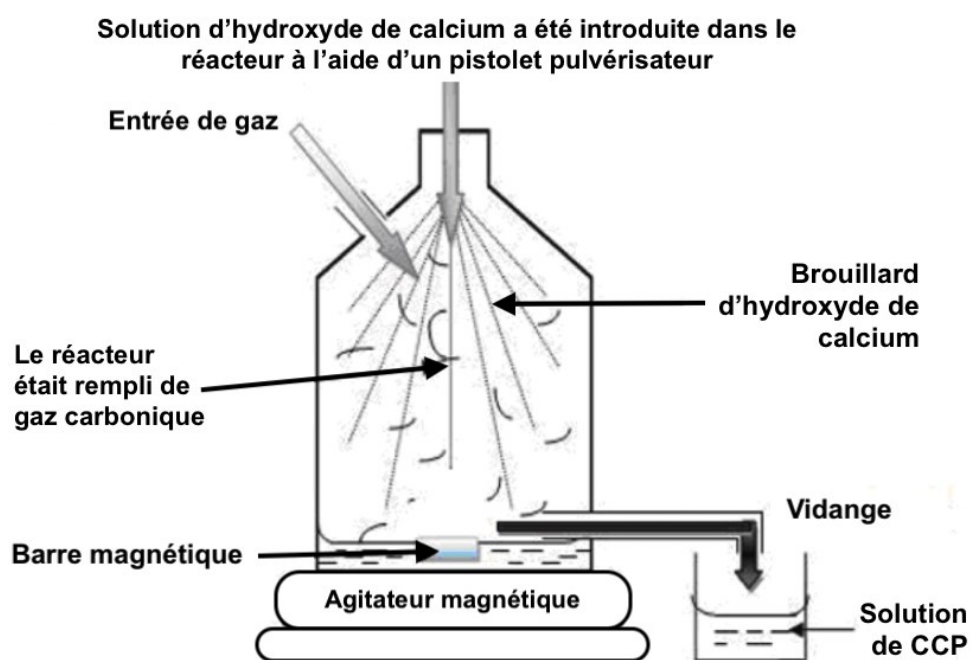
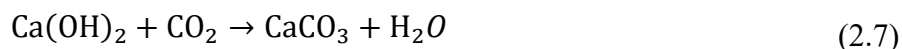


Figure 2.27 – Réacteur utilisé pour synthétiser les particules de PCC (Onimisi et al., 2016)

Ce procédé a l'avantage d'être écologiquement correct car il utilise le même CO_2 dégagé lors de la calcination du calcaire, évitant la contribution au GES (Barhoum et al., 2015). Les étapes associées au procédé de réaction de carbonatation sont exprimées ci-dessous (Onimisi et al., 2018) :

- a) Absorption du dioxyde de carbone : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
- b) Dissolution de l'hydroxyde de calcium : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca} + 2\text{OH}$
- c) Formation de l'ion hydrogénocarbonate : $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- d) Formation de l'ion carbonate : $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$
- e) Formation du carbonate de calcium : $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

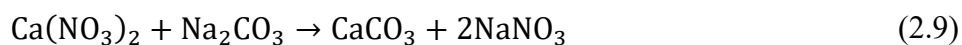
Il est important de noter que la carbonatation est un processus lent, principalement en raison de l'étape A, puisque la faible solubilité du CO_2 dans l'eau retarde le temps de réaction (Domingo et al., 2006). Dans tous les cas, la réaction chimique globale est donnée par :



La morphologie résultante la plus courante de ces réactions est la calcite rhomboédrique et, dans certains cas plus sporadiques, l'aragonite peut être synthétisée. Dans un contexte de calcification des sols, cette méthodologie est difficilement utilisable en raison du besoin d'équipements et de conditions très particulières.

2.3.4.1.2 Double décomposition

Selon Onimisi et al. (2018), la réaction de double décomposition, ou aussi appelée voie liquide-liquide, est l'une des méthodes de calcification chimique les plus utilisées, en raison de sa vitesse de réponse très rapide. Le carbonate de calcium précipité par cette méthode est produit par un mélange équimolaire, en solution, entre un sel de calcium et un carbonate (Figure 2.28). Lorsque les réactifs entrent en contact, la précipitation se produit en quelques secondes, presque instantanément. Une des conséquences de cette réaction est la diminution du pH après la diminution des espèces basiques dans la solution (carbonates). En raison de sa facilité de manipulation et du contrôle des variables opérationnelles, ce procédé est fréquemment utilisé dans la production en laboratoire. Dans ce processus, le carbonate de calcium peut être formé par les réactions suivantes.



La morphologie résultante la plus courante de ces réactions est la calcite rhomboédrique. Malgré la production de la forme la plus stable en termes de calcification du sol, le problème de cette réaction réside dans le maintien de l'homogénéité du mélange au regard de la possibilité d'obtenir des sursaturations élevées (Ibrahim et al., 2012).

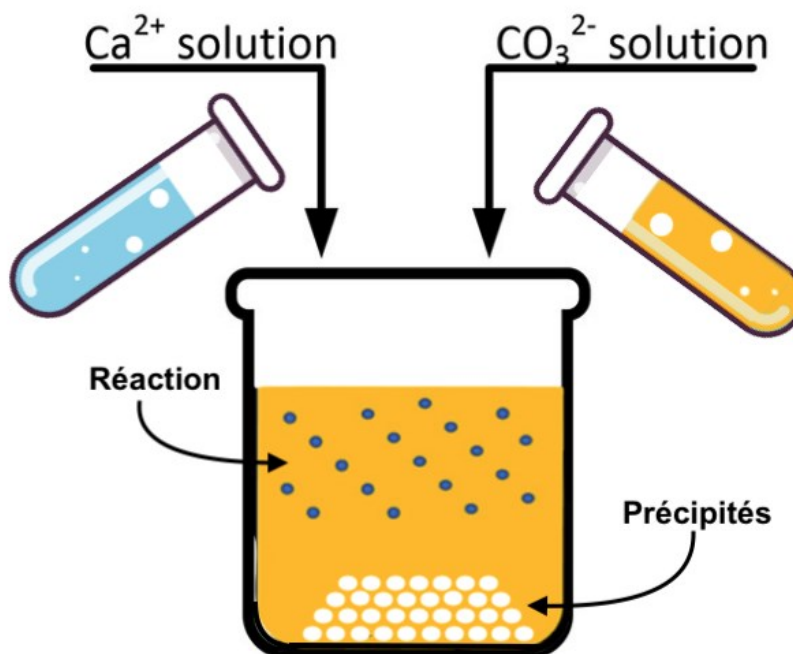
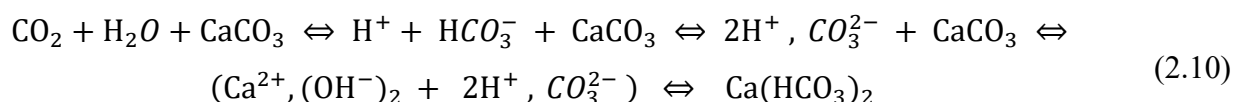


Figure 2.28 – Réaction de double décomposition (Adaptée de Liendo et al., 2022)

2.3.4.1.3 Équilibre calco-carbonique

Les réactions d'équilibre calco-carbonique se trouvent facilement dans la nature, principalement dans les roches calcaires des systèmes karstiques et dans les structures des grottes. Le minéral qui contrôle ce processus est l'hydrogénocarbonate de calcium, également connu sous le nom de bicarbonate de calcium, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. L'eau qui percole entre les fissures des massifs calcaires est saturée de gaz carbonique (CO_2) durant son déplacement. Ce mélange dissout les roches calcaires en décomposant le carbonate de calcium (CaCO_3). Par un équilibre chimique entre le dioxyde de carbone et l'eau, l'équilibre calco-carbonique est modifié et, par conséquent, la formation de bicarbonate de calcium a lieu (Hamrouni & Dhahbi, 2003; Worch, 2015). L'équilibre est représenté par l'équation suivante :



De la dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau, l'acide carbonique H_2CO_3 se forme. L'ion H^+ dissocié de l'acide amorce un processus d'agression du carbonate de calcium des roches calcaires. Le résultat de la corrosion est la formation d'une solution aqueuse (émulsion) d'ions calcium (Ca^{2+}), de bicarbonate (HCO_3^-) et d'ions carbonate (CO_3^{2-}). Cette étape de dissolution à partir d'eau riche en CO_2 correspond au mouvement de réaction vers la droite.

Cependant, cet équilibre peut ne pas durer longtemps. Une augmentation de la température et, par conséquent, un dégazage du dioxyde de carbone entraîne une augmentation du pH de la solution et une diminution du coefficient de dissolution du CO_2 . En raison de cette variation, la réaction commence un chemin de droite à gauche, c'est-à-dire la transformation du bicarbonate de calcium en carbonate de calcium. Le résultat du processus est que le carbonate de calcium est peu soluble dans l'eau, ce qui provoque une précipitation sous forme solide. Ce mouvement de réactions de dissolution-reprécipitation est fondamental dans la formation des stalactites, stalagmites et autres concrétions dans les grottes et aquifères karstiques (Hamrouni & Dhahbi, 2003; Verrecchia, 2002).

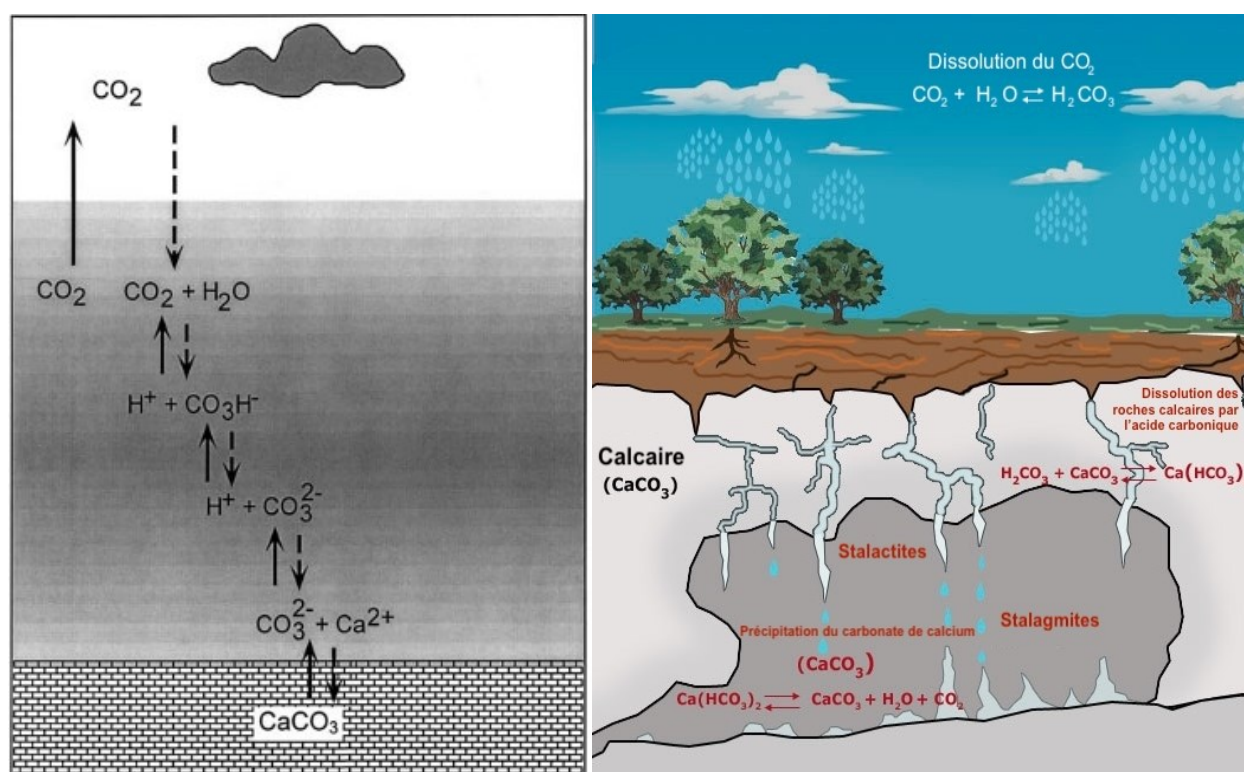


Figure 2.29 – Illustration de l'équilibre calco-carbonique (Adaptée de Verrecchia, 2002)

2.3.4.2 Critères influençant la calcification chimique

Comme pour la biocalcification, de nombreux facteurs peuvent affecter la qualité, la quantité, la taille et la morphologie des particules de carbonate de calcium précipité. Parmi les principaux facteurs susceptibles de faire varier les résultats de la précipitation figurent : la concentration des réactifs, la température, le pH, la vitesse d'agitation et la présence d'additifs (Feng et al., 2007; Han et al., 2006; MacAdam & Parsons, 2004; Yu et al., 2004; Zeller & Wray, 1956).

2.3.4.2.1 Effet de la température

La température est un effet important dans le processus de précipitation du carbonate de calcium, influençant principalement la taille et la morphologie des cristaux résultants. Ces résultats sont plus évidents, principalement dans les précipitations de double décomposition. Selon Feng et al. (2007), la variation de température a entraîné une diminution de la taille des particules, de 2,5 μm (25°C) à 1 μm (80°C). Yu, Lei, et al. (2004) ont obtenu des résultats similaires, à 25°C la taille variait entre 6-12 μm , tandis qu'à 80°C les particules étaient légèrement plus petites (4-10 μm).

La variation de température provoque également un changement de la morphologie des particules. D'après Feng et al. (2007), leurs expériences ont montré que des températures plus élevées augmentent la solubilité et, par conséquent, modifient la morphologie des calcites. Dans les études de Han et al. (2006), ils ont montré que des particules sphériques se formaient à 25°C tandis que des particules en forme d'aiguille se formaient à 60°C. Cela signifie que la température plus basse a produit un mélange de calcite avec un peu de vaterite tandis que la température plus élevée n'a produit que de l'aragonite. Ce fait a été également confirmé par Zeller and Wray (1956), à travers 3 groupes d'essais. Le premier groupe à 10°C ne présentait que de la calcite et de la vaterite dans tous les tests. Le deuxième groupe de précipités, formé à 23°C, ne présentait que de la calcite et aucune trace d'aragonite ou de vaterite n'a été trouvée. Par contre, l'aragonite et la calcite sont devenues les polymorphes majeurs à 52°C.

Dans un test réalisé pendant 120 minutes avec une plage de température comprise entre 15°C et 75°C, Chu et al. (2013) ont pu élaborer des courbes de comportement des polymorphes en fonction de la température (Figure 2.30). Les résultats étaient très proches de ceux trouvés dans les études précédentes. La vaterite était prédominante (teneur 90%) à 15°C. En revanche, la teneur en calcite

était la plus élevée à 45°C avec plus de 80%. Cependant, à 75°C, l'aragonite est la polymorphe prédominante avec près de 65%.

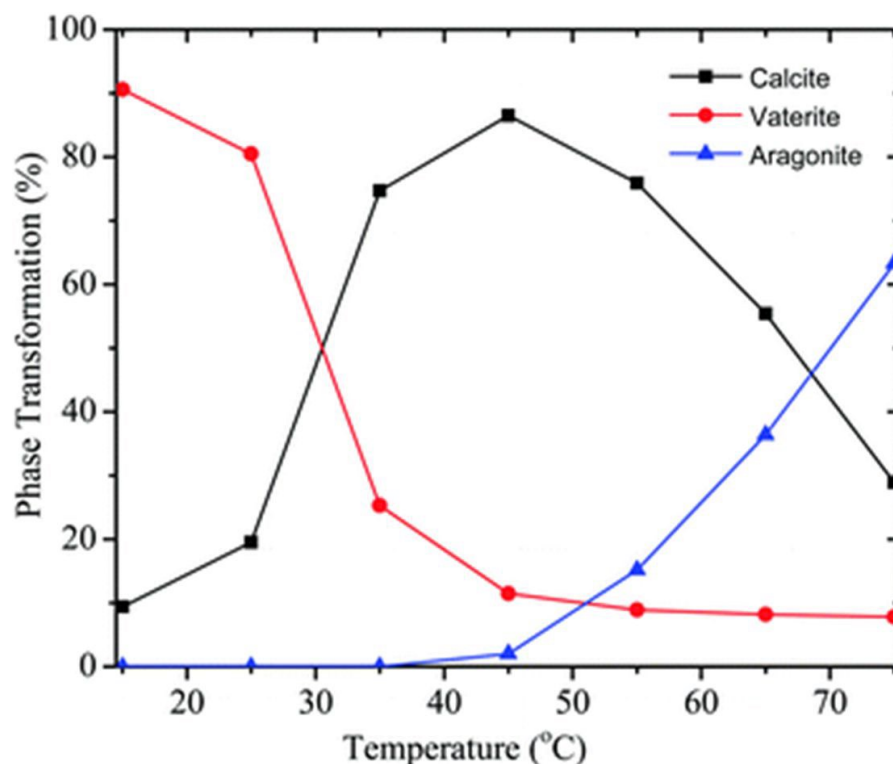


Figure 2.30 – Comportement des polymorphes en fonction de la température (Chu et al., 2013)

Les tests présentés permettent de comprendre l'influence de la température sur la transformation des polymorphes calcaires en un temps court. Cependant, d'autres études ont cherché à comprendre le comportement de ces minéraux dans des synthèses plus longues mais avec une température constante. Ganguli, Ahmad, Vaidya, and Ahmed (2008) ont effectué une expérience de 168 heures (7 jours) avec une température constante de 20°C. Ils ont pu observer la prédominance de la vaterite dans les 8 premières heures du test (87,7%) jusqu'à un peu plus de 50 heures (56,5%). Après 96 heures de test, la calcite atteint une prédominance de 74% et la transformation complète de la calcite se produit après 168 heures. Dans une autre analyse, une synthèse de 120 heures et une température constante de 40 degrés ont abouti à une concentration finale de 60% de calcite, alors que dans les 15 premières heures la prédominance était de 70% de vaterite (Chotoli et al., 2017). Dans l'analyse Rodriguez-Blanco, Shaw, and Benning (2011), les chercheurs ont utilisé une température constante de 7,5°C et ont obtenu la transformation complète de la vaterite en une calcite stable en environ 1 jour ou 24 heures.

2.3.4.2.2 *Concentration initiale des réactifs*

Les réactifs utilisés pour favoriser la réaction chimique jouent également un rôle fondamental dans la forme, la taille et la distribution des particules. L'utilisation de concentrations plus élevées pour les solutions de calcification se traduit par des particules et des granulométries plus petites avec des distributions bien définies (Feng et al., 2007; Wei et al., 1997). Cette concentration élevée de réactifs favorise l'amplification de la phase de nucléation, ce qui se traduit par une phase de croissance cristalline plus importante et, par conséquent, une taille de particules réduite. Les situations où les concentrations sont plus faibles induisent la synthèse des cristaux de CaCO_3 de plus grande taille et une distribution plus étalée.

La concentration a également un effet sur la morphologie des particules de CaCO_3 produites, comme on peut le voir dans l'étude de Han et al. (2006). Ils ont rapporté que lorsque la concentration initiale de réactif calcifiant a augmenté à 0,3 M, les particules sphériques ont disparu et seules des particules rhombiques sont restées, c'est-à-dire que de la calcite a été trouvée. À l'inverse, lorsque la concentration initiale était inférieure à 0,1 M, les échantillons contenaient un mélange de vaterite et de calcite. Dans la recherche de Kim et al. (2004), trois niveaux de concentration réactive ont été considérés (élevé, moyen et faible). Aux niveaux élevé et moyen de concentration de Ca^{2+} et CO_3^{2-} , de la calcite s'est formée majoritairement, mélangée à de la vaterite. Au niveau faible, l'aragonite prédominait avec une présence quasi inexistante de calcite et de vaterite.

2.3.4.2.3 *Effet du pH*

Le pH est un facteur clé dans la formation de carbonate de calcium précipité. Il est capable de rendre le milieu apte ou non à la précipitation, le pH élevé assure la formation instantanée de carbonate de calcium, tandis qu'avec la diminution du pH, le temps d'induction de la précipitation augmente considérablement (Yu, Lei, et al., 2004). De plus, un pH beaucoup plus bas (acide) affecte directement la force de la liaison calcium-carbonate (Ca-CO_3), inhibant dans certains cas la formation de carbonate de calcium en faveur de sa dissolution.

D'autres caractéristiques comme la morphologie et la taille des particules des précipités sont également influencés par le pH. Selon Feng et al. (2007), une valeur de pH plus élevée correspond à une taille de particules plus petite. Un pH plus élevé (≥ 12) induit une diminution de 2 à 3 fois de la taille des particules. Cela est peut-être dû à l'effet du pH sur le taux de nucléation du CaCO_3 . La

morphologie des particules est altérée lorsque le pH est supérieur à 12, où la calcite prédomine, mais lorsque le pH est inférieur à 10, l'aragonite presque pure se forme (Swinney et al., 1982; Tai & Chen, 1998). Dans des recherches récentes, de petites tiges d'aragonite mélangées à de la vaterite ont été trouvées dans une plage de pH de 1,5 à 6,9 (Zhou et al., 2009). En bref, un pH supérieur à 11 induit la production de calcite, tandis qu'un pH compris entre 9 et 11 favorise la production d'aragonite. Finalement, un pH inférieur à 8 favorise la production de vaterite (Han et al., 2006).

Zeller and Wray (1956) concluent cette discussion en montrant une étude de la formation d'aragonite en fonction du pH de la réaction. Les conditions de base étaient une température constante de 52°C et les mêmes réactifs : $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ et Na_2CO_3 . À cette température, la calcite prédomine (Figure 2.30) à pH neutre ou faiblement alcalin, mais une augmentation de pH à 10.3 donne un pourcentage d'aragonite supérieur 90 % (Figure 2.31).

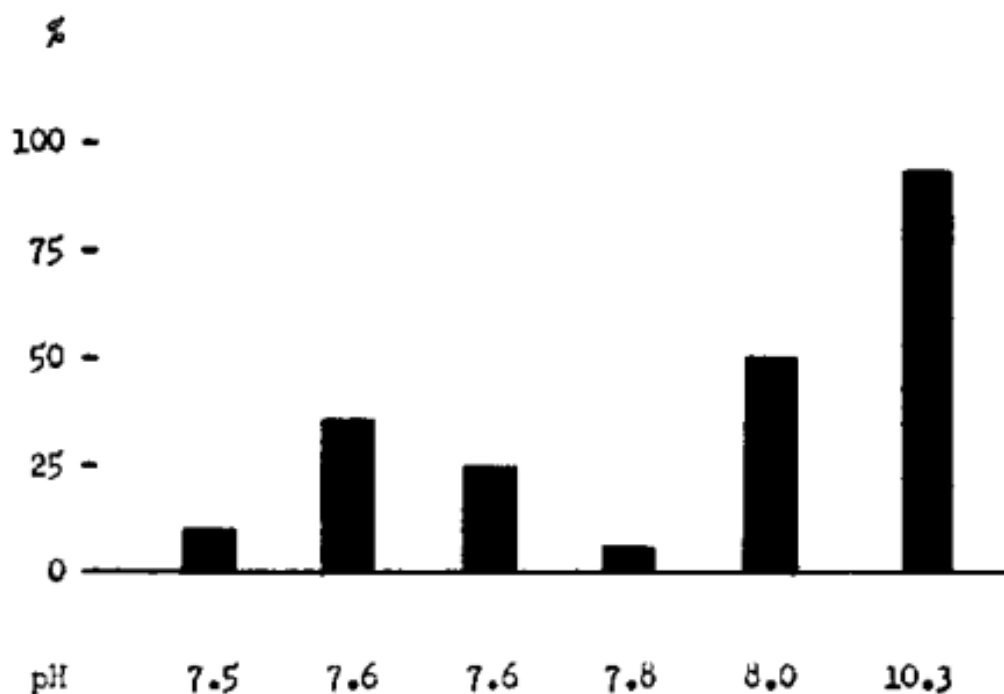


Figure 2.31 – Pourcentage d'aragonite dans les précipités formés à 52°C (Zeller & Wray, 1956)

2.3.4.2.4 Effet des additifs ou surfactants

Au fil des ans, de nombreux chercheurs ont produit et amélioré la qualité du carbonate de calcium précipité en utilisant diverses sources alternatives. Parmi les plus importants figurent les résidus de marbre, les carbonatites, le sulfate de calcium peu soluble, le carbonate de magnésium peu soluble

et le chlorure de calcium (Onimisi et al., 2018). Ces variations sont fondamentales lors du processus de précipitation pour modifier positivement la forme du cristal (polymorphisme) ou de la particule (morphologie). Plusieurs surfactants et additifs, tels que l'acide polyacrylique (PAA), le terpinéol, le polyéthylène glycol (PEG), l'EDTA, l'alcool polyvinylique (PVA), le chlorure de magnésium, le chlorure de zinc et le dispex A40 ont été développés et sont également utilisés dans les processus industriels de précipitation (Feng et al., 2007).

- Terpinol - Il est largement utilisé en hydrométallurgie pour accélérer l'absorption du CO_2 et a permis d'obtenir des particules de taille nanométrique. Des expériences ont obtenu une réduction importante du diamètre des particules de CaCO_3 . Après addition de 0,1 à 1,0 vol% de terpinéol, une réduction de 150 nm à environ 90 nm s'est produite. Lorsque de plus grandes quantités de terpinéol étaient ajoutées, les résultats se traduisaient par des particules plus grosses aux formes irrégulières (Xiang et al., 2004).
- EDTA – Xiang et al. (2002) ont identifié que cet additif aide à accélérer la vitesse de carbonatation, ce qui réduit le temps de réaction de 80 à 40 min. Ce résultat était également très favorable à la formation de particules super fines de CaCO_3 . La variation de la quantité d'EDTA de 0,25 à 1 % a entraîné une diminution de 70 à 50 nm.
- PAA (Acide polyacrylique) – L'utilisation de cet additif tend à renforcer les interactions entre les groupes carboxyliques et les ions calcium (Ca^{2+}), il en résulte un effet significatif sur la morphologie cristalline où se produit une augmentation de la taille des particules de CaCO_3 . Cet effet s'est produit avec une meilleure qualité lorsque le pH était à 9. À des niveaux de pH supérieurs à 12, une formation irrégulière de particules s'est produite (Cheng et al., 2004; Yu et al., 2004).
- Chlorure de zinc (ZnCl_2) et chlorure de magnésium (MgCl_2) - Xiang et al. (2002) ont également rapporté que l'ajout de 1 % de ZnCl_2 présente une diminution de la taille des particules de carbonate de calcium précipité et une formation des particules sphériques de carbonate de calcium précipité de 0,2 μm de diamètre. L'ajout de MgCl_2 a entraîné la formation d'un fuseau de taille micrométrique et de particules de forme sphérique.
- CTAB – Des études ont rapporté que cet additif n'avait aucun effet évident sur la morphologie du CaCO_3 à 25°C, mais présentait une grande influence sur la morphologie du CaCO_3 et les structures de phase à 80°C (Yu et al., 2004). Certains précipités d'aragonite

ont été observés sur les MEB (microscopie électronique à balayage). Ces types de particules sont très recherchés dans les industries de la peinture et du papier, notamment en raison de la résistance électrique élevée et du module d'élasticité qu'ils confèrent au composite.

2.3.4.2.5 Effet de l'agitation

Un autre facteur important sur la précipitation est l'agitation des solutions impliquées dans le processus de précipitation. La formation de calcite est influencée par des vitesses d'agitation plus faibles (autour de 100 tr/min) et celle-ci est remplacée par la vaterite lors de l'augmentation de ces vitesses (Yan et al., 2009). Wei et al. (1997) et Agnihotri et al (1999) ont montré que l'augmentation de la vitesse et du temps d'agitation entraîne également une diminution de la taille des particules. La vitesse élevée active la création de diverses forces de cisaillement, résultant en une augmentation du nombre de sites de nucléation dans la solution. Le problème survient lorsque l'agitation s'arrête. Lorsqu'il y a moins de sites de nucléation, les nuclei préexistants s'unissent entre eux pour former précipités irréguliers, de plus grosse taille.

2.3.5 Impact environnemental potentiel de la technique de calcification

L'application des techniques de (bio)calcification à grande échelle est encore rare en raison de la difficulté passer le protocole à l'échelle chantier et à l'absence de réglementation dédiée à ce type de procédé relativement récent. Dès lors, les nouvelles techniques doivent se trouver un chemin dans les réglementations existantes, notamment en ce qui a trait à la protection de l'environnement. Ces dernières dépendent des cas d'application et de la taille des projets et nous présenterons dans cette section l'impact potentiel des réactifs impliqués dans la calcification chimique.

2.3.5.1 Sels de voirie

Les sels de voiries utilisés pour la calcification chimique peuvent générer un impact sur la santé humaine et sur l'environnement si utilisées hors des limites établies par l'Environnement Canada (2004).

La législation canadienne en matière de protection de l'environnement a requis la création d'une liste des substances d'intérêt prioritaire (LSIP) sous la supervision conjointe d'Environnement Canada et de Santé Canada. L'objectif de cette initiative est de réglementer l'utilisation de produits jugés nocifs pour la santé humaine et l'environnement. En conséquence de leur utilisation répandue

sur les routes canadiennes et à la suite d'évaluations de leur impact sur la santé humaine et l'écosystème, quatre sels de voirie ont été inclus dans cette liste des substances d'intérêt prioritaire. Ces sels comprennent le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de magnésium (MgCl_2), le chlorure de calcium (CaCl_2) et le chlorure de potassium (KCl). Ainsi, sur les 4 réactifs, 2 sont présents dans notre réaction de calcification chimique (NaCl et CaCl_2).

Selon Warrence et al. (2002), la salinité devient un problème pour l'agriculture lorsque la production de sel est si importante qu'elle peut s'accumuler dans la zone racinaire et nuire à la croissance des plantes. Les anions Cl^- et cations Ca^{2+} qui forment les sels de voirie contribuent à la salinité du sol. La contribution des anions Cl^- à la salinité est la plus importante en comparaison au bicarbonate (HCO_3^-), au carbonate (CO_3^{2-}) et le sulfate (SO_4^{2-}) (Gouvernement du Québec, 2010). L'excès de sels dans la zone racinaire empêche les plantes de consommer de l'eau du sol. Cela réduit la quantité d'eau disponible pour la plante, ce qui l'affaiblit et peut la faire mourir.

Selon CNESST (2022b), la substance est très irritante pour la peau, les voies aériennes supérieures et le tractus gastro-intestinal. Lors des tests de cas de contamination d'un cours d'eau, ce réactif n'a pas présenté de toxicité pour les animaux aquatiques (poissons, algues et invertébrés). Cependant, des précautions importantes doivent être prises avec les dépôts importants de ce type de réactif dans la nature, car ils sont classés comme inorganiques, c'est-à-dire non biodégradables.

L'usage du CaCl_2 doit donc être fait avec précaution, mais il est à noter que la technique de calcification chimique développée ne prévoit pas un épandage fréquent de sels, puisqu'ils sont essentiellement utilisés durant la phase de construction, contrairement aux applications de types abats-poussières ou déglacage, qui sont récurrentes.

2.3.5.2 Carbonate de Sodium

Le carbonate de sodium (Na_2CO_3) est un produit que l'on retrouve dans la nature, par exemple comme composant Trona, et qui peut de plus être créé à partir du procédé Solvay, un mélange de calcaire et de sels (Breton, 2002).

Selon la CNESST (2022a), ce produit peut provoquer une légère irritation cutanée, telle que de légères démangeaisons, et une grave irritation des yeux. Dans ce dernier cas, il faut laver les yeux pendant au moins 15 minutes. En cas d'ingestion en grande quantité, des irritations intestinales, des vomissements ou de la diarrhée peuvent survenir. Pour cette raison, il faut conserver le produit

dans un récipient hermétique placé dans un endroit sec, porter un appareil de protection des yeux et éviter tout contact avec la peau.

Il n'est pas inclus comme produit dangereux dans la législation relative au transport routier ou ferroviaire. En cas de versements sur les routes et les chemins de fer, aucune notification environnementale n'est nécessaire sauf si des cours d'eau sont à proximité. Dans ce cas, il faut retirer le produit déversé avec un aspirateur. Si cela n'est pas possible, il faut récupérer le produit déversé avec une pelle, un balai ou un outil similaire. Il est important de mentionner que le réactif doivent être collectés complètement car il contient majoritairement des substances inorganiques qui ne sont pas biodégradables (VRAC, 2018).

Le carbonate de sodium n'est pas un produit agressif ou toxique pour l'environnement. Cependant, comme il se dissout facilement, il faut éviter de l'introduire dans les cours d'eau, car il agit en augmentant le pH de l'eau. Certains tests ont été réalisés sur des poissons susceptibles d'être affectés par de l'eau contaminée avec le carbonate de sodium. Les résultats n'ont démontré aucun changement dans la santé de ces animaux, considérant le Na_2CO_3 comme non toxique (CNESST, 2022a; VRAC, 2018).

2.3.6 Développement de la calcification à Polytechnique de Montréal

Après l'émergence de la biocalcification dans le monde, de nombreux centres de recherche se sont intéressés à ce sujet. À Polytechnique Montréal, la première publication a été présentée par Benoit Courcelles en 2013 au 81^e congrès de l'Association Francophone pour le Savoir. Ensuite, une série d'articles scientifiques, de mémoires de maîtrise et une thèse de doctorat ont été produits par les étudiants de cette école sous la direction du professeur Courcelles. Les travaux ont cherché à comprendre les différentes caractéristiques, comportements et applications de la calcification biologique dans le domaine géotechnique.

En 2019, dans le but de proposer une alternative à la biocalcification, le Professeur Courcelles a lancé une ligne de recherche liée à la calcification chimique. Les premiers résultats ont démontré un potentiel d'amélioration similaire et parfois meilleur que la calcification biologique. Pour cette raison qu'en 2020, un nouveau groupe d'amélioration des sols a été créé, axé sur la comparaison de la calcification chimique et de la calcification biologique.

En raison de la pandémie de COVID-19, toutes les actions de recherche ont été arrêtées et reprises seulement 6 mois plus tard. Après ce période, l'équipe s'est concentrée uniquement sur le développement de protocoles de calcification chimique. La chronologie de développement de la calcification à la Polytechnique de Montréal est présenté à la Figure 2.32 et sera expliquée plus en détail ci-dessous.

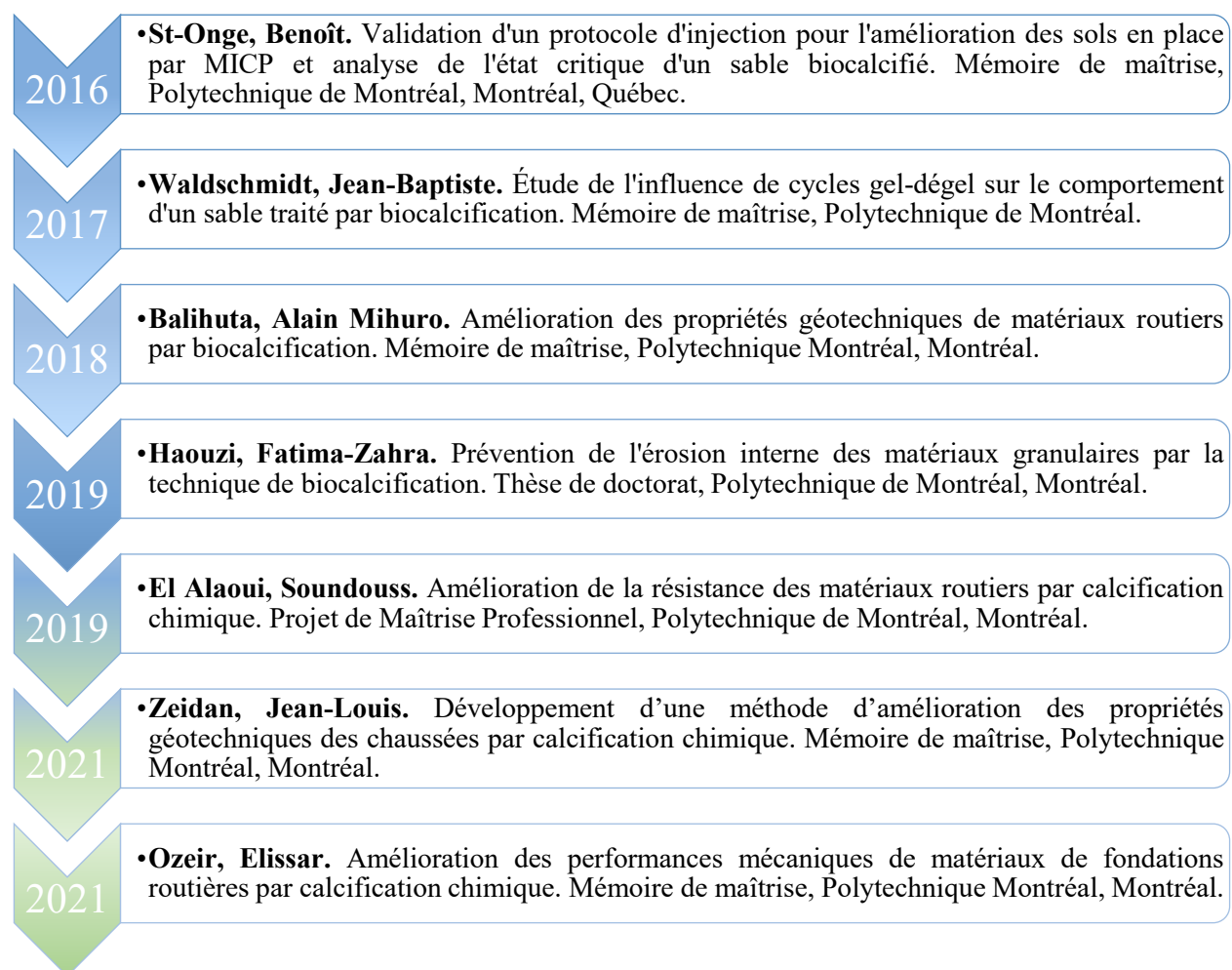


Figure 2.32 - Principales études sur la calcification biologique et chimique réalisée à Polytechnique Montréal

La séquence ci-dessus montre que les analyses suivaient un ordre chronologique d'apprentissage. Avec chaque nouvelle étude, les auteurs cherchaient de nouvelles applications pour la calcification biologique ou chimique.

2.3.6.1 Benoît St-Onge (2016)

Il s'agissait du premier mémoire produit à Polytechnique Montréal sur la calcification biologique. Ce mémoire de maîtrise est considéré comme un point de départ de l'équipe de biocalcification, en raison de l'élaboration du protocole d'injection de MICP pour les tests de laboratoire et la caractérisation mécanique. En bref, c'est le document qui a enregistré et expliqué la procédure d'application de la solution biocalcifiante sur des échantillons de sol québécois. Enfin, les premiers résultats d'essais de cisaillement après l'application de la technique de biocalcification à différents contenus de cimentation ont été présentés.

Les résultats ont montré une cimentation efficace car presque toute la quantité de calcium injectée était précipitée (90%), principalement lorsqu'elle était injectée à des teneurs en eau de 8% à 17%. De plus, les échantillons testés sous des contraintes de consolidation de 100, 150 et 200 kPa ont permis d'évaluer l'augmentation de l'angle de friction et de la cohésion en fonction du niveau de cimentation.

2.3.6.2 Jean-Baptiste Waldschmidt (2017)

Cette étude a utilisé de nombreux aspects développés par St-Onge (2016), mais a permis de mieux comprendre la réalité québécoise. Le but de l'étude était de comprendre comment se comporterait un sol biocalcifié en fonction des cycles de gel-dégel. Compte tenu de cela, l'auteur a développé une série de 14 protocoles afin de trouver celui qui convient le mieux au climat et aux conditions de sol granulaires de la province.

La recherche a obtenu des résultats intéressants avec le protocole 11, présentant une efficacité de précipitation d'environ 40% et une teneur en carbonate de calcium comprise entre 3 et 6%. Enfin, les échantillons traités selon le protocole optimal ont été soumis à plusieurs cycles de gel et dégel, puis évalués par des tests de compression simple. Les résultats ont été excellents jusqu'au septième cycle, ne montrant qu'un impact limité après 10 cycles de gel et de dégel.

2.3.6.3 Alain Miruho Balihuta (2018)

À partir d'une technique déjà répandue dans le groupe du professeur Benoit Courcelles, l'auteur a présenté une étude centrée sur un type de solution d'un problème historique dans la province de Québec. L'objectif principal de la recherche était l'évaluation en laboratoire de l'amélioration des

fondations des routes et des sous-fondations par la technique de biocalcification. Le test CBR a été la méthode choisie pour évaluer et quantifier la capacité du sol avant et après traitement.

Les cycles de gel et de dégel ont ensuite été simulés pour rapprocher les tests de laboratoire de la réalité. Enfin, Balihuta (2018) a produit un essai à grande échelle pour mieux représenter le comportement d'une route. Il a construit une colonne de 1 mètre de hauteur remplie de matériaux MG-20 (fondation) et MG-112 (sous-fondation).

L'amélioration des sols était significative dans toutes les applications. Le CBR des échantillons biocalcifiés a montré une amélioration allant de 2 à 3 fois plus. En ce qui concerne l'évaluation des cycles de gel et de dégel, les tests CBR ont montré qu'il n'y avait pas d'impact significatif sur le comportement. Les essais pilotes ont également confirmé qu'il était possible de précipiter des cristaux de carbonate de calcium dans toute la colonne expérimentale.

2.3.6.4 Fatima Zahra Haouzi (2019)

Cette thèse de doctorat a suivi un chemin similaire à celui de Balihuta (2018), avec la recherche d'une solution possible à un problème fréquemment rencontré dans les ouvrages hydrauliques. L'étude a démontré le gain de résistance des sols granulaires traités par la technique de calcification biologique afin de lutter contre l'érosion interne. L'un des objectifs de cette recherche était donc de pouvoir proposer une loi d'érosion applicable aux sols biocimentés et de la rendre applicable à divers travaux de génie civil.

Pour ce faire, Haouzi (2019) a mené un test expérimental pour quantifier la suffusion d'un matériau granulaire non cohésif. Une charge hydraulique a été appliquée sur des échantillons de 100 x 160 mm et, à chaque incrément, il a été possible de quantifier des paramètres tels que la masse des particules, le débit hydraulique à la sortie et de la courbe granulométrique avant et après érosion. Par la suite, le même type de sol a été soumis au processus de biocalcification par la méthode de percolation de surface et optimisé par des injections de solutions bactérienne et de cimentation.

Les résultats de la recherche montrent que lorsque les échantillons sont soumis uniquement à un traitement de surface, ils produisent une précipitation d'au moins 4%. Le gradient hydraulique critique était supérieur à 5 pour tous les échantillons, à l'exception de l'échantillon traité à 30 % de volume de pores de suspension bactérienne et de 0.35 M de solution de cimentation. Dans ce dernier cas, le gradient hydraulique critique était égal à 0.7, mais la masse totale de fines lessivée

a été, tout de même, réduite en comparaison avec le sol non traité. Lorsque les échantillons sont soumis au traitement de surface et à l'optimisation de l'injection, la quantité de particules fines lessivées est complètement annulée et le gradient hydraulique critique est maximal (de l'ordre de 10 fois celui d'un sol non traité).

2.3.6.5 Soundouss El Alaoui (2019)

Il s'agit des premiers travaux sur la calcification chimique à Polytechnique Montréal. Ce projet est considéré comme un point de départ pour l'équipe dans le cadre de la cimentation des sols à partir de réactifs chimiques et visait la précipitation de carbonate de calcium à partir de l'injection de solutions de carbonate de sodium et de chlorure de calcium. Le traitement a permis la création d'une cohésion entre les particules, entraînant une augmentation de la résistance et une amélioration des propriétés mécaniques avec des résultats similaires à la biocalcification.

Dans son rapport, l'auteure présente la méthodologie appliquée, décrit les produits utilisés et l'avancement des essais de validation réalisés en laboratoire. Parmi les points principaux figurent les injections de réactifs calcifiants, qui ont été réalisées par percolation, en ajoutant simultanément les solutions aqueuses des deux produits chimiques. Les sols de fondation et de sous-fondation ont été utilisés dans la production d'échantillons, et ils ont ensuite été soumis à des essais de compression simple et des tests de dissolution pour quantifier la masse de carbonate de calcium précipité. Les résultats obtenus montrent que la calcification chimique améliore la résistance des matériaux granulaires et que la précipitation se produit tout au long du sol traité. Les essais MEB (microscopie électronique à balayage) et DRX (diffraction de rayons X) ont confirmé la précipitation de carbonates de calcium et la formation de ponts entre les particules du sol.

2.3.6.6 Jean-Louis Zeidan (2021)

L'objectif principal de la recherche était de rechercher des réactifs écologiquement responsables, capables de produire des résultats similaires aux précédents. La source de calcium utilisée dans ce projet était un sel de voirie peu répandu au Québec, l'acétate de calcium (au lieu du chlorure de calcium). Un autre facteur important était lié à la production de cette solution calcifiante, qui a été synthétisée à partir de coquilles d'œufs. La source de carbonates était associée au bicarbonate de sodium, un produit facilement trouvable sur le marché.

Dans ce projet, plusieurs facteurs ont été étudiés pour mieux contextualiser le traitement, dont la température de cure, la concentration et l'état (solide ou soluble) des réactifs, ainsi que la nature et la granulométrie des sols traités. Les résultats de cette étude confirment la faisabilité du traitement par calcification chimique, avec toutefois quelques discontinuités et de faibles profondeurs de pénétration dans certains cas d'application. Enfin, prenant en considération les limitations des différentes méthodes d'application, à savoir le malaxage ou la pulvérisation des réactifs, la recherche a pu confirmer la faisabilité technique des protocoles pour le traitement par calcification.

2.3.6.7 Elissar Ozeir (2021)

Ce travail visait à concevoir un nouveau matériau performant et applicable dans le domaine de la construction et de l'entretien des routes. Afin de trouver les meilleures performances, quatre réactions chimiques ont été appliquées à différents échantillons d'un même sol et dans les mêmes conditions. Ces réactions se différencient par la nature des produits chimiques utilisés en tant que sources de calcium et de carbonates.

Afin d'optimiser l'application du traitement, un protocole de traitement fiable a été développé afin de permettre la préparation d'échantillons de sol suffisamment résistants et homogènes. Cette préparation a été modifiée en tenant compte du compactage, du malaxage, de la séquence d'ajout des réactifs et de la température de cure. Les échantillons ont été préparés dans des moules de 10 x 20 cm, laissés en cure au four pendant 7 jours maximum, et ont été testés en compression simple et en cisaillement direct. Les résultats ont montré qu'un gain de résistance plus rapide était lié à la température imposée (plus de chaleur donne plus de résistance en moins de temps). De plus, la résistance optimale a été obtenue après diminution de la solution de calcium, c'est-à-dire qu'il était possible que la source de calcium la plus importante pour la calcification provienne directement du sol calcaire. Pour retrouver ce résultat, des séries de 3 échantillons de sol ont été préparées par Ozeir (2021). Les informations relatives à chaque série d'échantillons se trouvent dans le Tableau A.1 en Annexe A et les principaux résultats de cette évaluation sont présentés à la Figure 2.33.

Le traitement à l'aide de bicarbonate de sodium a montré une faible variation de résistance à la compression, de 0,82 MPa à 2,55 MPa, comparativement à un traitement à base de carbonate de calcium, dont la résistance varie de 2,27 MPa à 33 MPa avec l'ajout de CaCl_2 . La comparaison des résultats obtenus met ainsi en évidence une performance largement supérieure du carbonate de sodium par rapport au bicarbonate de sodium. Cette conclusion Ozeir (2021) montre un résultat

jusqu'alors inobservé dans les théories fondamentales et la possibilité de suivre une voie non encore explorée.

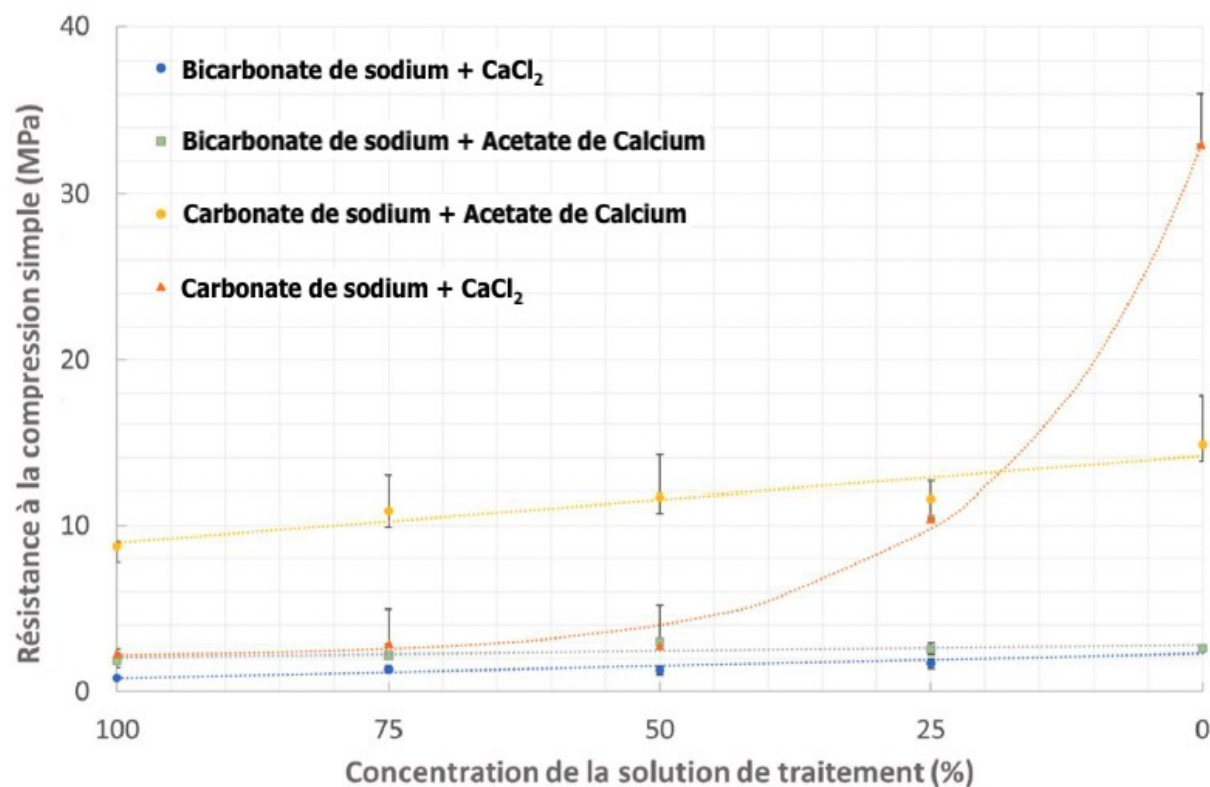


Figure 2.33 – Compression simple en fonction de la variation de la concentration de traitement (Ozeir, 2021)

Compte tenu de cet historique, on constate l'avancée des études sur la calcification biologique et chimique à Polytechnique Montréal ces dernières années. Néanmoins, certains points devaient être approfondis et mieux discutés en vue d'une application à l'échelle industrielle du procédé. Cet approfondissement fait l'objet de la présente étude.

CHAPITRE 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Le présent chapitre vise à répondre au premier objectif spécifique de ce projet, à savoir (OS1) Définir un protocole optimal de calcification chimique en se basant sur la quantité de ressources et les caractéristiques physiques, mécaniques et minéralogiques du sol. D'abord, les réactifs chimiques ainsi que le matériau granulaire utilisé dans la préparation des échantillons seront décrits. Le plan expérimental du projet sera ensuite présenté, avec tous les détails sur la définition du protocole optimal (réaction, mode de préparation, post traitement...) et les différentes formes de caractérisation du sol après traitement.

3.1 Matériaux

3.1.1 Sol à traiter

4 types de sols ont été testés dans ce projet : 3 d'entre eux étaient de la poussière de roche et le dernier était de la pierre concassée (MG-20), le matériau utilisé dans les fondations et sous-fondations routières. Les premiers sols ont été utilisés dans la plupart des essais de cette recherche et le dernier type a été sélectionné dans le but d'évaluer le comportement d'un sol fréquemment utilisé sur les chantiers de construction routière.

3.1.1.1 Poussière de roche

Le principal type de sol utilisés dans cette étude est connu sous le nom de criblure et il s'agit d'un sable contenant beaucoup de particules fines. Le choix de ce type de sol repose sur 2 principes :

- Le diamètre du moule est d'environ 50,8 mm. Conformément à la norme ASTM D1557, seuls les sols d'une dimension allant jusqu'à 5 mm sont donc proportionnellement acceptés;
- Un sol calcaire avec un plus grand nombre de fines favorise la formation de ponts de calcite, permettant une évaluation efficace des précipitations induites chimiquement.

Les sols sont préparés par l'entreprise « Bomix » et proviennent de 3 grandes carrières : Laval (Demix Agrégats), Montréal-Est (Lafarge) et Saint-Eustache (Mathers). Selon le MTQ (2021a), les deux premières carrières ont des roches d'origine majoritairement calcaire calcite et la dernière a des pourcentages plus élevés de calcaire dolomite. Bien que l'entreprise n'ait pas identifié l'origine exacte de chaque sol, sur la base d'une analyse minéralogique, ce doute a été levé. Les poussières

1 et 2 sont des poussières calcaires, alors que la poussière 3 est dolomitique. Les données pour chacun de ces sols sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 - Paramètres des sols utilisés dans le projet

Paramètres	Poussière 1	Poussière 2	Poussière 3
Densité sèche maximale - ρ_{dmax} (kg/m^3)	2232.3	2223.1	2307.0
Teneur en eau optimale - w_{opt} (%)	5.8	5.9	5.8
% de Calcite ($CaCO_3$)	27.3	24.6	7.4
% de Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$)	3.8	2.6	15.3
% en particules fines (0.08 mm)	15.13	12.82	18.89

3.1.1.1.1 Granulométrie

La granulométrie du sol a été réalisée selon la norme ASTM C136 et les résultats pour les 3 poussières sont présentés à la Figure 3.1.

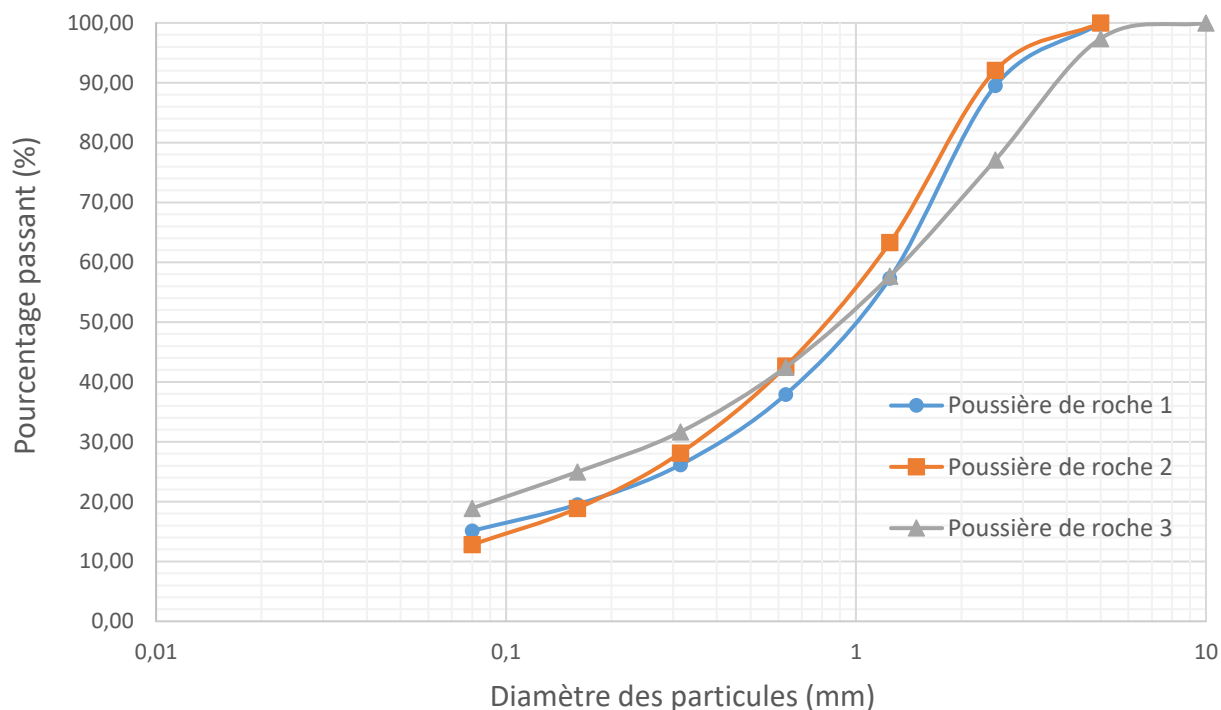


Figure 3.1 – Courbes granulométriques des 3 poussières de roche utilisées

À partir des courbes granulométriques et à cause de leur très faible plasticité, les sols étudiés sont des sables contenant beaucoup de particules fines (SM).

Les poussières de roche 1, 2 et 3 ont une teneur en particules fines de 15.13%, 12.82% et 18.89%, respectivement, soit environ le double de la valeur exigée par le MTQ pour les fondations routières (7 %). Ce sol a toutefois été retenu dans la perspective d'une utilisation en couche de roulement et non en couche de fondation. Le taux élevé de fines aide au rapprochement interparticulaire. Ainsi, dès l'initiation de la précipitation, la formation de liaisons calcifiées se produit avec un rendement plus efficace dans la zone de contact des grains. Par conséquent, la granulométrie peut affecter directement le potentiel de cimentation de la calcification chimique.

3.1.1.1.2 Proctor modifié

L'essai Proctor modifié a été réalisé conformément à la norme NQ 2560-114 – Travaux de Génie Civil - Granulat (BNQ, 2014), afin de déterminer la teneur en eau et la masse volumique sèche optimales de la poussière de roche testée. Les sols ont été compactés en 5 couches avec 56 coups par couche selon la méthode C (dame de masse 4,5 kg, hauteur de chute de 45,7 cm et moule de diamètre 15,2 cm).

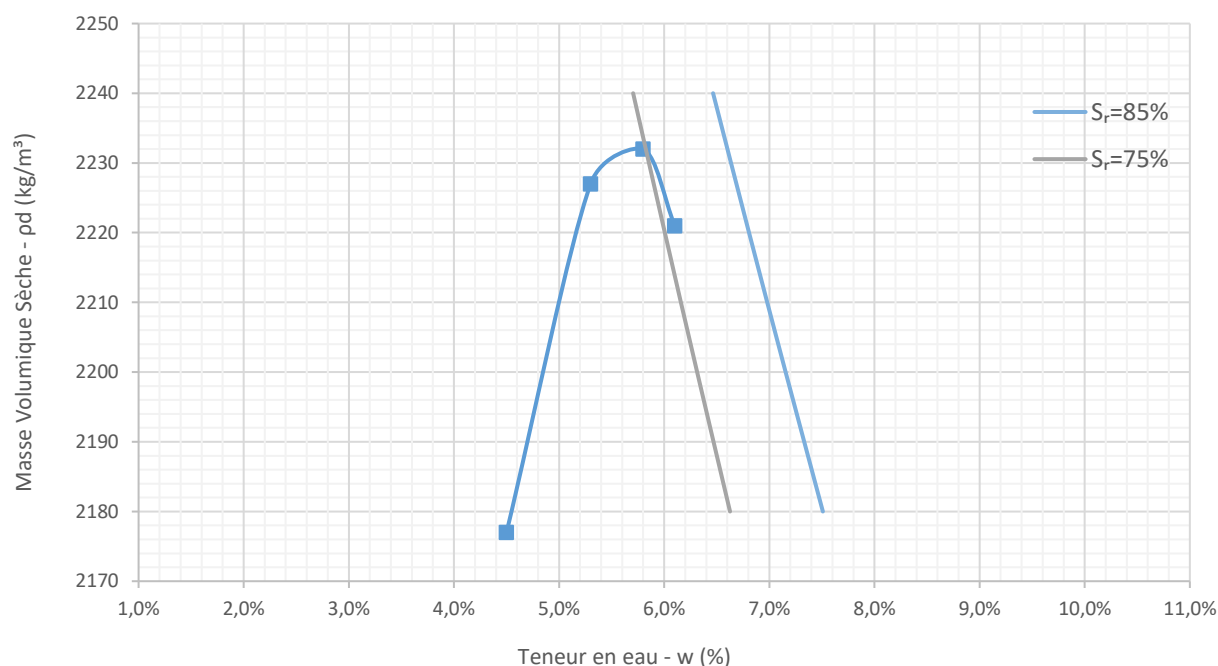


Figure 3.2 – Courbe de compactage de la poussière de roche 1 selon Proctor modifié

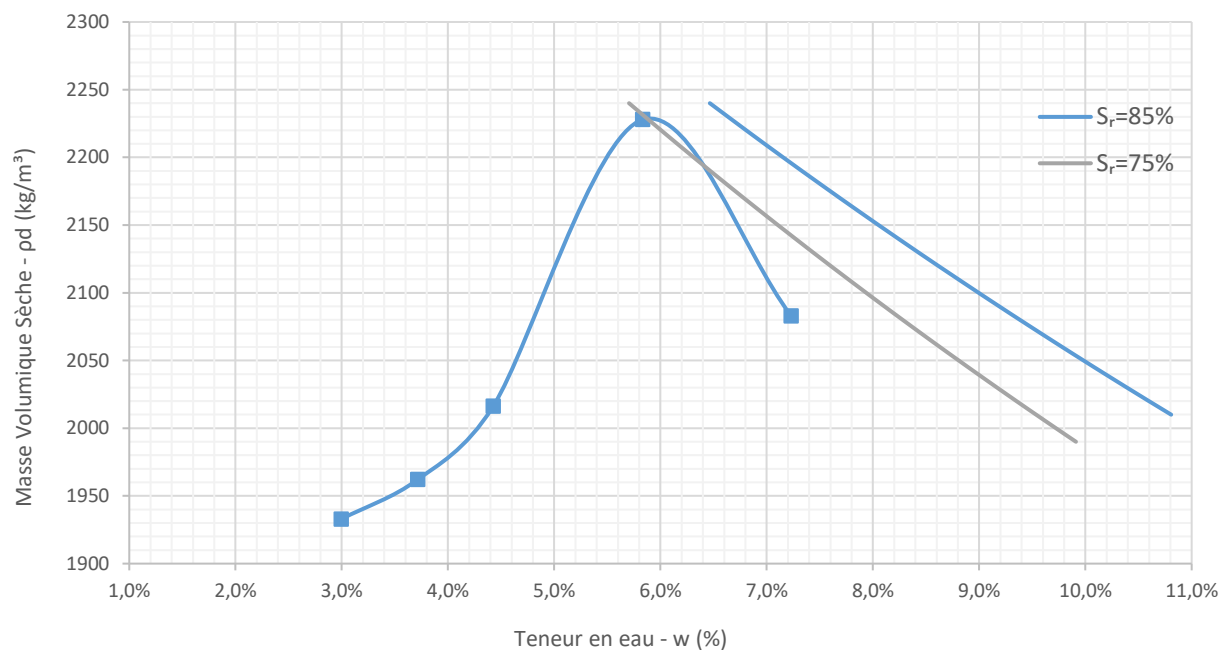


Figure 3.3 – Courbe de compactage de la poussière de roche 2 selon Proctor modifié

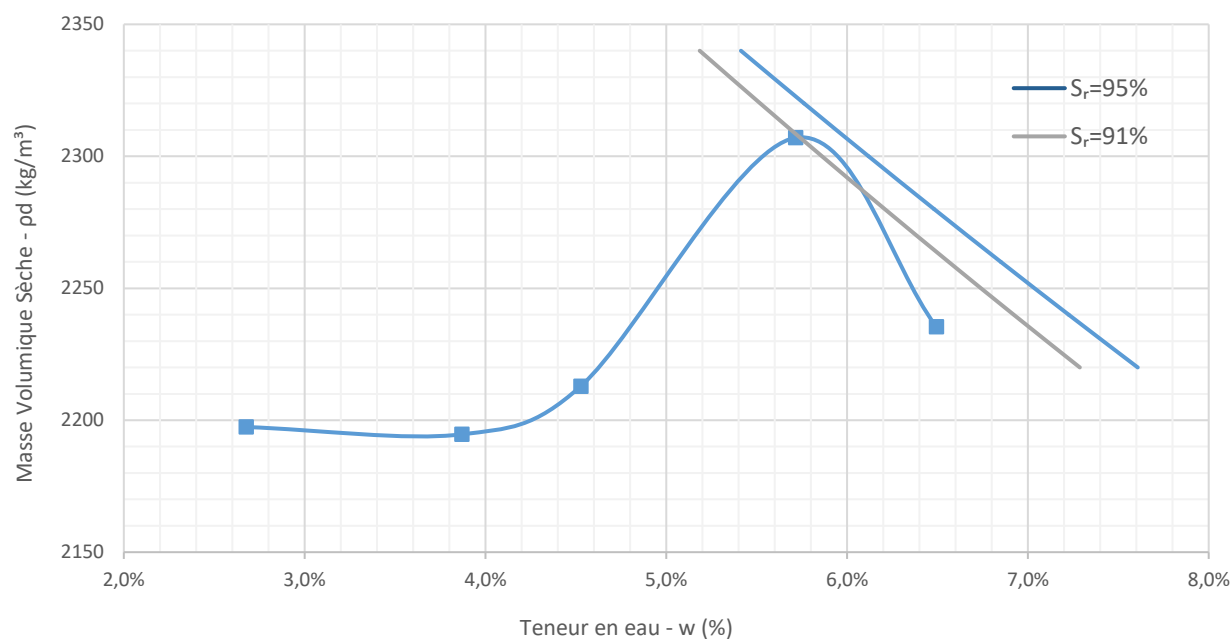


Figure 3.4 – Courbe de compactage de la poussière de roche 3 selon Proctor modifié

La teneur en eau optimale et la masse volumique maximale sont présentées dans le Tableau 3.1. Le degré de saturation optimal des poussières de roche 1 et 2 sont respectivement de 74,7% et 74,3%, alors que le degré de saturation optimal de la poussière de roche 3 est égal à 91,9 %.

3.1.1.1.3 Minéralogie

Le sol « BOMIX » est vendu avec 1 seule information minéralogique, « obtenu par le concassage de la pierre calcaire ». Du point de vue de la recherche scientifique, ces informations sont extrêmement génériques puisque les calcaires ont des compositions chimiques très différentes capables d'influencer directement le résultat final des précipitations.

En découvrant que les sols provenaient de 3 origines différentes, comme indiqué précédemment, il a fallu étudier en détail la minéralogie. Alors quelques essais DRX (diffraction rayon x) ont été commandés pour connaître les minéraux présents dans ce sol nouvellement arrivé. Le résultat était que « l'échantillon semble contenir une grande quantité de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (Dolomite) et il semble ne contenir que de très faibles quantités ou pas du tout de CaCO_3 (Calcite) et de SiO_2 (Quartz). » (Figure 3.5)

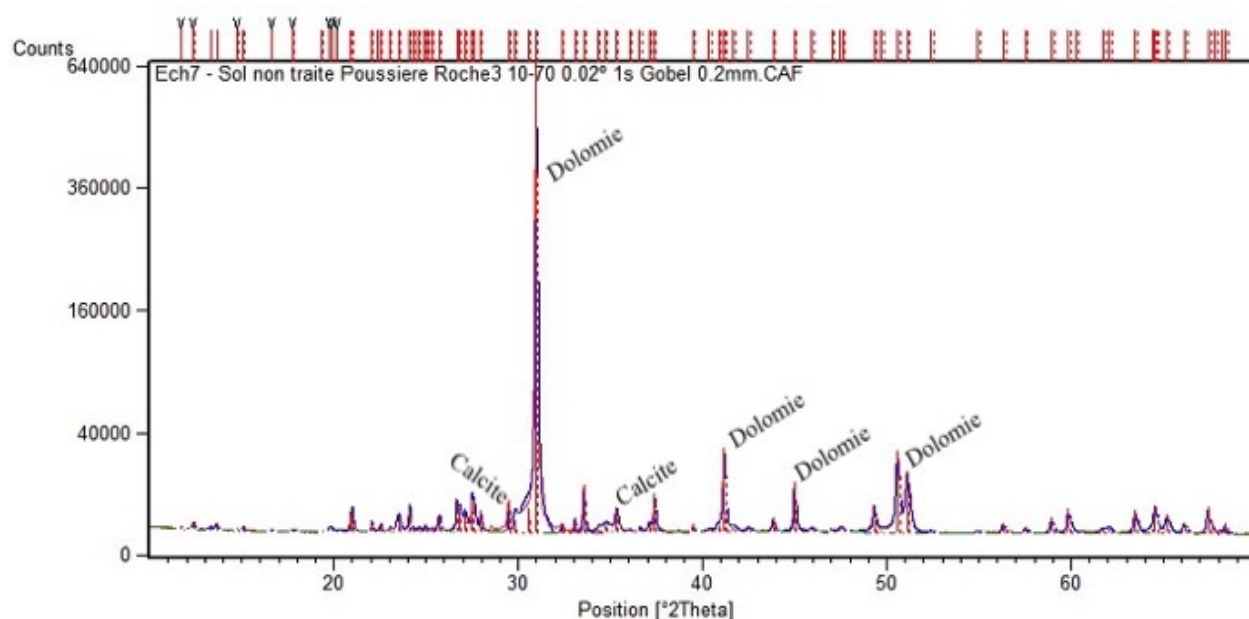


Figure 3.5 - Résultat du test DRX sur la poussière de roche 3 à prédominance de dolomite

À partir de ce résultat, des analyses chimiques par absorption atomique ont été demandées au laboratoire de Géo-ingénierie (Département de génie minéral) de la Polytechnique de Montréal pour confirmer le pourcentage des principaux minéraux dans ces sols. Les résultats de ces analyses sont présentés dans le Tableau 3.1.

3.1.1.2 MG-20

Le deuxième sol utilisé dans cette étude est appelé pierre concassée, ou selon USCS, un gravier bien étalé (GW). Le MTQ a une nomenclature spécifique pour ce matériau, il est connu sous le nom de MG-20, c'est-à-dire que le diamètre du plus gros grain de ce sol est de 20 mm. Il a été choisi à des fins de validation car il s'agit du sol le plus rencontré dans la construction des fondations routières.

Le sol est ensaché par la compagnie Bomix et provient de la carrière Laval (Demix Agrégats). Une carrière qui, selon le MTQ (2021a), possède des roches majoritairement calcaires (type calcite). Deux essais de caractérisation ont été réalisés : granulométrie et Proctor modifié.

3.1.1.2.1 Granulométrie

La granulométrie du sol a été réalisée selon la norme ASTM C136 et les résultats sont présentés à la Figure 3.6.

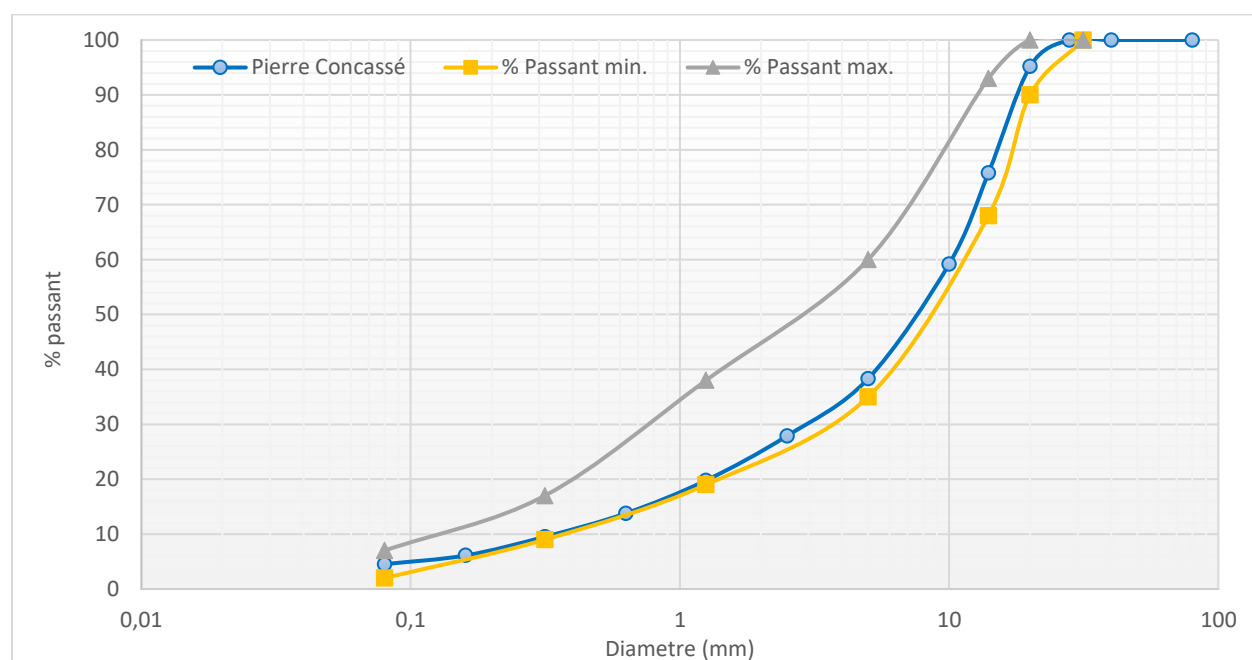


Figure 3.6 – Évaluation de la courbe granulométrique de la pierre concassée utilisée par rapport aux limites (maximum et minimum) du MTQ

De la courbe, il est confirmé que le sol est conforme à la norme NQ 2560-114 du MTQ. Elle spécifie les limites granulométriques pour les fondations routières comme indiqué dans le Tableau 2.2 du chapitre précédent. À partir de la courbe, le coefficient de courbure et le coefficient

d'uniformité peuvent être déterminés en utilisant les formules suivantes et ils sont résumés dans le Tableau 3.3.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} ; C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Où D_{10} , D_{30} et D_{60} sont les diamètres des particules correspondant à 10, 30 et 60% du passant.

Tableau 3.2 - Résultats des coefficients et d'uniformité de la courbe granulométrique du sol

Paramètre	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_c	C_u
MG-20	0.34 mm	2.99 mm	10.10 mm	2.60	29.71

Avec les résultats correspondant à $C_u > 4$ et $1 < C_c < 3$, il est possible d'affirmer que le sol étudié est un gravier bien étalé (GW), selon la classification USCS.

3.1.1.2.2 Proctor modifié

L'essai Proctor modifié a été réalisé conformément à la norme NQ 2560-114 – Travaux de Génie Civil - Granulat (BNQ, 2014), afin de déterminer la teneur en eau et la masse volumique sèche optimales de la pierre concassée (Figure 3.7). Elle a été compactée en 5 couches avec 56 coups par couche selon la méthode C (dame de masse 4,5 kg, hauteur de chute de 45,7 cm et moule de diamètre 15,2 cm).

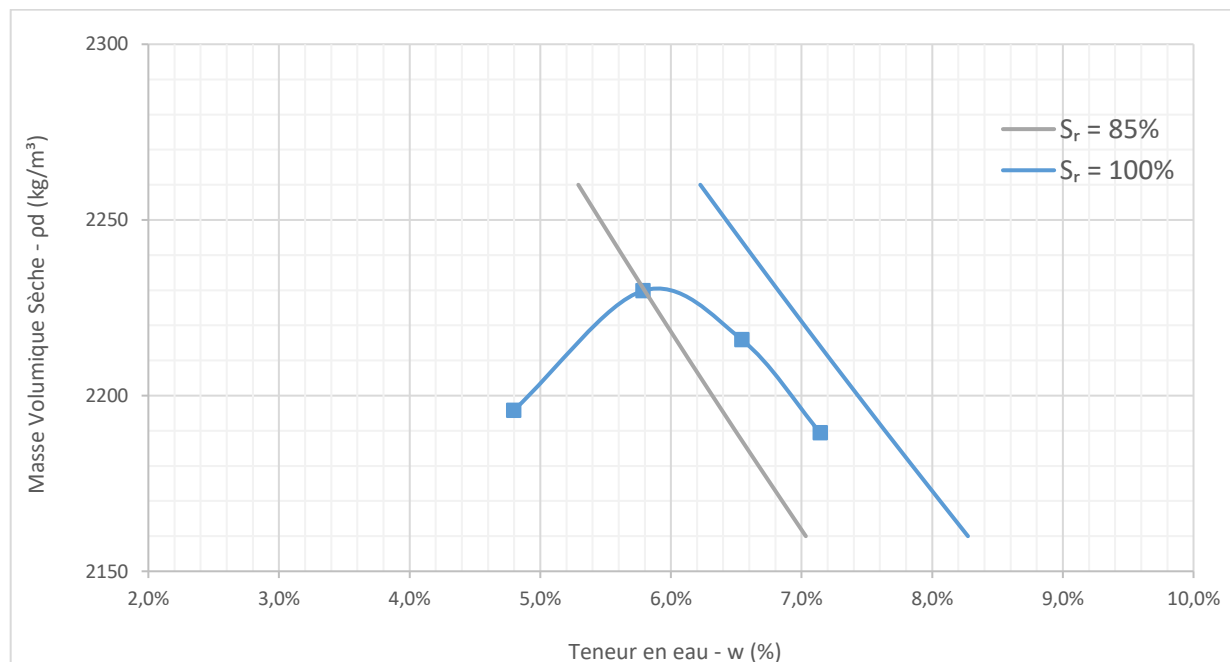


Figure 3.7 – Courbe de compactage de la pierre concassée (MG-20) selon Proctor modifié

La masse volumique maximale et la teneur en eau optimale sont respectivement 2 231 kg/m³ et 5.9%. Le degré de saturation optimal de la pierre concassée est de 86.8%.

3.1.2 Carbonate de sodium

Le carbonate de sodium est une excellente source de carbonates et la principale utilisée dans la présente étude. Il s'agit d'un sel blanc, translucide et très soluble, couramment présenté sous forme de poudre solide ou en cristaux et dont la formule chimique est Na_2CO_3 . Il peut être produit synthétiquement, à partir du chauffage du bicarbonate de soude (procédé Solvay), ou extrait de minerais tels que le trona (Breton, 2002). Certaines propriétés physico-chimiques de ce produit, selon CNESST, sont présentées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.3 – Résumé des propriétés physicochimiques du carbonate de sodium (CNESST - Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité, 2022a)

Propriétés chimiques	
Formule moléculaire	Na_2CO_3
Masse molaire	105.9884 ± 0.0017 g/mol
pKa	HCO_3^-/CO_3^{2-} : $pK_{a1} = 10.33$ $CO_{2(dissous)}/HCO_3^-$: $pK_{a2} = 6.33$
Propriétés physiques	
T° fusion	851°C
Solubilité	220 g/L à 20°C
Masse volumique	2.532 g/cm ³

L'utilisation de ce produit est extrêmement variée. Il connaît des applications dans multiple secteurs comme la production de verre, de papier, de savons, de détergents et dans diverses synthèses de composés organiques (Thieme, 2000). En raison de leur pH basique plus élevé, les cristaux de soude sont des outils de nettoyage domestique très puissants offrant la possibilité d'être utilisés comme adoucisseur d'eau et anticalcaire. De plus, ces cristaux sont un ingrédient nécessaire à la fabrication de nombreux produits de nettoyage en raison de leurs propriétés dégraissantes et purifiantes. Il peut également être utilisé dans l'industrie du verre comme matière pour la fusion. Il

est également essentiel dans la fabrication de dérivés sodiques en chimie industrielle, ainsi que dans la désulfuration de la fonte dans les procédés métallurgiques. Enfin, le carbonate de sodium est utilisé comme agent antiagglomérant et régulateur de pH dans l'industrie alimentaire.

Comme mentionné dans le chapitre 2.3.5.2, ils doivent être manipulés avec précaution en portant des gants, car ils peuvent irriter la peau et les yeux. Ils sont facilement trouvés dans les supermarchés ou magasins-entrepôt sous le nom de cristaux de soude. Dans ce projet, les carbonates de sodium de la marque Arm&Hammer et de la marque Solvay seront les seuls utilisés (Figure 3.8).



Figure 3.8 – Carbonate de sodium de deux marques différentes utilisé

Les principales caractéristiques des deux produits sont fournies dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.4 – Synthèse des principales caractéristiques des deux types de carbonate de sodium

Marque	pH	Solubilité	Densité relative	Concentration
Arm&Hammer	11.4	71 g/l (0°C)	2.25	88%
Solvay	11.3		2.53	98%

3.1.3 Chlorure de calcium

Le chlorure de calcium est un sel inorganique de formule chimique $CaCl_2$. Il se présente sous forme de grains blancs ou de flocons à température ambiante, extrêmement solubles en milieu aqueux. Il peut provenir du calcaire ou être un sous-produit du procédé Solvay et existe sous 4 formes différentes: monohydraté, dihydraté, tétrahydraté et hexahydraté. Comme utilisations principales on retrouve : le déverglaçage, l'accélération de la prise du béton, la fixation de poussières des routes et de nombreuses utilisations dans l'industrie alimentaire et médicale (Patnaik & Knovel, 2003).

Le chlorure de calcium utilisé dans ce projet est du type dihydraté ($CaCl_2, H_2O$) de la marque *Fisher Bioreagents* et avec code « BP 510-500 ». Bien qu'il s'agisse du même produit, la procédure diffère de Ozeir (2021), car il n'a pas été utilisé comme source de calcium, mais comme élément pour le contrôle de la température durant la cure de l'échantillon. Les proportions utilisées ont été réduites de 10% pour Ozeir (2021) à 2% pour la présente étude.

La principale caractéristique du chlorure de calcium qui le rend apte à être utilisé comme fondant routier est son processus de dissolution extrêmement exothermique. En fait, la glace fond plus rapidement lorsque les grains de $CaCl_2$ se dissolvent en absorbant l'humidité ambiante et en libérant de la chaleur. Il est important de mentionner que ce type de sel de voirie agit efficacement, même à des températures de -15 °C. Une autre utilisation importante de ce produit est l'application comme abat-poussière sur les routes de gravier. En raison de sa capacité hygroscopique, il capte l'humidité et la transfère à la couche de surface, en conservant une pellicule d'eau qui favorise les liaisons entre les particules (Forget, 2005; Lacasse et al., 2014). Le comportement hygroscopique peut être vu sur les images de la Figure 3.9. Le produit a été placé sous le sol et après 30 minutes, il a été possible de vérifier que l'humidité était capturée et transformée en une solution liquide.

Tout comme le carbonate de sodium, il faut être prudent lors de la manipulation du chlorure de calcium. Les irritations de la peau et des yeux sont les principaux dangers liés à l'utilisation de ce produit en laboratoire, il est donc important de conserver le produit dans un récipient hermétique placé dans un endroit sec, utiliser des gants et des lunettes de protection pour éviter tout contact direct (CNESST, 2022b).



Figure 3.9 – État du CaCl_2 après 30 minutes de contact avec le sol et l'humidité de l'air

3.1.4 Moules

3.1.4.1 Tuyaux ABS

Les moules utilisés dans ce projet pour la poussière de roche (Figure 3.10) étaient en tuyaux d'ABS (acrylonitrile butadiène styrène). Le choix de ce type de matériau a été effectué à cause de sa bonne étanchéité et de sa bonne malléabilité pour l'étape d'extraction. Les moules ont un diamètre interne de 50,8 mm (2 pouces) et une hauteur de 101,6 mm (4 pouces). Un autre point important pour le choix de ce moule est l'exigence de la norme ASTM D-2166 (2010), selon laquelle la hauteur des échantillons des essais de compression simple doit être égale à 2 ou 2,5 fois leur diamètre.

Ces moules ont été choisis après quelques tentatives infructueuses avec d'autres modèles. D'abord, des moules à parois fendues ont été utilisés. Malheureusement, il a été impossible d'éviter les fuites de particules de sol et les mouvements latéraux des deux parois lors du compactage. Pour cela, un modèle capable d'empêcher tout mouvement ou fuite de terre a été pensé. Présentant une bonne étanchéité, du fait que les parois latérales sont complètement fermées, le problème de fuite a été complètement résolu avec les moules préfabriqués en tuyaux d'ABS.

Il est important de mentionner que les moules ont été adaptés pour être utilisés avec un extracteur. Un trou de 25 mm de diamètre a été percé (la moitié du diamètre du moule) et une plaque métallique de même diamètre interne et de 3 mm d'épaisseur a été insérée (Figure 3.10). Avec une plaque au fond de l'échantillon, la fuite de particules de sol est évitée et cela garantit une extraction sans endommager le fond de l'échantillon. Ainsi, la technique de démoulage utilisée reste simple et rapide, garantissant des échantillons réguliers avec un minimum de fissures et pertes.



Figure 3.10 – Moule en tuyaux d'ABS et plaque métallique utilisée pour le compactage de la poussière de roche

Le principal problème était lié à la manière d'extraire l'échantillon, puisque le moule n'avait que la surface supérieure ouverte. Face à cette situation, il a été décidé d'utiliser un extracteur vertical actionné par vérin hydraulique manuel (Figure 3.11). L'équipement était équipé d'une plaque d'éjection, d'un piston d'éjection et d'une plaque de rétention. Le piston est adapté à la hauteur de l'échantillon car il exerce la force directement sur le fond de l'échantillon. La plaque de rétention empêche les mouvements indésirables et assure la stabilité du moule et de l'échantillon pendant l'extraction.

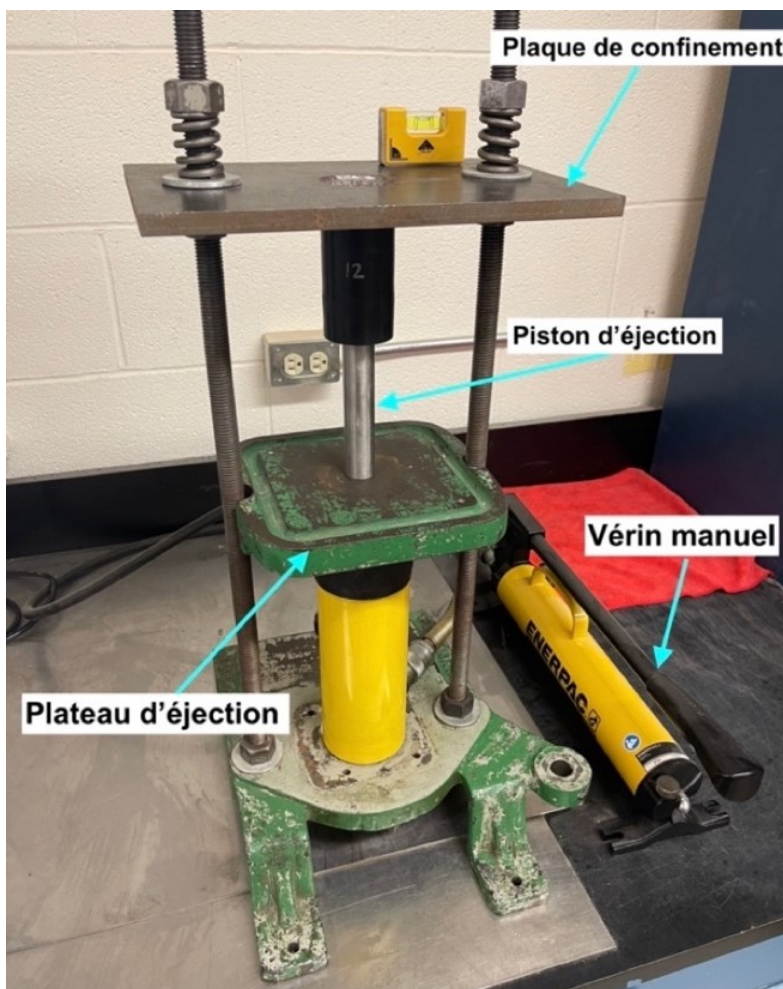


Figure 3.11 – Équipement d'extraction utilisé pour la poussière de roche

3.1.4.2 Bac métallique

Pour le test de simulation de pluie, un type de moule complètement différent a été utilisé. L'objectif du test était de simuler la surface d'une route non revêtue. 6 moules métalliques représentés par des bacs, dont les dimensions sont d'environ 35 cm de long, 25 cm de large et 2 cm de haut, ont été utilisés. L'augmentation de la surface de traitement était importante pour observer la distribution de la calcification. Jusque-là, tous les échantillons avaient un diamètre maximum de 5 centimètres et l'homogénéité n'a été jamais un problème. Les conteneurs métalliques ont facilité le processus d'augmentation de la charge de compactage sans courir le risque d'endommager les moules, comme ce fut le cas lors d'essais sur des moules en acrylique ou en plastique.

Malgré la bonne résistance du récipient métallique, le compactage n'a pas été une tâche simple. Tout d'abord, le compactage était prévu par zones, mais le contenant bougeait beaucoup et la

procédure prenait trop de temps (environ 1 200 coups). Pour cette raison, un support de compactage a été conçu, empêchant le moule de bouger et garantissant la possibilité d'utiliser des marteaux plus puissants. Afin d'obtenir une énergie et une masse volumique similaires aux échantillons de compression, le marteau électrique Kango 950K a été utilisé. Ce compacteur, selon le manuel d'instructions, est capable de produire 975 coups par minute à un taux d'impact de 20 newtons par mètre (Figure 3.12).

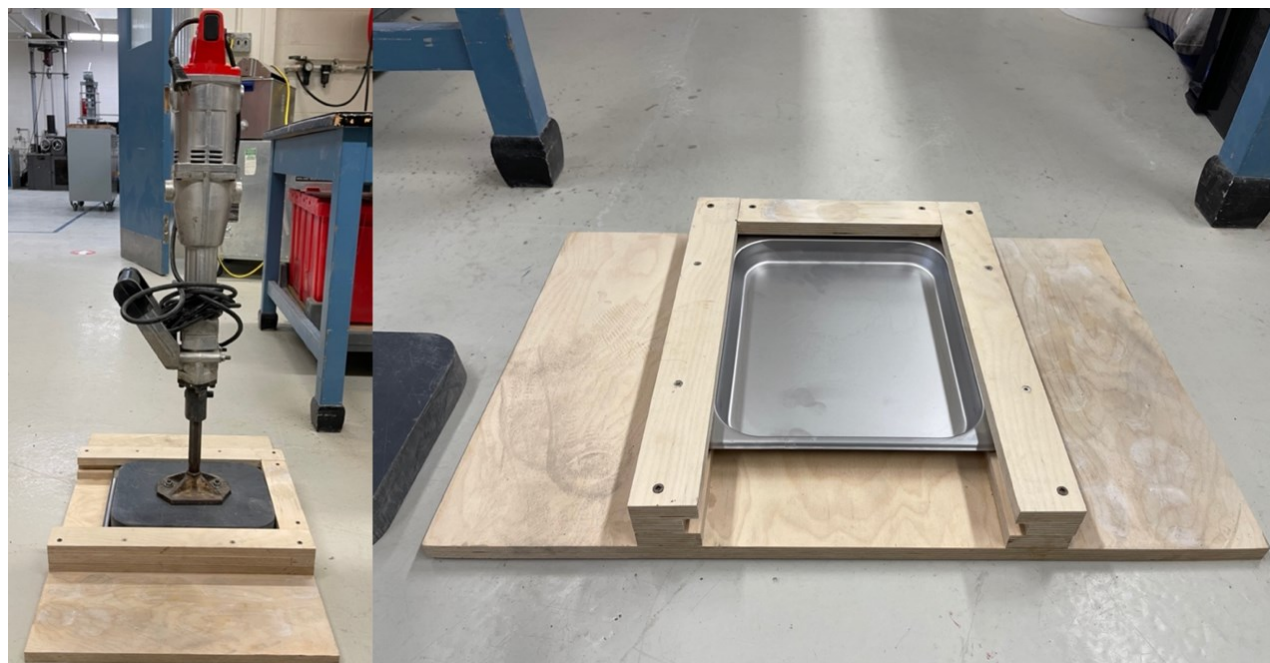


Figure 3.12 – Moule, support de compactage et marteau électrique utilisés

3.1.4.3 Cylindre métallique

Les moules utilisés dans ce projet pour les échantillons de pierre concassée étaient en acier galvanisé. Le choix de ce modèle était dû à sa similitude avec un moule de compactage Proctor et aussi à sa dimension proportionnelle au moule d'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) utilisé pour la poussière de roche. Ces moules ont un diamètre interne de 101,6 mm (4 pouces) et une hauteur de 203,2 mm (8 pouces), exactement deux fois la taille des plus petits moules. Par conséquent, ces moules répondaient également à l'exigence de la norme ASTM D-2166 (2010), selon laquelle la hauteur des échantillons des essais de compression simple doit être égale à 2 ou 2,5 fois leur diamètre (Figure 3.13).

Comme dans le cas précédent, il a fallu adapter le moule pour que les échantillons puissent être extraits sans fissures ni ruptures. Pour ce moule plus grand, il était plus facile de l'adapter, car il avait les deux côtés ouverts. Il était nécessaire d'insérer une seule plaque métallique de même diamètre interne et d'une épaisseur de 7 mm, environ deux fois la taille de la plaque précédente (Figure 3.13). Avec la plaque au fond de l'échantillon, la fuite des particules de sol est évitée, ce qui garantit une extraction sans endommager le fond de l'échantillon.



Figure 3.13 – Moule en acier galvanisée et plaque métallique utilisé pour compacter le MG-20

En raison d'une taille beaucoup plus grande que les échantillons de poussière de roche, il a été également nécessaire d'adapter l'équipement d'extraction. Le vérin manuel et la plaque d'éjection sont restés les mêmes, mais il a fallu utiliser un piston d'éjection plus long et plus épais. De plus, il était nécessaire de fabriquer une plaque de rétention de plus grand diamètre et de la positionner à deux fois la distance de la plaque d'éjection. Ces changements sont visibles sur la Figure 3.14.

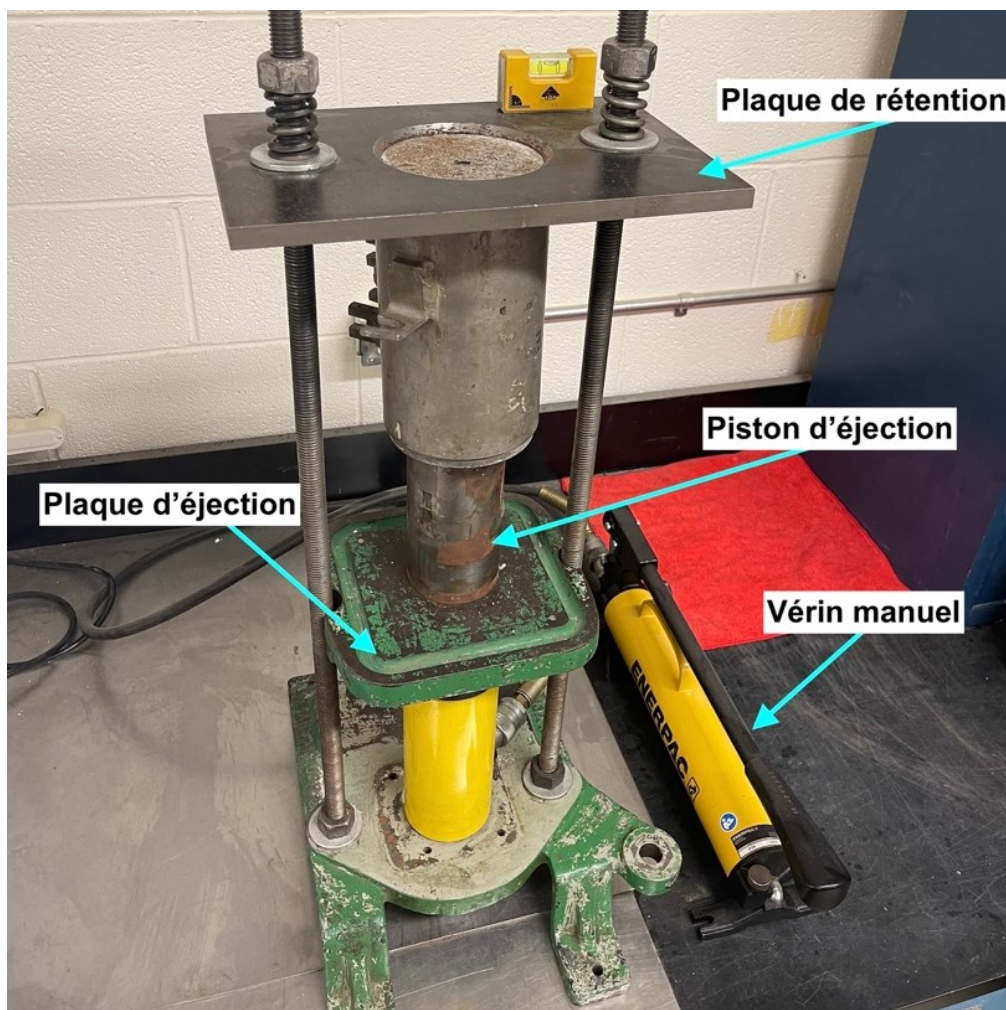


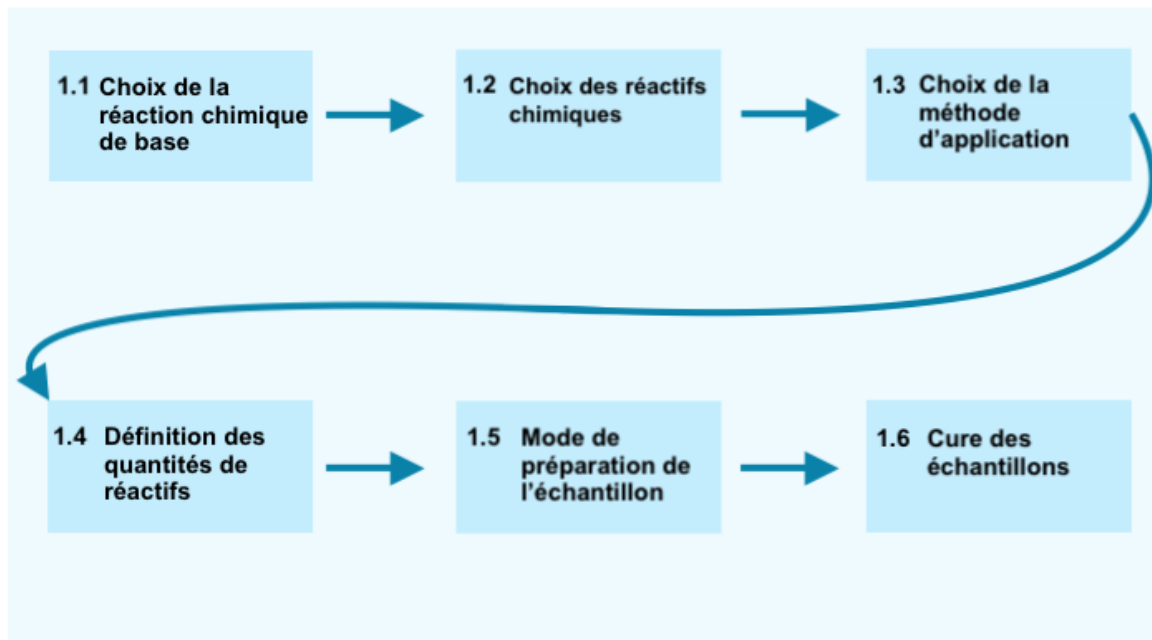
Figure 3.14 – Équipement d'extraction utilisé pour la pierre concassée

3.2 Plan expérimental

Le plan expérimental de ce projet a été conçu dans le but d'optimiser et de caractériser la méthode de préparation de calcification chimique (Figure 3.15). Pour ce faire, il a été divisé en 2 grandes phases : (1) définition du protocole optimal de préparation des échantillons et (2) caractérisation des performances en conditions de dégradations. Chacune de ces phases comporte des sous-étapes pour déterminer le concept de stabilisation par calcification chimique.

PLAN EXPÉRIMENTAL DU PROJET

(1) Définition du protocole optimal



(2) Caractérisation des performances en conditions de dégradations

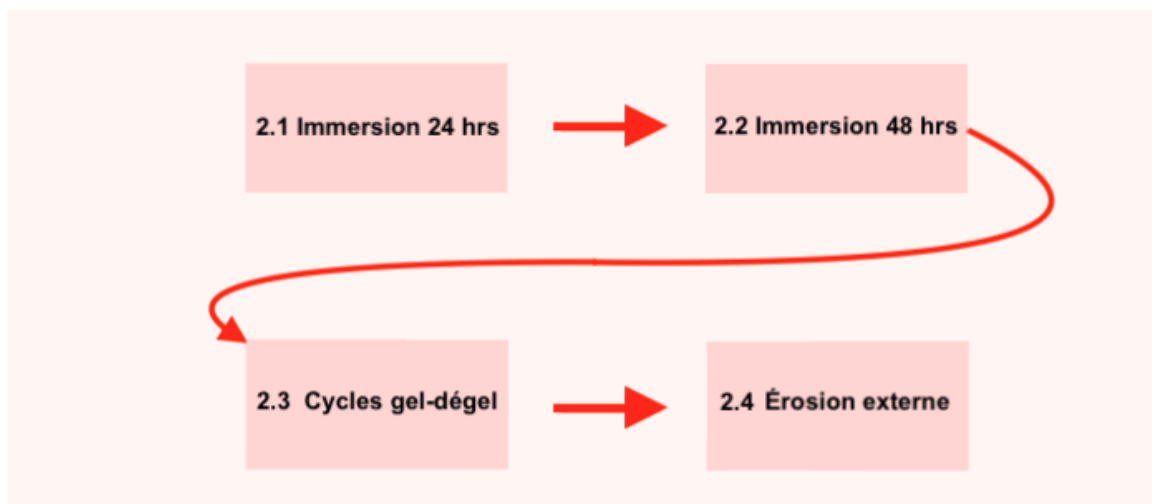


Figure 3.15 – Plan expérimental du projet

Il est important de souligner que, dans les deux phases, l'essai principal pour confirmer la viabilité des sous-étapes était la compression simple. À partir des expériences en série, chaque résultat était crucial pour comprendre les possibilités de la calcification chimique. Que ce soit pour choisir la

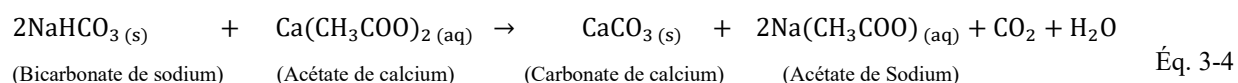
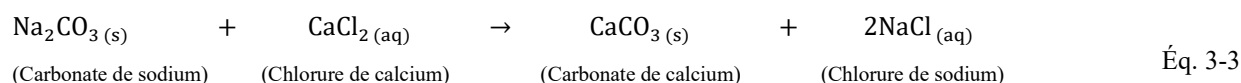
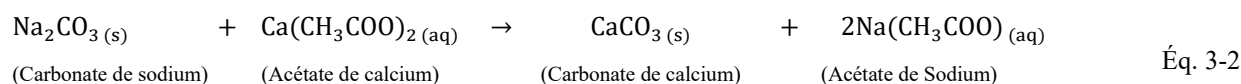
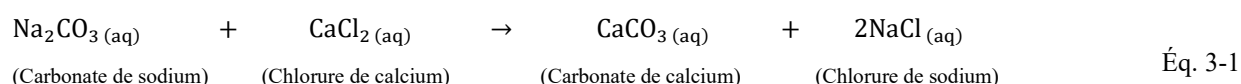
meilleure méthode de malaxage ou définir les quantités de réactifs utilisés, la compression simple a permis de comprendre et, par conséquent, de déterminer les paramètres du protocole optimal. La seule exception est liée à la caractérisation de la performance du sol lorsqu'il est soumis à l'érosion externe, puisqu'un essai de pluie simulée a été réalisé.

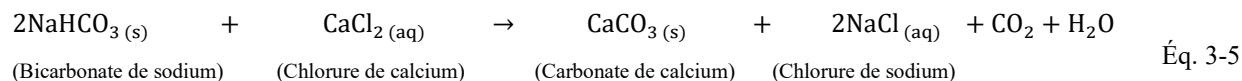
3.2.1 Définition du protocole optimal

Afin d'améliorer la méthode dont les échantillons ont été préparés, 6 étapes susceptibles d'influencer le résultat ont été déterminées. Ensuite, chacun d'eux a été testé plusieurs fois afin de trouver la condition la plus performante. La combinaison des essais plus performantes donne le protocole optimal. Les 6 étapes sont décrites plus en détail ci-dessous.

3.2.1.1 Choix de la réaction chimique de base

Le choix de la réaction chimique de base a consisté en une évaluation de toutes les procédures testées par le groupe de recherche depuis l'idéation du procédé chimique et dont les bases ont été posées par Soundouss El Alaoui, Jean-Louis Zeidan et Elissar Ozeir (Sous-chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). À partir d'une synthèse de ces données, il était possible d'utiliser au moins 5 réactions, toutes basées sur le concept de mélange d'une source de calcium avec une source de carbonates.





Parmi ces 5 possibilités, la recherche a porté sur l'analyse du type de réactif utilisé et généré, la forme d'application et les meilleurs résultats de chaque technique en termes de résistance à la compression. L'équation 1, proposée par Soundouss (Éq. 3-1) n'a pas été prise en compte en raison de la sursaturation des échantillons lors de l'étape d'injection (20 % de la masse de sol) et des résultats de compression inférieurs aux autres réactions. Les solutions proposées dans les équations 2 à 4 avaient un différentiel important, la source calcifiante était dissoute dans de l'eau (ou du vinaigre) et suivie d'une injection égale à la teneur optimale du sol. Le comportement de ces équations est présenté dans la revue de la littérature dans le chapitre 2.3.6.7. En s'appuyant sur la conclusion obtenue par Ozeir (2021), cette recherche doctorale a cherché à comprendre ce qui se passait à l'échelle microscopique dans la réaction la plus performante.

L'ajout d'une solution calcifiante s'est avéré inefficace pour cette condition, car elle ne crée que des conditions de sursaturation de CaCO_3 dans le sol. Les ions calcium présents dans l'acétate de calcium ou le chlorure de calcium ont tendance à précipiter dans des endroits inefficaces, tels que le milieu des pores et les zones de surface, apportant peu de changement structurel. En revanche, l'application de solutions moins concentrées favorise la formation d'une couche aqueuse d'ions Ca^{2+} à la surface des grains, ce qui a mis en évidence la contribution du calcium initialement présent dans le sol. Au contact des ions carbonates, la précipitation commence à générer de petits flocons de carbonate de calcium à proximité des particules de sol. Avec le temps, les flocons s'unissent pour générer des ponts rigides de CaCO_3 (Figure 3.16).

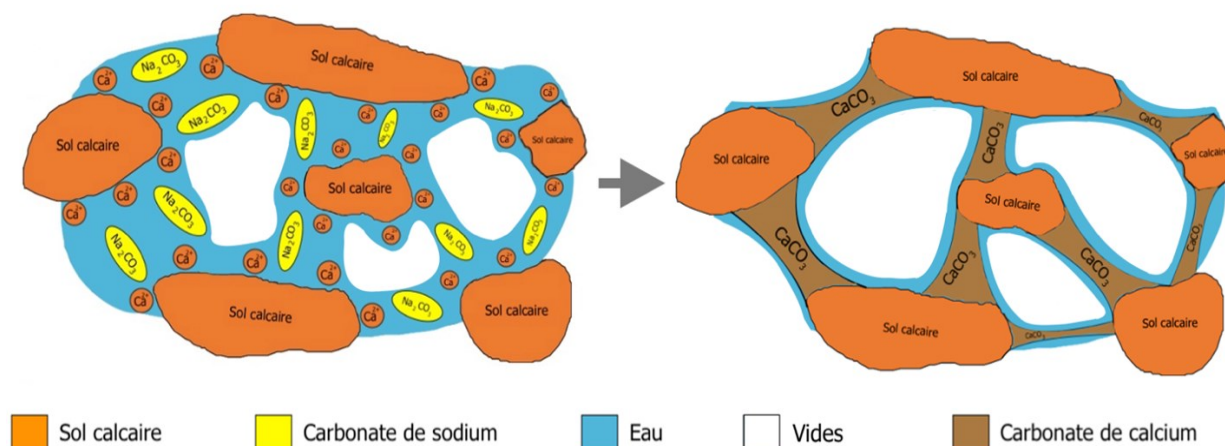


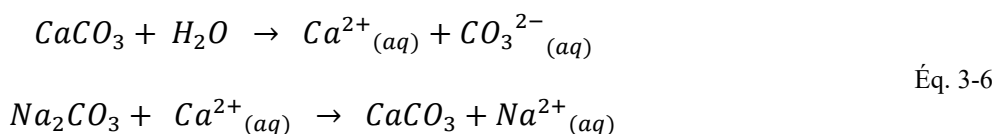
Figure 3.16 – L'évolution des précipitations de carbonate de calcium à l'intérieur du sol

Cette réaction est également stimulée par le pH, confirmant la théorie présentée dans le sous-chapitre 2.3.3.2, selon laquelle une augmentation de la résistance du sol est observée lorsque le pH passe d'acide à basique.

L'étude de la réaction chimique de base nous a permis de comprendre 3 points principaux :

- Le sol calcaire fonctionne comme une excellente source de calcification;
- l'ajout de solution calcifiante crée des conditions de sursaturation en réduisant la rigidité du sol et;
- le milieu réactionnel doit toujours avoir un pH neutre ou alcalin (seule l'eau suffit).

Pour cette raison, aucune des équations présentées précédemment n'a été utilisée dans la présente étude et il a été considéré que le calcium provenait uniquement du sol calcaire.



Cette approche constitue une nouvelle façon d'aborder la calcification chimique.

3.2.1.2 Choix de la méthode d'injection

Après avoir défini la réaction de base, il fallait trouver la manière la plus efficace d'ajouter les éléments chimiques au sol. Pour cela, 3 types de traitement ont été idéalisés, en cherchant à avoir un procédé le plus proche de la réalité d'un chantier (Figure 3.17).

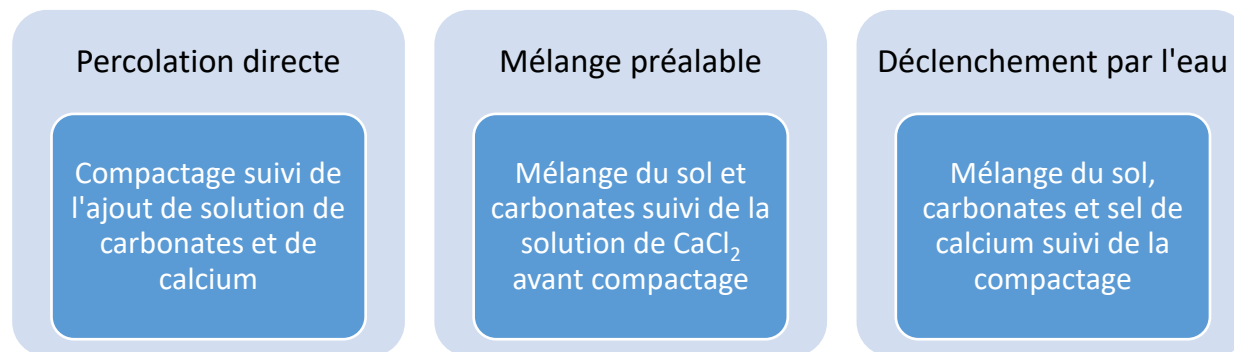


Figure 3.17 – Types de traitement idéalisés

Le traitement par percolation directe est effectué par déversement du liquide de sel de calcium sur l'échantillon compacté. La pénétration du liquide se fait sous l'effet de la gravité, formant un drainage libre entre les pores. Il est important de préciser que le contact de la solution carbonatée avec le sol initie une réaction chimique instantanée, perçue principalement comme un bouillonnement. Cette méthode de préparation des échantillons s'est avérée inefficace car le liquide se concentrait sur la surface de l'échantillon pendant une longue période. Cette caractéristique est due au compactage préalable et à la précipitation immédiate de carbonates de calcium en surface. Des injections à répétitions multiples ont été testées mais elles se sont avérées inefficaces en raison de la longue durée de traitement, en plus d'endommager les échantillons avec une sursaturation (Figure 3.18).

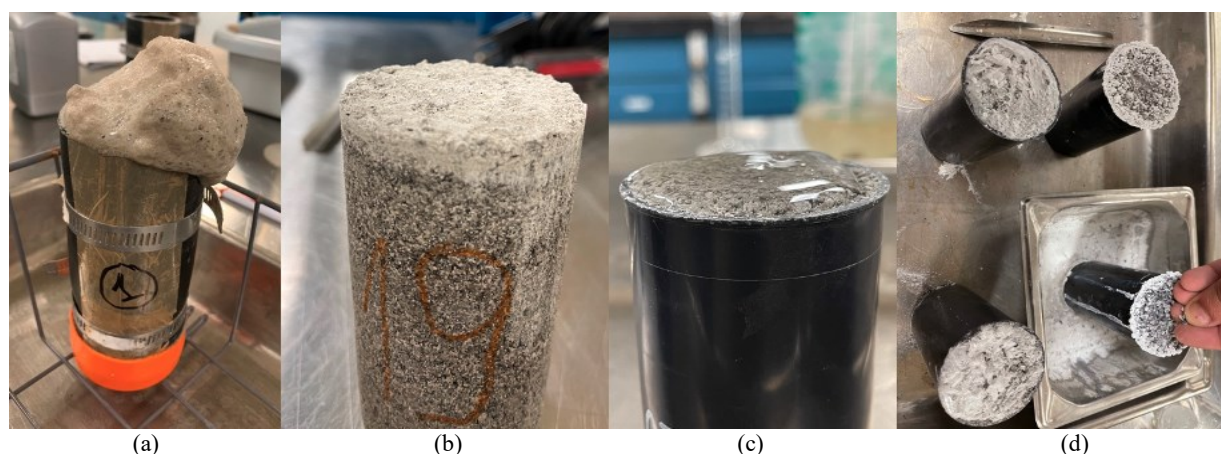


Figure 3.18 – Exemples des problèmes rencontrés lors de l'utilisation de la méthode de percolation : (a) bouillonnement, (b) précipitation concentrée à la surface, (c) blocage de la percolation et (d) dommage à la surface de l'échantillon

Lors des tests de la méthode de percolation, il a été constaté que malgré une précipitation initiale, l'augmentation de la résistance du sol se produisait de façon exponentielle dans les semaines suivantes et non dans les premières minutes de malaxage. Cette particularité a permis d'envisager une variation dans le mode d'application des réactifs, permettant une meilleure répartition des précipités. Ainsi, une injection dite par « mélange préalable » a été conçue, c'est-à-dire un mélange initial de la poussière de roche avec le carbonate de sodium suivi de l'ajout de la solution de sel de calcium en quantité égale à la teneur optimale en eau de compactage. Cette méthode a éliminé les problèmes de percolation ainsi que les précipitations en surface et la distribution était meilleure. L'inconvénient de cette application réside toutefois dans la dépendance à la dissolution du sel de

calcium dans l'eau avant l'application. En pensant aux applications potentielles, la technique se limite à l'utilisation de camions spécifiques pour le mélange et l'arrosage de la solution.

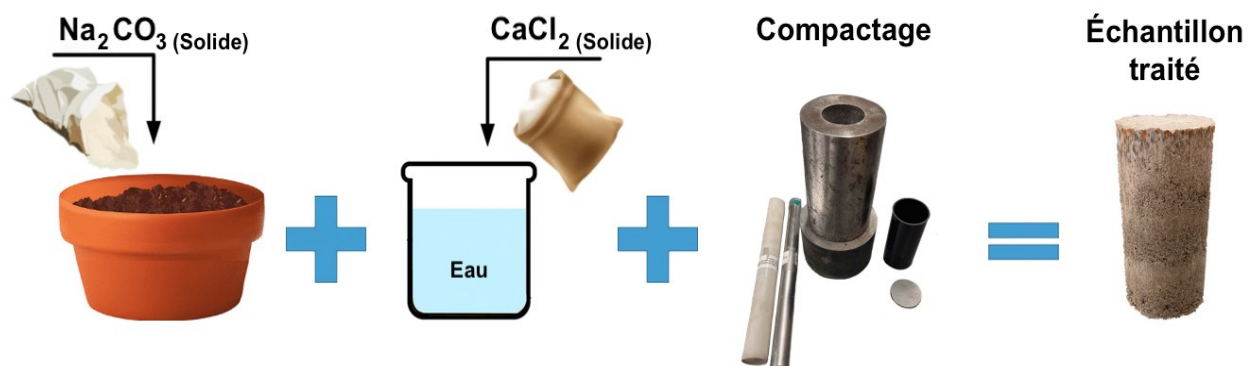


Figure 3.19 – Étapes de l'injection par mélange préalable

L'un des objectifs de cette recherche étant de délivrer un traitement facilement applicable et au plus proche de la réalité d'un chantier routier, la méthode par mélange préalable a été modifiée en considérant l'initiation de la réaction par l'eau. Dans ce protocole, le sol est d'abord complètement séché, assurant l'élimination de toute humidité. Ensuite, il est homogénéisé avec la source de carbonates et également avec du chlorure de calcium, puis, avant de commencer le compactage, de l'eau est ajoutée à un teneur en eau optimale. L'activation de la réaction se produit instantanément, les réactifs étant déjà présents dans le sol favorisent une maximisation de la formation de ponts calcifiés. De plus, cette méthodologie facilite l'introduction de la technique dans l'industrie du génie civil car elle est similaire à l'application de chaux ou de ciment dans les fondations routières, permettant d'utiliser des machines et des équipements similaires.

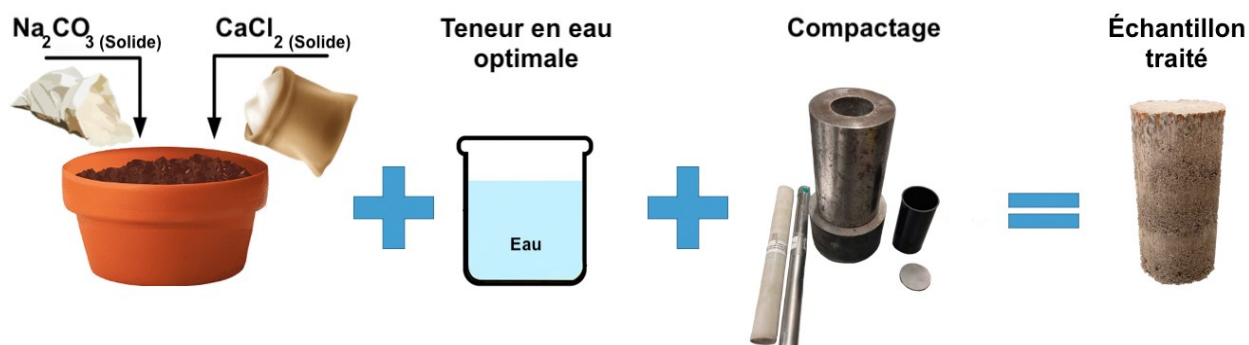


Figure 3.20 – Étapes de la méthodologie de déclenchement par l'eau

3.2.1.3 Méthode de préparation des échantillons

La préparation d'un échantillon traité comprend 3 étapes bien définies : l'injection des réactifs, le moulage et la cure. L'injection a déjà été discutée dans le chapitre précédent, et la cure sera discutée plus en détail dans le chapitre suivant. Le moulage sera l'aspect principal de cette section et sera également divisé en 3 étapes : préparation du sol, compactage et démoulage.

3.2.1.3.1 Préparation du sol

L'étape de préparation du sol commence par le séchage de la poussière de roche, ou MG-20, pendant au moins 12 heures. Le sol est mis dans un contenant métallique en quantité nécessaire pour être utilisé lors de la journée de travail suivante. Il est placé au four à une température de 60 degrés Celsius et retiré une fois le temps écoulé. Après avoir éliminé toute l'humidité, le sol est séparé en récipients et en quantités approximatives pour chaque couche de sol à compacter. Ensuite, l'ajout de réactifs au sol commence selon le protocole de déclenchement par l'eau. Il est important de souligner que les réactifs sont ajoutés par couche, pour éviter de démarrer la réaction dans le contenant de malaxage. Après mélange à sec, le sol est humidifié, mis en place dans le moule et compacté.

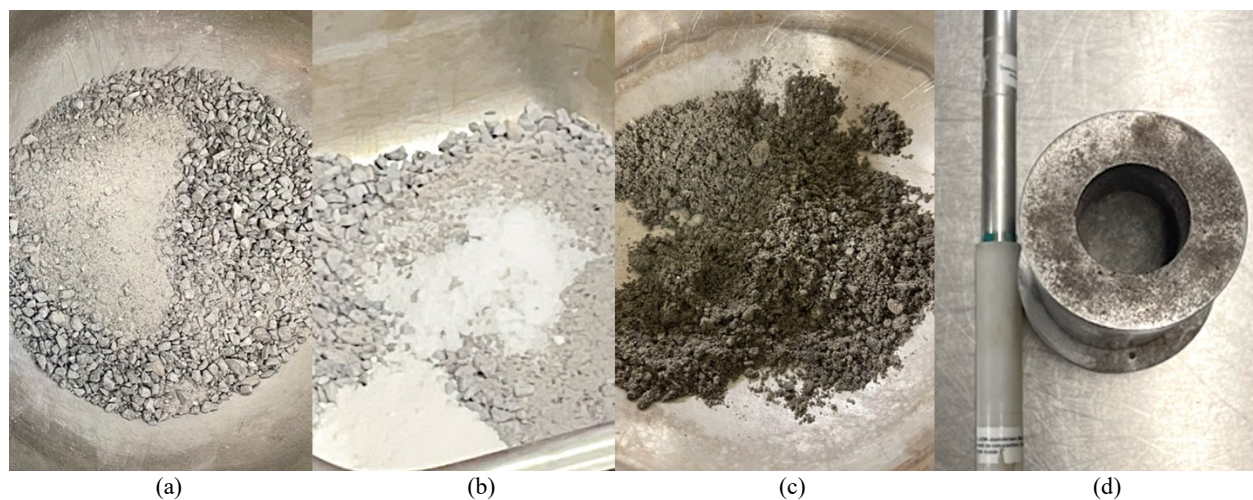


Figure 3.21 – Séquence de préparation du sol : (a) Sol juste après séchage; (b) Ajout de réactifs; (c) malaxage et humidification; (d) sol prêt à être compacté

3.2.1.3.2 Compactage

Le compactage est une étape très importante dans la préparation des échantillons car il densifie le sol traité à partir d'un transfert d'énergie et réalise également le moulage dans le moule ABS. Ce

moule étant très petit, il a fallu concevoir un modèle à compaction réduite capable de reproduire la même énergie que le Proctor modifié.

La première étape a consisté à fabriquer une structure capable d'empêcher le déplacement de l'échantillon lors de la série de coups. Une structure de retenue en acier a été pensée, garantissant que le moule est complètement enveloppé. Une base en acier a été ajoutée à l'ensemble pour éliminer les vibrations de la table ou de l'établi. Pour compléter l'ensemble, un marteau en acier inoxydable a également été fabriqué, un cylindre de 30 centimètres de long et de 2,5 centimètres de diamètre et pesant environ 1,5 kg. Un tube blanc accompagne le marteau afin de contrôler la direction du coup et d'aider à établir la hauteur de chute (28,1 cm). Un plan avec les dimensions exactes de fabrication a été ajouté à l'annexe B et la Figure 3.22 montre les équipements de compactage fabriqués par l'équipe du projet.



Figure 3.22 – Outils de compactage

La deuxième étape a consisté à calculer le nombre de coups. En utilisant une corrélation avec la norme ASTM 1557, un tableau Excel a été créé sur la base de l'équation de l'énergie de compactage :

$$E = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V}$$

E = Énergie de compression spécifique, par unité de volume ;

P = Poids du marteau (kg) ;

h = hauteur de chute du marteau (cm) ;

N = Nombre de coups par couche ;

n = Nombre de couches ;

V = Volume de sol compacté (cm³).

À partir de ce tableau, il a été possible d'interpoler le nombre de coups avec le nombre de couches afin de trouver l'énergie la plus proche de celle du Proctor modifié, soit environ 2 700 kN•m/m³. Le résultat trouvé pour la poussière de roche a été un compactage en 3 couches et 46 coups pour chaque couche. Pour la pierre concassée, le résultat a été un compactage en 3 couches et 75 coups pour chaque couche. Il est important de mentionner qu'une adaptation a été faite au compactage Proctor de cette étude de 5 couches à 3 couches, en raison de la très faible épaisseur des échantillons. De ce fait, le nombre de coups a été augmenté pour reproduire la même énergie de compactage. La détermination de la valeur de la teneur eau n'était pas nécessaire en raison de la détermination déjà effectuée dans les tests de caractérisation du sol et des réactifs, qui a conduit à une valeur de 5,9 % pour la teneur en eau optimale.

À partir des nombreuses répétitions, il a été possible de déterminer expérimentalement la quantité approximative de sol utilisée pour chaque échantillon. La valeur de 450 g était une valeur souvent répétée dans les tests de validation. Cela facilitait donc la recette de préparation du sol, puisqu'il suffisait de séparer trois (3) couches de 150 g (Poussière de roche plus réactifs). À partir des pourcentages optimaux définis avant, il a été possible de calculer la quantité nécessaire pour chaque couche. Les masses exactes par couche pour préparer un échantillon sont les suivantes :

- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| • Poussière de roche : 133 g | • Pierre concassée : 1027 g |
| Carbonate de sodium : 13.3 g | Carbonate de sodium : 102.7 g |
| Chlorure de calcium : 2.7 g | Chlorure de calcium : 20.5 g |
| Eau : 8.9 ml | Eau : 62 ml |

Cette définition a apporté une grande efficacité au projet, réduisant considérablement la quantité de sol et de réactifs gaspillés.

3.2.1.4 Choix des réactifs

Le choix des réactifs repose sur l'équation définie dans le chapitre précédent. Il fallait trouver les produits qui offraient les résultats les plus performants, d'un point de vue technique et économique.

Avec une offre variée sur le marché, l'achat de plusieurs de ces produits a commencé afin que des comparaisons puissent être faites.

Le sol

L'équation de base a défini qu'une source calcaire était nécessaire pour que la réaction aille jusqu'à son terme. Par conséquent, l'équipe a recherché des sols qui avaient une teneur plus élevée en calcite, c'est ainsi que nous sommes arrivés à la poussière de roche. Ce sont des sols faciles à trouver au Québec, principalement dans la région de Montréal. En traçant un rayon d'environ 30 kilomètres, il est possible de trouver près de 40 carrières (fermées ou en exploitation), c'est-à-dire que la région regorge de ce type de roche (Figure 3.23).

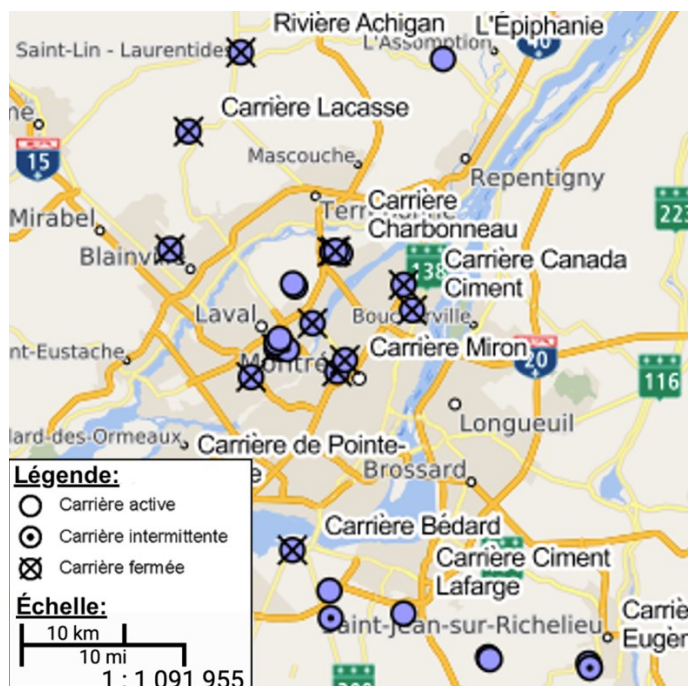


Figure 3.23 – Carrières de calcaire de la région du Grand Montréal (MRNF - Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023)

En raison de la forte concentration en minéraux calcaires, le sol est devenu l'un des principaux réactifs de la calcification. Pour cela, il était nécessaire de comprendre le comportement de la réaction en utilisant des sols avec des concentrations variées de calcite. Dans les essais, les poussières de roches de la marque Bomix ont été utilisées, en raison de la facilité d'achat, du bas prix et de la disponibilité dans plusieurs magasins de la région de Montréal. La concentration des trois types de poussière de roche a été présentée dans des tests minéralogiques du sous-chapitre

3.1.1.1. Pour confirmer les meilleures performances, trois séries de trois échantillons ont été préparés avec une cure de 30 jours. Les détails de ces tests seront donnés dans le chapitre 3.2.1.5 de définition des quantités des réactifs.

La source de carbonates

Le carbonate de sodium est un élément chimique facilement trouvable sur le marché. Les marques Arm&Hammer et Solvay Light² ont été choisies pour l'analyse comparative. La première marque est plus commerciale. La deuxième marque est liée à une production plus industrielle. Il s'agit d'un fournisseur de grandes industries telles que l'électronique, l'agroalimentaire, l'agriculture, l'automobile, l'aéronautique, la santé ou la construction. Afin de comprendre le comportement des produits, une série d'essais a été réalisée afin d'évaluer la résistance à la compression simple en fonction du temps de cure. Un total de 36 échantillons, 3 échantillons pour 6 périodes de cure (entre 2 et 90 jours) pour chacune des deux marques, a été testé. Le résultat de cette évaluation a permis de sélectionner le produit qui serait utilisé au cours du projet.

Tableau 3.5 – Propriétés des échantillons testés dans l'évaluation des deux types de Na_2CO_3

Type	Réactifs variables	Recette fixe	Cure	Échantillons
Carbonate de sodium	Na_2CO_3 Arm & Hammer – 10%	Poussière 1 – 133g CaCl_2 – 2% L'eau – 5.9%	2 jours	E202, E206 et E207
			7 jours	E203, E204 et E205
			15 jours	I84, I85 et I86
			30 jours	Série 1 : I99, I100 et I101 Série 2 : I172, I173 et I174
			60 jours	I32 et I62
			90 jours	I114, I59 et I34
	Na_2CO_3 Solvay light – 10%	Poussière 1 – 133g CaCl_2 – 2% L'eau – 7.3%	2 jours	E193, E191, E184 et E185
			7 jours	E196, E195, E180 et E181
			15 jours	E197, E198 et E199
			30 jours	I68, I66 et I67
			60 jours	E239, E241 et E242
			90 jours	I132, I133 et I134

² Solvay Light a une granulométrie plus fine, nécessitant plus d'eau pour atteindre un compactage optimal. D'après les tests de compactage, la valeur optimale de 7,3 % a été trouvée lorsque ce réactif a été ajouté.

Lors des tests d'évaluation des réactifs, il a été constaté que l'association eau, carbonate de sodium et sol calcaire produisait une réaction exothermique importante, capable d'assécher le sol en quelques minutes.

Le chlorure de calcium

Du CaCl_2 a été ajouté au traitement afin d'offrir au sol des caractéristiques hygroscopiques plus durables. Avec une humidité maintenue constante plus longtemps, il est possible de compacter le sol sans pertes majeures et ainsi obtenir une cure plus efficace de l'échantillon. Pour comprendre ce comportement, 2 tests de température ont été réalisés avec la poussière de roche 3. Ils consistaient en l'ajout de carbonate de sodium dans 2 échantillons, avec un complément en CaCl_2 dans un des deux seulement. Ensuite, de l'eau a été ajoutée, suivie d'un malaxage des deux échantillons. Les températures ont été enregistrées durant toutes ces étapes, avec des intervalles de 10 minutes, jusqu'à un total de 70 minutes. Après avoir défini ces paramètres, l'évaluation de la quantité de chlorure de calcium à considérer dans la recette optimale est présentée dans le chapitre 3.2.1.5. Pour les tests, seul le chlorure de calcium *Fisher BP 510-500* a été utilisé en raison d'un stock élevé et de la facilité d'approvisionnement.

3.2.1.5 Quantités de réactifs

Les quantités de chaque réactif ont été initialement définies sur la base des recherches antérieures, 10% de précipités étant considéré comme la quantité idéale pour une calcification satisfaisante (Haouzi, 2019; Ozeir, 2021; Zeidan, 2021). Considérant que les réactions chimiques dans cette recherche se produisent à un ratio de 1: 1, la valeur standard de départ était de 10% pour la source de carbonate. La validation des pourcentages de réactifs a ensuite été réalisée à partir d'une comparaison expérimentale.

L'équation de base a montré les quatre principaux éléments de conception : Sol, eau, carbonate de sodium et chlorure de calcium. La stratégie de définition des pourcentages des réactifs a été basée sur la variation d'un des éléments et la fixation des trois autres.

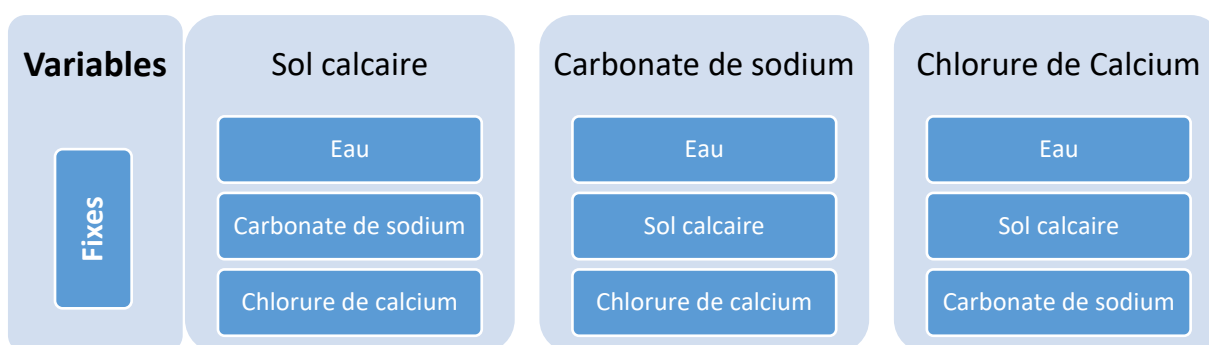


Figure 3.24 – Stratégie de définition des quantités de réactifs

Le premier paramètre à analyser était le sol, car il s'agit de l'élément le plus abondant dans le processus. La question à laquelle il fallait répondre dans cette analyse était de savoir si la variation de la concentration en minéraux calcaires influence directement la résistance du sol. Pour cela, le pourcentage de 10% pour le carbonate de sodium et 2% pour le $CaCl_2$ a été fixé, puis 3 échantillons ont été préparés pour chaque type de sol (Poussière de roche 1, 2 et 3). Les échantillons ont été laissés en cure pendant 30 jours à température ambiante. Ensuite, ils ont été testés à l'aide d'essais de compression simple, en comparant les résistances maximales obtenues.

Tableau 3.6 – Propriétés des échantillons dans l'évaluation de différents types de sol

Type	Réactifs variables	Recette fixe	Cure	Échantillons
Sol calcaire	Poussière 1	Na_2CO_3 – 10% $CaCl_2$ – 2% L'eau – 5.9%	30 jours	I172, I173 et I174
	Poussière 2			I130, I131 et I153
	Poussière 3			I175, I176 et I177

Le deuxième paramètre analysé était le carbonate de sodium, soit le réactif chargé de représenter la source de carbonates. Dans ce deuxième cas, nous avons cherché à définir le pourcentage de Na_2CO_3 avec la meilleure performance, c'est-à-dire le résultat mécanique le plus élevé en fonction de la quantité de produit ajouté. L'analyse expérimentale a été réalisée à partir d'essais de compression simple effectués sur des échantillons avec 5%, 7%, 10%, 12% et 15% de carbonate de sodium. Pour chacun des pourcentages, 3 échantillons de poussière 1 ont été préparés, tous selon la procédure de préparation standard (Déclanchement par l'eau) avec 2% de $CaCl_2$ et 5.9% d'eau. La cure a été effectuée à température ambiante au laboratoire pendant 21 jours. Après avoir terminé la période, des tests de compression simples ont été effectués.

Tableau 3.7 – Propriétés des échantillons testés dans l'évaluation de la concentration de Na_2CO_3

Type	Réactifs variables	Recette fixe	Cure	Échantillons
Carbonate de sodium	Na_2CO_3 – 5%	Poussière 1 – 133g CaCl_2 – 2% L'eau – 5.9%	21 jours	I69, I70 et I71
	Na_2CO_3 – 7%			I72, I73 et I74
	Na_2CO_3 – 10%			I75, I76 et I77
	Na_2CO_3 – 12%			I78, I79 et I80
	Na_2CO_3 – 15%			I178, I179 et I80

Le chlorure de calcium a été la dernière variable analysée, en raison de son rôle plus secondaire dans le processus de calcification. L'analyse consistait à trouver le pourcentage le plus efficace à ajouter aux échantillons utilisés dans le traitement, c'est à dire, la plus petite quantité de réactif qui offre les meilleures performances. Les échantillons ont été préparés avec les valeurs fixes de 10% de carbonate de sodium et 5,9% de l'eau, puisque le chlorure de calcium variait dans les concentrations suivantes 1%, 2%, 5% et 7,5%. Après 30 jours de durcissement à température ambiante de laboratoire, les échantillons ont été testés à l'aide de tests de compression simple.

Tableau 3.8 – Propriétés des échantillons testés dans l'évaluation de la concentration de CaCl_2

Type	Réactifs variables	Recette fixe	Cure	Échantillons
Chlorure de calcium	CaCl_2 – 1%	Poussière 2 – 133g Na_2CO_3 – 2% L'eau – 5.9%	21 jours	I199, I200 et I201
	CaCl_2 – 2%			I186, I187 et I188
	CaCl_2 – 5%			I189, I190 et I191
	CaCl_2 – 7.5%			I192, I193 et I194

3.2.1.6 Cure des échantillons

La cure dans la calcification chimique a des caractéristiques similaires à celle d'un béton, garantit l'intégrité et le gain de résistance des échantillons pendant la période de maturation et de durcissement. Cependant, l'hydratation constante, très courante dans le béton, est remplacée dans le cas présent par l'action du CaCl_2 . Ce dernier contrôle la température et prolonge la présence d'eau à l'intérieur des échantillons. En plus de l'analogie avec le béton, il fallait insérer la notion de précipitation des carbonates de calcium dans processus de cure. La vitesse de formation et la quantité de précipités sont des facteurs important à l'étape de durcissement. Une définition exacte des paramètres de cette procédure était donc essentielle pour la faisabilité de la recherche.

Les études antérieures menées par l'équipe de calcification chimique ont défini que l'étape de cure doit avoir lieu dans une chambre chaude. La bibliographie (chapitre 2.3.4.2.1) indique également

la valeur de 45°C ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) comme la température idéale pour la formation de précipités de calcite dans les plus brefs délais, dans la meilleure qualité et dans la plus grande quantité. Malheureusement, cette méthode de cure n'a pas de viabilité pratique malgré les bons résultats au laboratoire. L'application d'une température constante et élevée sur chantier est difficile, à un coût élevé et il serait impensable de le faire sur plusieurs kilomètres voire centaines de kilomètres d'une route. Cependant, pendant certaines périodes de l'année (été), il est possible d'atteindre ou même de dépasser cette température sur le terrain, ce qui serait intéressant pour générer des précipités et des résistances dans un laps de temps plus court. Cependant, durant la période hivernale, l'application de la technique est ralentie en raison des températures très basses et la cure serait assez lente. Tout comme pour le béton, des études plus approfondies seraient nécessaires pour concevoir des additifs capables d'accélérer cette réaction en hiver.



Figure 3.25 – Étape de cure thermique ($45^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) du traitement de calcification chimique

Après avoir analysé la dernière méthode, nous avons cherché à comprendre le comportement des échantillons après un durcissement sans aucune source de température supplémentaire. Dans une nouvelle recherche bibliographique, nous avons identifié la possibilité de transformer la vaterite en calcite à 20°C après une période de synthèse plus longue. Dans les premières heures de réaction, les minéraux prédominants sont la vaterite et après 5 jours la phase calcite commence à prédominer dans le milieu (sous-chapitre 2.3.4.2.1). Ces informations étaient essentielles pour l'optimisation

de la recherche. Ainsi, une nouvelle série de tests expérimentaux a commencé en comparant la cure dans la chambre chaude (Figure 3.25) et la cure à température ambiante du laboratoire (Figure 3.26).

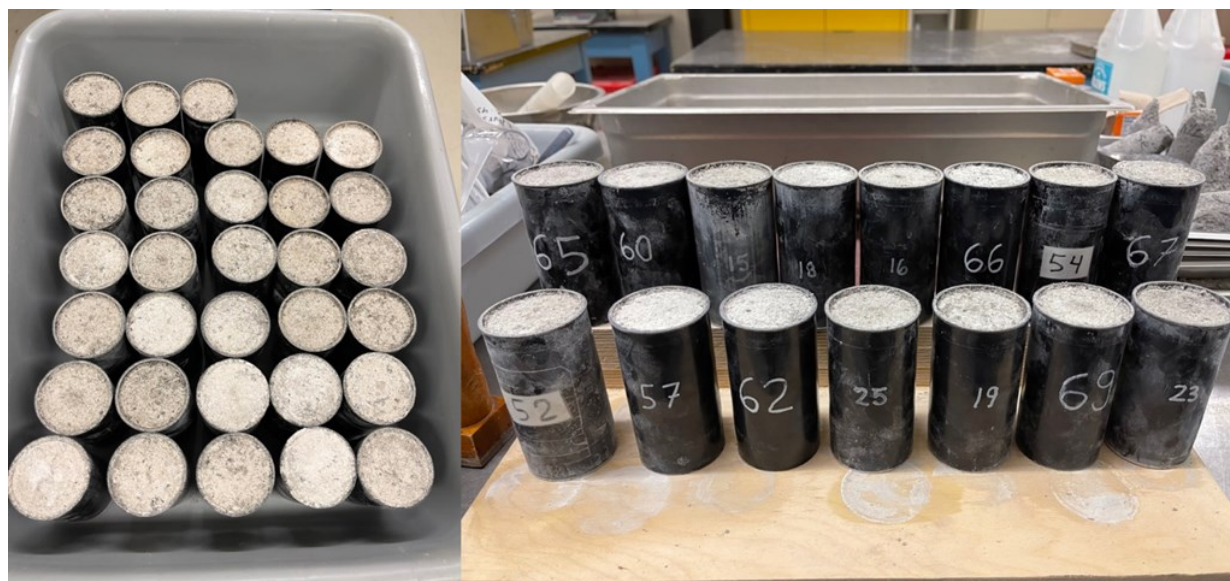


Figure 3.26 – Exemple de disposition des échantillons dans la cure à température ambiante

Les échantillons ont été préparés exactement comme indiqué dans les chapitres précédents et laissés encore moulés tout au long du temps établi, seule la surface supérieure est restée exposée à l'atmosphère, tout comme avec une couche de sol à l'extérieur. Le plan de l'essai consistait en préparer 10 échantillons divisés en 5 séries, cure au four à 2 et 7 jours et cure à température ambiante à 2, 7 et 15 jours (Tableau 3.9).

Tableau 3.9 – Propriétés des échantillons testés dans l'évaluation du lieu de cure

Type	Recette fixe	Lieu	Cure	Échantillons
Lieu de cure	Poussière 2 – 133g Na_2CO_3 – 2% L'eau – 5.9% CaCl_2 – 2%	Four 45°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)	2 jours	E167 et E168
			7 jours	E151 et E152
		Température ambiante (22 $\pm$ 1°C)	2 jours	E169 et E170
			7 jours	E132 et E131
			15 jours	E135 et E136

À ce stade du projet, il a été observé qu'il était possible d'obtenir des résistances similaires dans des cures plus longues à température ambiante au laboratoire (22 $\pm$ 1°C).

La somme de chacune de ces étapes de préparation des échantillons a conduit à la formation de la recette optimale pour la calcification chimique des sols. Les résultats de chacune de ces modifications seront présentés dans le Chapitre 4 de cette thèse.

3.2.2 Caractérisation du sol après traitement

Après avoir défini un protocole optimal de préparation des échantillons, une évaluation du comportement mécanique du sol traité a été réalisée. Il a ainsi été imaginé d'effectuer les tests directement après la période de cure des échantillons, afin de savoir comment le sol se comporte à l'état initial et sans les effets externes de la nature. Après avoir déterminé les caractéristiques et les propriétés du sol « post-traitement », il a été décidé de simuler des conditions proches des situations réelles. Pour cela, 3 types de conditions de dégradation des échantillons ont été pensées : cycles gel-dégel, immersion et pluie intense simulée. Afin de pouvoir évaluer ces échantillons après dégradation, le test de compression simple a été choisi en raison de la facilité d'exécution et des résistances élevées des échantillons.

3.2.2.1 Compression Simple

Dans le contexte de cette étude, des tests de compression simple ont été effectués conformément à la norme ASTM D2166. Cet essai mécanique permet de tester rapidement un grand nombre d'échantillons pour établir une base de données. Il est important de souligner que l'évolution de la résistance des échantillons a été plus importante que prévu, rendant impossibles les essais de cisaillement direct ou triaxial, car les cellules supportaient de très faibles charges. D'autres tests courant dans les essais routiers, comme des essais cycliques et le CBR auraient pu être réalisés, mais compte-tenu du grand nombre d'essais envisagés, le choix s'est porté vers la compression simple afin de déterminer le traitement optimal et l'influence des différents paramètres.

Au cours de cette phase d'essais, nous avons souvent transféré les échantillons du laboratoire de géotechnique au laboratoire de structures en béton pour bénéficier de presses de plus grandes capacités.

a) Préparation

Après l'étape de démoulage, les échantillons ne peuvent pas être testés directement en raison des imperfections existantes sur leurs surfaces. En effet, les échantillons doivent présenter deux

surfaces planes et parallèles afin d'être placés entre les plateaux de la presse mécanique pour que la charge soit répartie uniformément. En s'assurant de cette condition, il a été possible de réduire les risques de rupture causée par la concentration de contraintes. Une petite élévation ou un grain mal réparti à la surface de l'échantillon suffit à compromettre l'ensemble du test.

Les tentatives initiales pour réaliser le surfaçage ont été réalisées avec du plâtre et par limage. Le premier produit n'a pas bien fonctionné en raison du durcissement rapide de la pâte et de la difficulté à mouler la surface. Le limage n'a pas non plus atteint de bons résultats aussi à cause de la granulométrie. Si une particule plus grossière apparaissait dans le chemin de coupe, il était nécessaire de répéter le processus, par conséquent certains échantillons étaient perdus avec cette approche. Après ces tentatives infructueuses, l'équipe a trouvé que le soufre en poudre était la meilleure option. Il s'agit d'un produit nécessitant moins de temps de préparation et avec un moulage plus facile. La préparation consiste à faire fondre le produit à une température d'environ 130°C. Dès que le soufre atteint une consistance liquide, il doit être ajouté avec l'une des faces de l'échantillon dans un moule d'une hauteur de 20 mm et d'un diamètre de 60 mm. Après quelques minutes, le soufre va adhérer et durcir sur l'échantillon en formant une plaque lisse et rigide. Ensuite, la procédure est répétée à l'autre extrémité de l'échantillon. Une fois le surfaçage terminé, il est important d'identifier l'échantillon avec le numéro du moule pour éviter les problèmes liés au grand nombre d'essais réalisés.

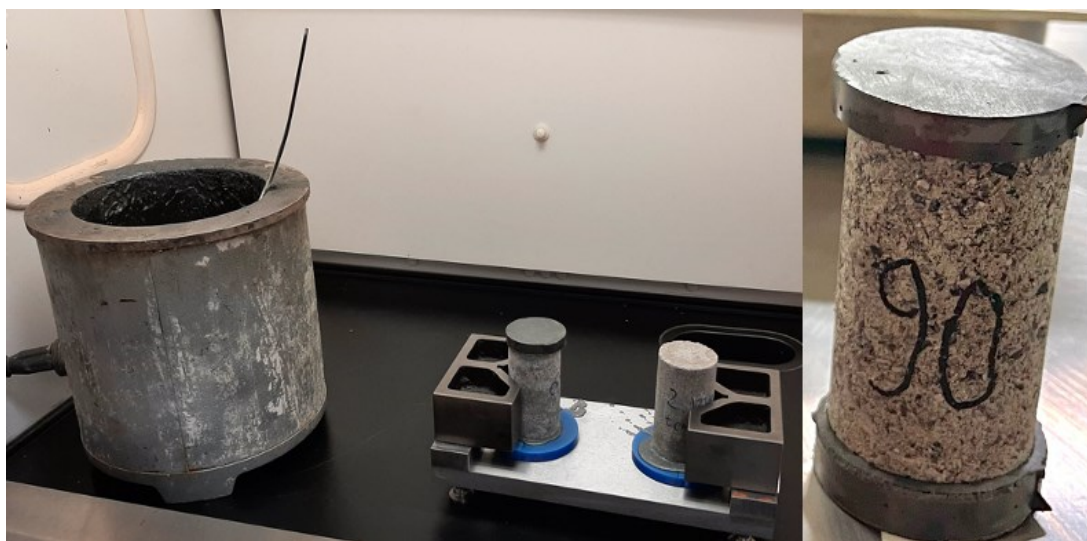


Figure 3.27 – Procédure de préparation des échantillons pour le test de compression simple

b) Banc d'essai

Une fois les échantillons identifiés et surfacés, il est temps de définir l'équipement d'essai, à partir d'une estimation des résistances attendues en fonction du temps de cure, des conditions de dégradation et du type de sol. Cette étape est importante en raison de la capacité des cellules de charge de chaque presse. Il est ainsi essentiel d'avoir la cellule appropriée pour éviter de l'endommager ou de l'arrêter pendant l'exécution des essais. Le laboratoire dispose de deux presses à compression simple, la presse ELE (Figure 3.28a) et la presse Instron (Figure 3.28b). La première a une cellule de charge de 10 000 livres et la deuxième une cellule de 22 000 livres, ces capacités sont 24 MPa et 50MPa, respectivement, pour la poussière de roche. Dans les cas où la limite de la presse Instron a été dépassée, l'équipe a eu recours à la presse à compression du laboratoire de structure (presse Amsler), car elle peut atteindre jusqu'à 100 000 livres. L'utilisation de cette presse beaucoup plus grande a eu lieu principalement pour les échantillons de pierre concassée et aussi pour les échantillons de poussière de roche au-dessus de 50 MPa, pour le cas des échantillons plus petits une adaptation a été nécessaire (Figure 3.28c).

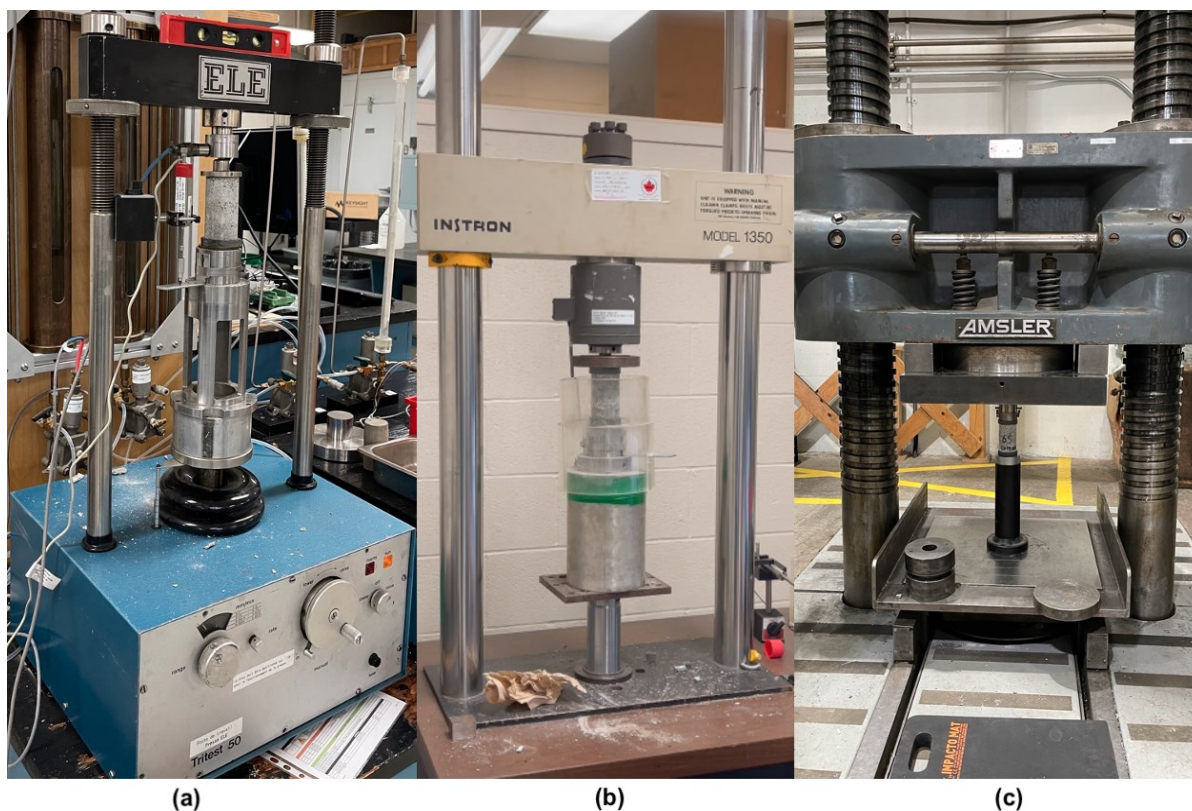


Figure 3.28 – Chacune des presses utilisées lors des essais de compression simple : (a) ELE, (b) Instron et (c) Amsler

Après avoir défini la presse idéale, l'échantillon est positionné dans la zone de déformation, le capteur de déplacement est ajusté, la vitesse de déformation est choisie et la cellule de charge est branchée, comme le montre la Figure 2.9. La machine est alors mise en marche et la charge est appliquée de bas en haut par un piston. Pour les presses Instron (Figure 3.29b) et ELE (Figure 3.29a), la cellule de charge lance l'acquisition des données et les transfère automatiquement vers un ordinateur connecté à côté. Les résultats sont enregistrés dans un cahier ou une feuille de calcul Excel et présentés en fonction de 3 paramètres : la durée du test (secondes), le déplacement vertical (millimètres) et la force (Newton). Le test est terminé après avoir observé sur la courbe que la résistance a atteint son maximum (même avec des fissures visiblement exposées, certains échantillons n'ont pas atteint leur maximum). Dans la presse Amsler, le processus était plus manuel, l'application de la force se faisait par des commandes hydrauliques et l'acquisition des données se faisait en observant le manomètre (Figure 3.29c).

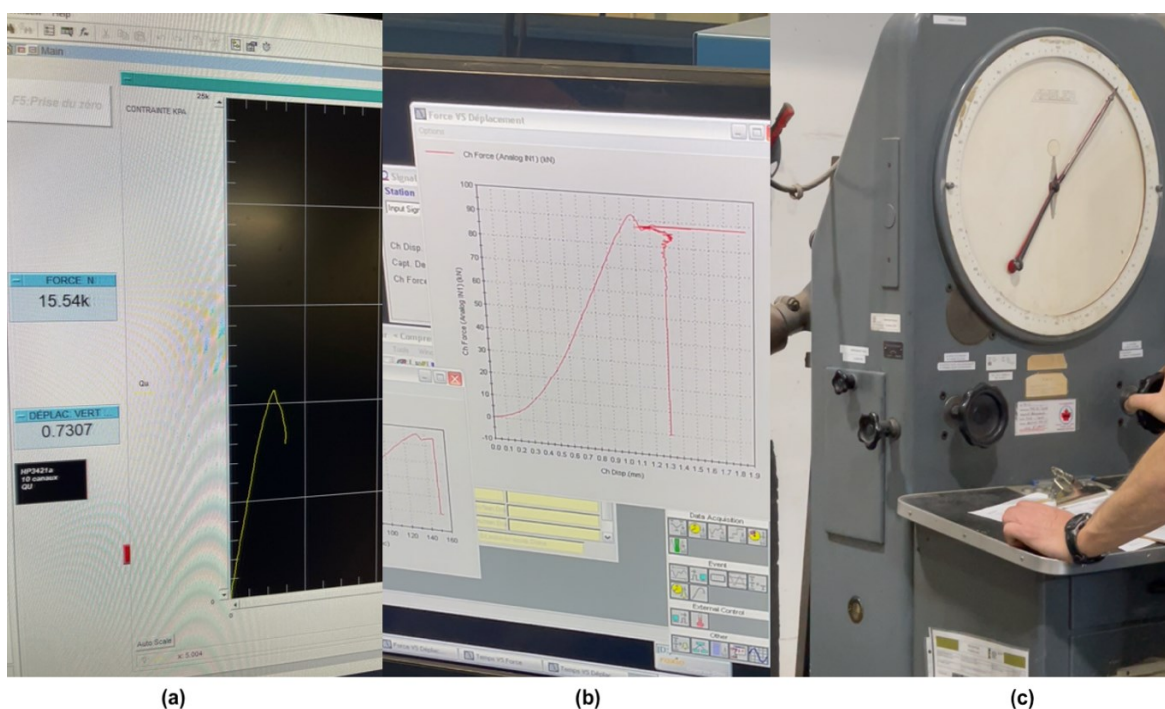


Figure 3.29 – Méthode d'acquisition des données pour chacune des presses disponibles : (a) ELE, (b) Instron et (c) Amsler

c) Résultats

L'enregistrement automatique de ces essais (presse ELE et Instron) était basé sur une combinaison de la durée de l'essai, de la déformation de l'échantillon et de la force appliquée. À partir de la

charge maximale appliquée (Newton) sur la surface circulaire de l'échantillon (mm^2), la valeur en MPa a été calculée. Les valeurs ont été enregistrées dans des feuilles de calcul afin de calculer des moyennes représentatives pour chaque type d'analyse.

Face à une forte production d'échantillons dans les premières semaines, il a été décidé de mettre en place une structure de base de données, au lieu de plusieurs feuilles de calculs, dans le but d'optimiser le stockage, la gestion et le traitement de ces résultats (Figure 3.30). La base de données compte environ 500 échantillons et présente plusieurs caractéristiques divisées en 15 colonnes :

- **ID Labo (Identification Laboratoire)** - Première lettre du nom de la presse utilisée dans l'essai + numéro établi par le technicien de laboratoire
- **ID Projet (Identification Projet)** - Date du test de compression unique + numéro d'échantillon. Avec cela, nous évitons la répétition des noms.
- **Échantillon** - Numéro de moule utilisé pour effectuer la préparation de l'échantillon. Ce numéro est fixé sur chacun des moules.
- **Essai** - Type d'essai réalisé. Exemple : compression simple, cisaillement direct ou érosion externe.
- **Recette** - Utilisation d'une lettre pour représenter les réactifs ajoutés. Exemple, Carbonate de sodium A&H (W) ; Chlorure de calcium (C); Carbonate de sodium Solvay Light (WS) ; Bicarbonate de sodium (B) ; Acétate de calcium (A);
- **Méthode** - Type de dégradation appliqué après avoir terminé le temps de cure. Par exemple, Test direct, Immersion, Cycle Gel-dégel, Humidification, etc.
- **Mode de séchage** - Type de cure : température ambiante ou four 45°C.
- **Date de moulage** - Jour de préparation des échantillons.
- **Presse** - Nom de la presse utilisée dans l'essai. Exemple : ELE, Instron ou Amsler.
- **Date d'essai** - Jour où les échantillons ont été testés.
- **Durée de cure** - Nombre de jours de cure
- **Résistance (MPa)** - Résultat du test de résistance à la compression simple.

- **Remarques** - Colonne pour décrire tout problème ou détail important concernant l'échantillon.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
ID Labo	ID Projet	Échantillon	Essai	Recette	Teneur en Eau	Type de sol	Méthode	Mode de séchage
I135	202112-54	54	Compression	WS + C	7.3%	Poussière 1	Testage direct - W Solvay	Température ambiante
E263	202112-31	31	Compression	W + C	6%	Poussière 2	Comparison 3h/24h	Température ambiante
J	K	L	M	N	O			
Date de Moulage	Date d'essai	Presse	Durée de cure (jours)	Résistance (MPa)	Remarques			
2021-08-18	2021-11-18	Instron	90	21.82	Non considéré dans le calcul			
2021-10-30	2021-12-02	Instron	21	12.44	24hrs démoulé - 1 cycle gel-dégel			

Figure 3.30 – Mise en page de la base de données et ses 15 colonnes

3.2.2.2 Condition de dégradation

Les échantillons ont été exposés à différentes conditions de dégradation, telles que l'immersion dans l'eau et les cycles de gel-dégel. L'objectif est de connaître le comportement des sols traités lorsqu'ils sont soumis au contact des intempéries. Les échantillons n'ont pas été extraits des moules avant ces essais car ce sont des situations extérieures où tout contact se fera toujours par la surface. L'exécution de ces tests a eu lieu exactement après le temps de cure prédéterminé. Les dégradations appliquées sont détaillées ci-dessous.

a) Immersion

Le test d'immersion a été la première tentative de dégradation d'échantillons, un test simple avec un seul objectif : vérifier le comportement du sol traité après un long contact avec l'eau. De nombreux matériaux utilisés en ingénierie souffrent de l'action de l'eau, deviennent fragiles et se détériorent rapidement. Pour cette raison, il était nécessaire de valider la calcification chimique contre l'agent érosif le plus connu au monde, l'eau.

L'idée de vérifier uniquement l'action de l'eau sur la calcification chimique s'est rapidement étendue à une comparaison complète, c'est-à-dire un test directement après durcissement versus un test après période d'immersion. Trente-six (36) échantillons ont été préparés et mis à durcir pendant les périodes suivantes : 2, 7, 15, 30, 60 ou 90 jours. Après ces périodes, les échantillons ont été conservés à l'intérieur des moules et séparés en deux séries de 18 échantillons. La première série comprenait 6 périodes de cure suivies d'une immersion de 24 heures. Les échantillons de la deuxième séquence ont subi le même temps et étaient immergés pendant 48 heures. Les

échantillons ont été placés dans des contenants plus grands que leur hauteur (25x30x15cm) et complètement immergés dans l'eau à température ambiante au laboratoire $22\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Figure 3.31).



Figure 3.31 – Type de conteneur utilisé et moment de l'exécution des tests d'immersion

Après avoir terminé la période d'immersion, les échantillons ont été immédiatement démoulés et amenés à la préparation (surfaçage et identification). Environ 3 heures plus tard, ils ont été testés sur les presses de compression simple. La liste des échantillons testés ainsi que les propriétés de la préparation sont présentées dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10 – Propriétés des échantillons dans l'évaluation de la dégradation par immersion

Type de dégradation	Recette fixe	Lieu de cure	Durée	Échantillons
Immersion (24hrs et 48hrs)	Poussière 2 – 133g Na_2CO_3 – 2% L'eau – 5.9% CaCl_2 – 2%	Température ambiante ($22\pm 1^{\circ}\text{C}$)	2 jours	24hrs – E211, E212 et E213 48hrs – E217, E218 et E219
			7 jours	24hrs – E208, E209 et E210 48hrs – E214, E215 et E216
			15 jours	24hrs – I87, I89 et I89 48hrs – I90, I91 et I92
			30 jours	24hrs – I102, I103 et I104 48hrs – I105, I106 et I107
			60 jours	24hrs – I44 et I45 48hrs – I31 et I55
			90 jours	24hrs – I115, I116 et I117 48hrs – I121, I122 et I123

b) Cycles de gel-dégel

À partir des résultats obtenus lors des essais d'immersion, il a été décidé d'étudier l'impact du type de dégradation le plus courant au Canada, soit les cycles gel-dégel, un phénomène récurrent chaque année et qui provoque l'affaiblissement de la plupart des fondations routières du pays. Comme expliqué au chapitre 2, ils sont l'un des principaux facteurs de ruine structurelle et d'impacts financiers dans la province du Québec. Valider le comportement de la calcification chimique sous cet aspect était essentiel pour assurer sa viabilité dans le pays.

La norme ASTM C666-97 a été utilisée comme base pour réaliser cette procédure. Après avoir terminé un temps de cure prédéterminé (2, 7, 15, 30, 60 ou 90 jours), les échantillons ont été placés dans des récipients mesurant 25x30x15cm et complètement immergés dans l'eau pendant 24 heures. Après la période d'immersion, les échantillons ont été transférés au congélateur à température minimale ($-28 \pm 1^\circ\text{C}$), où ils sont congelés pendant 24 heures (Figure 3.32). Après avoir terminé le cycle de congélation, les échantillons ont été amenés à la préparation (surfaçage et identification).



Figure 3.32 – Les équipements utilisés pour l'exécution des essais de cycle gel-dégel.

L'évaluation du comportement des échantillons sous cycles de gel-dégel a été réalisée à deux moments différents de la recherche. Le premier moment a été une évaluation en parallèle aux essais directs et par immersion; la poussière de roche 1 a été utilisée à ce moment-là. Les sols traités et durcis pendant 2, 7, 15, 30, 60 et 90 jours ont été évalués en 1 et 2 cycles (Tableau 3.11).

Tableau 3.11 – Propriétés des échantillons dans l'évaluation de la dégradation par cycle gel-dégel en fonction de la durée de cure

Dégradation	Recette fixe	Lieu de cure	Durée	Échantillons
Cycles gel-dégel	Poussière 2 – 133g Na ₂ CO ₃ – 2% L'eau – 5.9% CaCl ₂ – 2%	Température ambiante (22±1°C)	2 jours	1 cycle – E226, E227, E250 et E251 2 cycles – E225, E246, E247 et E248
			7 jours	1 cycle – E220, E221 et E222 2 cycles – E223 et E224
			15 jours	1 cycle – I93, I94 et I95 2 cycles – I96, I97 et I98
			30 jours	1 cycle – I108, I109 et I110 2 cycles – I111, I112 et I113
			60 jours	1 cycle – I40 et I50 2 cycles – I46 et I27
			90 jours	1 cycle – I118, I119 et I120 2 cycles – I127, I128 et I129

Le deuxième moment a été réalisé juste après la définition de la durée optimale de cure du projet, où il a été décidé de prolonger la période des cycles de gel-dégel. À ce stade du projet, le sol utilisé était la poussière de roche 2. Les échantillons avec la cure optimale (30 jours) ont subi de nombreux autres intervalles, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25 et 30 cycles, soit 60 jours de congélation et de décongélation (Tableau 3.12).

Tableau 3.12 – Propriétés des échantillons dans l'évaluation de la dégradation par cycle gel-dégel en fonction de la quantité des cycles

Dégradation	Recette fixe	Lieu de cure	Cure	Cycles	Échantillons
Cycles gel-dégel	Poussière 2 – 133g Na ₂ CO ₃ – 2% L'eau – 5.9% CaCl ₂ – 2%	Température ambiante (22±1°C)	30 jours	3	I163, I164 et I165
				4	I166, I167 et I168
				5	I124, I125 et I126
				7	E272, E273 et E274
				10	I169, I170 et I171
				15	E275, E276 et E277
				20	E289, E290 et E291
				25	E295, E296 et E297
				30	E298, E299 et E300

3.2.2.3 Simulation de pluie

La simulation de pluie a également été l'un des types de dégradation utilisés dans la validation de la technique de calcification chimique. La méthodologie appliquée était basée sur des essais d'érosion de surface réalisés en génie agronomique. Ces tests sont normalement effectués pour étudier la fragilité du sol par rapport aux fortes pluies et les mesures à prendre pour éviter la perte de nutriments.

Notre test a adapté un tronçon de plantation à un tronçon de route et évalué uniquement la résistance du sol face à des pluies intenses. Un modèle réduit d'une route non revêtue a été conçu avec une pente raide et un sol compacté à l'optimum. Les échantillons ont été exposés à une pluie simulée provenant d'une buse à jet conique. À la fin, une comparaison a été faite entre les échantillons traités et non traités en ce qui concerne les caractéristiques de la surface érodée et le poids des grains érodés. La quantité de sol érodée par minute a également été examinée afin de connaître le comportement dans le temps. Il est nécessaire de préciser que l'érosion de surface n'est pas seulement causée par la pluie, mais aussi par le ruissellement de surface et concentré (Jiang et al., 2019), malgré cela, cette étude s'est concentrée uniquement sur l'effet de la pluie.

a) Préparation

La préparation des échantillons a été effectuée selon la recette optimale, soit l'utilisation de 10% de carbonate de sodium et 2% de CaCl_2 par rapport à la masse du sol, en plus de 5,8% d'eau par rapport à la masse du mélange (sol, Na_2CO_3 et CaCl_2). Comme l'objectif était d'obtenir une densité humide similaire aux essais de compression simple ($2\,438.8\text{ kg/m}^3$), 2.5 kg de sol ont été utilisés. Le sol a été mélangé avec du carbonate de sodium et du CaCl_2 , suivi de l'ajout d'eau et d'un malaxage uniforme. Après avoir préparé le mélange, le sol a été ajouté au récipient métallique. Le compactage a été réalisé en 1 seule couche avec le marteau électrique Kango 950K pendant 15 secondes, soit environ 240 coups, transmettant ainsi la même énergie que le Proctor modifié.

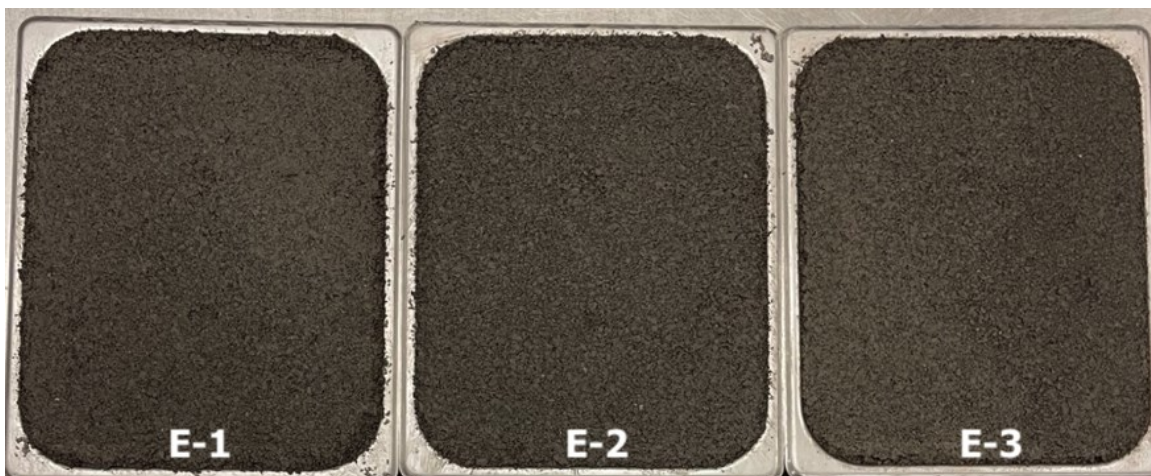


Figure 3.33 – Échantillons sans aucun traitement juste après le compactage

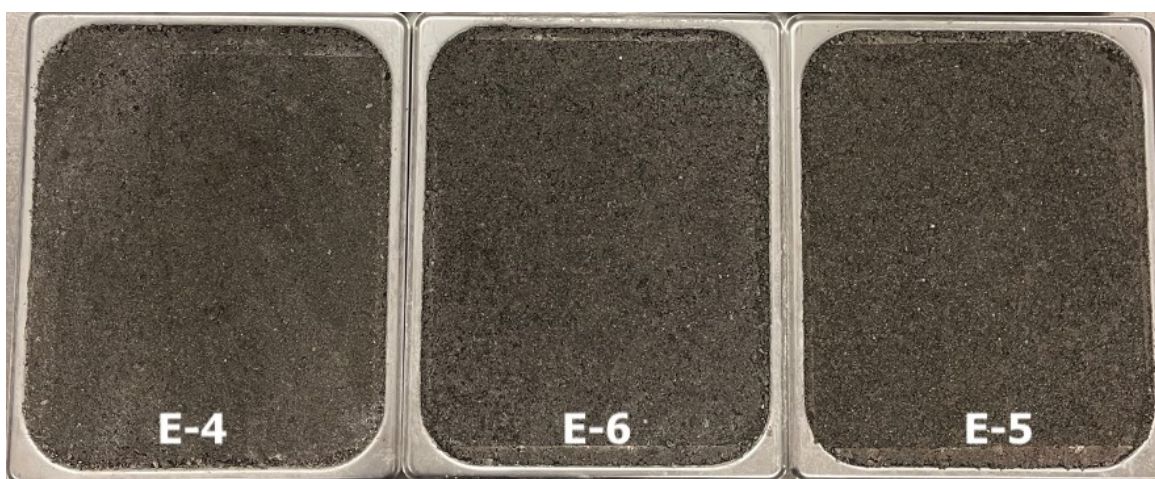


Figure 3.34 – Échantillons traités par calcification chimique juste après le compactage

Les échantillons ont été laissés en cure pendant 30 jours à l'air ambiant. Le nombre de jours était basé sur les résultats les plus efficaces des tests de compression simple, mais même après un temps réduit entre la préparation des échantillons et leur observation, une différence de texture entre les sols naturels et traités était visible. Cette différence était plus remarquable après 30 jours de cure.

Une autre caractéristique importante est la distribution homogène de la calcification chimique dans les 3 échantillons améliorés (E-4, E-6 et E-5). Les précipités de carbonate de calcium étaient facilement visibles dans ces échantillons grâce aux différents points blancs couvrant toute la surface du sol.

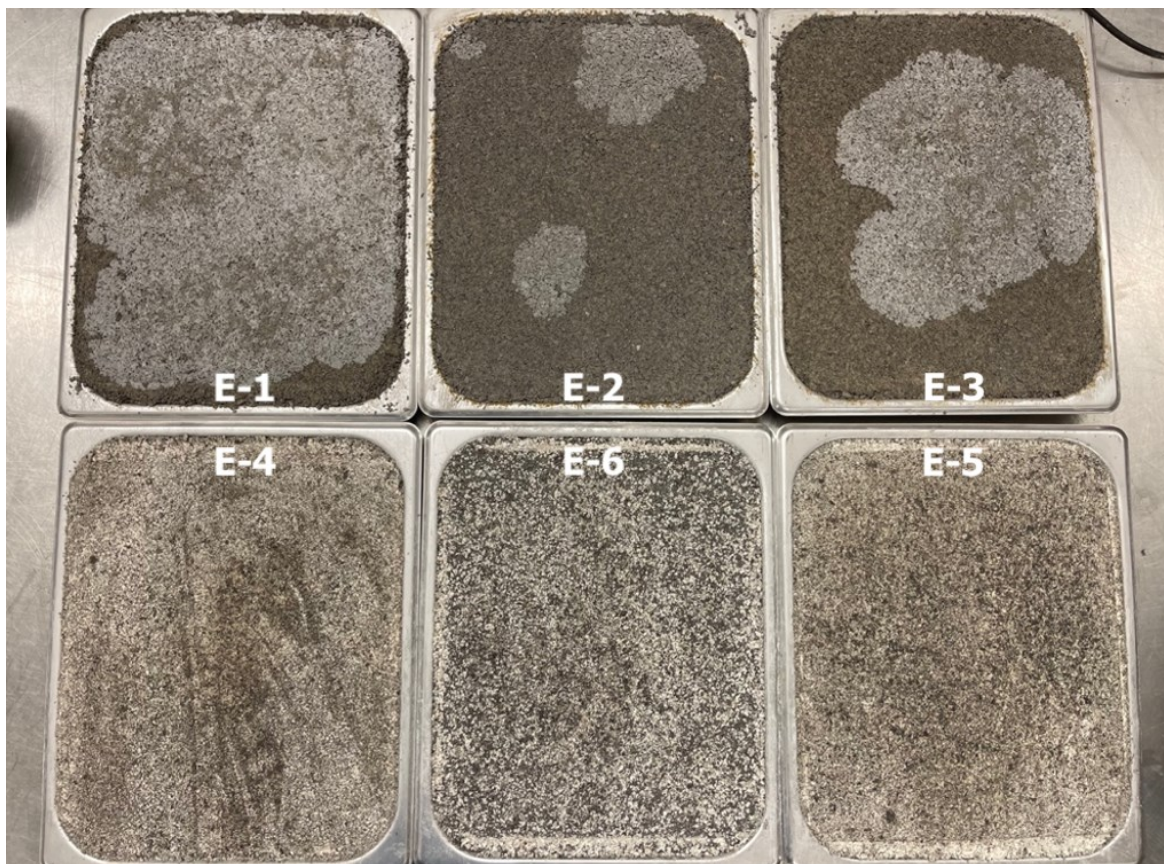


Figure 3.35 – Échantillons préparés pour le test d'érosion après 30 jours de cure

a) Dispositif de simulation de pluie

L'appareil a été conçu pour reproduire le plus fidèlement possible une pluie intense (Figure 3.36). La structure est constituée d'une tour métallique supportant une base en bois à pente variable et une tige supérieure reliée à une buse de pulvérisation. Un récipient en plastique (30 x 40 x 50 cm) avec un support interne pour les échantillons a été installé sur la base en bois. Lorsqu'il est frappé par la pluie, le sol est transporté directement au fond du récipient en plastique par l'écoulement d'eau. La pente de cette base est ajustable selon le type d'essai et, dans ce projet, nous avons utilisé une pente de 12%. Le guide canadien de conception des routes recommande une déclivité maximale de 12%, qui ne peut être augmenté que dans les cas où la topographie l'exige.

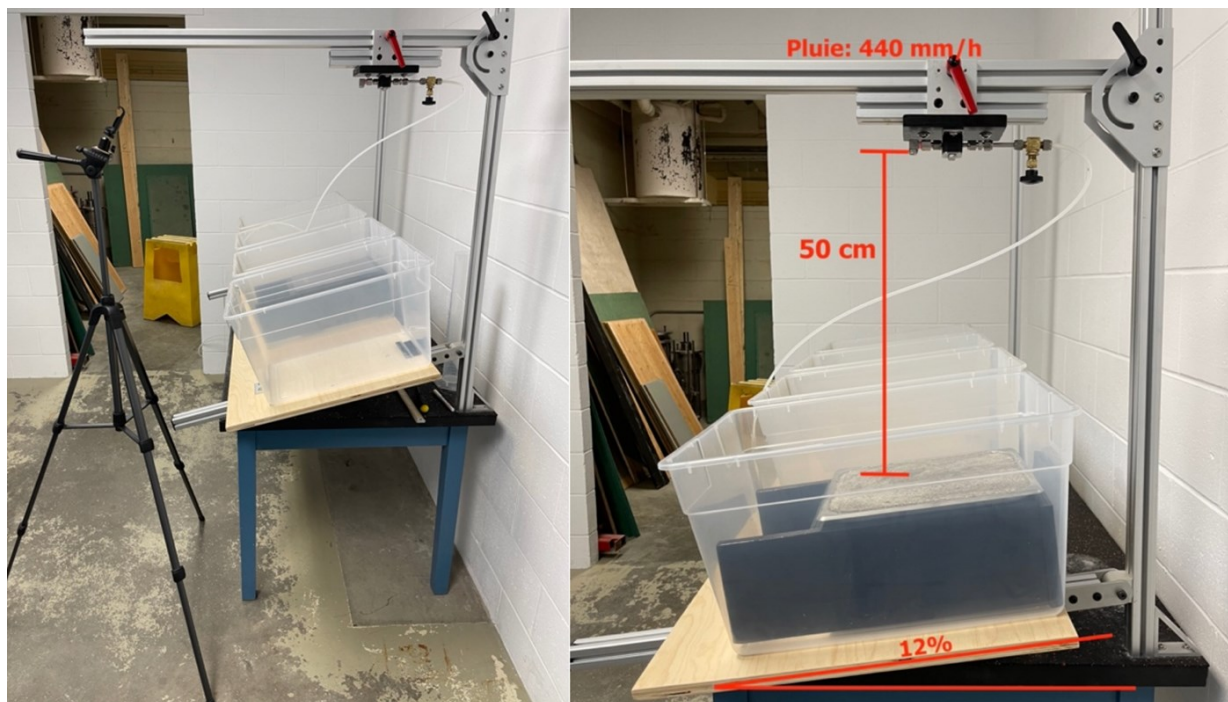


Figure 3.36 – Disposition de la structure pour l'essai de simulation de pluie

La buse de pulvérisation a été installée à une distance de 50 centimètres du sol au-dessus de la structure métallique. Elle crée un jet de forme conique avec des débits variant entre 0.011 et 0.024 l/s et un angle d'environ 48 degrés. Dans cette étude, un débit de 0.016 l/s, soit 440 mm/h, a été utilisé afin de recouvrir uniformément et entièrement la surface du sol.



Figure 3.37 – Jet conique réalisé par la buse de pulvérisation

Cette intensité simule une condition pluviométrique extrême similaire aux records mondiaux enregistrés en Chine en 1974 et 1985 (NWS - National Weather Service, 2021; Wang, 1991). Si la calcification chimique fonctionne bien dans les conditions utilisées dans ce projet, elle est susceptible de bien fonctionner dans des conditions de précipitations moins intenses, comme au Québec. Il est important de noter que l'eau utilisée pour préparer les échantillons et simuler la pluie est de l'eau du robinet, sans aucun type de traitement. La taille des gouttes de pluie n'a pas été quantifiée et l'intensité des précipitations a été supposée être spatialement uniforme à la surface du sol.

a) Essai d'érosion externe

Après avoir traversé les 30 jours de cure, les échantillons ont été placés à l'intérieur du récipient en plastique, sur une base en bois. En parallèle, un trépied et une caméra ont été installés, dans le but d'enregistrer toute la durée du test. Les images présentées dans la session de résultats sont toutes des captures obtenues à partir des vidéos. La durée du test a été fixée à 30 minutes, divisée en 6 intervalles de 5 minutes. À chaque intervalle, la pluie était arrêtée et la masse érodée accumulée au fond du récipient en plastique était collectée et amenée directement au four pour être séchée. Après 24 heures et l'élimination complète de l'humidité, les masses érodées ont été pesées à chaque intervalle d'essai, ce qui a permis de calculer et de construire un graphique du taux d'érosion par minute et de l'évolution de la perte de masse en fonction du temps. Après la réalisation de tous les essais, des évaluations visuelles de la masse de sol érodée et de l'aspect général des échantillons après érosion pluviale ont également été présentées.

3.2.2.4 Durée de préparation de l'échantillon

La préparation et le test des échantillons sont des étapes du projet qui dépendent de nombreux facteurs allant bien au-delà de la théorie. En particulier, les actions de surfacage et l'exécution du test de compression simple dépendent des jours d'ouverture du laboratoire, de la disponibilité des équipements et des techniciens. La combinaison de ces facteurs a entraîné des cas où les échantillons ont été démoulés et préparés, mais n'ont pas été testés immédiatement après. Cette situation a suscité des doutes quant à la qualité des résultats, surtout après avoir effectué plus de 500 tests avec plusieurs variantes.

Les essais ont été réalisés afin de savoir si le temps d'attente pouvait altérer les résultats. La comparaison a consisté à préparer 6 échantillons (Figure 3.38), qui ont été divisés en 2 séries de :

- 3 échantillons testés juste après 3 heures du cycle gel-dégel (E267, E268 et E270);
- 3 échantillons testés après 24 heures du cycle gel-dégel (E263, E264 et E265).



Figure 3.38 – Échantillons préparés pour l'évaluation de l'effet du temps de préparation sur le comportement mécanique

Les échantillons ont été préparés avec les mêmes caractéristiques : méthode de déclanchement par l'eau, poussière de roche 2 et temps de durcissement de 21 jours. La méthode de dégradation correspondait à 1 cycle gel-dégel, c'est-à-dire 24 heures d'immersion et 24 heures de congélation. Après la cure de 21 jours, les échantillons ont été soumis aux dégradations. Après le cycle, les échantillons de 24 heures ont été envoyés pour surfacage et identification, puis mis en attente à température ambiante. Le lendemain, les échantillons de 3 heures ont été immédiatement préparés et envoyés en compression simple avec les échantillons de 24 heures.

Le résultat de cette analyse et d'autres présentées ci-dessus se trouvent dans le chapitre 4 de cette thèse.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Ce chapitre décrit les résultats de chaque étape d'exécution du plan expérimental de recherche. Le protocole de calcification chimique optimal sera formé sur la base de l'analyse des cinq premiers effets analysés ci-dessous. Ensuite, tests de performance ont été réalisés en fonction des conditions de dégradation (immersion, cycle gel-dégel et pluie simulée) pour évaluer son comportement dans des conditions proches de la réalité. L'ensemble des résultats vise à répondre aux objectifs spécifiques 1 et 2, en décrivant l'évolution de la recherche et offrant des pistes de pour la discussion.

4.1 Effet de la minéralogie du sol sur la calcification chimique

Une fois les pourcentages de chaque sol connus (Tableau 3.1), grâce à l'essai DRX et l'analyse minéralogique par absorption atomique, des nouveaux échantillons ont été préparés avec les poussières 1, 2 et 3 (Tableau 3.6). En suivant la recette optimale présentée au chapitre précédent, les échantillons ont été laissés en cure à température ambiante pendant 30 jours et soumis à des essais de compression simple. Les résultats des 9 échantillons testés sont présentés ci-dessous (Figure 4.1), suivis d'une comparaison entre les résultats moyens des 3 types de poussières de roche (Figure 4.2).

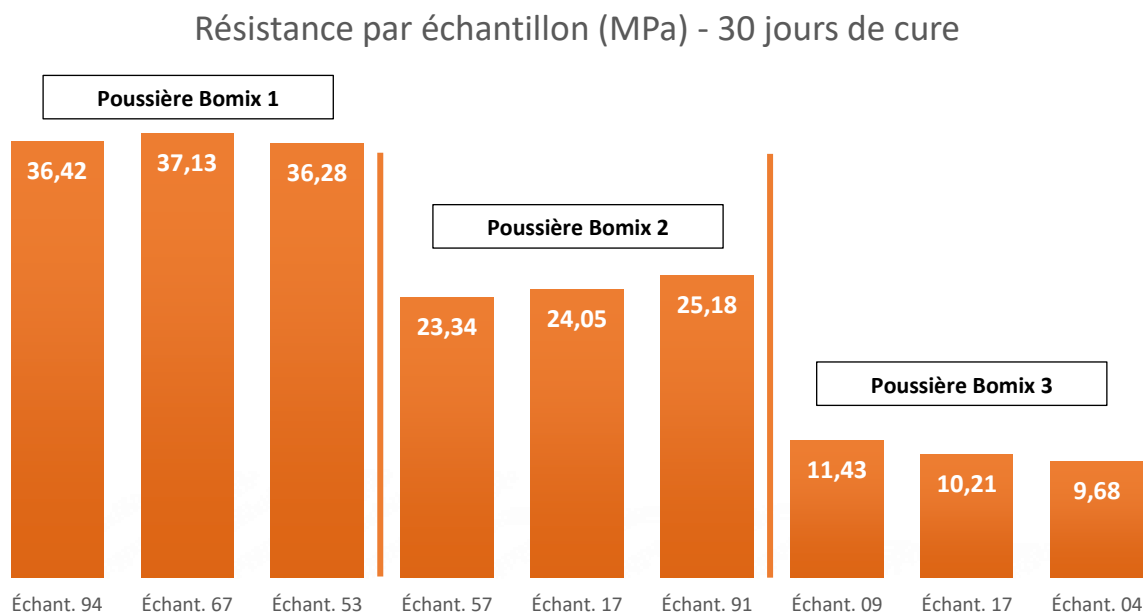


Figure 4.1 – Comparaison entre les résultats de compression simple des poussières 1, 2 et 3

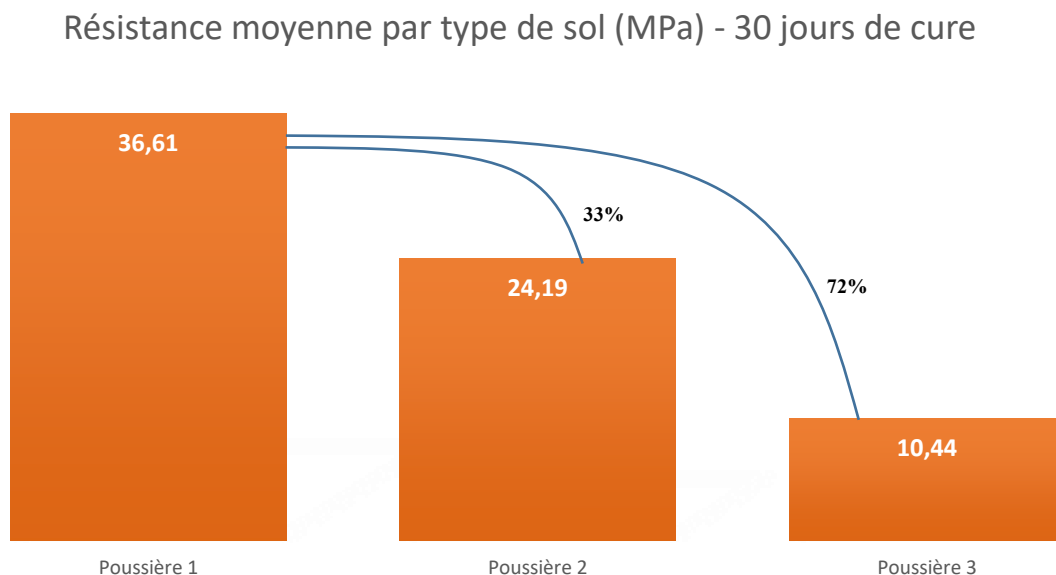


Figure 4.2 – Comparaison entre la moyenne des résultats de compression simple des 3 types de poussières de roche

D'après les résultats, il a été observé que plus la teneur en calcite du sol est faible, plus la résistance diminue. Bien que la dolomite contienne également des ions calcium, ils sont beaucoup plus difficiles à détacher de ce minéral en raison de sa plus faible solubilité par rapport à la calcite. Ainsi, avec une résistance moyenne de 36,61 MPa, le sol avec le pourcentage le plus élevé de calcite a confirmé le résultat attendu. La proportionnalité entre les autres sols a été partiellement confirmée, c'est-à-dire que la poussière 3 a une résistance inférieure de 72 % à la poussière 1, une différence similaire dans la teneur en calcite (73 %). Cependant, la relation entre les poussières 1 et 2 ne suivait pas cette proportionnalité, avec une différence de résistance de 33 % et pour une variation de teneur en calcite de 10 %.

4.2 Effet du type de réactif sur le processus de calcification chimique

Carbonate de sodium

Afin de comparer l'effet du Arm&Hammer et du Solvay light sur la poussière de roche, 36 échantillons ont été préparés pour les deux types de carbonates, étant 3 échantillons pour chaque durée de cure (2, 7, 15, 30, 60 et 90 jours).

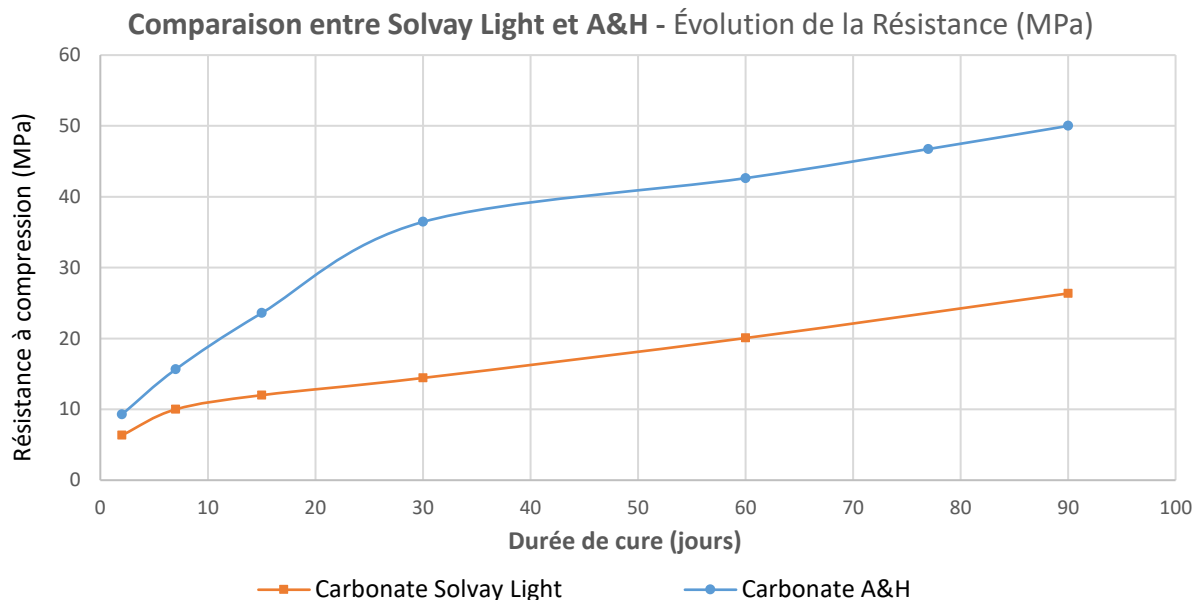


Figure 4.3 – Comparaison des résistances moyennes des échantillons avec Solvay Light et A&H

Ainsi, les résultats indiquent un meilleur comportement mécanique pour le carbonate de sodium A&H. Nous avons ensuite cherché à comprendre les raisons de cette différence de résistance d'un facteur supérieur à 2. Le premier point est lié à la granulométrie des réactifs. Le carbonate A&H est beaucoup plus grossier, avec de petits cristaux ou des flocons, tandis que Solvay Light est une poudre très fine. Cette caractéristique influence principalement la consommation d'eau pour déclencher la réaction. Une quantité plus importante d'eau est ainsi nécessaire dans les sols traités avec le Solvay Light pour obtenir le même effet que A&H. Le résultat est une réaction et un compactage moins efficaces.



Figure 4.4 – Texture des carbonates de sodium Solvay Light (à gauche) et A&H (à droite)

Le second point est lié à la caractérisation minéralogique des deux produits. À partir de tests DRX, il a été possible de vérifier la présence de thermonatrite, en plus du Na_2CO_3 pur. Ce minéral est l'une des variations hydratées du carbonate de sodium, légèrement plus soluble que sa forme pure. Elle est certainement plus intense dans le carbonate A&H car le produit est destiné au nettoyage et au lavage des vêtements, nécessitant une plus grande solubilité au contact de l'eau.

Chlorure de calcium

La fonction principale du chlorure de calcium dans ce procédé est de contrôler la température de la réaction, prolongeant ainsi la teneur en eau optimale. Ces caractéristiques influencent plusieurs aspects de l'amélioration du sol, par exemple, le compactage, la cure et le gain de résistance. En raison de son caractère hygroscopique, le chlorure de calcium est capable d'empêcher la teneur en eau optimale de s'évaporer, même si le carbonate de sodium au contact du liquide provoque une forte élévation de température. Ce maintien de l'eau dans le sol offre une diminution plus rapide de la température et, par conséquent, plus de temps pour réaliser des réactions. Les courbes de température sont présentées à la Figure 4.6.

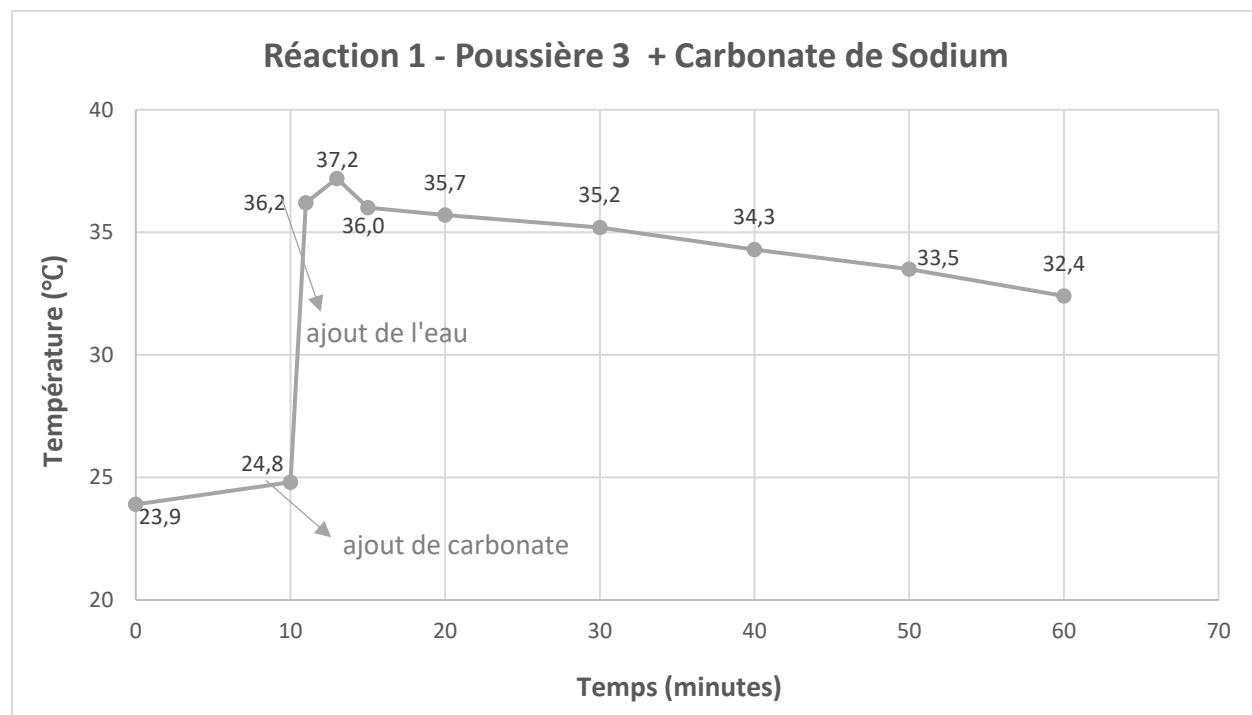


Figure 4.5 – Courbe de température en fonction du temps pour le mélange de poussière de roche 3 et carbonate de sodium (réaction 1)

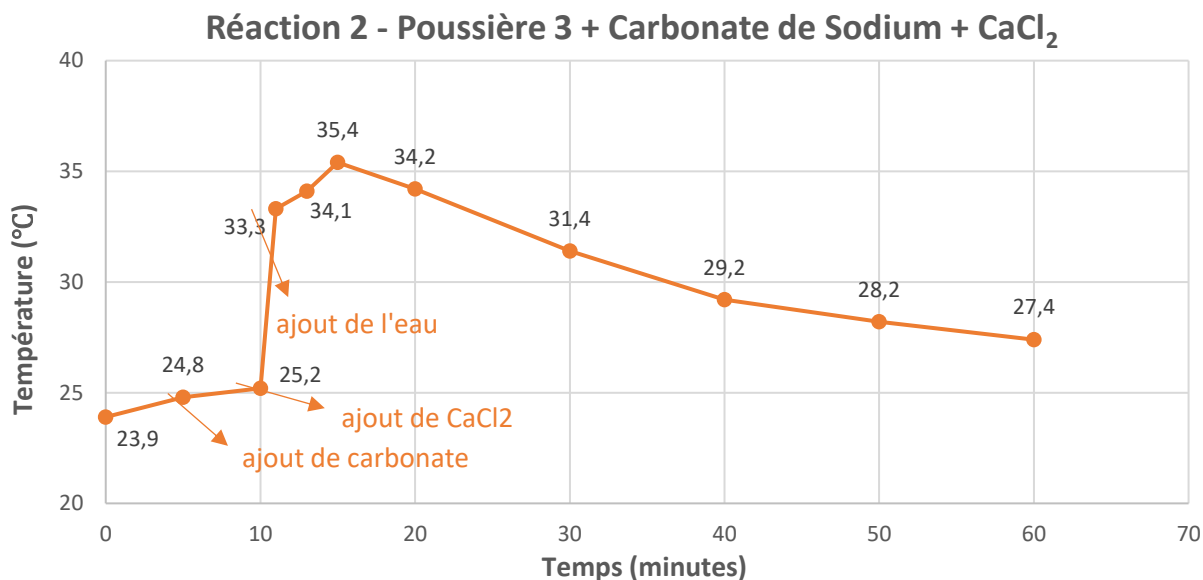


Figure 4.6 – Courbe de température en fonction du temps pour le mélange de poussière 3, carbonate de sodium et avec l'ajout de CaCl_2 (réaction 2)

D'après les graphiques, il est possible de voir que CaCl_2 est capable de fournir une température de réaction plus basse, en plus d'offrir une chute de température beaucoup plus rapide. Une heure après de l'ajout d'eau, et donc après le début de la réaction, le mélange avec uniquement du Na_2CO_3 est 4.9°C au-dessus du sol avec CaCl_2 . Ainsi, la réaction 1 offre une évaporation beaucoup plus rapide que la réaction 2, comme montre la Figure 4.4 ci-dessous.



Figure 4.7 – Comparaison de la texture des deux sols, 1 heure du début de la réaction

Une heure après le démarrage de la réaction, les textures des sols sont très différentes. La réaction 1 semble provoquer un séchage intense tandis que la réaction 2 paraît n'avoir aucune influence sur le comportement du sol (la texture reste complètement humide). Ainsi, il était important de vérifier la teneur en eau de ces échantillons pour confirmer la raison pour laquelle la texture du sol avait beaucoup changé après 1 heure de réaction. Une évaluation par pesée a été réalisée et les masses des échantillons à chaque étape du test sont indiquées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Évaluation de la teneur en eau après 1 heure de réaction chimique

Réaction	Masse du contenant (g)	Contenant + mélange humide (g)	Contenant + mélange après 1h (g)	Contenant + mélange sec (g)	Teneur en eau Initial (%)	Teneur en eau après 1hr (%)	Différence
1 - Na_2CO_3	209.9	685.9	680.0	657.6	5.95	4.76	1.18%
2 - Na_2CO_3 + CaCl_2	223.3	707.7	707.4	679.1	5.90	5.85	0.06%

Ce résultat est très important pour confirmer la nécessité d'utiliser le CaCl_2 dans le processus de calcification chimique. La perte d'humidité dans la réaction 2 est minime, ce qui garantit un temps de cure prolongé. L'eau interagissant plus d'heures avec les réactifs permet la formation de plus de précipités et, par conséquent, plus de liaisons entre les particules et un gain de résistance élevé. En revanche, la réaction 1 avec un pourcentage de perte en eau 20 fois supérieur à la réaction 2, voit son gain de résistance affecté. Si en une heure la réaction provoque une perte de 1/5 de toute l'humidité du sol, en quelques heures le sol pourrait être complètement sec avec peu de précipités formés.

4.3 Effet de la concentration des réactifs sur la calcification chimique

Carbonate de sodium

Ozeir (2021) a défini une concentration de carbonate de sodium de 10 % par rapport à la masse du sol, sur la base de similitudes avec des projets de biocalcification. Considérant que le principe de recherche est le même, mais que les réactifs chimiques sont différents, il a fallu confirmer expérimentalement ces concentrations. Pour cela, 15 échantillons avec la poussière 1 ont été

préparés (Tableau 3.7), répartis en 5 séries de concentration de Na_2CO_3 (5%, 7%, 10%, 12% et 15%). Les résultats des essais sont présentés dans la Figure 4.8.

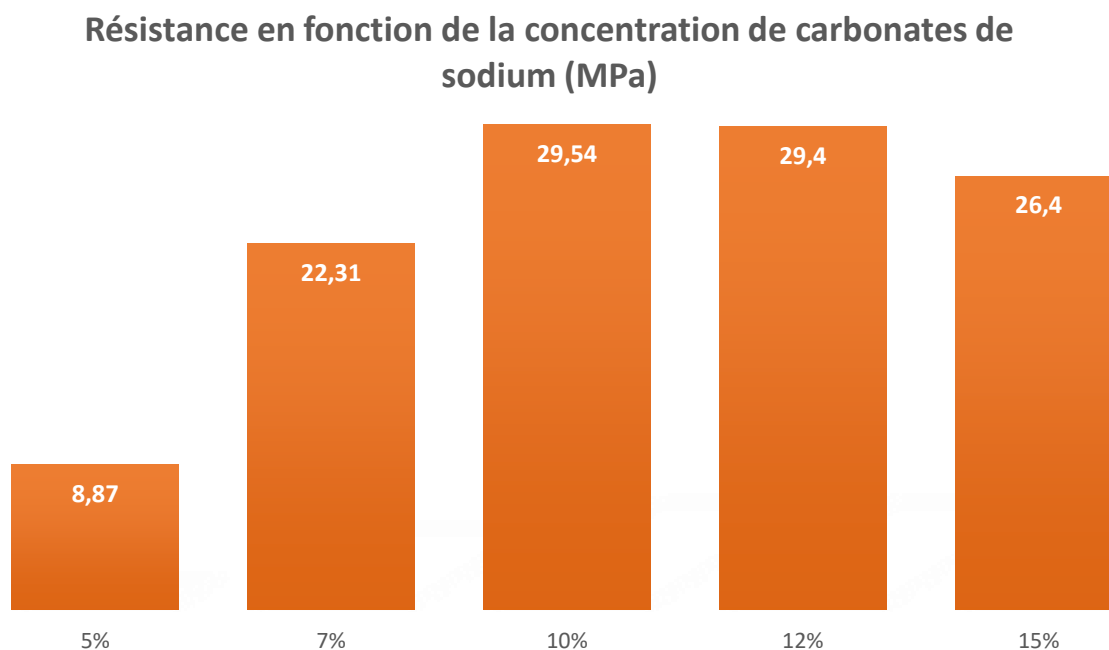


Figure 4.8 – Résultats des résistances moyennes de la variation de la teneur en carbonate de sodium

Les résultats confirment expérimentalement la concentration de 10% de carbonate de sodium comme solution idéale pour induire la précipitation des carbonates de calcium. Autre point intéressant, la moyenne de 29.54 MPa obtenue avec la concentration de 10% après une cure de 21 jours est tout à fait cohérente avec l'évolution des résistances présentée sur la Figure 4.11.

Chlorure de calcium

Comme présenté précédemment, l'utilisation de chlorure de calcium visait à diminuer la température de préparation de l'échantillon. Bien que faible, cette concentration aide beaucoup à contrôler la température et, par conséquent, à développer une résistance dans le sol. Pour cela, 12 échantillons avec la poussière 2 ont été préparés (Tableau 3.8), répartis en 4 séries de concentration de $CaCl_2$ (1%, 2%, 5% et 7.5%). Les résultats des essais sont présentés dans la Figure 4.9.

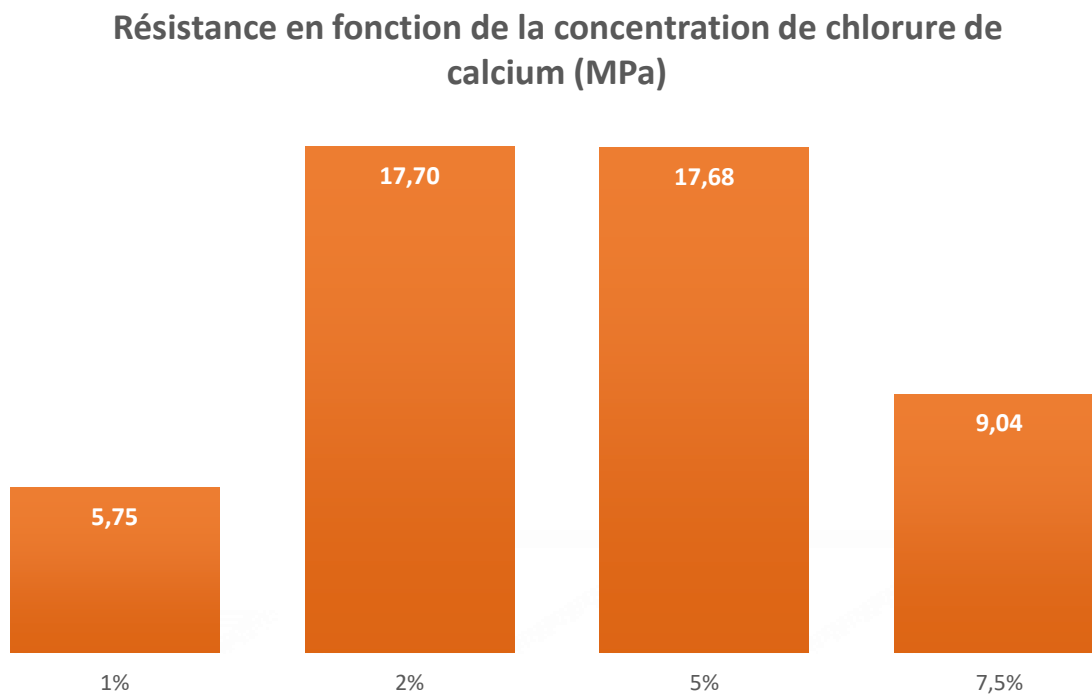


Figure 4.9 – Résultats des résistances moyennes de la variation de la teneur en chlorure de calcium

Les résultats confirment expérimentalement la concentration de 2% de chlorure de calcium comme solution idéale pour induire la précipitation des carbonates de calcium. Il est important de souligner que les concentrations de 2% et 5% présentent des résultats très similaires, mais la concentration la plus faible a été choisie car elle permet d'économiser le produit et dans le coût de préparation.

4.4 Effet du lieu et de la durée de la cure sur la résistance à la compression du sol traité

Cette évaluation vise à trouver une alternative au lieu de cure du traitement par calcification chimique. Quelques tests (Tableau 3.9) ont été lancés pour comparer l'évolution de la résistance à l'intérieur du four et la température ambiante. Les résultats sont présentés à la Figure 4.10.

Les résultats de cette première évaluation ont confirmé que le durcissement à température ambiante est capable d'offrir des résistances similaires à une cure au four, mais qu'une durée légèrement plus longue est nécessaire. Quelques points ont été remarqués dans ces tests, avec 2 jours de cure les échantillons présentaient des moyennes très proches, 5,55 MPa contre 5,66 MPa. Après 7 jours, la

résistance des échantillons au four a augmenté d'environ 4 fois (23,12 MPa), alors que les échantillons à température ambiante n'ont atteint que 12,56 MPa, soit environ le double. Ainsi, après 15 jours de cure, les résultats à température ambiante correspondent à une cure de 7 jours dans le four.

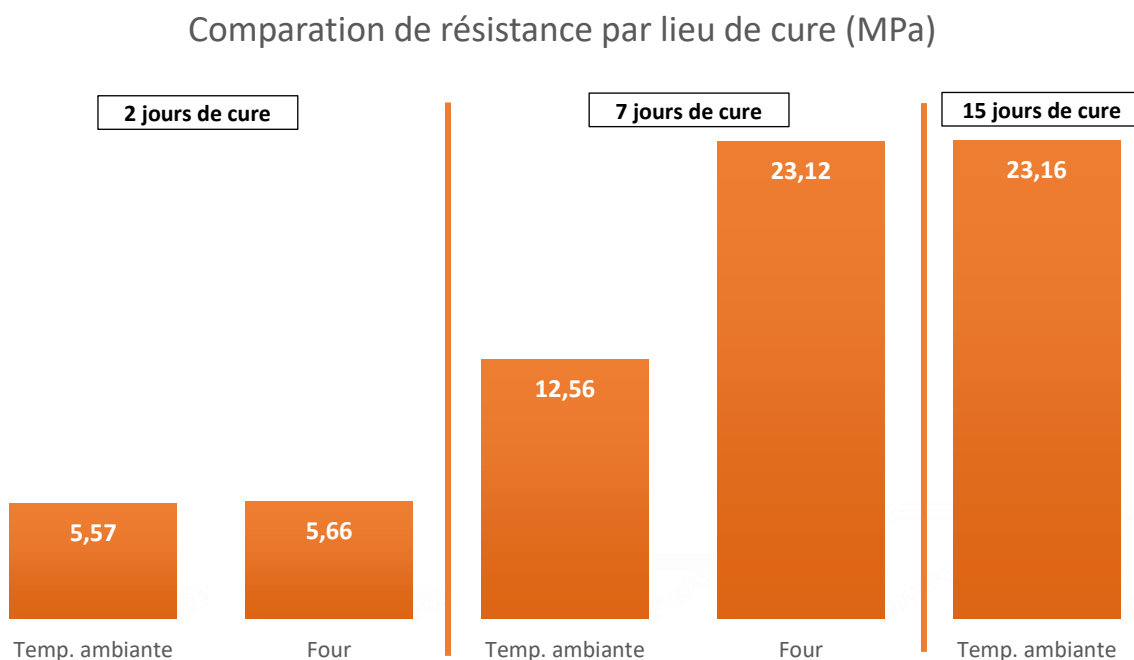


Figure 4.10 – Résultats moyenne par lieu et durée de cure

Compte tenu de ces bons résultats, une nouvelle évaluation a été réalisée pour préciser l'influence du temps de durcissement à température ambiante. L'objectif était d'établir l'évolution de la résistance des sols traités pour des durées comprises entre 2 et 90 jours. Les résultats des tests de compression simple sont présentés dans le Tableau 4.3 et la Figure 4.11.

Tableau 4.2 – Évolution de la résistance en fonction du temps de cure.

Recette	Essai	Lieu de séchage	Échantillons préparés	Durée de cure (jours)	Résistance Moyenne (MPa)
Poussière de roche – 133g Washing Soda A&H – 10%; CaCl ₂ – 2%; Teneur en eau – 5.9%;	Compression simple	Température ambiante – Laboratoire de Géotechnique	3	2	9.26
				7	15.63
				15	23.58
				30	36.45
				60	42.63
				77	46.74
				90	49.61

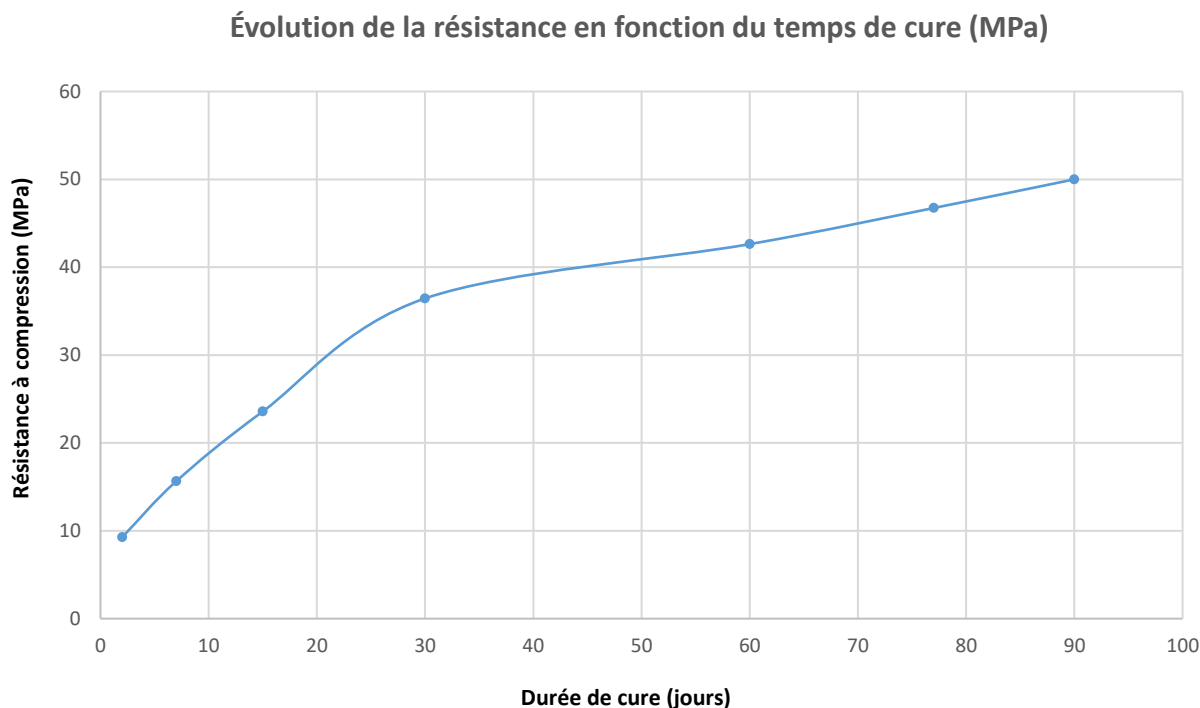


Figure 4.11 – Évolution de la résistance des sols traités par la technique de calcification chimique

L'effet de la durée de cure peut être divisé en deux étapes, une augmentation linéaire de la résistance dans les 30 premiers jours et une latéritisation entre 30 et 90 jours. Au cours du premier mois, les échantillons croissent à un rythme moyen de 1,22 MPa par jour, les 2 premiers jours de durcissement étant responsables de 25 % des gains de résistance (9,27 MPa). Après 30 jours, la courbe s'aplatit du fait d'une croissance modérée, de l'ordre de 0,22 MPa par jour. Les résultats ont montré le potentiel important de cette technique, atteignant la valeur d'environ 50 MPa après 90 jours de cure. Dans un temps de cure similaire à celui des structures en béton (28 jours), cette technique est capable d'offrir une résistance moyenne de 36.45 MPa. De plus, les résultats de ce nouveau test, par rapport au test de cure au four, ont montré une amélioration avec 2 jours de cure à température ambiante. Il a été obtenu 3.61 MPa de plus que l'essai de 2 jours au four (5.66 MPa). À 7 jours de cure, il a été trouvé 7.49 MPa de moins que la cure au four, résultat similaire à celui trouvé précédemment. Il est important de souligner que les périodes de cure au four supérieures à 7 jours n'ont pas été testées.

4.5 Effet du temps de préparation des échantillons sur la résistance à la compression du sol traité

Cette étape vise à comprendre l'impact du temps de préparation (démoulage, surfacage et essais) sur le résultat final de la résistance à la compression des échantillons. Pour cela, certains échantillons ont été préparés avec un temps d'attente de 3 heures et 24 heures, comme expliqué au chapitre 3.2.2.4. Les résultats sont présentés dans la Figure 4.12.

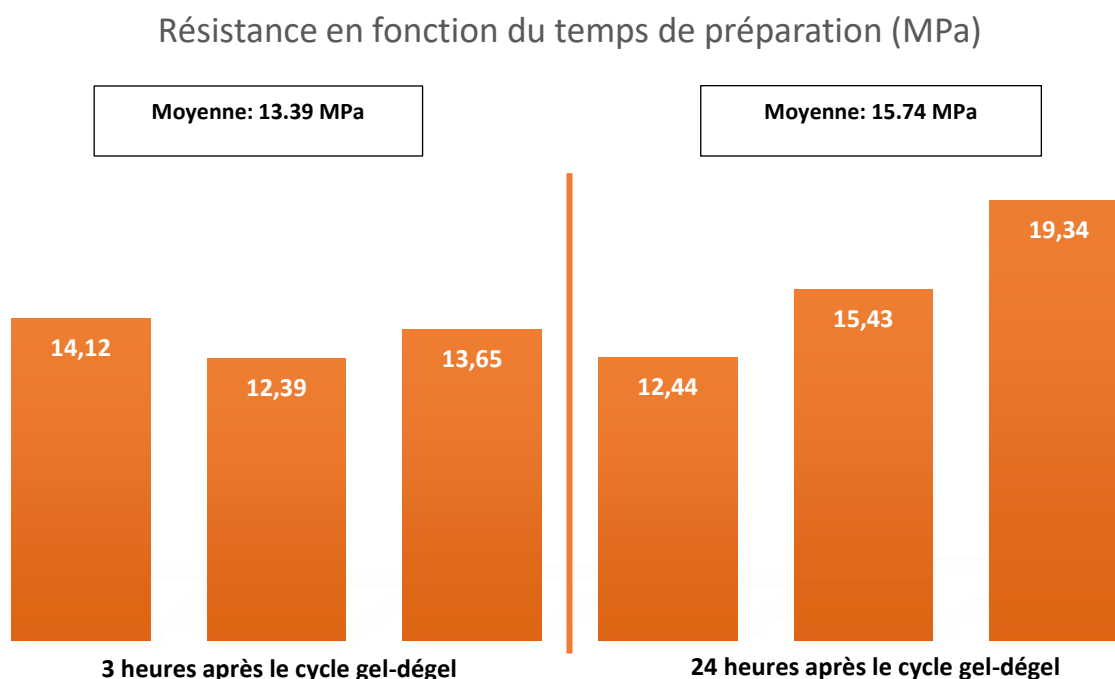


Figure 4.12 – Résistance à la compression simple en fonction du temps de préparation

Les valeurs de résistance sont très proches de celles obtenues lors d'autres essais avec la poussière de roche 2. En comparant les deux séries, on obtient des moyennes respectives de 13.39 MPa et 15.74 MPa, une différence de 1.73 MPa entre la série après 3 heures et la série après 24 heures. Une différence est donc notable, mais elle n'est pas significative. Par conséquent, l'effet de l'attente de 24 heures ne signifie pas un problème en termes de préparation, mais ouvre des possibilités pour des études futures plus détaillées.

Durant cet essai, un phénomène d'apparition de nouveaux précipités à la surface des échantillons pendant le « temps d'attente » a attiré notre l'attention sur une propriété qui n'avait pas encore été envisagée, à savoir : une post-amélioration ou auto-cicatrisation. La Figure 4.13 propose une

comparaison entre un échantillon testé 3 heures après le cycle gel-dégel et un autre testé après 24 heures d'attente. On y note la formation d'une couche blanchâtre de précipités sur l'échantillon avec une texture solidifiée entre les liaisons des particules. Ce résultat après 24 heures d'exposition à l'air d'un échantillon remouillé semble réactiver la réaction de précipitation. Cette caractéristique a été notée dans d'autres échantillons qui ont subi un certain contact avec l'eau, mais des études approfondies sur le sujet n'ont pas été menées. Au cas d'une confirmation de cette propriété dans de futures recherches, elle sera un différentiel pour la faisabilité et la diffusion de la technique dans le monde.



Figure 4.13 – Comparaison d'un échantillon testé 3 heures après le cycle gel-dégel avec un autre testé 24 heures après le cycle

4.6 Effet des conditions de dégradation sur la résistance à la compression du sol traité

4.6.1 Immersion

Cette étape visait à évaluer un sol traité par la technique de calcification chimique lorsqu'il est soumis à une immersion dans l'eau. Pour évaluer l'effet, 36 échantillons ont été préparés, répartis

en intervalles de cure et deux durées d'immersion (24h et 48h), le protocole utilisé est présenté dans le chapitre 3.2.2.2. Après 24 et 48 heures d'immersion, les échantillons ont été extraits des moules et soumis à la procédure de surfacage au soufre suivis de l'essai de compression simples. Les résultats de cette étape sont présentés ci-dessous.

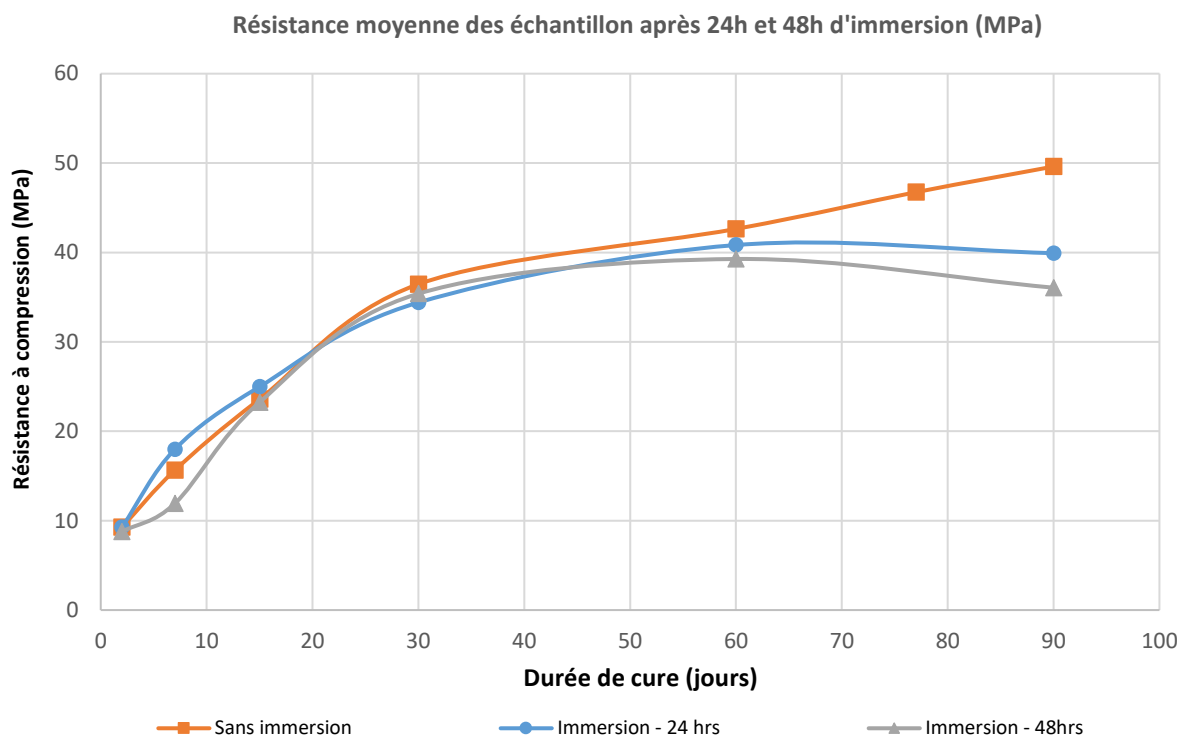


Figure 4.14 – Test d'immersion d'échantillons traités par calcification chimique

Comme indiqué sur le graphique, l'immersion n'a pratiquement aucun impact sur les échantillons traités et durcis jusqu'à 30 jours. Après 60 jours de cure, un plateau de résistance est observé, voire une diminution, pour les échantillons immergés par rapport à ceux sans immersion. Si l'on considère l'immersion de 48 heures, la diminution a été la plus significative, soit une différence de 3,21 MPa. Cette baisse crée une alerte pour réaliser des tests d'immersion plus prolongés, dans le but de comprendre le comportement de ce sol lorsqu'il est soumis à des semaines ou des mois d'immersion.

4.6.2 Cycles de gel-dégel

L'objectif de cette étape était d'analyser la résistance des échantillons traités par calcification chimique lorsqu'ils sont soumis à des cycles consécutifs de congélation et de décongélation d'une

durée d'au moins 24 heures. Pour évaluer l'effet, 36 échantillons ont été préparés, 36 échantillons répartis en intervalles de cure et dans les deux cycles (gel et dégel). Après une durée de 1 et 2 cycles, les échantillons ont été testés en compression simple. Les résultats de cette étape sont présentés dans l'image Figure 4.15.

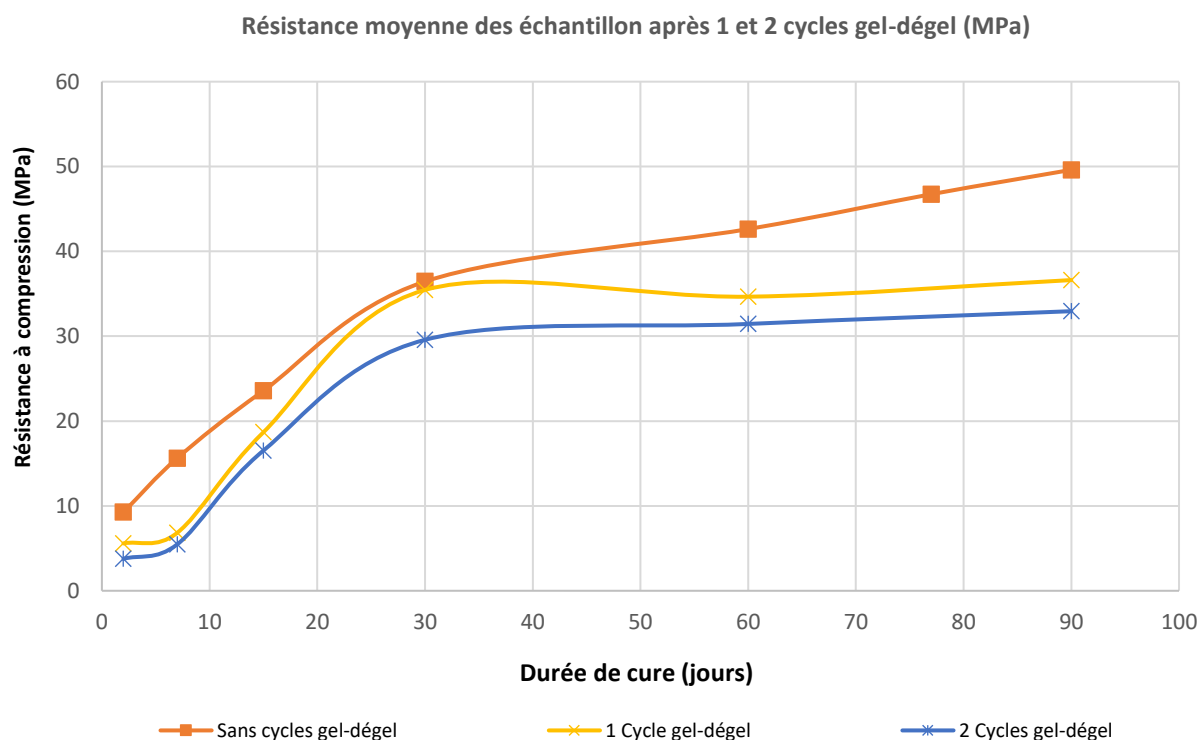


Figure 4.15 – Test de cycle gel-dégel en fonction du temps de cure

La résistance après 2 cycles gel-dégel a présenté une réduction significative d'environ 19 % à 30 jours de cure (de 36.45 MPa à 29.58 MPa) et 34% à 90 jours de cure (49.61 MPa à 32.95 MPa). Ces résultats ont justifié une évaluation étendue jusqu'à 30 cycles, soit 60 jours de congélation et décongélation. Comme indiqué dans le Tableau 3.12, 27 échantillons ont ainsi été préparés et répartis en 9 séries de 3 échantillons soumis à un nombre de cycles gel-dégel compris entre 3 et 30. La procédure de déclenchement par l'eau a été utilisée et l'ensemble des échantillons a été soumis à une cure de 30 jours à température ambiante. Les résultats des essais sont présentés à la Figure 4.16.

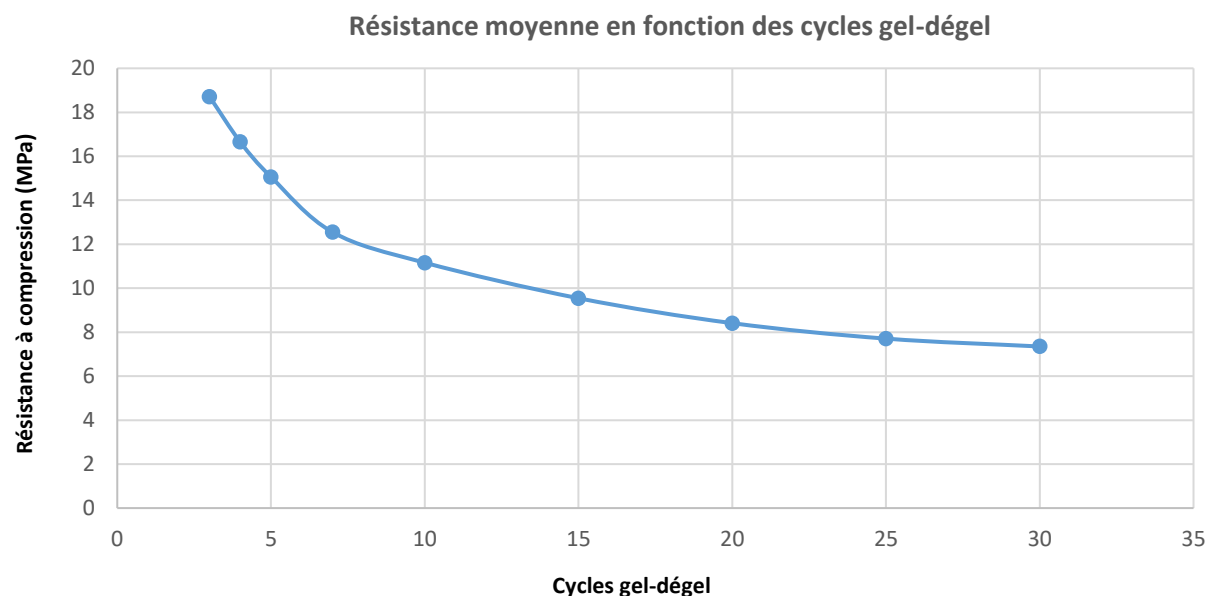


Figure 4.16 – Résultats de résistance après réalisation de 30 cycles gel-dégel

Cette évaluation a démontré un bon comportement du sol traité par calcification chimique lorsqu'il est soumis à des cycles de gel-dégel. Bien que la résistance après 30 cycles (7.35 MPa) ait diminué d'environ 70 % par rapport à l'état initial peu après le traitement (24.19 MPa), ce résultat de résistance à la compression est toujours 10 fois supérieur au sol non traité (0.73 MPa) testé par Ozeir (2021). L'obtention d'un plateau est une information importante pour le comportement au gel-dégel. En effet, le sol se comporte comme si les premiers cycles contribuaient à la rupture des liaisons excédentaires (diminution du degré d'hyperstaticité), et que l'échantillon devient plus flexible. Il est alors capable d'accepter les déformations liées aux cycles gel-dégel, sans nouvelle rupture de liaison et donc de perte de résistance associée. Ce résultat est important car malgré la diminution notable, il reste supérieur aux sols non traités ou aux valeurs usuellement obtenues pour des sols traités au ciment.

Un autre point important est que ces valeurs sont liées à la poussière de roche 2 et que des valeurs plus importantes auraient pu être atteintes avec un plus grand pourcentage de calcite (poussière de roche 1).

4.6.3 Simulation de Pluie

4.6.3.1 Observation visuelle

Les Figure C.3 et Figure C.4 de l'Annexe C montrent l'évolution de l'érosion lors de l'essai de pluie simulée pour les instants 0 minutes, 10 minutes et 30 minutes. La Figure C.1 montre les échantillons non traités et la Figure C.2 montre ceux traités par calcification chimique. Dans les échantillons non traités, une érosion importante est perceptible, principalement pour les particules grossières les plus superficielles. Cela peut être vu à travers les taches grises plus claires qui apparaissent à 10 minutes. Après 30 minutes de test, les zones sont plus espacées, la plupart des grains fins étant transportés. Il en résulte une surface extrêmement fragile car les connexions (grains fins) entre les gros grains sont perdues, ne laissant que les vides. Ceci peut être diagnostiqué à partir d'une comparaison entre les échantillons E-1 et E-4 (Figure 4.17), 30 minutes après avoir terminé les tests avec des sols légèrement plus secs.



Figure 4.17 – Comparaison entre les échantillons E-1 et E-4 après l'essai d'érosion

En revanche, les échantillons traités présentaient très peu de variation visuelle. Il y a une perte de particules fines, mais rien qui modifie la surface des échantillons (Absence de canaux d'écoulement). Cette analyse est facilitée lorsque l'on compare les masses de sol érodées et collectées toutes les 5 minutes. Le résultat de l'érosion dans les sols traités présente une granulométrie fine, s'accompagnant de quelques précipités de carbonate de calcium (Figure 4.18).

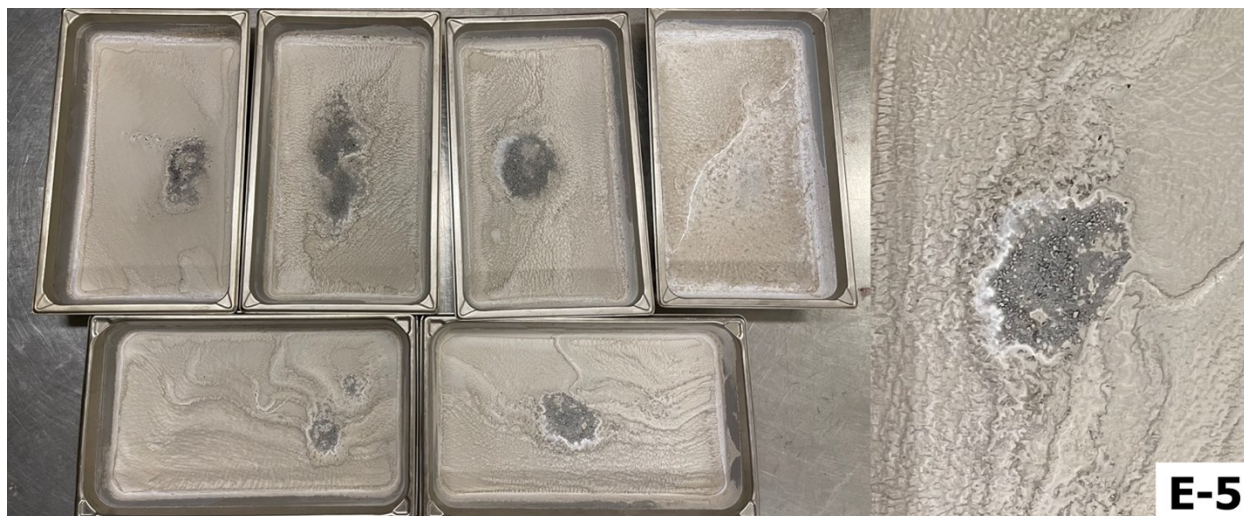


Figure 4.18 – Masses érodées de l'échantillon traité E-5

Par contre, la masse érodée des sols non traités présente une granulométrie beaucoup plus mixte, avec une prédominance de particules beaucoup plus grossières (Figure 4.19).

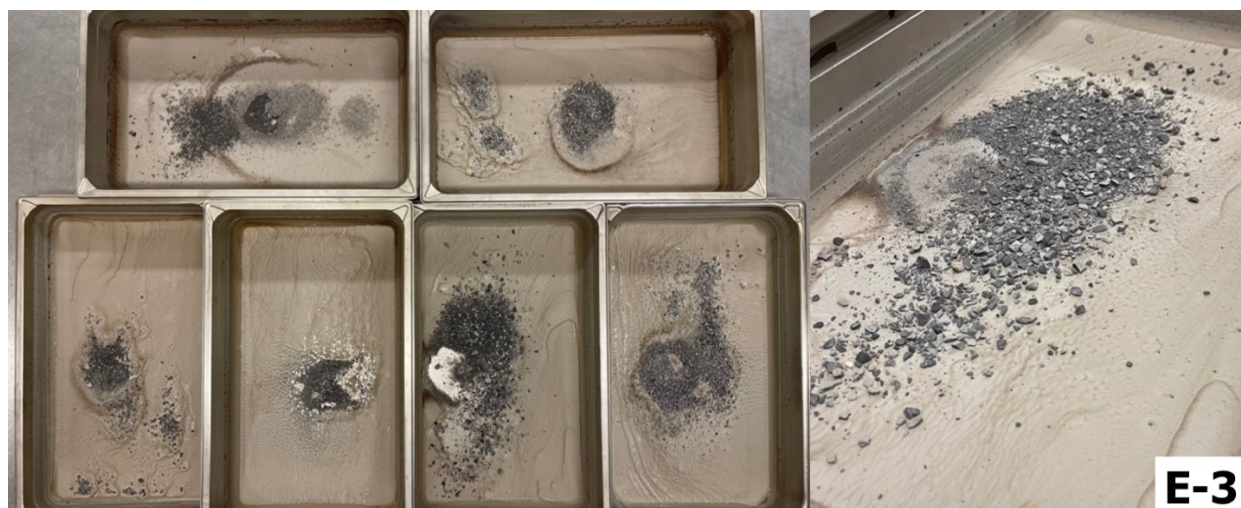


Figure 4.19 – Masses érodées de l'échantillon non traité E-3

Les échantillons testés ont été laissés à l'air ambiant pour sécher après le test. Après 15 jours, les échantillons traités ont montré une couleur différente, plus blanchâtre. Cette observation a confirmé l'hypothèse d'une post-amélioration. Les échantillons traités par calcification chimique et laissés à l'air ambiant après contact avec l'eau développent un nouveau processus de précipitation de carbonates de calcium. Ce procédé semble capable de générer un rebond important de la résistance, notamment après avoir subi des conditions de dégradation telles que la pluie ou des cycles de gel-dégel.

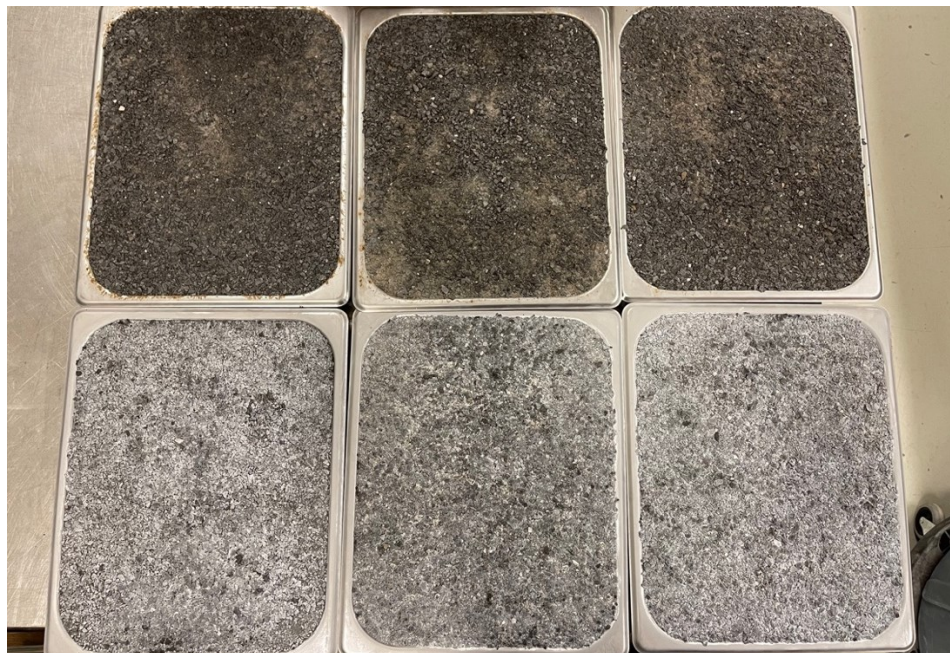


Figure 4.20 – Texture des échantillons après 15 jours de cure

Une autre comparaison non traduite en résultats est la rigidité du sol après contact avec la pluie. Au toucher, le sol non traité est mou et sans résistance, il est facilement percé ou déplacé à la main. Le sol traité, par contre, reste assez résistant, même après le détachement de petites particules superficielles (Figure 4.21).



Figure 4.21 – Comparaison entre la rigidité des échantillons E-3 et E-5

L'une des raisons pour lesquelles le sol non traité n'est pas complètement arraché est probablement la pente du test. Comme la pente est très douce et que le sol est très granuleux, le frottement prévaut entre les plus gros grains, empêchant davantage de particules d'être érodées lors de la pluie simulée. Après séchage des échantillons, on vérifie que la couche la plus superficielle du sol est complètement ameubli. Un test simple a été effectué pour confirmer ce résultat, soulever un côté de l'échantillon à un peu plus de 45 degrés et comparer la quantité de particules qui tombent avec la gravité.



Figure 4.22 – État de la couche la plus externe des échantillons E-3 et E-5 avant et après essai

4.6.3.2 Poids et taux de perte de sol

Les résultats présentés dans cette section ont été établis à partir de la masse érodée pour chaque intervalle de temps. À partir du poids de chacun des conteneurs, il a été possible de tracer les courbes de poids et le taux de perte de sol accumulé au fil du temps. Tous les échantillons ont été soumis aux mêmes conditions : pente 12%, pluviométrie 440 mm/h et sol de type poussière 3 (traité et non traité). Les résultats se retrouvent à la Figure 4.23 et la Figure 4.24.

Les deux types d'échantillons ont montré une érosion accentuée dans les 5 premières minutes et l'intensité de l'érosion a diminué avec le temps. Les échantillons non traités ont montré une masse de sol érodée accumulée moyenne d'environ 369 grammes. L'échantillon E-1 était celui avec la masse érodée la plus élevée, soit 407.36 grammes. Sur ce total, 123.73 grammes ont été érodés au cours des 5 premières minutes seulement. Le taux de perte pour cette période est de près de 25 g/min. Ces résultats démontrent que l'échantillon E-1 a perdu 9.8 % de sa masse totale dans le processus d'érosion.

En revanche, les échantillons traités présentaient une masse de sol érodée moyenne d'environ 117 grammes, soit 3.2 fois plus petite que les échantillons non traités. L'échantillon E-5 était celui avec la plus petite masse érodée, soit un total de 98.65 grammes, c'est-à-dire 4 fois plus petit que la masse de l'échantillon le plus érodé. Sur ce total, 31.85 grammes ont été érodés au cours des 5 premières minutes seulement. Le taux de perte pour cette période est d'environ 6 g/min. Ces résultats démontrent que l'échantillon E-5 a perdu 2.9 % de sa masse totale dans le processus d'érosion.

Les résultats du poids et du taux de perte de sol cumulé étaient cohérents avec les observations visuelles et ont confirmé que le traitement de calcification chimique était capable de réduire l'érosion externe des routes non revêtues.

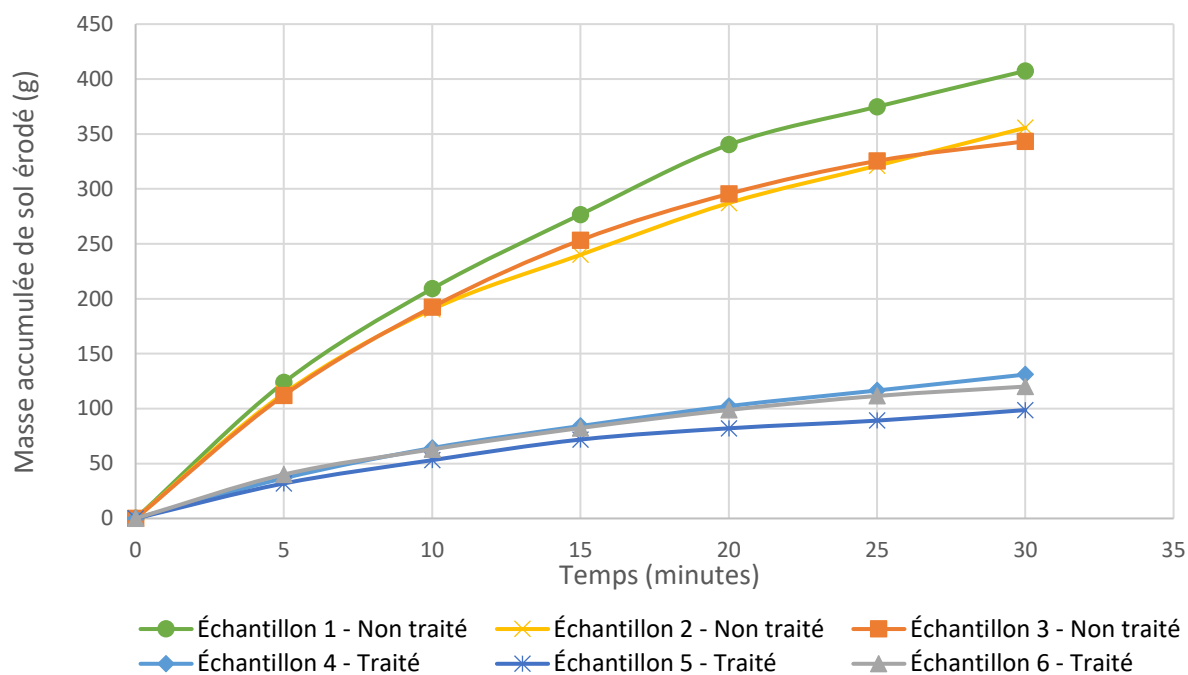


Figure 4.23 – Masse accumulée de sol érodé par minute

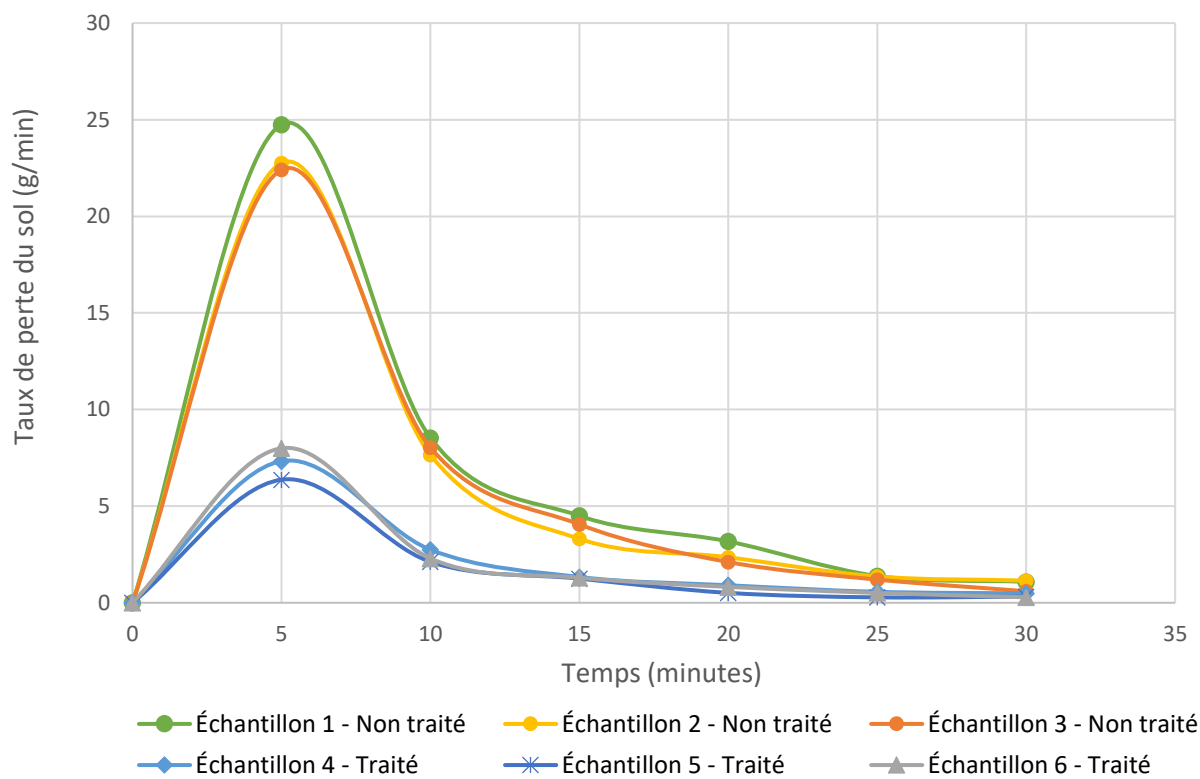


Figure 4.24 – Taux de perte du sol testé en grammes par minute

4.7 Effet de la granulométrie sur la résistance à la compression du sol traité

L'analyse a été effectuée afin de comprendre comment le traitement par calcification chimique se comporterait dans des échantillons de sol calcaire de granulométrie beaucoup plus élevée. Comme nous l'avons déjà mentionné dans les chapitres précédents, ces échantillons ont été préparés avec un sol MG-20 pur (fuseau MTQ et moins de fines) dans un moule de 10cm x 20cm. La recette optimale utilise la même procédure que les petits échantillons : déclenchement par l'eau avec carbonate de sodium A&H (10%) et CaCl_2 (2%). Quelques remarques ont été faites après le démoulage de ces échantillons :

- le démoulage a été effectué avec la même machine que pour les échantillons de poussière de roche. Au cours du processus, des fissures sont apparues dans les échantillons, mais elles n'ont pas entraîné leur perte;
- la texture est assez poreuse et les ponts de précipitation sont plus évidents que dans les échantillons de poussière de roche;
- en raison de l'absence des résistances antérieures, il a été décidé de les tester dans le laboratoire des structures de Polytechnique Montréal. Comme ils sont 4 fois plus grands que les échantillons de poussière de roche, la force en Newton appliquée devait également être 4 fois plus grande;
- le moule n'a pas été conçu pour ce test, mais il en avait les dimensions exactes. Toutefois, il présentait de nombreuses aspérités internes et de la rouille, ce qui rendait souvent le compactage et l'extraction difficiles.

Les images suivantes illustrent certaines des caractéristiques de cet essai : d'abord le sol mélangé aux réactifs (Figure 4.25a), puis deux échantillons de sol, l'un déjà démoulé et l'autre en cours de durcissement à l'intérieur du moule (Figure 4.25b).



Figure 4.25 – Échantillons de pierre concassée avant et après compactage dans le moule en acier

Les échantillons ont été préparés à partir du mois de décembre, mais comme il n'y avait qu'un seul moule, seul un échantillon à la fois a pu être préparé tous les 15 à 20 jours. Au total, 8 échantillons ont été préparés et testés le 3 mai 2022 au laboratoire des structures en béton. Les 8 échantillons préparés et l'exécution de l'essai sur la presse Amsler dans le laboratoire de structure de Polytechnique Montréal à la Figure 4.26.



Figure 4.26 – Échantillons de pierre concassée avant et pendant l'exécution des essais de compression simple

Il est important de souligner que cette analyse est uniquement comparative et sans évaluation de l'influence des effets secondaires tels que la minéralogie, la température ou le temps de durcissement. La méthodologie de préparation est la même et n'a été appliquée qu'à un sol, sans évaluation de caractéristiques supplémentaires. Les résultats de ces tests sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.3 - Évolution de la résistance en fonction du temps de cure.

Essai	Recette	Date de moulage	Durée de cure (mois)	Résistance Moyenne (MPa)	Id Laboratoire
Compression Simple	Pierre concassée – 1027 g Washing Soda A&H – 10%; CaCl ₂ – 2%; Teneur en eau – 5.9%; Cure à température ambiante	06 décembre 2021	5	9.86	A2
		20 janvier 2022	3.5	8.01	A3
		07 février 2022	3	6.46	A4
		25 février 2022	2.5	7.91	A5
		04 mars 2022	2	11.41	A6
		18 mars 2022	1.5	9.64	A7
		04 avril 2022	1	6.58	A8
		12 avril 2022	0.7	4.48	A9

Le tableau commence à partir de l'échantillon A2 car une première tentative de préparation a été faite mais l'échantillon A1 a été perdu lors de la manipulation en laboratoire. Les 4 premiers échantillons avec une cure entre 5 et 2,5 mois ont montré une résistance plus faible que ceux testés après une cure plus courte. Les échantillons préparés au mois de mars ont montré un comportement plus cohérent, bien que les résultats soient inférieurs à ceux attendus par rapport à la poussière de roche. En évaluant les résultats obtenus entre 0,7 et 2 mois, on constate qu'ils sont environ 4 à 5 fois inférieurs à la valeur trouvée dans les échantillons de poussière de roche 1 et environ 2 fois inférieurs à la poussière 3. Ceci est dû à la granulométrie plus grossière et à la plus grande porosité du sol, qui créent moins de possibilités de contact entre les particules et donc moins de liaisons CaCO₃. Cependant, il est impossible de dire si la granulométrie est le seul facteur influençant ce résultat.

La réduction significative de la résistance de ces échantillons est étroitement liée aux outils utilisés. L'équipe ne disposait que d'un seul moule pour préparer les échantillons, ce qui nécessitait un démoulage avant 30 jours de durcissement optimal. L'utilisation continue du moule l'a amené à rouiller et le diamètre a commencé à s'agrandir en raison de l'ouverture que le moule a sur le côté (Figure 4.27). Cette augmentation du diamètre au fil du temps a généré des échantillons plus grands que le diamètre de la plaque de rétention (Figure 3.14), c'est-à-dire qu'un frottement lors de l'extraction s'est également produit. La difficulté d'extraire les échantillons était également grande.

En général, les échantillons adhèrent facilement à la paroi du moule à cause de la rouille, de sorte que lors de l'extraction, la structure de l'échantillon est toujours endommagée. La plaque métallique utilisée à la base du moule était également collée à la base de l'échantillon ; pour la retirer, il fallait la frapper avec un marteau, ce qui endommageait les bords de l'échantillon.

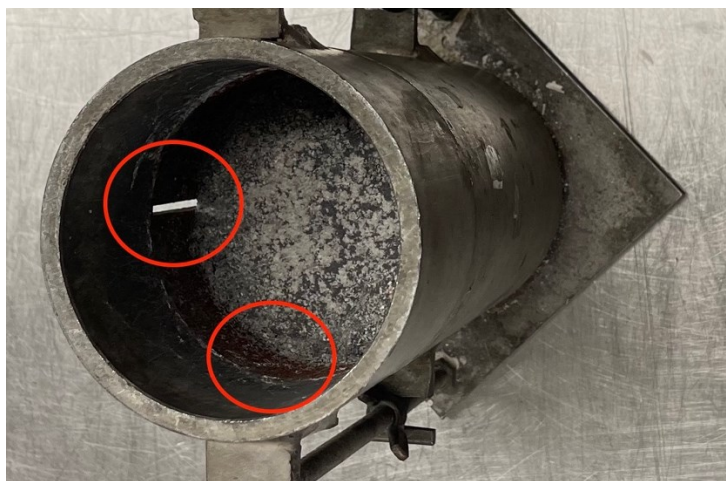


Figure 4.27 – Le moule du sol MG-20 après quelques mois d'utilisation

CHAPITRE 5 DISCUSSION

Le plan expérimental a démontré le potentiel de la recette optimale pour la calcification chimique. Ce procédé a permis de créer des liaisons entre les grains d'un sol et de le transformer en une roche calcaire pouvant être utilisée comme fondation routière ou comme couche de roulement, en remplacement de l'asphalte ou du béton. Les essais de laboratoire réalisés dans la phase d'élaboration du procédé ont démontré que les sols traités avaient une résistance à la compression comparable à celle du béton et une excellente résistance à l'érosion. Le potentiel de la technique ayant été démontré, la présente discussion porte sur les limitations, les recherches qui restent à faire, les questions en suspens avant de passer au chantier et son applicabilité à grande échelle. Ce chapitre permet donc de répondre à l'objectif spécifique 4.

Minéralogie des sols

Les premières évaluations ont cherché à définir la recette optimale du sol, la méthodologie, les réactifs, la cure et toutes les caractéristiques associées à ces étapes. Ces évaluations ont mis en évidence l'importance de la minéralogie du sol et, bien que présentées comme identiques par le fournisseur Bomix, les trois poussières de roche ont conduit à des performances différentes. La mise en œuvre de la technique à grande échelle nécessitera donc une caractérisation minéralogique des sols à traiter, notamment pour déterminer l'accessibilité des ions calcium en provenance du sol.

De même, la finesse et la pureté des réactifs est importante pour le succès de la technique et un contrôle de la minéralogie et de la granulométrie devra être effectué lors des traitements à grande échelle.

Protocol optimal de calcification (synthèse)

La définition du protocole constitue l'objectif principal de cette recherche, définissant un ensemble de procédés capables d'apporter une résistance améliorée aux sols granulaires. Ainsi, 6 étapes pour améliorer ces processus ont été proposées par rapport à ce qui a été défini par Ozeir (2021). La réaction fondamentale n'avait besoin que d'une seule adaptation pour devenir optimale: l'utilisation du sol lui-même comme source de calcium. Lors du choix du sol ayant la meilleure teneur en calcite, les réactifs sont injectés dans le sol. Parmi les 3 modes évalués, la méthode qui a montré la plus grande similitude avec les applications sur chantier est le déclenchement par l'eau. Il consiste à mélanger des réactifs chimiques et du sol calcaire avec l'ajustement d'une teneur en

eau optimale (5,9%). Les quantités avec les résultats les plus efficaces étaient de 10 % de carbonate de sodium et 2 % de chlorure de calcium. La préparation des échantillons est complétée par un compactage à une énergie égale à celle du Proctor modifié, dans les moules respectifs. Après avoir terminé la période de développement de la résistance (durcissement), les échantillons ont été démoulés, surfacés et testés en simple compression. Il a été observé que la résistance augmente à au cours des 30 premiers jours de cure. Après cette période, le taux d'évolution de la résistance ralentit. Pour cette raison, 30 jours ont été définis comme la période de cure optimale.

Parmi les points évoqués, la modification qui a donné les meilleurs résultats est l'utilisation du sol comme source de calcium, mais l'adaptation qui a apporté une plus grande efficacité a été le choix de la méthode du déclenchement par l'eau. Les méthodes d'injection précédentes posaient de nombreux problèmes, entraînant la perte de nombreux échantillons et du temps de recherche (Figure 3.18).

Effet de l'immersion et des cycles gel-dégel

Les deux principales conditions de dégradation appliquées aux échantillons ont entraîné des effets très notables. L'effet de l'immersion n'a pas montré de variations significatives dans la résistance à la compression des échantillons pour des périodes de durcissement de 2 à 30 jours. Cependant, après 60 jours, ces valeurs ont montré une différence croissante. La valeur la plus notable est à 90 jours de durcissement où l'échantillon est passé de 49,6 MPa (sans dégradation) à 36,06 MPa (48 heures d'immersion), soit une diminution de 13,54 MPa en 2 jours immergés dans l'eau (Figure 4.14). Ce résultat indique que la résistance du sol peut diminuer lorsqu'il est soumis à des périodes de submersion et il est recommandé de réaliser des tests d'immersion plus longs, avec un maximum d'au moins 1 mois.

En ce qui concerne les cycles gel-dégel, les résultats obtenus après 30 cycles présentaient une résistance finale supérieure à la valeur obtenue pour un sol non traité (0.73 MPa) ou celle usuellement obtenue pour des sols traités au ciment (3.4 MPa) (Aboud, 2018; Gross & Adaska, 2020). L'allure de la perte de résistance met en évidence une forte diminution pour les premiers cycles, mais une stabilisation par la suite, les résultats de 25 cycles (7,70 MPa) et 30 cycles (7,35 MPa) étant similaires. En d'autres termes, après avoir brisé les ponts précipités les plus fragiles, l'échantillon entre dans un état capable de résister à l'effet de dégradation sans se rompre davantage, ne laissant que les liaisons les plus fortes à l'intérieur de l'échantillon.

Simulation de pluie

La simulation de pluie a montré des résultats significatifs en termes de résistance à l'érosion, soit une perte de sol de 3,2 fois inférieure pour un échantillon traité par rapport à un échantillon non traité. Le taux initial de perte est passé de 25 g/min à 6 g/min. Il est important de souligner qu'il s'agit d'une procédure non standardisée et qu'elle a servi uniquement pour comparer expérimentalement l'effet de la calcification chimique. Malgré cela, certains points ont été observés et pourraient être améliorés pour de futurs essais. L'intensité des précipitations simulées était extrême et bien supérieure aux épisodes usuellement rencontrés.

Concernant le moule, celui-ci présente des bords arrondis, ce qui générerait un compactage plus faible dans les coins. Que le sol soit traité ou non, ces zones ont ainsi montré une forte érosion initiale. Le bord inférieur du moule lors du test a également créé une barrière retenant les grains les plus grossiers, jusqu'à une rupture conduisant à la chute des grains en même temps.

Selon Schertz (1983), la perte de sol devrait être comprise entre 0,4 et 1 mm d'érosion du sol par an, ce qui correspond à 5 à 12 tonnes/ha/an. La valeur obtenue à la surface de notre moule est très éloignée (environ 1000 fois), mais comme indiqué précédemment, nous utilisons des conditions extrêmes et non normalisées. Cependant, l'essai a permis de comparer deux situations d'érosion (sol traité et non traité) dans des conditions similaires de préparation et de sollicitation. Il s'agit donc d'une évaluation comparative des performances et non d'une évaluation dans un contexte réel.

Mise en œuvre

Afin d'évaluer l'applicabilité de la technique à des sols de fondation, des tests ont été effectués sur un sol de type MG-20, couramment utilisé dans la construction des routes. Ceux-ci ont montré des résistances 5 fois inférieures à celles de la poussière de roche 1 et 2 fois inférieures à celles de la poussière de roche 3. Cependant, par rapport à un sol non traité, elles représentent une augmentation d'un facteur 15 et, par rapport à un sol stabilisé avec du ciment, elles restent 3 fois plus élevées (Gross & Adaska, 2020). Ce résultat permet de conclure que la technique peut être utilisée sur un chantier de construction actuel, en ne modifiant que très légèrement la procédure, c'est-à-dire en ajoutant une étape de malaxage des sols avec les réactifs. Il s'agit ainsi d'une solution alternative qui donne des résultats similaires, voire supérieurs, aux techniques de stabilisation actuellement utilisées.

L'écart important entre le MG-20 et la poussière de roche montre toutefois que la voie à suivre consiste probablement à utiliser la poussière de roche calcifiée comme un nouveau type de géomatériau. Le potentiel de cette technique démontre la possibilité de créer un produit capable de concurrencer le béton et l'asphalte. En outre, il est possible de surmonter l'obstacle de la géotechnique routière et d'étendre l'application du produit à d'autres types de travaux géotechniques. Alors que le traitement de sol de type MG-20 servira à la réhabilitation des routes non revêtues et des fondations routières existantes, une suggestion serait d'utiliser le retraitement en place à froid, où des réactifs chimiques de calcification pourraient être ajoutés au processus sans rien changer à l'exécution : (1) scarification de la fondation, (2) épandage des réactifs, (3) malaxage du mélange (sol + réactifs) suivi d'une humidification, (4) passage du rouleau compacteur, et (5) mise en place d'un revêtement bitumineux, le cas échéant. Rappelons que l'application d'une couche de bitume permet d'accélérer la réaction de base par apport de chaleur, générant une forte résistance et une plus grande précipitation dans le sol (Figure 5.1).

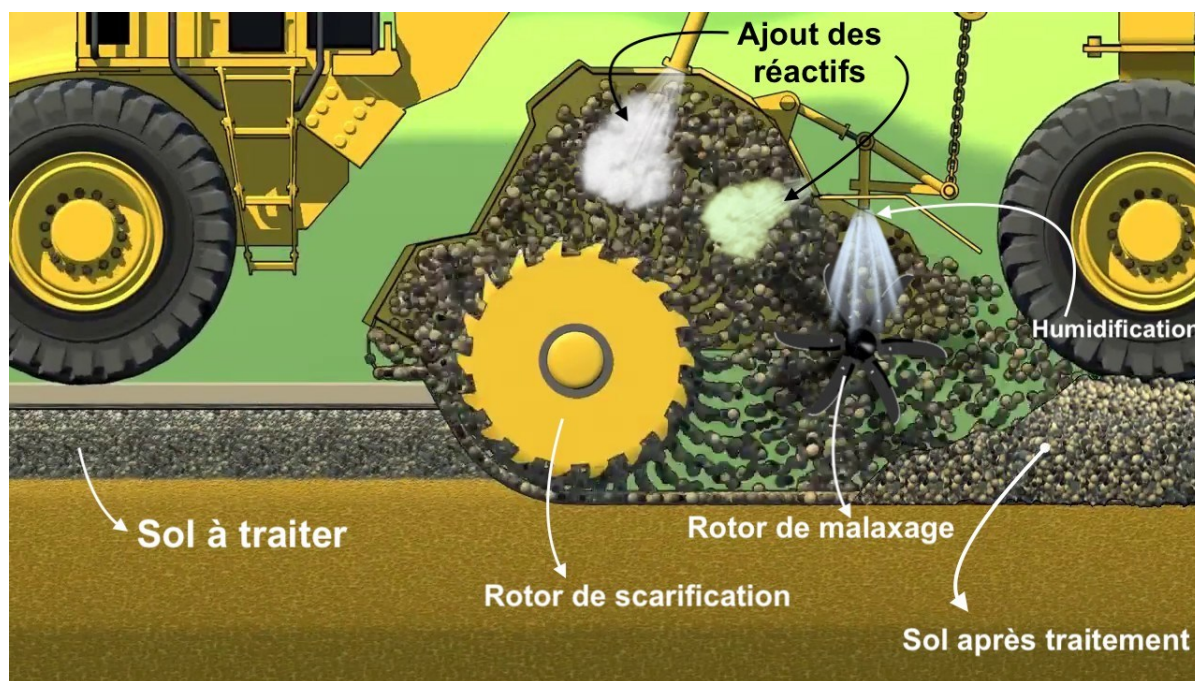


Figure 5.1 – Concept d'un scarimalaxeur pour traitement des sol par calcification chimique (Adapté de Infociments, 2018)

Pouvoir d'auto-réparation

Le pouvoir d'autoréparation en cas d'altération en surface mis en évidence dans les essais est essentiel puisqu'il permet d'envisager des routes capables de se régénérer après une dégradation,

ce qui diminue la nécessité d'entretiens récurrents. Grâce cette capacité, il est possible d'envisager une commercialisation reposant sur le concept émergent d'économie de la fonctionnalité. Ainsi, ce ne serait pas la route qui constituerait le produit, mais plutôt la fonction quelle assure, à savoir le passage de véhicules. En effet, les performances améliorées des routes traitées permettent d'envisager une augmentation de leur durée de vie et une meilleure qualité de roulement. Le suivi de l'autoréparation des routes, assorti de moyens de traitement en cas de défauts ponctuels, permettrait d'assurer une réponse adaptée aux besoins du client. Cette approche permettrait de vendre un produit fini à court terme, mais également un contrat de service et d'entretien à long terme.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les résultats présentés dans le plan expérimental ont montré non seulement la faisabilité de la technique de stabilisation des sols, mais aussi un potentiel important pour en faire un nouveau géomatériau. Dans ce projet, il a également été possible de conclure que la recette optimale dépend de plusieurs facteurs. La minéralogie du sol est fondamentale pour atteindre de grandes valeurs de résistance. La prédominance de matériaux granulaires d'origine calcaire dans la province du Québec (MTQ, 2021a) constitue un atout pour la technique puisque cela permet l'amélioration du sol sans ajout de sources riches en calcium. Le type de réactif utilisé joue également un rôle important dans cette amélioration, car il est important de vérifier la granulométrie et la solubilité des réactifs lorsqu'ils sont présents dans le mélange. Cependant, même avec des réactifs et des sols moins efficaces, le niveau d'amélioration est toujours très important. Si l'on compare avec les échantillons non traités (0,73 MPa) testés par Ozeir (2021), le réactif Solvay Light est capable d'offrir une amélioration d'un facteur 20 environ et la poussière de roche 3, majoritairement dolomitique, présente une amélioration d'environ 15 fois par rapport à la résistance d'origine. En prenant comme référence la recette optimale avec de la poussière de roche 1, 10% de Na_2CO_3 A&H et 2% de $CaCl_2$, l'amélioration de la résistance est près de 69 fois après 90 jours de cure. Ce constat confirme l'atteinte des objectifs spécifiques 1 et 2, respectivement, à travers la définition du protocole optimal de calcification chimique et les résultats effectifs des tests de compression simple en termes de temps de cure.

Ce bon comportement mécanique des échantillons traités a également été confirmé lors de tests d'immersion et de cycles gel-dégel. Lorsqu'ils ont été testés dans des conditions extrêmes de cycle de gel-dégel, les échantillons ont présenté une baisse significative de la résistance, d'environ 70 %. Bien que cette diminution soit importante, elle reste 15 fois supérieure à la valeur d'un sol non traité et le comportement asymptotique laisser supposer une très faible variation pour de plus longues sollicitations.

Finalement, l'application de la technique de calcification chimique a permis de transformer la surface du sol et de réduire son érosion externe d'un facteur 4. Les échantillons traités ont également présenté un rebond de résistance après quelques jours. Comme dans l'évaluation de

l'effet du temps de préparation, la formation de nouveaux précipités à la surface est perceptible, ce qui permet à l'échantillon de redevenir résistant.

La calcification proposée dans cette étude offre donc une alternative capable de contrôler l'érosion d'un sol en plus d'améliorer ses autres propriétés géotechniques du sol. Ainsi, les résultats confirment cette technique comme une excellente alternative aux méthodes traditionnelles de stabilisation des sols. La technique a été pensée pour être simple à mettre en œuvre à l'aide de matériel de chantier existant, mais une nouvelle étape d'essais centrée sur l'application terrain est nécessaire pour affiner les données et optimiser les paramètres de traitement. Ce n'est qu'après ces essais à grande échelle, dans différentes conditions de dégradation et types de routes, que la méthode pourra être considérée comme une technique pleinement acceptable pour le contrôle de l'érosion et l'amélioration des chaussées. À ce stade, il sera possible de vérifier si la solution est capable de devenir un nouveau géomatériau capable de remplacer l'asphalte ou même le béton. Le potentiel existe mais il faut trouver les applications exactes à cette technologie.

Le deuxième point de recommandation est lié à la minéralogie des sols. Il sera important, avant toute application de cette technique, de réaliser une évaluation de la concentration en calcite dans le sol utilisé. Ce résultat sera essentiel pour confirmer la résistance sera obtenue et l'atteinte des objectifs. Si la procédure implique le remplacement de l'asphalte ou la stabilisation des pentes, nous aurons différentes formulations et le paramètre qui a la plus grande influence sur cette procédure est la minéralogie.

La troisième recommandation porte sur la viabilité économique et écologique de la technique. Une évaluation du coût de mise en œuvre est nécessaire, notamment pour définir les temps de malaxage pour un sol homogène, et cela nécessite des essais sur le terrain. En parallèle, une étude d'impact environnemental doit être réalisée. En effet, le CaCl_2 est un sel de voirie largement utilisé sur les routes québécoises avec des limites bien établies et le carbonate de sodium se trouve facilement dans la nature. Cependant, comme le montre la revue de la littérature de cette thèse, ces réactifs rejetés dans la nature peuvent provoquer des impacts importants sur la faune et la flore locales. Ainsi, une étude du cycle de vie, de l'infiltration et de la contamination de la nappe phréatique doit être réalisée pour confirmer les impacts et la viabilité environnementale.

La quatrième recommandation porte sur quelques tests complémentaires, en laboratoire, en tenant compte des résultats obtenus à ce stade de la recherche :

- essai de chargement cyclique dans le but de comprendre le comportement d'un sol amélioré vis-à-vis d'une sollicitation similaire à celle de la route,
- nouveaux essais d'immersion des échantillons traités avec un maximum de 30 jours, pour comprendre le comportement des échantillons soumis à une longue exposition à l'eau,
- nouveaux essais de simulation de pluie en utilisant un moule différent avec une meilleure qualité de compactage et une buse permettant de simuler une intensité de pluie modérée.

Enfin, il est recommandé d'étudier plus en profondeur l'effet d'autoréparation. Il est important d'évaluer comment s'effectue cette cicatrisation et quelle résistance peut être obtenue après de nouvelles périodes de cure. Cette fonctionnalité pourrait constituer un avantage de la technologie par rapport aux techniques de traitement existantes, notamment pour réduire le coût d'entretien annuel et diminuer le déficit de maintien d'actifs.

RÉFÉRENCES

- Aboud, F. (2018). *Création d'un montage expérimental pour l'application des cycles de gel-dégel sous confinement pour les mélanges sol-ciment*. (Maîtrise). École de Technologie Supérieure,
- Agnihotri, R., Mahuli, S. K., Chauk, S. S., & Fan, L.-S. (1999). Influence of Surface Modifiers on the Structure of Precipitated Calcium Carbonate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38(6), 2283-2291. doi:10.1021/ie9900521
- Al-Thawadi, S. (2013). Consolidation of Sand Particles by Aggregates of Calcite Nanoparticles Synthesized by Ureolytic Bacteria under non-Sterile Conditions. *Journal of Chemical Science and Technology, Volume 2*.
- Amin, M., Zomorodian, S. M. A., & O'Kelly, B. C. (2017). Reducing the hydraulic erosion of sand using microbial-induced carbonate precipitation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 170(2), 112-122. doi:10.1680/jgrim.16.00028
- ASTM. (2010). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. In *Soil And Rock (I)* (Vol. 04.08, pp. 6). West Conshohocken, Pa: American Society for Testing and Materials.
- ATC, & AQTR. (2004). *Guide canadien de conception géométrique des routes*. Ottawa: Association des transports du Canada = Transportation Association of Canada.
- Balihuta, A. M. (2018). *Amélioration des propriétés géotechniques de matériaux routiers par biocalcification* (Mémoire de maîtrise). École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Barabesi, C., Galizzi, A., Mastromei, G., Rossi, M., Tamburini, E., & Perito, B. (2007). Bacillus subtilis gene cluster involved in calcium carbonate biomineralization. *J Bacteriol*, 189(1), 228-235. doi:10.1128/jb.01450-06
- Barhoum, A., Van Assche, G., Makhlouf, A. S. H., Terryn, H., Baert, K., Delplancke, M.-P., . . . Rahier, H. (2015). A Green, Simple Chemical Route for the Synthesis of Pure Nanocalcite Crystals. *Crystal Growth & Design*, 15(2), 573-580. doi:10.1021/cg501121t
- Benini, S., Rypniewski, W. R., Wilson, K. S., Miletti, S., Ciurli, S., & Mangani, S. (1999). A new proposal for urease mechanism based on the crystal structures of the native and inhibited enzyme from Bacillus pasteurii: why urea hydrolysis costs two nickels. *Structure*, 7(2), 205-216. doi:10.1016/S0969-2126(99)80026-4
- Birchal, V., Rocha, S., & Ciminelli, V. (2000). The effect of magnesite calcination conditions on magnesia hydration. *Minerals engineering*, 13(14-15), 1629-1633.
- BNQ - Bureau de normalisation du Québec. (2013a). Norme 2501-250 - Détermination de la relation teneur en eau-masse volumique - Essai avec énergie de compactage normale (600 kN.m/m³). In *Génie civil et infrastructures urbaines - Sols* (pp. 17). Québec: Bureau de normalisation du Québec.
- BNQ - Bureau de normalisation du Québec. (2013b). Norme 2501-255 - Détermination de la relation teneur en eau-masse volumique - Essai avec énergie de compactage modifiée (2700

- kN.m/m³). In *Génie civil et infrastructures urbaines - Sols* (pp. 17). Québec: Bureau de normalisation du Québec.
- BNQ - Bureau de normalisation du Québec. (2014). Norme 2560-114 - Travaux de génie civil - Granulats. In *Génie civil et infrastructures urbaines* (pp. 69). Québec: Bureau de normalisation du Québec.
- Breton, C. (2002). Carbonate de sodium Procédé Solvay à l'ammoniac. *Techniques de l'ingénieur Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique, base documentaire : TIP452WEB*(ref. article : j6195). doi:10.51257/a-v1-j6195
- Brockenbrough, R. L., & Boedecker, K. J. (2003). *Highway engineering handbook : building and rehabilitating the infrastructure*. New York: McGraw-Hill.
- Burbank, M., Weaver, T., Lewis, R., Williams, T., Williams, B., & Crawford, R. (2013). Geotechnical Tests of Sands Following Bioinduced Calcite Precipitation Catalyzed by Indigenous Bacteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(6), 928-936. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000781
- CAA - Canadian Automobile Association. (2021). Coût des routes en mauvais état au Canada. In (pp. 22). Ottawa, Canada.
- Castanier, S., Le Métayer-Levrel, G., Orial, G., Loubière, J.-F., & Perthuisot, J.-P. (2000). Bacterial Carbonatogenesis and Applications to Preservation and Restoration of Historic Property. In O. Ciferri, P. Tiano, & G. Mastromei (Eds.), *Of Microbes and Art: The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage* (pp. 203-218). Boston, MA: Springer US.
- Chen, Z., & Nan, Z. (2011). Controlling the polymorph and morphology of CaCO₃ crystals using surfactant mixtures. *Journal of Colloid and Interface Science*, 358(2), 416-422. doi:10.1016/j.jcis.2011.02.062
- Cheng, Cord-Ruwisch, R., & Shahin, M. A. (2013). Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), 81-90. doi:10.1139/cgj-2012-0023
- Cheng, B., Lei, M., Yu, J., & Zhao, X. (2004). Preparation of monodispersed cubic calcium carbonate particles via precipitation reaction. *Materials Letters*, 58(10), 1565-1570. doi:10.1016/j.matlet.2003.10.027
- Cheng, L., Shahin, M., Cord-Ruwisch, R., Addis, M., Hartanto, T., & Elms, C. (2014). *Soil Stabilisation by Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP): Investigation into Some Physical and Environmental Aspects*.
- Chotoli, F., Aldeia, W., Derenzo, S., Guimarães, K., Loureiro, R., Gallo, M., . . . Castro, B. (2017). *Quantificação de polimorfos do carbonato de cálcio cristalizado em laboratório* São Paulo, Sp: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT.
- Chou, C.-W., Seagren, E. A., Aydilek, A. H., & Lai, M. (2011). Biocalcification of Sand through Ureolysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12), 1179-1189. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000532

- Chu, D. H., Vinoba, M., Bhagiyalakshmi, M., Hyun Baek, II, Nam, S. C., Yoon, Y., . . . Jeong, S. K. (2013). CO₂ mineralization into different polymorphs of CaCO₃ using an aqueous-CO₂ system. *RSC Advances*, 3(44), 21722-21729. doi:10.1039/C3RA44007A
- Ciurli, S., Benini, S., Rypniewski, W. R., Wilson, K. S., Miletto, S., & Mangani, S. (1999). Structural properties of the nickel ions in urease: novel insights into the catalytic and inhibition mechanisms. *Coordination Chemistry Reviews*, 190-192, 331-355. doi:10.1016/S0010-8545(99)00093-4
- CNESST - Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité. (2022a). Fiche 497-19-18 Carbonate de Sodium. In d. l. é. Commission des normes, de la santé et de la sécurité du travail (Ed.). Québec.
- CNESST - Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité. (2022b). *Fiche 10043-52-4 - Chlorure de calcium*. Retrieved from Québec: https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=105288
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th edition ed.). Stamford: Cengage Learning.
- Dejong, J., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., van Paassen, L., Al Qabany, A., . . . Tsesarsky, M. (2013). Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges. *Géotechnique*, 63, 287-301. doi:10.1680/geot.SIP13.P.017
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.12.029
- Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. *Front Microbiol*, 4, 314. doi:10.3389/fmicb.2013.00314
- Domingo, C., Loste, E., Gómez-Morales, J., García-Carmona, J., & Fraile, J. (2006). Calcite precipitation by a high-pressure CO₂ carbonation route. *The Journal of Supercritical Fluids*, 36(3), 202-215. doi:10.1016/j.supflu.2005.06.006
- Dupuis, S. (2014). Les différents types de structures routières. Retrieved from <https://slideplayer.fr/slide/1298019/>
- Code de pratique pour la gestion environnementale des sels de voirie, (2004).
- Esnault Filet, A., Gadret, J.-P., Loygue, M., & Borel, S. (2012). *Biocalcis and its Applications for the Consolidation of Sands*.
- Ewane, M. S. (2019). *Chapitre 4: Gel et dégel des chaussées. Notes du cours de Géotechnique Routière (CIV8450)*. École Polytechnique de Montreal., Montréal.
- Farlane, S. M. (2014). À l'aube du dégel : 41 000 camions surchargés épinglés en six ans. Retrieved from <https://www.chamblyexpress.ca/actualites/societe/143397/a-laube-du-degel-41-000-camions-surcharges-epingles-en-six-ans>
- Fattet, M., Fu, Y., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulous, J., . . . Stokes, A. (2011). Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Fuel and Energy Abstracts*, 87, 60-69. doi:10.1016/j.catena.2011.05.006

- Feng, B., Yong, A. K., & An, H. (2007). Effect of various factors on the particle size of calcium carbonate formed in a precipitation process. *Materials Science and Engineering: A*, 445-446, 170-179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.010>
- Ferris, F. G., Phoenix, V., Fujita, Y., & Smith, R. W. (2004). Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10 to 20°C in artificial groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(8), 1701-1710. doi:10.1016/S0016-7037(03)00503-9
- Ferris, F. G., Stehmeier, L. G., Kantzas, A., & Mourits, F. M. (1996). Bacteriogenic Mineral Plugging. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 36(09). doi:10.2118/97-09-07
- Forget, N. (2005). *Distribution et rétention des sels de déglacage dans des sols en bordure d'une autoroute*. (Maîtrise). Université de Montréal, Montréal, QC.
- Fragaszy, R. J., Santamarina, J. C., Amekudzi, A., Assimaki, D., Bachus, R., Burns, S. E., . . . Tsouris, C. (2011). Sustainable development and energy geotechnology — Potential roles for geotechnical engineering. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 611-621. doi:10.1007/s12205-011-0102-7
- Fujita, Y., Ferris, F. G., Lawson, R. D., Colwell, F. S., & Smith, R. W. (2000). Calcium Carbonate Precipitation by Ureolytic Subsurface Bacteria. *Geomicrobiology Journal*, 17(4), 305-318. doi:10.1080/782198884
- Gagnon, M.-A. (2019). Nos routes en déroute: il faut 16 milliards \$ pour rattraper le retard d'entretien. *Journal de Québec*. Retrieved from <https://www.journaldequebec.com/2019/06/19/le-deficit-dentretien-se-creuse>
- Gagnon, M.-A. (2021). État du réseau routier québécois: ça y va «lentement mais sûrement». *Journal de Québec*. Retrieved from <https://www.journaldequebec.com/2021/06/21/ca-y-va-lentement-mais-surement>
- Ganguli, A., Ahmad, T., Vaidya, S., & Ahmed, J. (2008). Microemulsion route to the synthesis of nanoparticles. *Pure and Applied Chemistry*, 80, 2451. doi:10.1351/pac200880112451
- Gomez, M., Martinez, B., Dejong, J., Hunt, C., deVlaming, L., Major, D., & Dworatzek, S. (2013). *Bio-mediated Soil Improvement Field Study to Stabilize Mine Sands*. Paper presented at the GeoMontréal 2013, Montréal, QC, Canada.
- Gomez, M. G., Martinez, B. C., DeJong, J. T., Hunt, C. E., deVlaming, L. A., Major, D. W., & Dworatzek, S. M. (2015). Field-scale bio-cementation tests to improve sands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 168(3), 206-216. doi:10.1680/grim.13.00052
- Gouvernement du Canada. (2022). Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010. Retrieved from https://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?searchType=stnName&txtStationName=montreal&searchMethod=contains&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5490&dispBack=0
- Gouvernement du Québec. (2010). Stratégie québécoise pour une gestion environnementale des sels de voirie. Retrieved from <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1061427.pdf>
- Gross, J., & Adaska, W. (2020). *Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils*. Retrieved from Ames, IA:

- Hammes, F. (2003). *Ureolytic microbial calcium carbonate precipitation*. (PhD). University of Ghent, Ghent, Belgium.
- Hamrouni, B., & Dhahbi, M. (2003). Calco-carbonic equilibrium calculation. *Desalination*, 152(1), 167-174. doi:10.1016/S0011-9164(02)01059-7
- Han, Y. S., Hadiko, G., Fuji, M., & Takahashi, M. (2006). Factors affecting the phase and morphology of CaCO₃ prepared by a bubbling method. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(4), 843-847. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2005.07.050
- Haouzi, F.-Z. (2019). *Prévention de l'érosion interne des matériaux granulaires par la technique de biocalcification* (Thèse de Doctorat). Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.
- Harkes, M., Van Paassen, L., Booster, J., Whiffin, V., & Van Loosdrecht, M. (2010). Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement. *Ecological Engineering*, 36(2), 112-117. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.01.004
- Hassan, B. (2015). Dégradation et usure des revêtements routiers souples. *Frottement, usure et lubrification*. doi:10.51257/a-v1-tri4620
- Herrero, M., & Stuckey, D. C. (2015). Bioaugmentation and its application in wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 140, 119-128. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.10.033
- Hilaire, P., & Guhur, E. (2016). Érosion. Retrieved from <https://meuse.chambre-agriculture.fr/environnement/amenagements-hydrauliques/erosion/>
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*: Presses inter Polytechnique.
- Huang, C., Bradford, J. M., & Cushman, J. H. (1983). A Numerical Study of Raindrop Impact Phenomena: The Elastic Deformation Case. *Soil Science Society of America Journal*, 47(5), 855-861. doi:10.2136/sssaj1983.03615995004700050003x
- Hubbe, M. A., & Gill, R. A. (2016). Fillers for Papermaking: A Review of their Properties, Usage Practices, and their Mechanistic Role. 2016, 11(1), 78. Retrieved from https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_1_2886_Hubbe_Gill_Review_Fillers_Papermaking
- Hyslip, J., & McCarthy, W. (2000). Substructure investigation and remediation for high tonnage freight line. *AREMA Proceedings of the 2000 Annual Conference*. Dallas, Texas., 26 p.
- Ibrahim, A.-R., Vuningoma, J. B., Hu, X., Gong, Y., Hua, D., Hong, Y., . . . Li, J. (2012). High-pressure gas–solid carbonation route coupled with a solid ionic liquid for rapid synthesis of rhombohedral calcite. *The Journal of Supercritical Fluids*, 72, 78-83. doi:10.1016/j.supflu.2012.08.004
- Infociments. (2018). Retraitement des chaussées en place à froid aux liants hydrauliques. Retrieved from <https://www.infociments.fr/liants-hydrauliques-routiers/retraitement-des-chaussees-en-place-froid-aux-liants-hydrauliques>
- Jiang, N.-J., Tang, C.-S., Yin, L.-Y., Xie, Y.-H., & Shi, B. (2019). Applicability of Microbial Calcification Method for Sandy-Slope Surface Erosion Control. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11), 04019250. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002897

- Kézdi, Á., & Rétháti, L. (1988). *Soil mechanics of earthworks, foundations, and highway engineering* (Vol. 3): Elsevier.
- Khanna, S. K., & Justo, C. E. G. (2011). *Highway Engineering* (Vol. 9). Roorke: Nem Chand.
- Kim, J.-H., Ahn, J.-W., Park, H.-S., & Park, C.-H. (2004). Synthesis Peculiarity of the Precipitated Calcium Carbonate Polymorphs Following Variation of Supersaturation in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and Na_2CO_3 Reaction System. *Geosystem Engineering*, 7(4), 95-102. doi:10.1080/12269328.2004.10541227
- Konrad, J.-M., & Lemieux, N. (2005). Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 515-527.
- Lacasse, C., Chaussadent, A., Tarte, F.-A. D., & Leroy, V. (2014). *Étude d'impact des épandages de produits de voirie sur les milieux naturels et stratégie d'intervention durable pour la municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs*. Retrieved from Sainte-Anne-des-Lacs, QC:
- Latrémouille, I. (2013). Guide des saines pratiques d'entretien des chemins forestiers dans les ZECS. *ZECS Québec et la Fondation de la Faune*, 76. Retrieved from <https://www.yumpu.com/fr/document/read/17012083/chapitre-1-chemins-forestiers-zec-quebec>
- Lay, M. G. (2009). *Handbook of road technology* (4th ed. ed.). London: Spon Press.
- LCPC. (1998). *Catalogue dess dégradation de surface des chaussées*. (1167-489x). Paris: Institut Français des Sciences et Technologies des Réseaux de l'aménagement et des Transports Retrieved from https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/MethodeDEssai/MethodeDEssai-LCPC-ME52.pdf
- Le Vern, M. (2016). *Conception mécaniste-empirique des chaussées non revêtues*. (Maîtrise de recherche Mémoire de maîtrise). Université de Laval, Québec.
- Lévesque, D. (2022). La Colombie-Britannique demande l'avis du public pour protéger ses bassins versants. Retrieved from <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1857052/bassins-versants-hydrographique-george-heyman-strategie-forum-changements-climatiques>
- Liendo, F., Arduino, M., Deorsola, F. A., & Bensaid, S. (2022). Factors controlling and influencing polymorphism, morphology and size of calcium carbonate synthesized through the carbonation route: A review. *Powder Technology*, 398, 117050. doi:10.1016/j.powtec.2021.117050
- Little, D. N. (1995). *Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. Dubuque, IA: The National Lime Association.
- Loko, B. Y. (2012). *Analyse des dégradations des chaussées revêtues et proposition d'une structure adaptée : cas du tronçon AKASSATO – ALLADA de la RNIE2*. (Diplôme d'ingénieur de conception). Université d'Abomey-Calavi, Bénin.
- MacAdam, J., & Parsons, S. A. (2004). Calcium carbonate scale formation and control. *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology*, 3(2), 159-169. doi:10.1007/s11157-004-3849-1
- Martinez, B. C. (2012). *Up-Scaling of Microbial Induced Calcite Precipitation in Sands for Geotechnical Ground Improvement*. (Ph.D.). University of California, Davis, Ann Arbor.

- Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/up-scaling-microbial-induced-calcite/docview/1319305649/se-2?accountid=40695> ProQuest Dissertations & Theses Global database. (3555372)
- McKenney, D., & Gerardin, V. (2001). *Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles: Vers une définition des bioclimats du Québec*. Québec, Canada: Direction du patrimoine écologique et du développement durable, ministère de l'Environnement.
- Mir, B. (2018). *Some Studies on Mechanical Behaviour of Cement Stabilized Dredged Soil from Flood Spill Channel of Jhelum River Srinagar*.
- Mitchell, A. C., & Ferris, F. G. (2006). The Influence of *Bacillus pasteurii* on the Nucleation and Growth of Calcium Carbonate. *Geomicrobiology Journal*, 23(3-4), 213-226. doi:10.1080/01490450600724233
- Mitchell, J. K., & Santamarina, J. C. (2005). Biological Considerations in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), 1222-1233. doi:doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222)
- Mojtaba, S., Baghini, M., Ismail, A., Kheradmand, B., Hafezi, M., & Al-Mansob, R. (2013). Bitumen-cement Stabilized Layer in Pavement Construction Using Indirect Tensile Strength (ITS) Method. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5, 5652-5656. doi:10.19026/rjaset.5.4251
- MRNF - Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2023). Carte interactive géologique et minière du Québec. Retrieved from https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1108_afchCarteIntr
- MTQ. (2002). *Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples*. Québec: Gouvernement du Québec Retrieved from <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0934906.pdf>
- MTQ. (2010). *Comparaison des coûts de construction routière entre le Québec, le Nouveau-Brunswick et l'Ontario*. Retrieved from Québec: https://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/DepotNumerique_v2/AffichageFichier.aspx?idf=159725
- MTQ. (2012). *Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées*. Retrieved from Québec: https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussees/Documents/orientation_types_chaussees2010-2015.pdf
- MTQ. (2014). Information sur le réseau routier. Retrieved from <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/projets-infrastructures/info-reseau-routier/Pages/information-sur-le-reseau-routier.aspx>
- MTQ. (2021a). Carte de la Direction générale principale de la région de Montréal. *Carte des carrières et sablières et des centrales d'enrobage*. Retrieved from <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseauxroutier/chaussees/cartes-carrieres-sablieres-centrales-enrobage/Pages/cartes-carrieres-sablierescentrales-enrobage.aspx>

- MTQ. (2021b). *La protection du réseau routier: une priorité*. Retrieved from Québec: https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/degel/Documents/fiches_degel.pdf
- MTQ. (2021c). *Rapport annuel de gestion 2020-2021*. Retrieved from Montréal: https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/transports/publications-adm/rapport-annuel-de-gestion/RA_rapport_annuel_2020-2021_MTQ.pdf?1632844429
- Nemati, M., & Voordouw, G. (2003). Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ. *Enzyme and Microbial Technology*, 33(5), 635-642. doi:10.1016/S0141-0229(03)00191-1
- Nicholson, P. G. (2014). *Soil improvement and ground modification methods*. Waltham, MA, USA: Butterworth-Heinemann.
- Nikolaides, A. (2014). *Highway engineering: Pavements, materials and control of quality*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- NWS - National Weather Service. (2021). HDSC World Record Point Precipitation Measurements. Retrieved from https://www.weather.gov/owp/hdsc_world_record
- O'Flaherty, C. A. (2002). Chapter 6 - Soil-stabilized pavements. In C. A. O'Flaherty, A. Boyle, M. J. Brennan, J. Knapton, H. A. Khalid, J. McElvaney, D. McMullen, C. A. O'Flaherty, J. E. Oliver, M. S. Snaith, A. R. Woodside, W. D. H. Woodward, & S. E. Zoorob (Eds.), *Highways (Fourth Edition)* (pp. 163-184). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Okwadha, G., & Li, J. (2010). Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. *Chemosphere*, 81(9), 1143-1148. doi:10.1016/j.chemosphere.2010.09.066
- Onimisi, J. A., Ariffin, K. S., Hussin, H. B., & Temitope, A. E. (2018). Synthesis of precipitated calcium carbonate: a review. *Carbonates and Evaporites*, 33(2), 331-346. doi:10.1007/s13146-017-0341-x
- Onimisi, J. A., Ismail, R., Ariffin, K. S., Baharun, N., & Hussin, H. B. (2016). A novel rapid mist spray technique for synthesis of single phase precipitated calcium carbonate using solid-liquid-gas process. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(9), 2756-2760. doi:10.1007/s11814-016-0093-7
- Ozeir, E. (2021). *Amélioration des performances mécaniques de matériaux de fondations routières par calcification chimique*. (Mémoire de maîtrise). École Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.
- Patnaik, P., & Knovel. (2003). *Handbook of Inorganic Chemicals*: McGraw-Hill.
- Pham, T. (2008). Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide.
- Pickrell, J. (2013). An eerie experience in the desert. *Australian Geographic*. Retrieved from <https://www.australiangeographic.com.au/blogs/ag-blog/2013/11/an-eerie-experience-in-the-desert/>
- Poulin, P. (2010). *Étude de la performance de chaussées non revêtues traitées par abat-poussière en contexte nordique canadien*. (Maîtrise de recherche Mémoire de maîtrise). Université Laval, Québec. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11794/21575>
- Poupart, J. (2018). *Étude du comportement en déformation permanente des matériaux granulaires*

- non liés de fondation de chaussées en condition de gel saisonnier*. (Maîtrise Memoire de Maîtrise). Université de Laval, Retrieved from <https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/24500/1/29855.pdf>
- Qabany, A. A., & Soga, K. (2013). Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils. *Géotechnique*, 63, 331-339.
- Ritter, J. (2018). L'érosion du sol – Causes et effets. *Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales, Fiche technique no12-054*.
- Roden, E. E., & Urrutia, M. M. (2002). Influence of Biogenic Fe(II) on Bacterial Crystalline Fe(III) Oxide Reduction. *Geomicrobiology Journal*, 19(2), 209-251. doi:10.1080/01490450252864280
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2017). *The geography of transport systems* (4th ed.). London: Routledge.
- Rodriguez-Blanco, J. D., Shaw, S., & Benning, L. G. (2011). The kinetics and mechanisms of amorphous calcium carbonate (ACC) crystallization to calcite, via vaterite. *Nanoscale*, 3 1, 265-271.
- Rogers, C., & Glendinning, S. (1996). *Modification of clay soils using lime*. Paper presented at the Lime Stabilisation: Proceedings of the seminar held at Loughborough University Civil & Building Engineering Department on 25 September 1996.
- Saleh, M. F. (2007). Cost evaluation of foam bitumen and other stabilisation alternatives. 8. doi:10.1080/10298430601149585
- Santhosh K. Ramachandran, V. R., & Sookie, S. B. (2001). Remediation of Concrete Using Microorganisms. *ACI Materials Journal*, 98(1). doi:10.14359/10154
- Schertz, D. L. (1983). The basis for soil loss tolerances. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(1), 10-14. Retrieved from <https://www.jswnonline.org/content/jswn/38/1/10.full.pdf>
- SCT. (2022). *Plan québécois des infrastructures 2022-2023*. Retrieved from Bibliothèque et Archives nationales du Québec: https://www.tresor.gouv.qc.ca/fileadmin/PDF/budget_depenses/22-23/6-Plan_quebecois_infrastructures.pdf
- Sherwood, P. T. (1993). *Soil stabilisation with cement and lime. State of the Art Review*. Crowthorne, Berks: Her Majesty Stationary Office.
- Société de l'assurance automobile du Québec. (2021). Nombre de véhicules en circulation selon le type d'utilisation, le type de véhicule et l'âge du véhicule, Québec et régions administratives. Retrieved from https://bdso.gouv.qc.ca/pls/ken/ken213_afich_tabl.page_tabl?p_iden_tran=REPERJA6WV6166536384148d06kR&p_lang=1&p_m_o=SAAQ&p_id_ss_domn=718&p_id_raprt=3372#tri_age=1&tri_tertr=0
- Song, D., Dong, C., Ragauskas, A., & Deng, Y. (2009). Filler Modification with Polysaccharides or Their Derivatives for Improved Paper Properties. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 3(4), 321-334. doi:10.1166/jbmb.2009.1042

- St-Onge, B. (2016). *Validation d'un protocole d'injection pour l'amélioration des sols en place par MICP et analyse de l'état critique d'un sable biocalcifié* (Mémoire de maîtrise). École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Statistique Canada. (2022). Immatriculations des véhicules neufs : outil de visualisation des données trimestrielles. Retrieved from <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/71-607-x/71-607-x2021019-fra.htm>
- Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1563-1571. doi:10.1016/S0038-0717(99)00082-6
- Suer, P., Hallberg, N., Carlsson, C., Bendz, D., & Holm, G. (2009). Biogrouting compared to jet grouting: Environmental (LCA) and economical assessment. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 44(4), 346-353. doi:10.1080/10934520802659679
- Swinney, L. D., Stevens, J. D., & Peters, R. W. (1982). Calcium carbonate crystallization kinetics. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 21(1), 31-36. doi:10.1021/i100005a006
- Sylvestre, O. (2017). *Influence du soulèvement au gel sur la durée de vie utile des chaussées*. (Maîtrise de recherche Mémoire de maîtrise). Université Laval, Québec.
- Tai, C. Y., & Chen, F.-B. (1998). Polymorphism of CaCO₃, precipitated in a constant-composition environment. *AIChE Journal*, 44(8), 1790-1798. doi:10.1002/aic.690440810
- Thieme, C. (2000). Sodium Carbonates. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- Thomas, P. (1999). Les stromatolithes du lac Thetis près de Cervantes, Australie occidentale. . Retrieved from <https://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/Img524-2016-03-07.xml>
- Trajectoire Québec. (2017). *Système de transport des personnes : Approches de réduction des GES et des coûts financiers*. Retrieved from Montréal, Québec, Canada:
- Van Paassen, L. (2009). *Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation*. (PhD thesis). Delft University of Technology, Delft, Netherlands. Retrieved from <http://resolver.tudelft.nl/uuid:5f3384c4-33bd-4f2a-8641-7c665433b57b>
- Van Paassen, L., Van Loosdrecht, M., Pieron, M., Mulder, A., Ngan-Tillard, D., & van der Linden, T. (2010). *Strength and Deformation of Biologically Cemented Sandstone*. Paper presented at the ISRM Regional Symposium - EUROCK 2009.
- Van Paassen, L. A., Ghose, R., Van der Linden, T., Van der Star, W., & Van Loosdrecht, M. (2010). Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale Biogrout Experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(12), 1721-1728. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000382
- Verrecchia, E. (2002). Géodynamique du carbonate de calcium à la surface des continents. In (pp. 233-258).
- Ville de Montréal. (2019). Indicateurs de condition des chaussées du réseau routier. Retrieved from <https://donnees.montreal.ca/dataset/condition-chaussees-reseau-routier#additional-info>

- VRAC. (2018). Fiche de données de sécurité - Carbonate de Sodium. Retrieved from https://www.vrac-mobile.com/wp-content/uploads/2018/04/FDS_CARBONATE_SODIUM.pdf
- Waldschmidt, J.-B. (2017). *Étude de l'influence de cycles gel-dégel sur le comportement d'un sable traité par biocalcification*. (Mémoire de maîtrise). École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Wang, J. Q. (1991). Rainstorm characteristics in the arid area of China. *Proceedings of the United States - People's Republic of China Bilateral Symposium on Droughts and Arid-Region Hydrology*, 2, 79-84. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/of/1991/0244/report.pdf>
- Wang, Z., Zhang, N., Cai, G., Jin, Y., Ding, N., & Shen, D. (2017). Review of Ground Improvement Using Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP). *Marine Georesources & Geotechnology*, 35. doi:10.1080/1064119X.2017.1297877
- Warrence, N. J., Bauder, J. W., & Pearson, K. E. (2002). Basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties. *Department of Land Resources and Environmental Sciences, Montana State University-Bozeman, MT*, 129, 1-29.
- Warthmann, R., van Lith, Y., Vasconcelos, C. g., McKenzie, J. A., & Karpoff, A. M. (2000). Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments. *Geology*, 28(12), 1091-1094. doi:10.1130/0091-7613(2000)28<1091:Bidpia>2.0.Co;2
- Weaver, T. J., Burbank, M., Lewis, A., Lewis, R., Crawford, R., & Williams, B. (2011). Bio-Induced Calcite, Iron, and Manganese Precipitation for Geotechnical Engineering Applications. In *Geo-Frontiers 2011* (pp. 3975-3983).
- Wei, S. H., Mahuli, S. K., Agnihotri, R., & Fan, L. S. (1997). High Surface Area Calcium Carbonate: Pore Structural Properties and Sulfation Characteristics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(6), 2141-2148. doi:10.1021/ie960768l
- Whiffin, V., Van Paassen, L., & Harkes, M. (2007). Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique. *Geomicrobiology Journal*, 24(5), 417-423. doi:10.1080/01490450701436505
- Whiffin, V. S. (2004). *Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement*. (PhD thesis). Murdoch University,
- Winterkorn, H. F., & Pamukcu, S. (1991). Soil Stabilization and Grouting. In H.-Y. Fang (Ed.), *Foundation Engineering Handbook* (pp. 317-378). Boston, MA: Springer US.
- Worch, E. (2015). 9 Calco-carbonic equilibrium. In *Hydrochemistry: Basic Concepts and Exercises* (pp. 119-133): De Gruyter.
- Xiang, L., Xiang, Y., Wang, Z. G., & Jin, Y. (2002). Influence of chemical additives on the formation of super-fine calcium carbonate. *Powder Technology*, 126(2), 129-133. doi:10.1016/S0032-5910(02)00047-5
- Xiang, L., Xiang, Y., Wen, Y., & Wei, F. (2004). Formation of CaCO₃ nanoparticles in the presence of terpineol. *Materials Letters*, 58(6), 959-965. doi:10.1016/j.matlet.2003.07.034
- Yan, G., Wang, L., & Huang, J. (2009). The crystallization behavior of calcium carbonate in ethanol/water solution containing mixed nonionic/anionic surfactants. *Powder Technology*, 192(1), 58-64. doi:10.1016/j.powtec.2008.11.013

- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1991). Soil and Base Stabilization. In *Principles of pavement design* (pp. 300-324): John Wiley & Sons.
- Yu, J., Lei, M., Cheng, B., & Zhao, X. (2004). Facile preparation of calcium carbonate particles with unusual morphologies by precipitation reaction. *Journal of Crystal Growth*, 261(4), 566-570. doi:10.1016/j.jcrysgro.2003.09.035
- Yu, J., Tang, H., Cheng, B., & Zhao, X. (2004). Morphological control of calcium oxalate particles in the presence of poly-(styrene-alt-maleic acid). *Journal of Solid State Chemistry*, 177(10), 3368-3374. doi:10.1016/j.jssc.2004.06.007
- Zeidan, J.-L. (2021). *Développement d'une méthode d'amélioration des propriétés géotechniques des chaussées par calcification chimique*. (Mémoire de maîtrise). École Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.
- Zeller, E. J., & Wray, J. L. (1956). Factors Influencing Precipitation of Calcium Carbonate¹. *AAPG Bulletin*, 40(1), 140-152. doi:10.1306/5ceae30a-16bb-11d7-8645000102c1865d
- Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., & Gao, P. (2013). Soil erosion, conservation and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 24(5), 499-510. doi:10.1002/ldr.2246
- Zhou, G.-T., Yao, Q.-Z., Ni, J., & Jin, G. (2009). Formation of aragonite mesocrystals and implication for biomineralization. *American Mineralogist*, 94(2-3), 293-302. doi:10.2138/am.2009.2957

ANNEXE A RÉCAPITULATIF DES ÉCHANTILLONS DU PROJET

Tableau A.1 – Échantillons essayés à compression simples en fonction de la variation de la concentration de traitement.

# Série	Réactifs	Concentration de la solution	Nombre d'échantillons	# Couches/ # Coups par couche	Temps de séchage au four	Résistance a compression simples moyenne (MPa)
0	Non traité	-	3	3 / 57	5 jours	0.73
1	Bicarbonate + CaCl ₂	100%	3	3 / 57	5 jours	0.82
2	Bicarbonate + CaCl ₂	75%	3	3 / 57	5 jours	1.70
3	Bicarbonate + CaCl ₂	50%	3	3 / 57	5 jours	1.61
4	Bicarbonate + CaCl ₂	25%	3	3 / 57	5 jours	1.92
5	Bicarbonate + Eau	0%	3	3 / 57	5 jours	2.55
6	Bicarbonate + Acétate	100%	3	3 / 57	5 jours	1.85
7	Bicarbonate + Acétate	75%	3	3 / 57	5 jours	2.34
8	Bicarbonate + Acétate	50%	3	3 / 57	5 jours	3.93
9	Bicarbonate + Acétate	25%	3	3 / 57	5 jours	2.75
10	Bicarbonate + Vinaigre	0%	3	3 / 57	5 jours	2.62
11	Carbonate + CaCl ₂	100%	3	3 / 57	5 jours	2.27
12	Carbonate + CaCl ₂	75%	3	3 / 57	5 jours	2.91
13	Carbonate + CaCl ₂	50%	3	3 / 57	5 jours	2.73
14	Carbonate + CaCl ₂	25%	3	3 / 57	5 jours	10.51
15	Carbonate + Eau	0%	3	3 / 57	5 jours	33.29
16	Carbonate + Acétate	100%	3	3 / 57	5 jours	8.76
17	Carbonate + Acétate	75%	3	3 / 57	5 jours	10.93
18	Carbonate + Acétate	50%	3	3 / 57	5 jours	11.85
19	Carbonate + Acétate	25%	3	3 / 57	5 jours	11.76
20	Carbonate + Vinaigre	0%	3	3 / 57	5 jours	14.78

ANNEXE B ÉQUIPEMENTS DE COMPACTAGE

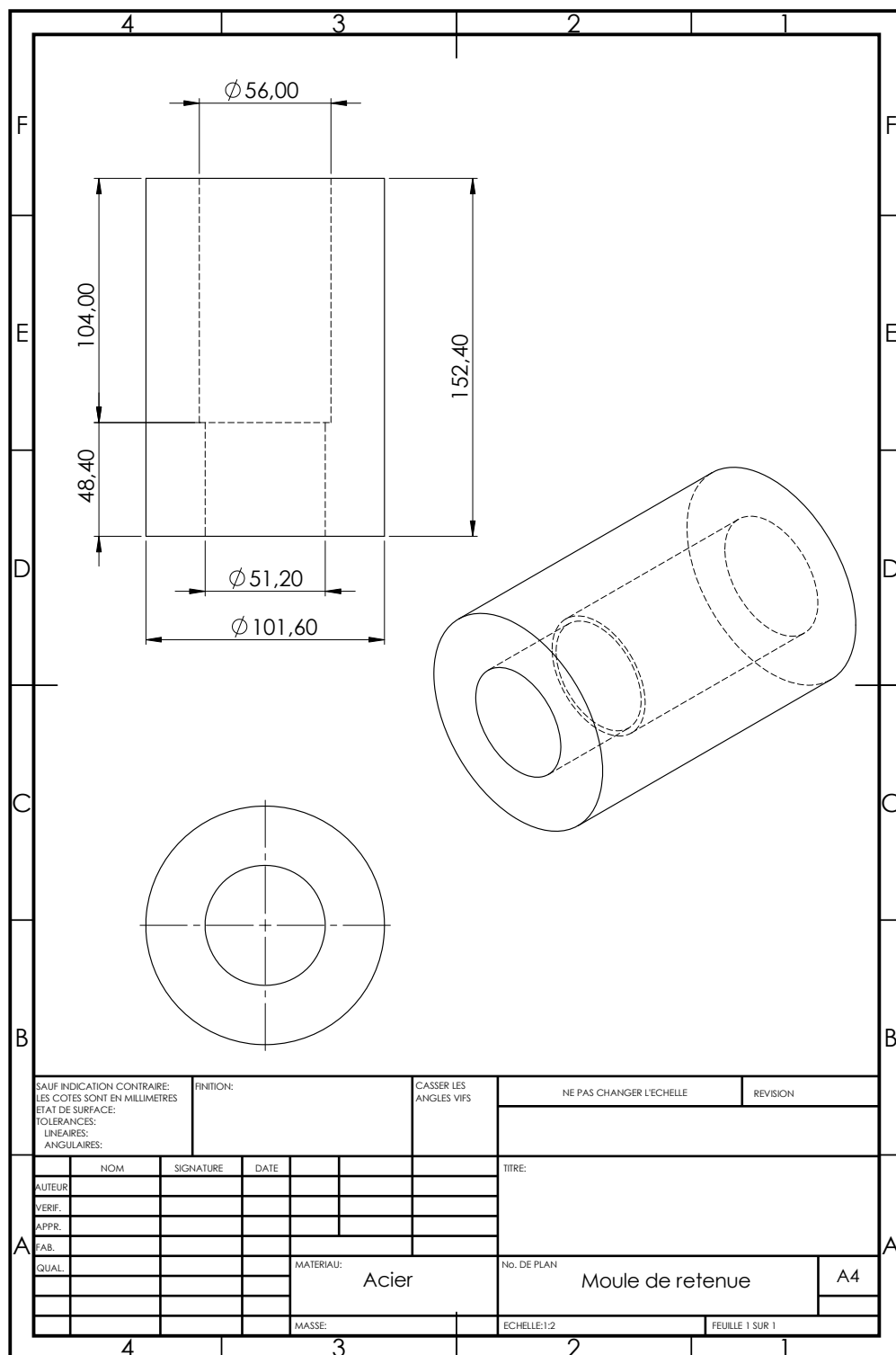


Figure B.1 – Plan du moule de retenue utilisé dans l'étape de compactage.

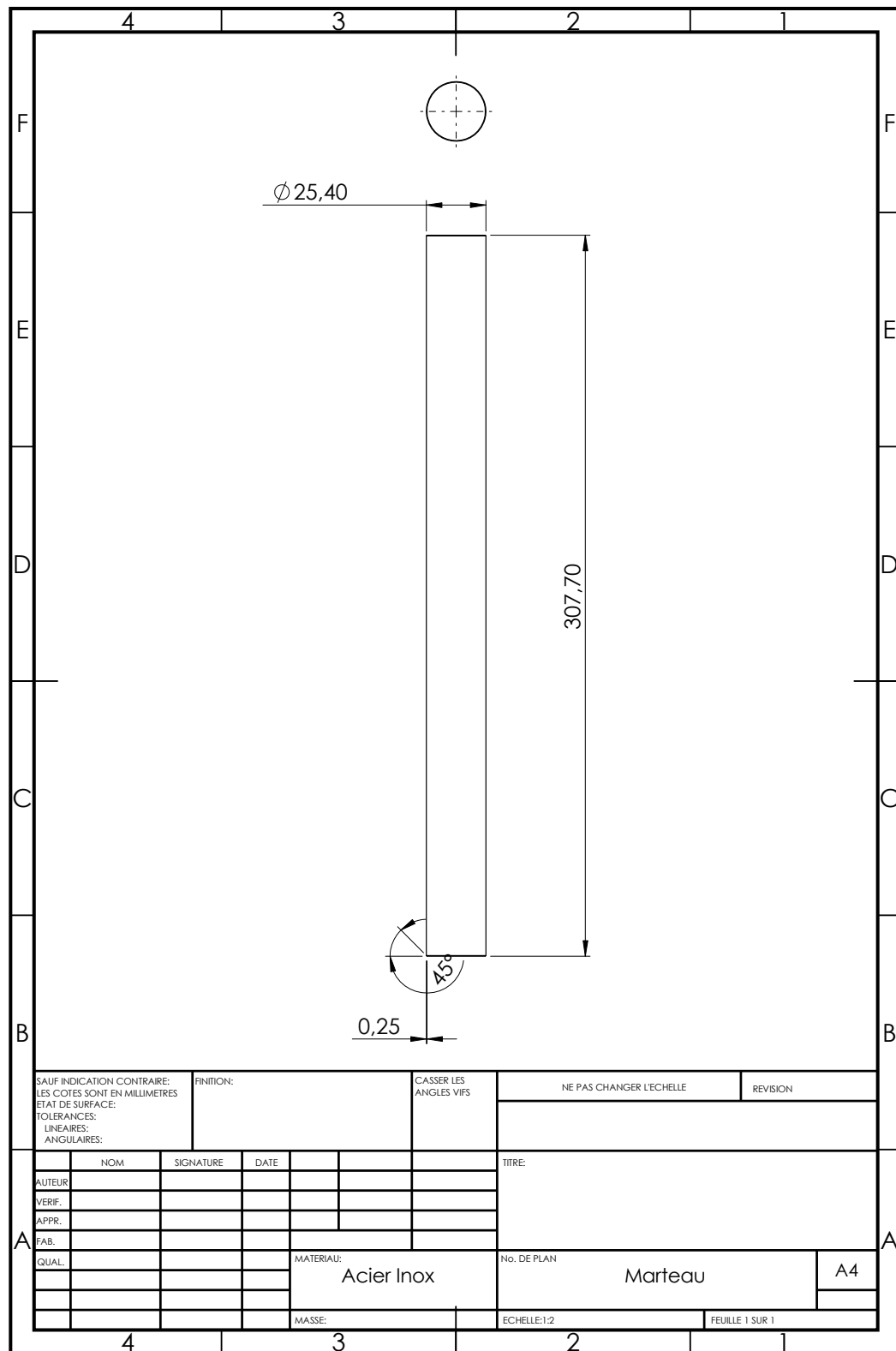


Figure B.2 – Plan du marteau utilisé dans l'étape de compactage.

Tableau B.2 – Calcul des paramètres de compactage.

Type de sol		Poussière de roche		MG-20	
Type de énergie		Modifié - ASTM D1557		Modifié - ASTM D1557	
Poids du marteau	(<i>lbf</i>) (<i>N</i>)	3.32	14.75	10.00	44.48
Hauteur de chute du marteau	(<i>in</i>) (<i>cm</i>)	11.1	28.1	18.0	45.7
Marteau Diamètre (approx.)	(<i>in</i>) (<i>cm</i>)	1.0	2.5	2.0	5.1
Marteau Surface (approx.)	(<i>in</i> ²) (<i>cm</i> ²)	0.8	5.1	3.1	20.3
Énergie de compaction (approx.)	(<i>ft•lbf/ft</i> ³) (<i>kN•m/m</i> ³)	56000	27000	56000	2700
Moule Diamètre (aprox.)	(<i>in</i>) (<i>cm</i>)	2.0	5.1	4.0	10.2
Moule Hauteur (aprox.)	(<i>in</i>) (<i>cm</i>)	4.00	9.91	8.00	20.07
Moule Surface (aprox.)	(<i>in</i> ²) (<i>cm</i> ²)	3.1	20.3	12.6	81.1
Moule Volume (aprox.)	(<i>in</i> ³) (<i>cm</i> ³)	12.6	200.9	100.5	1627.1
Nombre de couches		3		3	
Nombres de coups/couche		45		73	
Énergie de compaction (calculée)	(<i>ft•lbf/ft</i> ³) (<i>kN•m/m</i> ³)	56758.1	2786.1	56440.3	2736.0

ANNEXE C IMAGES DU TEST D'ÉROSION EXTERNE

Figure C.3 – Évolution de l'érosion du sol dans les échantillons non traités en fonction du temps (E-1 à E-3).

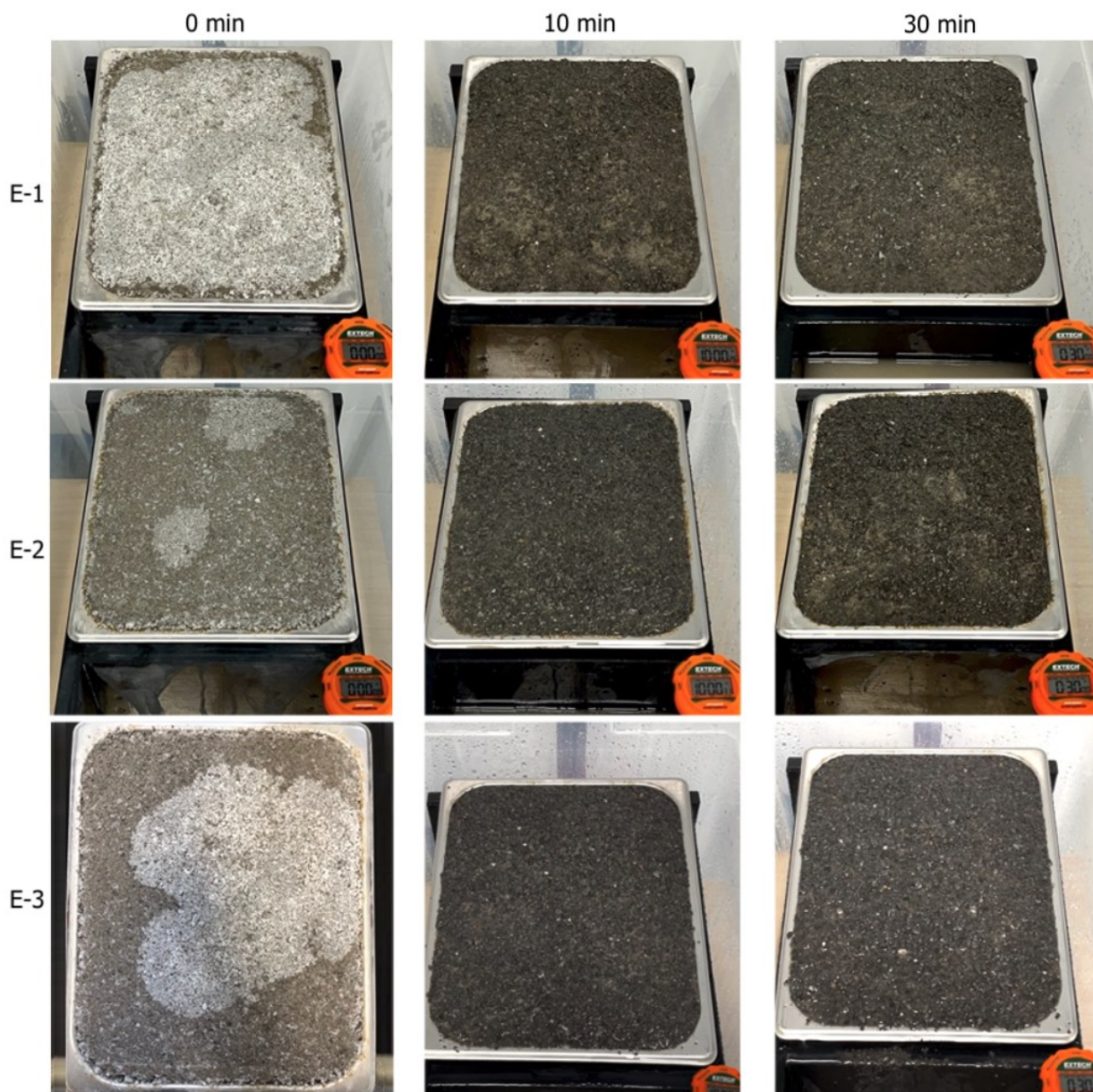


Figure C.4 – Évolution de l'érosion du sol dans les échantillons traités en fonction du temps (E4 à E-6).

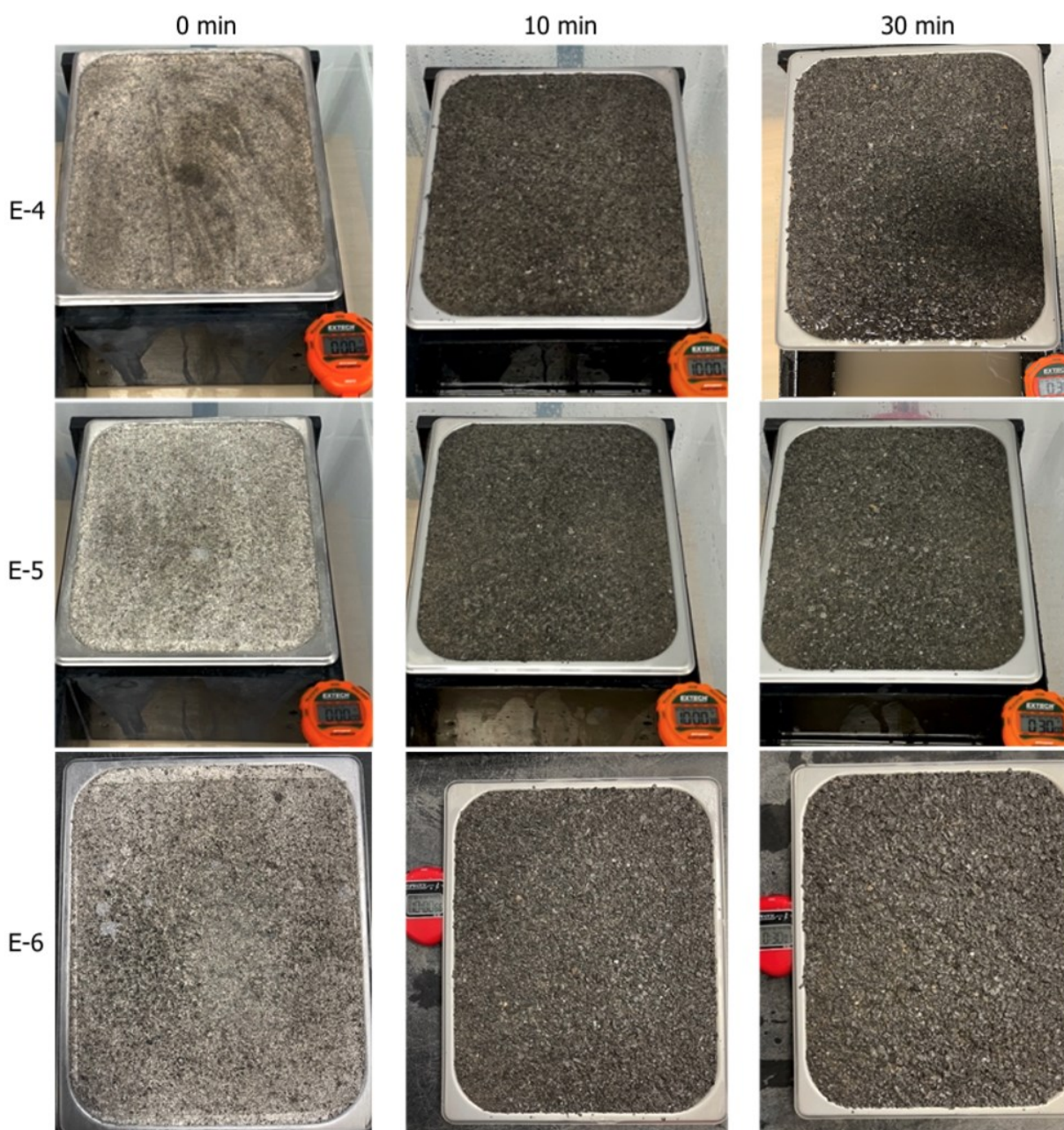


Figure C.5 – Masse de sol érodée à partir d'échantillons non traités (E1 à E-3).

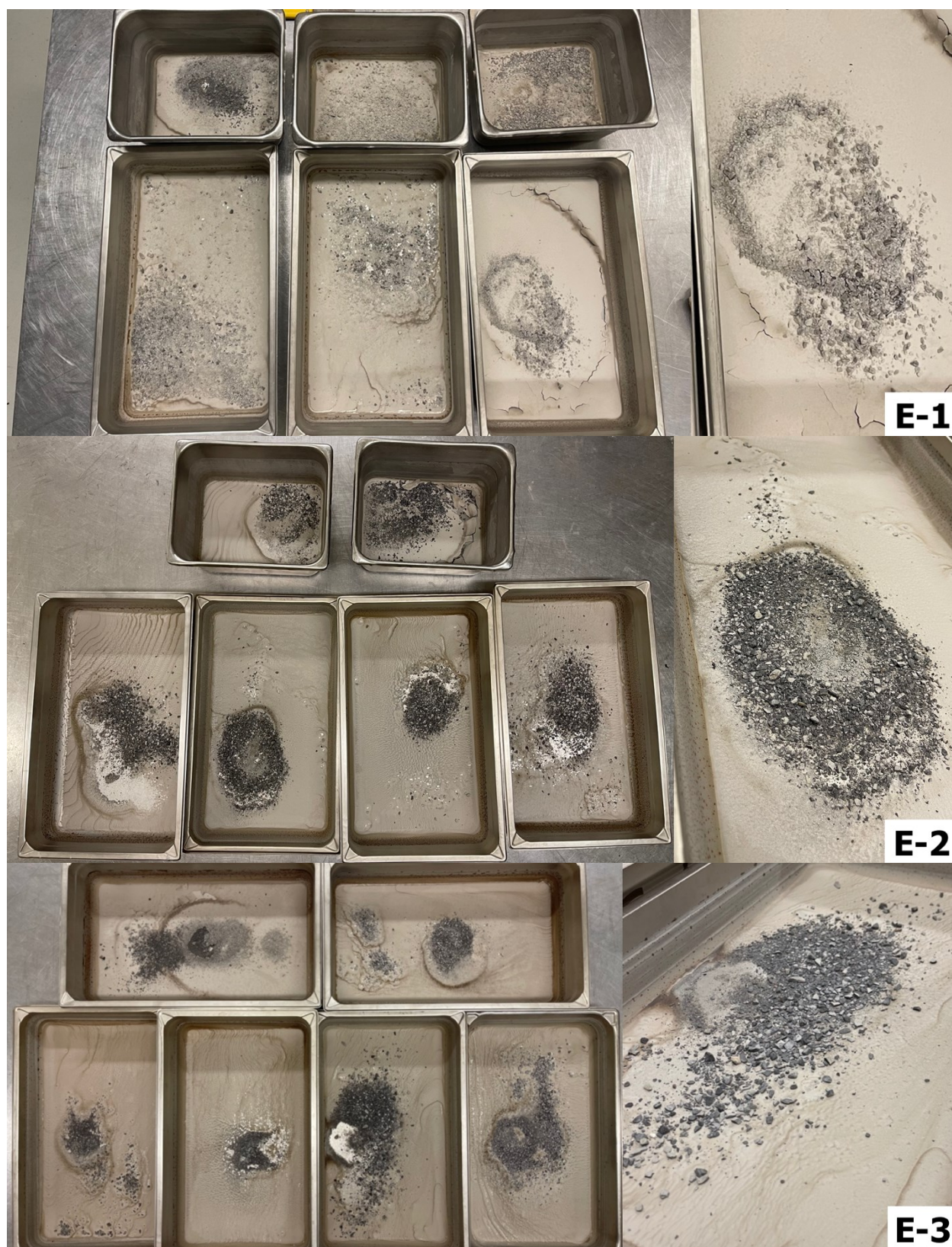


Figure C.6 – Masse de sol érodée à partir d'échantillons traités (E-4 à E-6)

