



Titre: Étude technico-économique de la stabilisation d'argile par des
résidus industriels de chaux : application au Québec

Auteur: Hanane Sfouli

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Sfouli, H. (2021). Étude technico-économique de la stabilisation d'argile par des
résidus industriels de chaux : application au Québec [Master's thesis,
Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/9175/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/9175/>

**Directeurs de
recherche:** Benoit Courcelles

Programme: Génie civil

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Étude technico-économique de la stabilisation d'argile par des résidus
industriels de chaux : application au Québec**

HANANE SFOULI

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie Civil

Août 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé:

**Étude technico-économique de la stabilisation d'argile par des
résidus industriels de chaux : application au Québec**

présenté par **Hanane SFOULI**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

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

Vincenzo SILVESTRI, président

Benoît COURCELLES, membre et directeur de recherche

Thomas **PABST**, membre

DÉDICACE

Je dédie ce travail à ma mère qui m'a donné tout son amour et son soutien,

Merci à mes frères qui ont cru en moi,

*Aussi à mon père, que dieu le bénisse, pour tous ses efforts et l'étincelle qu'il a allumée en moi
pour tout donner afin de réussir et être à la meilleure version de moi-même.*

REMERCIEMENTS

Mes remerciements se dirigent tout d'abord vers mon directeur de recherche, le professeur Benoît Courcelles, qui m'a vraiment aidé durant toute la période de mes travaux de recherche sur un projet pratique, intéressant et regroupant plusieurs disciplines.

Les essais géotechniques n'auraient pas pu être possibles sans l'aide inestimable de techniciens compétents que sont Samuel Chénier et Éric Turgeon.

Enfin, je tiens à remercier M. André D'Astous, vice-président de la compagnie Blumetric Environmental, M. Cyrias Girard, président des produits BCC, et MM. Yves Lamarche et Narain Harivarman, respectivement directeur et ingénieur nouveaux produits chez Graymont, pour leur encadrement et leurs conseils.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une étude de validité technique et économique de la stabilisation d'argile par des résidus industriels de chaux. Ces derniers constituent une ressource qui n'a, de prime abord, qu'une très faible valeur économique. Le projet vise donc à les valoriser, notamment pour la stabilisation des argiles qui constituent un sol prépondérant au Québec. Cette technique repose sur le développement des réactions pouzzolaniques entre les grains d'argiles, réactions qui rendent le sol pulvérulent après stabilisation. Un tel sol traité présente des caractéristiques mécaniques intéressantes pour la construction des routes, notamment dans les régions éloignées ou disposant de faibles ressources en matières premières granulaires.

Les travaux présentés dans cette étude ont pour objectif général de comprendre comment une argile traitée se comporte à la suite de la stabilisation avec les résidus industriels de chaux et de calculer le gain économique lors d'une utilisation en substitution aux matériaux conventionnels. Pour atteindre ce but, plusieurs objectifs spécifiques ont été établis, ces derniers correspondent aux étapes suivies pour le développement de la présente étude.

La première étape de cette étude porte sur la réalisation des essais mécaniques exigés par le Ministère de Transport de Québec (MTQ) sur l'argile traitée afin d'étudier son applicabilité comme matériaux de construction. La deuxième étape réside dans l'étude économique du projet et le calcul du profit généré par une telle technique dans le domaine routier. Un modèle de calcul de rentabilité a également été établi pour une plateforme de traitement des argiles avec des résidus de chaux dans le but de transformer l'argile en matériau pulvérulent destiné à être utilisé en tant que substituant au sable conventionnel.

La dernière étape de l'étude consiste à chercher des débouchés alternatifs du sol traité. Une des options de réemploi possible concerne les remblaiements autour des bâtiments ou réseaux utilitaires.

L'argile utilisée dans cette étude qui provient de Saint-Marc-sur-Richelieu et les essais ont montré qu'une portion du sol traité peut, selon sa granulométrie, remplacer la même portion dans le matériau granulaire conventionnel de type MG 112. Cette portion correspond aux diamètres des grains entre 0,08 mm et 2,5 mm. L'étude économique a permis de montrer que le coût d'une

chaussée traitée reste inférieur à celui d'une chaussée non traitée. Ainsi, avec une économie de 14,40 %, la stabilisation est intéressante, notamment dans le cas des chaussées non revêtues comme celui des routes minières, forestières et agricoles. Le modèle de la plateforme de traitement a montré que le coût du traitement d'une telle plateforme peut être inférieur à celui de l'achat des matériaux d'une sablière (carrière), et ce, selon la provenance des argiles.

Par ailleurs, la valorisation d'un sol traité permet, d'une part, de diminuer la pression sur les sites d'enfouissement, en diminuant la quantité des sols enfouis sans valorisation ultérieure, et d'autre part de diminuer le problème de pénurie mondiale de sable en émergence.

ABSTRACT

This thesis presents a technical and economic study of the stabilization of clay by industrial lime residues. These residues constitute a resource which has a very low economic value. Therefore, the project aims to valorize them as stabilizer of clays which constitute a preponderant soil in Quebec. This technique is based on the development of pozzolanic reactions between the clay particles that transform the clay into a granular media after stabilization.

Such a treated soil presents interesting mechanical characteristics for road construction in remote areas or regions with few resources in granular materials. The main objective of the work presented in this study is to understand how a treated clay behaves following stabilization with industrial lime residues, and to calculate the economic gain when used as a substitute for conventional materials. To achieve this goal, several specific objectives have been established, which correspond to the steps followed in the development of the present study.

The first step of this study is the realization of the mechanical tests required by the Ministry of Transport of Quebec (MTQ) on the treated clay to use it as a construction material. The second step is the economic study of the project and the calculation of the profit generated by such a technique in road field. A cost-benefit model was also developed for a clay processing platform with lime residue to transform clay into a granular material to be used as a substitute for conventional sand. The last objective of the study is to look for alternative outlets for the treated soil. One of the possible reuse options concerns backfill around buildings or utility networks.

The clay used in this study comes from Saint-Marc-sur-Richelieu and the results showed that only a portion of the treated soil can, according to its grain size, replace the same portion of conventional granular material (MG 112). This portion corresponds to grain diameters between 0.08 mm and 2.5 mm. The study showed also that the cost of a treated pavement remains lower than an untreated layer. With a saving of 14.40%, stabilization is interesting, particularly in the case of unpaved pavements such as mining, forestry, and agricultural roads.

The model of the treatment platform showed that the cost of operation of such a platform can be lower than the cost of purchasing material from a sand pit (quarry), depending on the origin of the clays.

Moreover, the valorization of a treated soil allows on the one hand to decrease the pressure on the landfill sites, by decreasing the quantity of buried soils without valorization, and on the other hand to decrease the emerging problem of shortage of sand in the world.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Objectif principal.....	3
1.3 Objectifs spécifiques	3
1.4 Structure du document	3
1.5 Schéma récapitulatif du projet.....	4
1.6 Retombée et originalité du projet	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 État du réseau routier au Québec.....	6
2.1.1 Chaussées non revêtues	8
2.1.2 Problèmes des chaussées non revêtues.....	8
2.1.3 Facteurs de dégradation des chaussées non revêtues	9
2.2 Propriétés géotechniques des matériaux de fondation et de sous-fondation.....	11
2.2.1 Granulométrie.....	11

2.2.2	Essai Proctor Normal et Proctor Modifié.....	12
2.2.3	Perméabilité.....	12
2.2.4	Indice de portance californien CBR	13
2.2.5	Série d’essais du ministère des transports du Québec.....	13
2.3	Particularités des argiles du Québec.....	15
2.4	Pénurie de sable à l’échelle mondiale	18
2.5	Techniques de traitement des sols au Québec	19
2.5.1	Historique du traitement au Québec.....	20
2.5.2	La chaux	24
2.5.3	Résidus industriels de la chaux	29
2.6	État des lieux sur l’étude économique du projet	30
2.6.1	La méthode d’analyse coûts-avantages	30
2.7	Réutilisation des sols contaminés au Québec.....	36
CHAPITRE 3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....		39
3.1	Essais de caractérisation de l’argile de Saint-Marc-sur-Richelieu.....	39
3.1.1	Prélèvement d’échantillons	39
3.1.2	Limites d’Atterberg.....	39
3.1.3	Essai de sédimentométrie	41
3.1.4	Essai de densité relative	41
3.1.5	Résistance au cisaillement du sol.....	42
3.1.6	Essai Proctor Normal	44
3.1.7	Essai à l’œdomètre	45
3.2	Choix du résidu industriel de la chaux pour le traitement.....	45

3.3	Point de fixation de la chaux (PFC)	47
3.4	Essais exigés par le Ministère des Transports	49
3.4.1	Limites d'Atterberg du sol traité	50
3.4.2	Essai de granulométrie du sol traité	51
3.4.3	Essai de densité relative des particules fines et des particules grossiers	51
3.4.4	Valeur de pH du sol traité	52
3.4.5	Essai d'absorption d'eau avec immersion	52
3.4.6	Essai Proctor Normal sur le sol traité	55
3.4.7	Essai de compression simple sur le sol traité	56
3.4.8	Essai de cisaillement direct sur le sol traité	57
3.5	Bilan des résultats des essais réalisés sur l'argile non traitée et traitée	59
CHAPITRE 4	ÉTUDE ÉCONOMIQUE DU PROJET	63
4.1	Dimensionnement d'une route non revêtue traitée à l'aide de résidus de chaux et d'une route non revêtue conventionnelle	63
4.1.1	Cas 1 : Chaussée minière traitée	64
4.1.2	Cas 2 : Chaussée non revêtue conventionnelle	68
4.1.3	Bilan de dimensionnement	72
4.2	Calcul de la rentabilité du traitement dans le cas routier	73
4.3	Abaque généralisé de comparaison économique entre le coût de chaussée traitée et une chaussée conventionnelle non revêtue	75
4.3.1	Cas 1 : Abaque généralisé pour le calcul du coût de construction d'une couche de sol traitée	75
4.3.2	Cas 2 : Abaque généralisé pour le calcul du coût de construction d'une couche de sol non traité	77

4.4	Calcul de la rentabilité pour une plateforme de traitement	80
4.4.1	Calcul de la distance optimale de transport des argiles traitées vers la plateforme ...	80
4.4.2	Influence du coût des matières premières sur la stratégie de remplacement	83
CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS		86
5.1	Avantage technico-économique de stabilisation des argiles avec les résidus de la chaux de type LKD	86
5.2	Débouchés alternatifs de la technique du traitement des argiles avec LKD	88
5.2.1	Application du sol traité aux fondations des bâtiments au Québec.....	88
5.2.2	Autres applications possibles de l'argile traitée	89
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		90
6.1	Éléments de synthèse	90
6.2	Recherches futures	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Limites de charge à appliquer dans le cas normal et le cas de dégel. Adapté de (MTQ, 2019).....	10
Tableau 2.2: Résumé des paramètres géotechniques qu'un sol doit satisfaire pour être utilisé comme matériau de fondation et sous-fondation (AASHTO, 1993; Ministère des transports de Québec, 2021c).....	14
Tableau 2.3: Tableau synthèse de l'historique du traitement des sols.....	22
Tableau 2.4: Tableau synthèse de l'historique du traitement des sols (Suite).....	24
Tableau 3.1: Échelle des valeurs de sensibilité utilisées au Canada et É.U./Suède (Lafleur, 1991)	42
Tableau 3.2: Tableau de comparaison entre les quatre types de chaux reçues de la part de la compagnie Graymont	46
Tableau 3.3: Tableau de comparaison entre les quatre types de chaux reçues de la part de la compagnie Graymont (Suite)	47
Tableau 3.4: Résultats des essais sur le sol avant et après traitement à 4% de TDS-257-3524.....	59
Tableau 3.5: Tableau 3.5: Résultats des essais sur le sol avant et après traitement à 4% de TDS-257-3524 (Suite).....	60
Tableau 4.1: Module réversible d'AASHTO selon le type de sol. Adapté de : (<i>CIV8450-dimensionnement de chaussées :routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues</i> , 2020).....	66
Tableau 4.2: Structure de la chaussée traitée	68
Tableau 4.3 : Structure de la chaussée conventionnelle.....	72
Tableau 4.4: Tableau récapitulatif des résultats de dimensionnement des deux cas.....	72
Tableau 4.5: Tableau des paramètres de stabilisation utilisés pour le calcul du coût de la chaussée traitée.....	73
Tableau 4.6: Tableau du coût de construction de la chaussée traitée.....	74

Tableau 4.7: Tableau explicatif du coût de construction de la chaussée non traitée.....	74
Tableau 4.8: Rentabilité économique du traitement des argiles à 4% des résidus de la chaux.....	75
Tableau 4.9: Calcul du temps de broyage	81
Tableau 4.10: Coût de production du sol traité	81

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Schéma récapitulatif du projet	4
Figure 2.1: Fuseau granulométrique des matériaux de fondation MG-20. Adapté de (AASHTO, 1993).....	11
Figure 2.2: Fuseau granulométrique de la fondation MG-112. Adapté de (AASHTO, 1993).....	12
Figure 2.3: Carte géologique des différents dépôts. Tirée de (Leroueil et al., 1983).....	16
Figure 2.4: a) Tétraèdre de silice. b) Feuillet de silice en tétraèdre. Tirée de (Holtz & Kovacs, 1981).	17
Figure 2.5: a) Octaèdre d'aluminium. b) Feuillet en octaèdre. Tirée de (Holtz & Kovacs, 1981).	17
Figure 2.6: Cycle de préparation de la chaux. Adapté de (Graymont, 2019d).....	25
Figure 2.7: La structure microscopique d'une argile non traitée et celle traitée à la chaux. Adapté de (Little, 1987).....	28
Figure 2.8: Abaque de Giummarra pour le calcul de l'épaisseur de la fondation de la chaussée. Tirée de (Giummarra, 2009).	32
Figure 2.9: Abaque donnant l'épaisseur total de la chaussée selon la norme IRC:37-2001. Tirée de (The Indian Road Congress, 2001)	34
Figure 2.10: Coupe typique de la route en Inde. Adaptée de (Graymont, 2019b; Sarkar & Dawson, 2017).....	35
Figure 2.11: Évolution des quantités de sols contaminés traités et des sols contaminés enfouis. Tirée de (MDDELCC, 2017).	37
Figure 3.1: Courbe de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité.....	40
Figure 3.2: Abaque de Casagrande pour la détermination du type d'argile et de la limite de retrait.	40
Figure 3.3: Courbe de sédimentométrie de l'argile avant traitement.....	41
Figure 3.4: Courbe de l'essai de la compression simple.....	43

Figure 3.5: Plan de rupture à la suite de l'essai de compression simple.....	44
Figure 3.6: Courbe Proctor de l'argile St-Marc-sur-Richelieu avant traitement.	44
Figure 3.7: L'indice de vide vertical en fonction de la contrainte effective appliquée dans l'essai CS.....	45
Figure 3.8: Six boîtes secouées prêtes pour la mesure de pH.	48
Figure 3.9: Mode opératoire de l'essai PFC.	48
Figure 3.10: Courbes PFC avec l'ancien pH-mètre et le pH-mètre numérique.	49
Figure 3.11: Abaque de plasticité de Casagrande pour différents types de sols (D'après Casagrande, 1948 et Howard, 1977). Tiré de (CIV3415- Mécanique des sols: propriétés des sols et classification, 2020).	50
Figure 3.12: Courbe granulométrique du sol traité à 4%.	51
Figure 3.13: Échantillon d'argile traitée mis sur un grillage et un papier filtre.....	53
Figure 3.14: Rehausseurs utilisés comme support de l'échantillon.....	53
Figure 3.15: Mode opératoire de l'essai d'absorption d'eau avec immersion.	54
Figure 3.16: Régression linéaire de l'essai d'absorption d'eau.	54
Figure 3.17: Courbe Proctor du sol traité (4%).	56
Figure 3.18: Courbe de la compression simple de l'argile traitée (4%).	57
Figure 3.19: Courbe de cisaillement direct sur 3 paliers de chargement.	58
Figure 3.20: Cercles de Mohr-Coulomb de l'argile traitée.	58
Figure 3.21: Fuseau granulométrique de MG 20 et courbe granulométrique du sol traité à 4%. ...	61
Figure 3.22: Fuseau granulométrique de MG 112 et courbe granulométrique du sol traité à 4%. 61	
Figure 4.1: Profil géologique du site de construction.	65
Figure 4.2: Abaque de dimensionnement selon la méthode empirique basée sur le CBR. Tiré de (CIV8450-dimensionnement de chaussées :routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues, 2020)	67

Figure 4.3: Profil géologique de la chaussée traitée.....	68
Figure 4.4: Détermination du D_{BS} pour la chaussée conventionnelle. Tiré de (<i>CIV8450-dimensionnement de chaussées :routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues</i> , 2020).....	70
Figure 4.5: Abaque déterminant la valeur du DBS finale compte tenue de la perte des granulats. Tirée de (<i>CIV8450-dimensionnement de chaussées :routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues</i> , 2020)	70
Figure 4.6: Abaque déterminant la valeur de DSB pour la sous-fondation. Tiré de (<i>CIV8450-dimensionnement de chaussées :routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues</i> , 2020).....	71
Figure 4.7: Abaque de calcul du coût de la couche traitée avec les résidus de chaux	77
Figure 4.8: Abaque de calcul du coût de la couche conventionnelle.	79
Figure 4.9: droite expliquant l'influence du coût de vente du sable sur la distance de transport des argiles traitées.....	84
Figure 4.10: Abaque généralisé qui permet la comparaison entre le coût de vente des sables ($\$/m^3$) et le coût de vente de l'argile traitée ($\$/m^3$).	85

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congrès de la Route
ASTM	American Society for Testing Materials
Al^{3+}	Ion aluminium
BC	Bituminous concrete
Ca^{2+}	Ion calcium
CaCl_2	Chlorure de calcium
CaCO_3	Calcite
CaO	Oxyde de calcium
Ca(OH)_2	Hydroxide de calcium
CBR	California Bearing Ratio
CEC	Capacité d'échange cationique
CERIU	Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines
CO_2	Dioxyde de carbone
CO_3^{2-}	Ion carbonate
DBM	Dense bituminous macadam
DMRLC	Direction des matières résiduelles et des lieux contaminés
ETS	École de technologie supérieure

GTR	Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme
GTS	Guide technique du traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques
H ⁺	Ion hydrogène
H ₂ O	Molécule d'eau
IDRRIM	Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité
IRC	International Residential Code
IRI	Indice de rugosité interne
I _p	Indice de plasticité
K ⁺	Ion potassium
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LES	Lieu d'enfouissement sanitaire
Li ⁺	Ion lithium
MDDELCC	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques
MG 20	Matériau granulaire 20
MG 112	Matériau granulaire 112
Mg ²⁺	Ion magnésium
MTQ	Ministère de Transport de Québec
Na ⁺	Ion sodium

NH ⁴⁺	Ion ammonium
NQ	Normes du Québec
OH ⁻	Ion d'hydroxyde
PFC	Point de fixation de la chaux
PCI	Pavement Condition Index
RBQ	Régie du bâtiment du Québec
RFE	Recyclage à froid des enrobés
RP	Retraitement en place
SETRA	Service d'études techniques des routes et autoroutes
S _R	Degré de saturation
WBM	Water bound macadam
W _L	Limite de liquidité
W _P	Limite de plasticité

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

La responsabilité du réseau routier du Québec est partagée entre plusieurs paliers gouvernementaux. Au Québec, il y a environ 325 000 km de routes. Parmi celles-ci, 500 km sont sous la responsabilité du gouvernement fédéral, alors que 31 000 km d'autoroutes, de routes nationales, de routes régionales, ainsi que des routes collectrices sont gérées par le Ministère de Transport de Québec (MTQ). Les routes nationales, de la série 100 selon la numérotation consacrée, relient les agglomérations urbaines principales, dont le nombre d'habitants est supérieur à 25 000, ainsi que les aéroports, les traverses maritimes nationales ou internationales (Gouvernement du Québec, 2021a). Les routes régionales, des séries 200 et 300, relient les agglomérations urbaines secondaires, dont le nombre des habitants est entre 5 000 et 25 000, ainsi que les aéroports ou les traverses maritimes régionaux (Gouvernement du Québec, 2021b). Le Ministère des Forêts, de la Faune et des parcs est, quant à lui, responsable de 186 000 km de routes d'accès aux territoires, tandis que les municipalités s'occupent de 107 000 km de routes, rues et chemins locaux. Par ailleurs, Hydro-Québec gère environ 100 km du réseau qui représente les voies carrossables et praticables (Ministère des Transports du Québec, 2020).

Si les routes se trouvent sous la responsabilité de différents acteurs, leurs modes de construction sont similaires. Ainsi, les chaussées les plus souvent rencontrées sont constituées de trois couches principales: la sous-fondation, la fondation et le revêtement. Par ailleurs, les matériaux granulaires utilisés dans la construction d'une chaussée conventionnelle sont souvent similaires et exigent le respect de fuseaux granulométriques réglementaires, qui sera un argument pour l'utilisation d'un matériau à des fins routières (Lacroix et al., 2020). Ces fuseaux définissent les limites des particules grossières et des particules fines dans le matériau. Par ailleurs, l'état des chaussées est conditionné par les conditions climatiques extrêmes du Québec, mais également par la charge appliquée liée aux différents types de véhicules qui les empruntent. La dégradation des chaussées et leur mauvais état causent une hausse importante des budgets d'entretien et, à titre d'exemple, la Ville de Montréal a investi 200 M\$ en 2017 dans la réfection de ses routes (Ministère des Transports du Québec, 2020). La déformation des chaussées entraîne ainsi des dégâts

superficiels ou même profonds aux couches formant les routes. Par ailleurs, le coût de transport des matériaux vers les sites s'ajoute encore aux coûts d'entretien élevés.

Pour éviter d'avoir à apporter des matériaux vierges sur un site de construction routière, le traitement des sols en place à la chaux est une technique classique qui permet de valoriser les sols inadaptés pour la construction de remblais, ou pour les travaux de terrassement dans la construction de routes. L'objectif de cette méthode est de diminuer la teneur en eau du sol et d'améliorer ses caractéristiques géotechniques et mécaniques pour qu'il soit apte à être utilisé comme matériau de construction. Pour cela, la connaissance du sol étudié et ses caractéristiques minéralogiques demeurent importantes, afin de pouvoir doser la quantité de la chaux convenable pour initier la réaction. Le traitement à la chaux est un moyen d'amélioration à court terme, et de stabilisation à long terme. L'amélioration est définie selon l'AIPCR (Association Internationale Permanente des Congrès de la Route) comme étant une technique qui permet d'améliorer, en ajoutant un liant, les caractéristiques physiques du sol à savoir la teneur en eau, la plasticité, les optimums Proctor, la sensibilité du sol au gel et à l'eau. Par ailleurs, cette opération permet de donner au sol une résistance à long terme face au phénomène de gel et de dégel (LCPC & SETRA, 2000). Cette stabilisation à long terme est atteinte grâce au développement de réactions pouzzolaniques entre les particules d'argiles (Ingles & Metcalf, 1972).

Comme les traitements à la chaux sont maintenant bien connus, le but de ce projet de recherche est de vérifier l'applicabilité d'un traitement des argiles du Québec par des résidus industriels de chaux pour la construction de fondations routières et pour d'autres usages à définir. Ces résidus industriels de chaux proviennent de la compagnie Graymont et présentent des caractéristiques comparables avec celles de la chaux pure. Cette approche permet de valoriser ces résidus qui sont normalement non utilisables et qui ne présentent aucune valeur économique pour l'industrie. En effet, la réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit le coût de transport des matériaux, la pollution et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale par la réduction des matériaux à transporter et de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier. De plus, la réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières) et des ressources naturelles non renouvelables, ce qui contribue à préserver l'environnement (Ministère de l'environnement & Ministère de l'économie et des finances, 2016).

La présente étude permet donc de (1) valoriser les argiles du Québec et les résidus de chaux, (2) permettre des constructions routières à coût moindre et, finalement, (4) proposer une solution à la question de la pénurie de sable à l'échelle mondiale.

1.2 Objectif principal

L'objectif principal du projet est d'évaluer la faisabilité technique de la stabilisation des argiles avec de la poussière de four à chaux et d'établir la rentabilité économique de la construction d'une chaussée traitée, ainsi que d'une plateforme de traitement des argiles avec ces résidus.

1.3 Objectifs spécifiques

L'objectif principal défini en 1.2 a été décomposé en 4 objectifs spécifiques (OS) détaillés ci-après :

OS1 : Évaluer l'effet des résidus industriels de chaux sur les argiles et déterminer le protocole de stabilisation optimal à appliquer,

OS2 : Dresser une approche expérimentale à réaliser au laboratoire afin de valider, d'un point de vue géotechnique, la faisabilité technique du traitement des argiles comme matériau de fondation des chaussées,

OS3 : Comparer les coûts de construction d'une chaussée traitée avec celui d'une chaussée conventionnelle,

OS4 : Dresser les débouchés alternatifs et analyser de rentabilité économique d'une plateforme de traitement destinée à l'approvisionnement vers ces débouchés.

1.4 Structure du document

Après ce premier chapitre d'introduction au mémoire, le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique comprenant : (1) l'état des lieux de l'état des chaussées du Québec et les différentes problématiques, (2) l'historique du traitement des sols à la chaux au Québec, et (3) les approches économiques pour le calcul de bénéfices générés par le traitement des sols.

Le troisième chapitre est consacré aux essais expérimentaux. Les essais de caractérisation du sol étudié y seront présentés, suivis par les essais du MTQ qui permettent de vérifier l'applicabilité du sol traité comme matériau de construction pour les chaussées.

Le quatrième chapitre fait le point sur l'étude économique du projet. Dans un premier temps, elle vise à comparer le coût d'une chaussée conventionnelle à une autre réalisée avec des sols traités. Dans un deuxième temps, elle vise à calculer le bénéfice éventuel suite de l'utilisation d'un sol traité, sous forme d'un sable fin silteux, produit par une plateforme de traitement en remplacement d'un matériau granulaire de base (sable de carrières ou sablières). Dans un troisième temps, elle vise à générer trois abaques qui permettent de calculer les coûts de construction en prenant en compte la variation de plusieurs facteurs (dosage des résidus de chaux, distance de transport...).

Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats de l'étude technico-économique du projet; celui-ci est suivi des principales conclusions de l'étude.

1.5 Schéma récapitulatif du projet

La problématique de base du projet et l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de la présente étude sont schématisés sur la Figure 1.1. On notera en particulier que le projet vise à valoriser des résidus et des argiles, abondantes au Québec, tout en luttant contre la pénurie mondiale de sable résultant d'une exploitation importante des ressources.

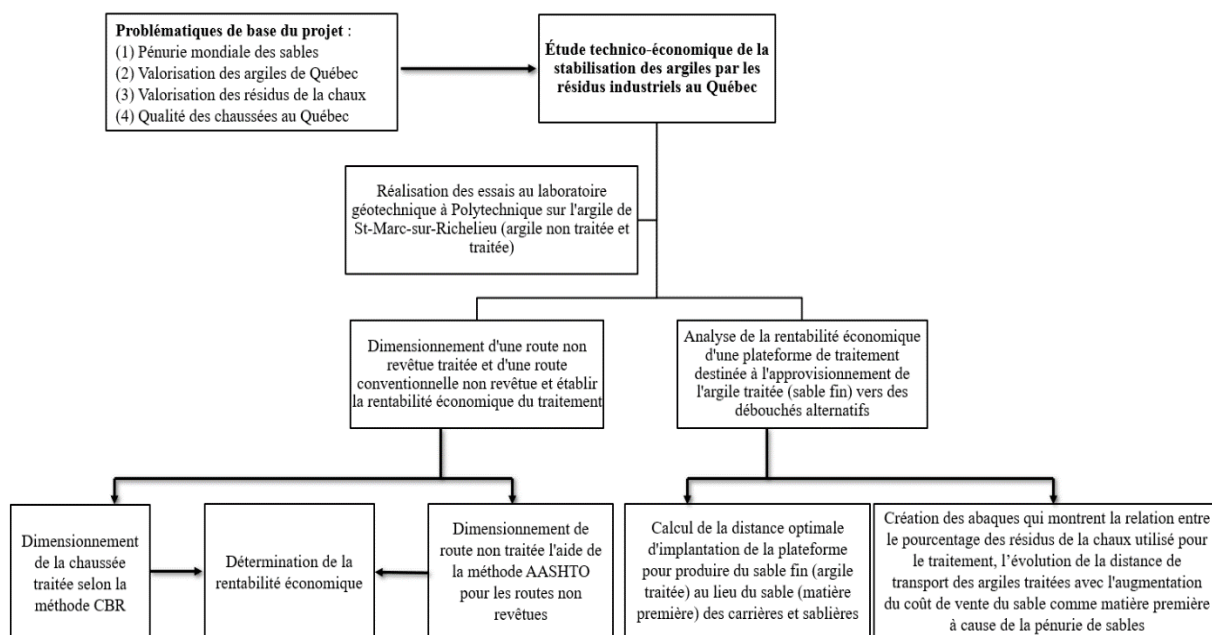


Figure 1.1: Schéma récapitulatif du projet

1.6 Retombée et originalité du projet

L'étude technique et économique de la stabilisation des argiles apporte plusieurs contributions. La première est la possibilité de valoriser des résidus de chaux comme produit stabilisateur des argiles. La deuxième consiste en la valorisation des argiles, prépondérantes au Québec, en permettant leur utilisation comme matériaux de construction dans les chaussées, mais aussi dans d'autres débouchés cités dans le présent mémoire. La troisième porte sur le développement d'abaques de comparaison économique, qui pourront être utilisés comme outils d'aide à la décision afin de choisir la méthode la plus rentable.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de littérature sur l'état du réseau routier au Québec, et les différentes problématiques ou dégradations qu'il subit au cours des années. Il se poursuit ensuite par l'historique du traitement des sols au Québec, puis par une présentation de l'état des lieux de la rentabilité économique de la stabilisation des sols en place.

2.1 État du réseau routier au Québec

La Direction des chaussées (2019), qui dépend de la Direction générale du laboratoire des chaussées et du sous-ministère à l'ingénierie et aux infrastructures du ministère des Transports de Québec, supervise une évaluation annuelle de l'état des chaussées revêtues en utilisant un équipement multifonction spécialisé muni de lasers, qui permet de mesurer trois indicateurs différents sur l'état de la chaussée : le confort de roulement, la profondeur des ornières et la présence de fissuration.

Le premier indicateur mesuré est le confort de roulement qui est évalué en se basant sur l'indice de rugosité international (IRI). L'IRI est un indice qui mesure la rugosité de tous les types de revêtement de la route. S'il est mesuré seul, le principe se base sur l'impact simulé d'une masse qui constitue le quart de la masse du véhicule par roue selon l'Association québécoise des transports (2012), il est exprimé en mètre par kilomètre et peut aller de 0 à 12 m/km. Généralement, les pires routes des réseaux nord-américains n'excèdent pas de 8 m/km d'IRI (Plante & Leroux, 1995). Le deuxième indicateur est la profondeur des ornières mesurée à l'aide d'un transversoprofilographe. C'est un instrument sous forme d'un chariot qui se déplace à vitesse constante et doté d'un lecteur de déplacement vertical qui permet de définir la profondeur de l'ornière. Pour la largeur de l'ornière, elle résulte du temps parcourus par le chariot ainsi que du nombre de lectures enregistrées par le déplacement vertical (Huot et al., 2006). Le troisième facteur déterminé est la présence de fissuration. La fissuration est mesurée à l'aide d'une caméra numérique placée sur le camion multifonction de la Direction du laboratoire des chaussées (2003). La capture d'images vidéo permet de déterminer le type de fissuration sur des voies de 3,6 m. Les fissurations peuvent être de type transversal, lorsque causées par le retrait thermique sur toute la

voie de la chaussée, longitudinal, lorsque causées par la fatigue située dans les pistes de roues, ou de type Lézarde, lorsque causées par le gel ou autres phénomènes climatiques.

En 2019, 76,7 % du réseau routier supérieur géré par le Ministère des Transports du Québec, qui englobe les autoroutes, les routes nationales, régionales ainsi que les routes collectrices, était considéré en bon état selon l'IRI, ce qui correspond donc à 23,3 % des chaussées en mauvais état. 19,3% de cette portion du réseau en mauvais état était en déficience mineure et les 4% restant étaient en déficience majeure. Le seuil de déficience de la route dépend de la valeur de IRI, cela veut dire qu'une déficience mineure correspond à un IRI entre 2 et 3, tandis qu'une valeur d'IRI entre 3 et plus correspond à un seuil de déficience majeure de la chaussée (Bergeron, 2008).

Un montant de 740 millions de dollars a ainsi été investi pour la réfection de 2 501 km de chaussées au Québec pour l'année 2019-2020. Ce montant est six fois ce qui a été dépensé pour les mêmes fins entre les années 1995-2000. Ainsi, les investissements pour la conservation des chaussées ont subi une grande augmentation entre 2013 et 2019, résultat de l'amélioration de la longueur des travaux préventifs qui ont impacté les investissements dédiés à ces fins. Le coût des travaux préventifs était de 100 M\$ en 2013 et il a atteint une valeur de 250 M\$ en 2019. Le but de ces travaux est de retarder toutes sortes de déficience de la chaussée et d'augmenter leur durée de vie utile. Toutefois, d'autres dépenses sont comprises dans les coûts d'investissement dont les travaux palliatifs, ceux de réhabilitation en surface et en profondeur, ainsi que ceux des travaux de reconstruction (La Direction des chaussées, 2019).

Le débit du trafic lourd appliqué aux chaussées revêtues affecte leur durée de vie et la détermination de l'agressivité totale, qui se traduit en termes d'équivalent de charge axiale simple (ÉCAS), permet de savoir le nombre total de passages d'essieux. Ainsi, le doublement du chargement entraîne une multiplication par 16 du nombre des dommages d'une chaussée revêtue (*CIV8450-dimensionnement de chaussées : routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues*, 2020) . Toutefois, le débit du trafic appliqué aux chaussées non revêtues est moins important comparativement à celui des chaussées revêtues et ce type de chaussée est habituellement constitué de deux couches (la sous-fondation et la fondation). Nous nous intéresserons donc essentiellement à ce type de chaussées, puisque la sollicitation moindre des matériaux augmente les chances de succès de la stabilisation par les résidus industriels de chaux. Les chaussées non revêtues sont donc présentées en détail dans la section suivante.

2.1.1 Chaussées non revêtues

Une chaussée non revêtue est définie comme étant une route où la circulation est faite sur les assises de la chaussée qui ne sont pas protégées par un revêtement. Elle est à peine carrossable à vitesse basse, mais à vitesse élevée, elle peut être aussi confortable qu'une route revêtue (Autret, 1997). Elle est habituellement constituée de deux couches, à savoir une couche de sous-fondation sur laquelle repose une couche de fondation (Holtz & Kovacs, 1981).

Il existe trois types de routes non revêtues (Autret, 1997):

- La piste naturelle : il s'agit d'une piste qui dépend des conditions naturelles du site. Elle n'a pas subi aucun traitement, ni entretien,
- La route en terre : l'élément principal qui différencie la route en terre de la piste naturelle est que ce type de route est amélioré par un tracé routier et par un traitement aux endroits jugés difficiles. On peut les rencontrer dans des contextes particuliers, comme le cas des activités agricoles ou des exploitations forestières,
- La route élaborée non revêtue : il s'agit d'une route accessible aux véhicules ordinaires, qui fait l'objet de travaux de gestion et d'un entretien routier.

2.1.2 Problèmes des chaussées non revêtues

Pour pouvoir entretenir et réhabiliter les chaussées, il faut bien identifier les problèmes qui se présentent à la surface des routes. Pour cela, la norme ASTM International (2020) permet la détermination de l'indice de l'état de la chaussée (PCI) grâce à des relevés visuels. Le PCI est déterminé en faisant une moyenne pondérée selon la quantité de dégradation de chaque type. On rencontre ainsi :

Les ornières : ce type d'endommagement est divisé en deux types : les ornières à grands rayons et les ornières à petits rayons. Elles sont causées par les traces des roues des véhicules lourds qui empruntent la chaussée. Plus le rayon de l'ornière est grand, plus le problème devient profond. Ces ornières profondes demandent une reconstruction complète de la chaussée, ce qui entraîne des coûts supplémentaires dans les travaux de reconstruction (Carter, 2018). Les ornières peuvent être

causées par un sous dimensionnement de la chaussée, un compactage ou un drainage insuffisant (Bamako, 2006).

Les traverses : Ce type de dégradation se voit comme un itinéraire transversal qui coupe la chaussée permettant l'écoulement d'eau durant la période pluviale (Bamako, 2006).

Les tôles ondulées : Elles se présentent sous forme d'ondulations de petite longueur, perpendiculaires à l'axe de la chaussée, qui sont le résultat d'une cohésion insuffisante des matériaux de chaussée ou bien d'une grande pression des pneus des véhicules qui empruntent la chaussée (Bamako, 2006).

Les nids de poule : Ils se présentent comme des cavités de forme arrondie. Leur formation est causée par la charge du trafic et par les cycles de gel-dégel durant lesquels des parties de la surface de la chaussée sont arrachées suite aux activités de déneigement (CERIU, 2010). Ce phénomène d'arrachement des matériaux granulaires est causé par le manque de particules fines ou une mauvaise homogénéité de la surface de la route, ce qui accentue l'accumulation d'eau à l'intérieur de la chaussée selon le Ministère des transports de Québec (2021b).

2.1.3 Facteurs de dégradation des chaussées non revêtues

L'état de la chaussée est conditionné par deux facteurs importants, à savoir les conditions météorologiques et la charge du trafic qui emprunte la chaussée.

2.1.3.1 Conditions météorologiques

Selon le Ministère des Transports du Québec (2020), le Québec se caractérise par des conditions météorologiques difficiles. Le sol gèle à des profondeurs comprises entre 1,2 m et 3 m, la différence de température entre l'hiver et l'été est de l'ordre de 60°C à 70°C (MTQ, 2019) et les précipitations totales peuvent atteindre 1 000 mm/an. Durant la période de dégel, la résistance de la chaussée est réduite de 40% et la route est de 30 à 70 % plus fragile, alors que les routes doivent encore continuer à supporter, dans un tel climat, les charges appliquées par le parc automobile. Cependant, en raison de la fragilité de la route le ministère des transports applique un règlement qui oblige une diminution de charge sur les chaussées, ces restrictions oscillent entre 8 à 20 % (Ministère des transports de Québec, 2021a).

2.1.3.2 Parc automobile

Le nombre de véhicules qui fréquentent le réseau routier québécois a augmenté de 69% entre 1990 et 2019, et le nombre de camions lourds et de tracteurs a augmenté de 76% (MTQ, 2019). Pour faire face à cette augmentation de la charge du trafic, le MTQ a mis en place un règlement sur les normes de charges et de dimensions applicables aux véhicules routiers afin d'éviter les charges excessives qui causent des déformations importantes sur les routes. Cela permet de réduire les coûts d'entretien et de réparation des routes. La charge maximale autorisée pour une catégorie d'essieu (Essieu simple, Tandem, Tridem, ou essieu autovireur à l'avant d'un Tridem) est la plus petite des trois valeurs suivantes : la somme des capacités de tous les pneus, la capacité de charge de l'essieu avant ou la limite de charge prévue au règlement selon la catégorie d'essieux (MTQ, 2019). Le Tableau 2.1 montre les limites de masse totale en charge exigées par le Ministère de Transport du Québec, durant la période normale et durant la période de dégel. Une réduction de la charge doit être appliquée afin de ne pas détériorer la chaussée. La limite de masse totale en charge est calculée en prenant la valeur la plus petite de ces deux valeurs : la somme des charges maximales autorisées de chaque type d'essieux et la limite de masse totale en charge de la catégorie de véhicule comme il est décrit dans le règlement (MTQ, 2019).

Tableau 2.1: Limites de charge à appliquer dans le cas normal et le cas de dégel. Adapté de (MTQ, 2019).

Catégorie de véhicule	Période		Réduction
	Normal	Dégel	
Essieu simple	25 250 kg	22 750 kg	10 %
Essieu tandem	41 500 kg	36 500 kg	12 %
Essieu tridem	49 500 kg	43 000 kg	13 %
Essieu quadrem	57 500 kg	50 500 kg	12 %
Essieu cinquem	62 500 kg	57 500 kg	8 %

2.2 Propriétés géotechniques des matériaux de fondation et de sous-fondation

Le ministère des Transports du Québec exige une série d'essais en laboratoire afin de caractériser et de qualifier un sol comme matériau approprié pour la fondation ou la sous-fondation des chaussées, qu'elles soient revêtues ou non revêtues (AASHTO, 1993; Ministère des transports de Québec, 2021c). L'ensemble de ces essais est présenté dans cette section.

2.2.1 Granulométrie

Les courbes granulométriques des matériaux de fondation et de sous-fondation des chaussées doivent être à l'intérieur du fuseau granulométrique défini par la norme NQ 2560-114 par le Ministère des Transports du Québec. L'identification d'un nouveau matériau et l'étude de sa validité pour la construction des chaussées fait référence aux caractéristiques mécaniques des matériaux de base. Les deux fuseaux granulométriques exigés par le MTQ pour le MG-20 et le MG-112 sont présentés sur la Figure 2.1 et 2.2.

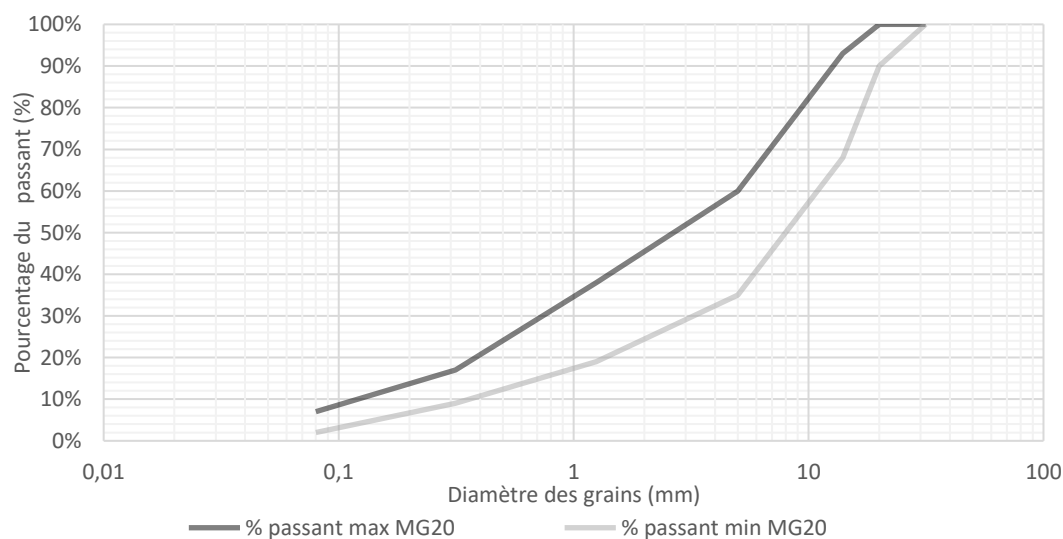


Figure 2.1: Fuseau granulométrique des matériaux de fondation MG-20. Adapté de (AASHTO, 1993).

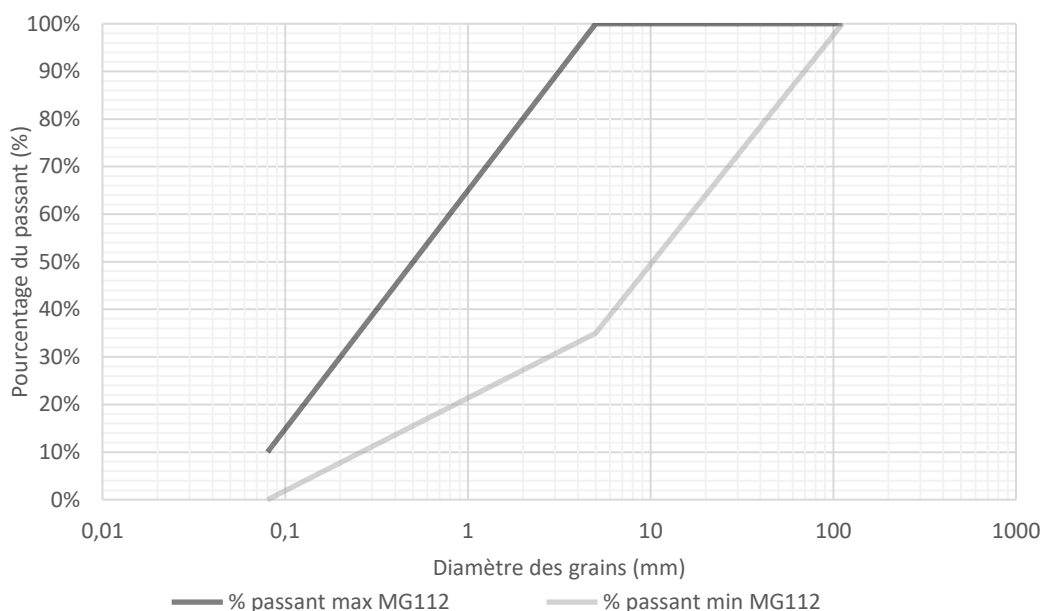


Figure 2.2: Fuseau granulométrique de la fondation MG-112. Adapté de (AASHTO, 1993).

2.2.2 Essai Proctor Normal et Proctor Modifié

L'essai Proctor vise à déterminer les conditions de compactage du sol sur le chantier. Ces conditions sont la masse volumique sèche, la teneur en eau, l'énergie de compactage, ainsi que le type de sol (Holtz & Kovacs, 1981). Selon la norme NQ 2560-114/2014, les matériaux de fondation doivent être densifiés à 98% de la masse volumique sèche et leur teneur en eau optimale doit être entre 8 et 15%. De même, la norme NQ 2560-114/2020 exige que les matériaux de sous-fondation soient densifiés à 95% du Proctor modifié et leur teneur en eau optimale soit entre 8 et 15%, ces normes s'appliquent aux matériaux granulaires indépendamment du type de la chaussée.

2.2.3 Perméabilité

Pour contrôler la quantité d'eau dans la chaussée, un système de drainage doit être mis en place. Le drainage peut être vertical ou horizontal. Le premier consiste à mettre en place le dispositif drainant en bordure de chaussée, tandis que le deuxième est mis sur l'ensemble de la chaussée. Il est généralement sous forme d'un géosynthétique ou autres matériaux drainants selon la structure de la chaussée (InfraStructures, 2021). La conception du système de drainage nécessite ainsi la

connaissance de la conductivité hydraulique des matériaux utilisés dans la construction des chaussées.

La conductivité hydraulique est déterminée selon la loi de Darcy dans les conditions d'écoulement laminaire. La loi de Darcy est exprimée selon la relation suivante :

$$v = k \cdot i \quad 2-1$$

Où :

v : vitesse d'écoulement [m/s],

i: gradient hydraulique [-],

k: conductivité hydraulique [m/s].

La conductivité hydraulique est déterminée au laboratoire selon la norme ASTM D2434-68, qui est dédiée uniquement aux matériaux granulaires.

2.2.4 Indice de portance californien CBR

L'indice de portance californien (CBR) est utilisé pour l'évaluation de la capacité portante du matériau dans les conditions de l'optimum Proctor. La détermination du CBR est basée sur la norme ASTM D1883-16. L'essai consiste à faire pénétrer un piston circulaire dans le matériau compacté à un taux de pénétration constant. La valeur du CBR est exprimée comme le rapport entre la charge unitaire sur le piston nécessaire pour atteindre une pénétration de 2,5 mm (0,1 po) et de 5,1 mm (0,2 po) dans le matériau d'essai et la charge unitaire requise pour la même pénétration dans un matériau standard de pierre concassée bien calibrée. Selon AASHTO (1993), la valeur CBR doit être supérieure à 80% pour la fondation et supérieur à 35% pour la sous-fondation.

2.2.5 Série d'essais du ministère des transports du Québec

La validation d'un matériau granulaire afin de l'utiliser dans une couche de fondation et ou de sous-fondation nécessite de réaliser une série d'essai AASHTO. Ces essais englobent les limites d'Atterberg, la densité relative, la sédimentométrie, l'absorption d'eau, l'essai Proctor et l'essai triaxial. La série d'essais exigés est présentée dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2: Résumé des paramètres géotechniques qu'un sol doit satisfaire pour être utilisé comme matériau de fondation et sous-fondation (AASHTO, 1993; Ministère des transports de Québec, 2021c).

Paramètres	Matériaux de fondation	Matériaux de sous-fondation
Indice de Plasticité	0	0
Densité pour particule grossier (Mg/m ³)	>2,0	>2,0
Densité pour particule fine (Mg/m ³)	>2,0	>2,0
Absorption d'eau - grossier (%)	<10	<10
Absorption d'eau - fin (%)	<10	<10
Teneur en matière organique (%)	<0,8	<0,8
pH	>7	>7
Teneur en particules fines (%)	<7	<7
Conductivité hydraulique (m/s)	1 à 10 ⁻⁹	1 à 10 ⁻⁹
Indice de capacité portante (m/s)	>80	>35
Compaction (Proctor modifié)		
Densité maximum sèche (Mg/m ³)	>1,8	>1,8
Teneur en eau optimum (%)	8-15	8-15
Essai triaxial		
Cohésion apparente (kPa)	>35	>35
Angle de friction interne (degrés)	>35	>35
Module de Résilience (MPa)	250	200
Coefficient de Poisson (-)	0,35	0,35
Coefficient de pression latérale (k ₀)	-	0,5

2.3 Particularités des argiles du Québec

Les argiles de l'Est du Canada « recouvrent environ 70% des régions peuplées des basses terres du Saint-Laurent, de la vallée de l'Outaouais et du Saguenay-Lac-Saint-Jean, ainsi qu'une partie importante du nord-ouest québécois, l'est et le nord de l'Ontario et certaines régions côtières des provinces maritimes » (Leroueil et al., 1983).

Beaucoup d'argiles sensibles se retrouvent dans les argiles de l'Est de Canada. La formation des argiles sensibles s'effectue principalement dans les régions nordiques, là où il a existé des ères de glaciation. La fin de ces ères a permis aux glaces de fondre, ce qui a conduit à la remontée des argiles en surface à cause de la diminution de la charge sur la croûte terrestre. Ce retrait des glaces a permis la sédimentation des sols à grains fins dans les régions de l'Outaouais et de la vallée du Saint-Laurent sur des grandes épaisseurs, allant jusqu'à une centaine de mètres (Leroueil et al., 1983). Par la suite, ces argiles ont devenues sensibles suite à l'action de la pluie et des eaux douces des rivières qui ont lessivé le sel interstitiel et modifié les interactions entre les particules de sol (*Les argiles sensibles au Québec*, 2011).

Selon Giroux (1947), les argiles du Québec peuvent être classées en quatre catégories (Figure 2.3). La première catégorie constitue les argiles lacustres. Ces dépôts se sont formés à la fin de la période glaciaire, qui englobait une large partie de l'Abitibi, et proviennent de l'ancien lac "Ojibway". Le dépôt est interstratifié avec des minces couches de limon ou de sable. La deuxième catégorie est celle des argiles marines du pléistocène, qui occupent une grande partie du bassin du St-Laurent, la partie intérieure de ses tributaires et une grande partie au sud et à l'est du lac St-Jean. Ce dépôt a une élévation de 182,88 mètres (600 pieds) et contient des quantités variables de sable. Ce type d'argile est utilisé pour la fabrication de briques et de blocs creux de construction. La troisième catégorie représente les argiles résiduelles du dévonien et du silurien. Il s'agit d'argiles assez plastiques, présentes en Gaspésie dans des schistes siluriens altérés et leur épaisseur varie entre 0,3 mètre à 1 mètre. La dernière catégorie représente les argiles qui proviennent de l'altération de l'anorthosite. Ce dépôt se trouve le long de la rivière Laval à Forestville (Québec) sur une longueur de 304,8 mètres et une largeur de plus de 12,2 mètres. Ce type d'argile contient presque 53% de silice et 28.5% d'alumine.

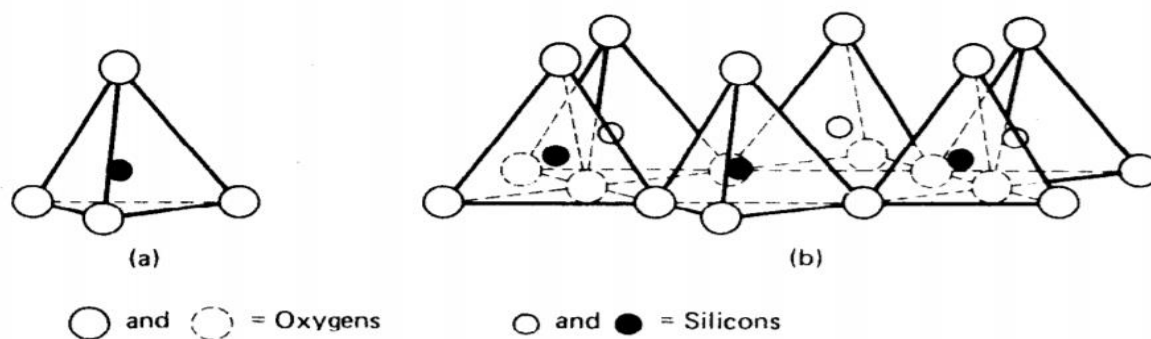


Figure 2.4: a) Tétrahédre de silice. b) Feuillet de silice en tétraédre. Tirée de (Holtz & Kovacs, 1981).

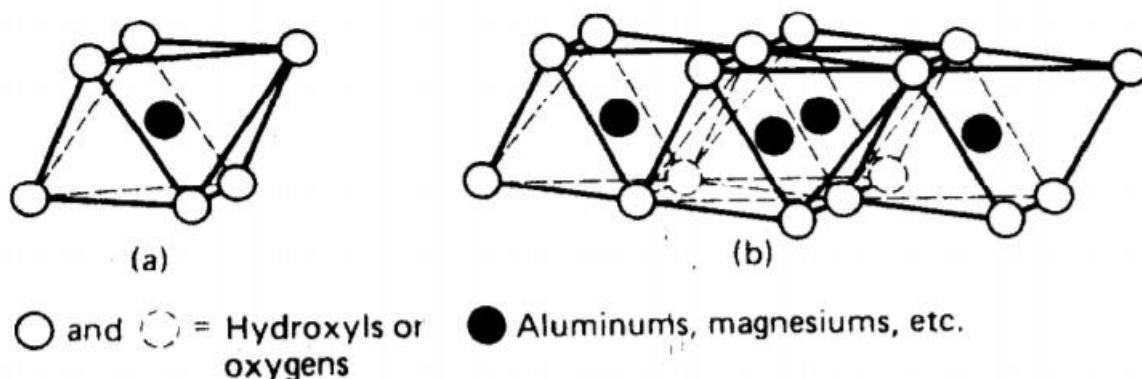


Figure 2.5: a) Octaèdre d'aluminium. b) Feuillet en octaèdre. Tirée de (Holtz & Kovacs, 1981).

Les quatre types d'argile les plus courants sont la kaolinite, la montmorillonite, l'illite et le chlorite. Les argiles se trouvent partout au Canada sauf sur l'Île-du-Prince-Édouard, au Nouveau-Brunswick et au Manitoba. Ces argiles sont parfois exploitées et, en 2008, le Canada a augmenté ses exportations de 58,7 % par rapport à 2007, ceci est dû à la forte demande de l'argile de type kaolinite aux États-Unis (Ressources naturelles Canada, 2008).

La kaolinite est sous forme d'une série de couches alternées de feuillets en tétraédre et de feuillets en octaèdre. Elle est la composante principale de la porcelaine et est largement utilisée dans la fabrication de papier et de la peinture. La montmorillonite, appartenant au groupe des smectites, est composée de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine. Cette structure est aussi appelée

une structure 2:1. L'illite est, dans sa composition, similaire à la montmorillonite sauf qu'un atome de potassium remplit les espaces entre les couches 2:1. En ce qui concerne le chlorite, elle est formée d'un agencement particulier de couches: un feuillet de silice suivi par un feuillet d'alumine puis un autre feuillet de silice et finalement un feuillet de gibbsite (Al) ou de brucite (Mg). Cette structure est désignée sous la forme 2:1:1 (Holtz & Kovacs, 1981).

Pour identifier les différents minéraux dans le sol, on peut avoir recours à différentes techniques comme la diffraction aux rayons X, l'analyse différentielle thermique ou l'analyse au Microscope Électronique à Balayage (MEB), ainsi que la technique de Casagrande basée sur les limites d'Atterberg. La montmorillonite est l'argile la plus instable au contact avec l'eau et elle subit de forts gonflements. Pour cette raison, la connaissance et la maîtrise des chantiers de construction sur des dépôts argileux est primordiale dans le but de contrôler le terrain durant les travaux de construction, ou bien d'interdire toute construction sur des terrains qui présentent un fort caractère organique.

Dans le cas des chaussées, le problème de gonflement des argiles peut survenir lorsqu'elles sont construites sur un sol support argileux. L'eau s'infiltre par des fissures dans la surface de la chaussée et, pendant la période hivernale, l'eau emmagasinée dans le sol gèle et conduit à la formation des lentilles de glaces. Ces lentilles de glace causent le gonflement de la structure, ainsi qu'un retrait dans la période de dégel. De nombreuses études ont donc été réalisées dans le but de trouver des solutions permettant de stabiliser les argiles. Les produits utilisés pour la stabilisation sont variés. Il peut s'agir de cendres volantes, de ciment Portland, d'huile sulfurée, de fibres synthétiques en polypropylène ou de chaux.

2.4 Pénurie de sable à l'échelle mondiale

Outre les possibilités de construction sur un sol argileux, le présent projet de recherche vise à trouver des alternatives à l'exploitation des ressources primaires et notamment du sable. Ce dernier est défini comme étant la fraction granulaire entre 0,075 mm et 4,25 mm qui en regroupe trois types : le sable fin, moyen et grossier (Holtz & Kovacs, 1981). Le sable est la source la plus utilisée dans le monde, après l'air et l'eau, dans tous les secteurs (construction, industrie...etc.) (Pelletier, 2019b). Dans le secteur de la construction, le sable est majoritairement utilisé comme matière première pour le béton (Pelletier, D. B., 2019b). La Chine a développé de gros projets de

construction qui utilisent une énorme quantité de ciment à base de sable. À cela s'ajoutent l'Inde, Singapour, les Pays-Bas, ainsi que l'Allemagne, qui sont les premiers consommateurs de sable au monde (Julien & Pamart, 2019).

Les carrières de sable ne permettent plus l'extraction des sables dans de nombreux pays, et les exploitations se sont donc dirigées vers les océans et les mers (Hérard, 2020). L'extraction des sables dans les océans et les côtes favorise la remontée du niveau d'eau, ce qui force la disparition de certaines régions comme le cas des Iles-barrières et de l'Isle Dernière au large de la Louisiane (Paskoff, 1998). En France, l'extraction du sable issu des fonds marin atteint 7 millions de tonnes par an (Ruffenach, 2019). Au Canada, le problème de la pénurie des sables pourrait être posé dans 30 à 50 ans, ce qui démontre l'importance des recherches actuelles de nouvelles alternatives permettant de limiter l'exploitation des ressources naturelles (Ouellet-Plamondon, citée par Pelletier, D. B. (2019a)). Ainsi, deux problèmes seront posés à terme : le premier consiste à trouver de nouvelles ressources de sable, alors que le deuxième est l'augmentation des distances d'approvisionnement des sables vers les villes. Dans le même article, Ouellet-Plamondon explique que lorsque les distances d'approvisionnement des sables s'amplifient, la solution la moins coûteuse est celle d'importer le sable des États-Unis.

Le sable est ainsi une ressource naturelle non renouvelable et sa régénération nécessite des milliers d'années à des centaines de milliers d'années. Pour cela, la recherche de nouveaux substituts du sable est primordiale afin de remplacer le sable naturel et empêcher sa surexploitation. La présente étude vise à vérifier la technique de traitement à la chaux des sols abondants en place comme solution à cette problématique.

2.5 Techniques de traitement des sols au Québec

Cette partie présente les travaux de stabilisation des sols au Québec, ainsi que les résultats sur les performances mécaniques obtenus selon le type de liant hydraulique utilisé. Elle comporte également une description détaillée de la chaux et de ses résidus industriels comme liant hydraulique, sujets du présent mémoire.

2.5.1 Historique du traitement au Québec

Le traitement des sols en place au Québec a été débuté en 1982 et 1984 par un programme d'essais sur l'influence des résidus de l'usine Union Carbide de Chicoutimi sur les argiles et les sables et s'est poursuivi en 1986 au laboratoire central (Flon & Besner, 1987). L'étude a montré l'effet de différents additifs, notamment de la chaux, du ciment et d'autres liants comme la poussière de Cottrel, qui est un résidu de cimenterie, ou la fumée de silice, ainsi que l'effet de leur combinaison sur trois types de sols : l'argile de Saint-Vallier, l'argile de Saint-Thuribe et le sable de la carrière PEB à Lac Saint-Charles (PEB fait référence aux initiales du fondateur de la carrière, Paul-Émile Beaulieu). Les résultats de l'étude montrent que l'effet de la combinaison des liants est plus efficace que l'amélioration des caractéristiques avec un seul additif, tandis que la chaux est efficace pour les sols argileux et le ciment semble le plus approprié dans le cas des sols sableux.

En 1991, le Ministère des Transports du Québec adopte deux nouvelles techniques, la première consiste à recycler en place une partie des revêtements bitumineux dégradés et fissurés avec un liant hydrocarboné, puis à recouvrir le mélange ainsi préparé par un enrobé à chaud suivant la technique de « recyclage à froid des enrobés (RFE) ». La seconde technique se base sur la fragmentation du revêtement bitumineux avec une partie de la fondation, puis un traitement avec un liant hydrocarboné ou un liant hydraulique comme le ciment ou la chaux hydratée suivant la technique de « retraitement en place RP » (Bergeron, 2005). Ces deux techniques permettent de retarder le phénomène de remontée des fissures qui caractérise la partie nordique et de développer les travaux d'entretien des chaussées afin d'augmenter leur durée de vie utile.

En 1998, une collecte de données a été entamée dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en France et le Ministère des Transports du Québec pour trouver des nouvelles techniques d'optimisation du dimensionnement des chaussées face au phénomène de gel-dégel dans un climat sévère comme celui du Canada. Le but d'une telle étude consiste principalement à caractériser le comportement de deux types de chaussées, une avec une assise traitée aux liants hydrauliques (mélange gravier et ciment) et une autre traitée aux enrobés bitumineux (méthode conventionnelle) dans les conditions climatiques québécoises et françaises. Le suivi ainsi réalisé concerne la route nationale 155 à Saint-Célestin à Québec (Pouliot et al., 2004). Les résultats de cette étude réalisée entre 2002 et 2003 ont montré que la méthode

d'utilisation de l'assise en grave-ciment a subi un endommagement et des fissures dès la première année d'essai, tandis que la planche en enrobés bitumineux n'a pas eu de fissures après cinq ans. Toutefois, l'article fait mention d'un fort potentiel d'utilisation des matériaux de fondation stabilisés avec une émulsion bitumineuse et une faible quantité de ciment dans les chaussées à fort trafic. Le traitement à froid a été sujet à des recherches menées en 2012, qui visaient l'analyse des déformations des chaussées contenant des matériaux bitumineux recyclés à froid (Diffiné, 2012). La mesure des déformations a été faite sur deux planches d'essai; elles se situaient à Montréal, sur l'avenue des Érables, entre les rues de Sherbrooke-Est et de Rouen. La première planche d'essai se situe au niveau de la rue de Rouen et la deuxième section au niveau de la rue de Sherbrooke-Est. La différence entre ces deux sections réside dans leur structure. La sous-fondation est de type MR5-TFE-A (Matériaux recyclé de type 5, avec Traitement à Froid de l'Émulsion, nommé « A ») d'une épaisseur de 240 mm pour les deux sections. Cependant, la fondation de la première section est de type MR5-TFE-B de type « B », d'une épaisseur de 200 mm. Tandis que la fondation de la deuxième section se compose de MR-TFE-B, d'une épaisseur de 100 mm, et de GB-20 (Grave-Bitume) d'une épaisseur de 100 mm. Les résultats de cette étude ont montré que la structure de chaussée des deux sections est rigide, mais la deuxième section a montré des déflexions de surface ainsi que des déformations internes plus faible que la première section. Ces déformations ont diminué après un an de trafic sur la chaussée, car les enrobés recyclés à froid arrivent à leur rigidité maximale après plusieurs mois de service.

En 2001, les routes forestières ont aussi fait l'objet d'expérimentations de l'efficacité de traitement des fondations avec la chaux comme liant hydraulique (Légère, 2001). La planche d'essai de cette étude est située à 200 km au Nord-Ouest de Rouyn-Noranda (Québec). La chaussée est constituée de trois horizons : (1) 8 cm de matières organiques, (2) 20 cm d'argile, et (3) 72 cm d'argile visuellement différente de la couche 2. Les résultats de traitements des argiles en place avec la chaux ont montré que la valeur de CBR de la couche de fondation traitée est supérieure à sa valeur avant traitement. Il est passé d'une valeur de 10 avant traitement à une valeur de 16 après traitement à 3% de chaux.

Par la suite, la recherche s'est intéressée au traitement de matériaux granulaires par trois produits : (1) le ciment type-GU, (2) le CaCl_2 et la saumure naturelle, et (3) des polymères. Le but était de caractériser le mélange stabilisant optimal pour des essais dans un simulateur climatique et

mécanique (Pelletier, L., 2007). Les résultats de cette étude ont montré qu'un taux de 1,8 l/m² de chlorure de calcium contribue d'une augmentation de la résistance au cisaillement de 16 %. Pour la saumure un taux de 1,5 l/m² contribue à un gain de 21 % de résistance au cisaillement. Le gain est finalement entre 16 à 18 % pour le ciment et de l'ordre de 15 % pour les polymères.

Plus récemment, la technique de traitement avec liants hydrauliques est devenue une technique couramment utilisée en Ontario et dans le nord des États-Unis (Holt, 2010). Toutefois, en 2010, Holt a aussi démontré la validité de la technique de stabilisation au Québec par l'augmentation de la résistance au cisaillement d'un sol traité comparativement à un sol non traité (Holt, 2010). Par la suite, une étude expérimentale *in situ* a été réalisée au Québec sur un sol typique composé de 67% de sable et de silt et de 33% de pierres concassées (Bernier Racine, 2018). Les résultats de l'étude de stabilisation de ce sol avec du ciment ont toutefois montré une grande hétérogénéité sur le chantier. Cette hétérogénéité est illustrée par des variations dans l'augmentation de la résistance à la compression du sol, ainsi que dans les performances du sol face au gel-dégel à la suite de la stabilisation du sol avec 7 % du ciment à une teneur en eau de 12,67 %. Le tableau 2.3 montre un récapitulatif de l'historique du traitement.

Tableau 2.3: Tableau synthèse de l'historique du traitement des sols

Auteur, Année	Stabilisateur	Planche d'essai	Performances obtenues
Flon et Besner , entre 1982- 1984, poursuivi en 1986	Chaux, Ciment Poussière de Cottrel	Argile de Saint- Vallier, Argile de Saint-Thuribe et sable de la carrière PEB à Lac Saint- Charles	Amélioration des caractéristiques mécaniques des sols : la chaux est efficace pour les sols argileux, le ciment pour les sols sableux

Tableau 2.3: Tableau synthèse de l'historique du traitement des sols (suite)

Auteur, Année	Stabilisateur	Planche d'essai	Performances obtenues
Guy Bergeron, 1991	Liant hydrocarboné (chaux hydratée, ciment)	Revêtements bitumineux	Retardement du phénomène de remontée des fissures
Pouliot et al, 1998	Ciment	Matériaux de fondation et de sous-fondation	Structure rigide dans le cas de la fondation. Déflexion de la surface observée pour la sous-fondation
Légère Glen, 2001	Chaux	Argile (route forestière)	Amélioration des caractéristiques géotechniques de l'argile, et une rentabilité économique intéressante
Pelletier Laurent, 2007	Ciment de type GU CaCl_2 Saumure naturelle Polymères	Matériaux granulaires de la chaussée	Augment de la R_c entre 16 à 18% dans le cas de la stabilisation avec le ciment, Un taux de $1,8 \text{ l/m}^2$ de CaCl_2 , augmente la R_c de 16%, Un taux de $1,5 \text{ l/m}^2$ augment la R_c de 21%, Augmentation de la R_c de 15% dans le cas de la stabilisation avec les polymères,
Holt Christopher, 2010	Chaux	Sols d'infrastructure	Augmentation de la résistance au cisaillement des sols après traitement

Tableau 2.4: Tableau synthèse de l'historique du traitement des sols (suite)

Auteur, Année	Stabilisateur	Planche d'essai	Performances obtenues
Bernier Racine et Marc- Antoine, 2018	Ciment	67% de sable et de silt et de 33% de pierres concassées	Variations dans l'augmentation de la résistance à la compression du sol traité avec 7% de ciment

Parmi tous les liants hydrauliques disponibles, la présente étude se concentre sur la chaux et plus particulièrement sur les résidus industriels de chaux. Ceux-ci sont présentés dans la suite de ce chapitre.

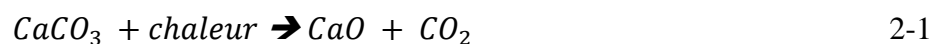
2.5.2 La chaux

La chaux est utilisée depuis des milliers d'années dans la construction, plus précisément sous ses deux formes: la chaux vive et la chaux éteinte. Le mot « chaux » fait référence au calcaire à partir duquel elle est produite. L'utilisation de la chaux diffère selon les industries visées (construction, pharmaceutique, agriculture...).

2.5.2.1 Types de chaux

2.5.2.1.1 Chaux vive

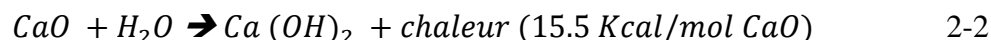
La chaux vive provient de la calcination du calcaire (Carbonate de calcium, $CaCO_3$). Elle est obtenue en mettant le calcaire au four à des températures comprises entre 800 et 1 000 degrés Celsius, selon la réaction suivante :



L'oxyde de calcium CaO qui en résulte est la chaux vive. Celle-ci peut se recarbone lentement, sous l'influence du CO_2 atmosphérique. Elle est alors dénommée « chaux aérienne ». La chaux vive peut être incorporée directement dans les sols argileux et l'introduction de 1% de la chaux vive dans un sol réduit d'environ 1% sa teneur en eau (LCPC & SETRA, 2000).

2.5.2.1.2 Chaux éteinte

La chaux éteinte, ou chaux hydratée, est obtenue par hydratation de la chaux vive. Son symbole chimique est $Ca(OH)_2$ et elle est obtenue selon la réaction chimique suivante :



La chaux éteinte agit aussi sur la teneur en eau dans le sol, mais la réduction est seulement de l'ordre 0.3% par 1% de chaux éteinte ajoutée (LCPC & SETRA, 2000).

2.5.2.1.3 Lait de chaux

Le lait de chaux est constitué de chaux éteinte mélangée avec de l'eau. Il s'agit d'un enduit de couleur blanche utilisé historiquement pour la décoration et la protection des matériaux (Graymont, 2019a). Contrairement aux autres types de chaux, il augmente la teneur en eau du sol. Le cycle de la chaux de la Figure 2.6 résume tout le processus. Il consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte ($Ca(OH)_2$) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux. Dans cet état, le dioxyde de carbone CO_2 contenu dans l'atmosphère ou par des prédécesseurs industriels peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la convertir en calcaire.

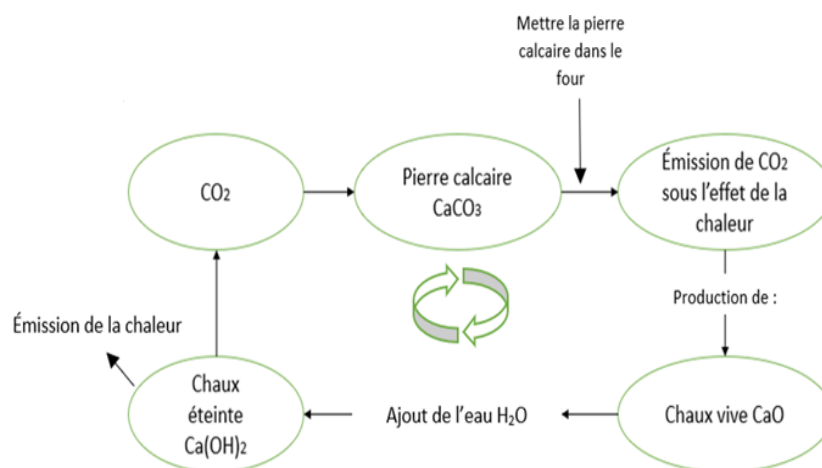


Figure 2.6: Cycle de préparation de la chaux. Adapté de (Graymont, 2019d).

2.5.2.2 Objectif de stabilisation

L'objectif de la stabilisation est de réduire le volume de vides entre les particules solides, de créer des liens chimiques et d'améliorer les liens existants entre les particules. Cela permet d'augmenter

la résistance mécanique des sols et aussi de réduire la sensibilité à l'eau. L'application de la chaux au sol suit le protocole suivant:

- préparation du sol afin d'atteindre la teneur en eau optimal pour le traitement,
- ajout de la chaux sur le sol à traiter,
- mélange de la chaux avec le sol,
- compactage du sol traité.

2.5.2.3 Processus de réaction d'un sol avec la chaux

Le traitement du sol avec de la chaux passe par quatre réactions successives, qui sont:

- l'hydratation et ionisation de la chaux,
- la variation de la Capacité d'Échange Cationique (CEC),
- le développement des réactions pouzzolaniques,
- la carbonatation.

2.5.2.3.1 Hydratation et ionisation de la chaux

La première étape de la technique de traitement consiste à mélanger la chaux (CaO) avec le sol étudié. Le pH du mélange est alors conditionné par la quantité de CaO appliquée. La quantité de chaux qui donne une valeur de pH de 12,4 est celle qui correspond au point de fixation de la chaux nécessaire pour initier les réactions de stabilisation du sol selon la norme ASTM D6276–19.

Plus la quantité de chaux est importante, plus la valeur du pH augmente. La valeur maximale atteignable est 12,6. Le stade d'hydratation de la chaux vive (CaO) avec l'eau dans le sol conduit à la formation de $Ca(OH)_2$, connu sous le nom de la portlandite (Nguyen, 2015). L'étape d'ionisation permet finalement l'apparition d'ions Ca^{2+} et OH^- selon la réaction suivante:



2.5.2.3.2 Modifications apportées à la capacité d'échange cationique (CEC)

Les cations Ca^{2+} résultant de l'étape d'ionisation remplacent les cations qui se trouvent à la surface de l'argile et dans leurs espaces interfoliaires (Little, 1987). Ces cations suivent la règle de substitution, ce qui veut dire que les cations à grande valence remplacent ceux qui ont une petite valence. De même, les cations de grande taille remplacent ceux de petite taille. Ainsi, l'ordre de substitution des différents cations est le suivant :

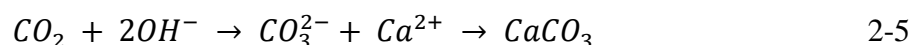


2.5.2.3.3 Développement des réactions pouzzolaniques

Les réactions pouzzolaniques consistent en la réaction, dans un milieu de pH supérieur à 12, de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer présents dans le sol avec les ions Ca^{2+} produits de la précédente étape. Cette réaction forme des silicates de calcium hydratés (C-S-H), des aluminates de calcium hydraté (C-A-H) et des silicates d'aluminate de calcium hydratés (C-A-S-H). Ces derniers se précipitent et se mélangent avec de l'eau dans le sol pour créer des liens forts. Les liens produits dépendent du type d'argile et de leur composition minérale: les montmorillonites permettent la formation de liaisons C-S-H et les kaolinites celle de liaisons C-A-H. L'initiation de ces réactions pouzzolaniques dépend du pH du sol traité à la chaux, conditionné par le point de fixation de la chaux (Nguyen, 2015). Sur cette base, la norme ASTM D6276-19 (ASTM International, 2019) a été élaborée pour la détermination du dosage en chaux correspondant à un pH de 12,4 afin d'initier les réactions pouzzolaniques.

2.5.2.3.4 Production de carbonatation

Les anions OH^- produits par la réaction d'ionisation peuvent aussi réagir avec le CO_2 dissous dans l'eau emprisonnée dans les pores pour donner lieu à des carbonates de calcium selon la réaction suivante :



La réaction montre ainsi qu'une partie de la chaux présente dans le sol se consomme, ce qui est néfaste pour le traitement.

2.5.2.4 Amélioration à court terme du sol

Le stade d'amélioration du sol commence par le séchage, qui consiste à réduire la teneur en eau du mélange. L'étape suivante est la floculation des particules du sol, qui est favorisée par l'hydratation et l'ionisation de la chaux, et la modification de la capacité d'échange cationique (CEC) (Nguyen, 2015). Cette floculation est illustrée à la Figure 2.7:



Figure 2.7: La structure microscopique d'une argile non traitée et celle traitée à la chaux. Adapté de (Little, 1987).

En ce qui concerne les limites d'Atterberg, l'amélioration à court terme du sol permet de réduire l'indice de plasticité du sol traité. En effet, l'ajout de chaux conduit à l'augmentation de la limite de plasticité (w_p) du sol, sans changer la limite liquidité (w_L), d'où une diminution de l'indice de plasticité (I_p) (LCPC & SETRA, 2000).

La courbe Proctor du sol traité change également, ce qui se reflète dans la diminution de la masse volumique sèche optimale causée par la floculation du sol et dans l'augmentation de la teneur en eau optimale. Ce changement dans la courbe Proctor dépend de la quantité de chaux utilisée. Par ailleurs, plus la quantité de chaux augmente, plus la courbe s'aplatit. L'augmentation de la teneur optimale en eau se justifie par le besoin additionnel d'eau pour initier des réactions d'hydratation et des réactions pouzzolaniques. Les courbes de l'indice de portance immédiat (IPI) et l'indice portant californien ($CBR_{4jimmersion}$) des sols traités sont, à leur tour, déplacées vers des niveaux d'eau élevés par rapport aux mêmes courbes du sol non traité. Selon le Guide de traitement du sol avec la chaux et/ou des liants hydrauliques (LCPC & SETRA, 2000), le sol traité devient insensible à l'eau si le rapport entre son indice $CBR_{4jimmersion}$ et son indice IPI est supérieur ou égal à l'unité. Cela signifie alors que le sol traité ne cause aucun problème de réutilisation et de mise en œuvre (Bufalo et al., 2009).

2.5.2.5 Stabilisation à long terme du sol

Les réactions pouzzolaniques qui se produisent à la suite de l'ajout de la chaux permettent la stabilisation du sol à long terme. La microstructure du sol traité change alors grâce aux ponts C-A-S-H et C-S-H qui remplissent les pores du sol. Ce phénomène a été remarqué dans une étude de traitement d'un limon de Saint-Quentin à 2% de chaux, qui a montré l'apparition d'une famille porale de taille 0,0003 à 0,3 μm (Cuisinier et al., 2011).

La stabilisation influence également les caractéristiques mécaniques du sol à long terme. La résistance à la compression simple d'un sol augmente en fonction du changement dans sa microstructure. En ce qui concerne la conductivité hydraulique du sol, elle augmente jusqu'au PFC suite à la floculation liée au traitement, puis elle se stabilise. Pour la résistance au cisaillement, plusieurs études ont permis de déterminer l'influence de la quantité de chaux ajoutée et du temps de cure sur les valeurs de l'angle de frottement interne du sol (ϕ') et sur la cohésion (c') (Nguyen, 2015). Pour les travaux de Brandl (1981), l'angle de frottement interne dépend du type de sol (argile ou limon), ainsi que de la quantité de la chaux utilisée. Elle se stabilise pour l'argile à une valeur de 35° et pour le limon à une valeur de 40° , tandis que la cohésion du sol augmente avec la quantité de chaux ajoutée et avec le temps de cure. La recherche de Balasubramaniam et Buensuceso Jr (1989) montrent les mêmes résultats que Brandl pour la cohésion ainsi que pour l'angle de frottement interne.

2.5.3 Résidus industriels de la chaux

Les résidus industriels de la chaux sont des sous-produits du processus de production. Ils se divisent en trois catégories : (1) les poussières de four à chaux, appelées aussi LKD (lime kiln dust), sous forme de particules très fines de couleur blanche ; (2) les poussières de pierre calcaire analogues aux poussières de four à chaux, elles sont caractérisées par des grains absolument très fins; puis finalement (3) les résidus de chaux éteinte, sous-produits de la production de la chaux éteinte (Graymont, 2019c). Les usines de fabrication de la chaux de Graymont sont installées à trois endroits au Québec : Bedford, Joliette et Marbleton. L'usine de Bedford, dans la région de l'Estrie, constitue un producteur essentiel de chaux vive et de calcaires pulvérisés. Les calcaires pulvérisés sont des produits obtenus en broyant et en tamisant la pierre à chaux et de la dolomite $MgCO_3$. L'usine de Joliette produit, quant à elle, de la chaux hydratée, et l'usine de Marbleton, dans la

région de l'Estrie, est la plus ancienne usine en Amérique du Nord. En effet, la pierre à chaux découle d'un dépôt de récifs marins et son exploitation a commencé dès 1824 (Graymont, 2019b)

2.6 État des lieux sur l'étude économique du projet

Cette partie a pour but de mettre en pratique les bases de dimensionnement et de calcul économique de la stabilisation des sols avec la chaux, et d'autre stabilisateur comme les fibres et le ciment portland. Pour cela, un état des lieux est réalisé afin d'avoir les bases de calcul économique appliqué dans le cas de la stabilisation des chaussées.

Le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports a publié un guide de gestion des projets routiers en 2016. Ce guide rassemble les 5 phases à mettre en œuvre dans chaque projet routier. La première est l'étude d'opportunité : cette phase permet l'étude des besoins ainsi que les solutions qui y répondent. La deuxième étape est la conception du projet, puis la préparation des plans et devis vient en troisième étape. Par la suite, la phase de la construction et l'évaluation du projet routier constituent la dernière étape.

Dans le cadre de la deuxième étape, une analyse avantages-coûts doit être effectuée. Il s'agit d'une analyse essentielle dans tout projet d'aménagement et nous nous en servons, dans le cadre de ce projet de recherche, pour étudier la rentabilité du traitement des sols en remplacement des méthodes de construction traditionnelles. Une analyse avantages-coûts compare les avantages et les coûts des projets pour chaque solution établie et détermine ainsi le scénario optimal. Le projet le plus rentable est celui dont le coût des retombées économiques est plus élevé que la somme des coûts économiques investis (Sambe et al., 2016). La méthode d'analyse coût-avantage sera détaillée dans la partie 2.6.1.

2.6.1 La méthode d'analyse coûts-avantages

La technique d'analyse coûts-avantages passe par différentes étapes: (1) définition du problème, de l'objectif de l'investissement et des contraintes; (2) définition du scénario de référence et des solutions; (3) établissement de l'horizon temporel; (4) détermination et quantification des coûts et les avantages; (5) actualisation des coûts et avantages; (6) comparaison des scénarios; (7) analyse de sensibilité (Sambe et al., 2016).

L'analyse avantages-coûts réalisée dans la deuxième étape présente le scénario de base à partir duquel les avantages et les coûts des solutions proposées seront évalués. Les solutions seront également des scénarios qui feront l'objet d'une sélection de la solution la plus rentable économiquement et socialement.

L'horizon temporel de l'analyse est le temps de la détermination des avantages et des coûts des scénarios proposés comme solution du problème de base. Selon le guide de gestion des projets routiers, cet horizon ne devrait pas être supérieur à 30 ans.

La quatrième étape permet de mettre en pratique les coûts et les avantages de chaque solution proposée tout au long de l'horizon temporel ; les coûts comprennent les coûts des travaux, d'entretien, d'exploitation et les retards possibles. En ce qui concerne les avantages, le guide propose les retombées économiques possibles pour un projet routier : réduction du temps de déplacement, réduction du nombre et de la gravité des accidents, réduction du coût d'utilisation des véhicules, réduction des impacts sur l'environnement.

La cinquième étape exige une mise à jour des coûts et des avantages, puisque l'analyse est faite sur une durée habituellement de 30 ans, et il faut donc amener le calcul à la base de la valeur du dollar actuel.

La sixième étape consiste à comparer les différents scénarios proposés comme solution au problème de base, puis à effectuer une analyse de sensibilité, qui implique différents paramètres qui semblent influencer les résultats obtenus, tels que les critères d'investissement. À la fin de cette analyse, soit le scénario choisi est confirmé, soit il conduit à une remise en question du choix du scénario.

2.6.1.1 Exemple d'analyse de la rentabilité économique d'une route forestière

Une étude économique a été menée par Légère (2001), en partenariat avec Abitibi Consolidated, pour comparer la technique habituelle de construction d'une route forestière avec la technique d'une route traitée par stabilisation chimique en chaux des sols en place. La route étudiée se situe en Nord-Est de l'Ontario à 200 km au Nord-Ouest de Rouyn-Noranda à Québec. Selon Abitibi-Consolidated, le coût de construction de la route forestière se base sur la distance entre le lieu d'emprunt des matériaux de construction et la route. Le site de construction de la route traitée

repose sur des dépôts de lacs glaciaire riches en argiles dans le Nord-Est de l'Ontario. Des travaux de déboisement dans le chantier ont été faites par une excavatrice afin de caractériser le dépôt sur une longueur de 750 m, une largeur de 9 m et une épaisseur de 1,2 m. Trois couches (A, B et C) ont été mises en évidence à la suite de cette caractérisation. La couche A, d'une hauteur de 8 cm, est constituée principalement de matières organiques. La couche B, de 20 cm, est principalement composée de sol argileux et la couche C, de plus de 72 cm, est aussi sous forme des sols argileux.

L'étude de Légère a permis de montrer que les caractéristiques géotechniques des argiles de ces deux horizons (B et C) se rapprochent mais ne sont pas identiques, même si elles sont toutes les deux composées d'illites. Pour cette raison, ces deux couches ont été distinguées.

Pour la conception de la chaussée, Légère a calculé la charge du trafic sur le chantier en se basant sur les données de Abitibi-Consolidated. Cette charge du trafic est de 1 672 300 ECAS₈₀ (l'équivalent de charge axiale simple d'essieu standard de 80 kN (18 000 lbs)) pendant une durée de vie de 15 ans. Pour la conception des routes forestières, la méthode utilisée pour la construction a été développée par Giummarra (2009) et elle se base sur le CBR et la charge du trafic sur la route. Dans son étude, la stabilisation avec un dosage de 3% de chaux concerne la partie superficielle des sols, de 250 mm (couches A, B et C) sur une largeur de 6 m. L'argile des couches B et C, traité à 3% de chaux, a donné un CBR moyen de 15. Selon l'abaque de Giummarra (Figure 2.8), l'épaisseur en gravier à utiliser pour la fondation est de 125 mm.

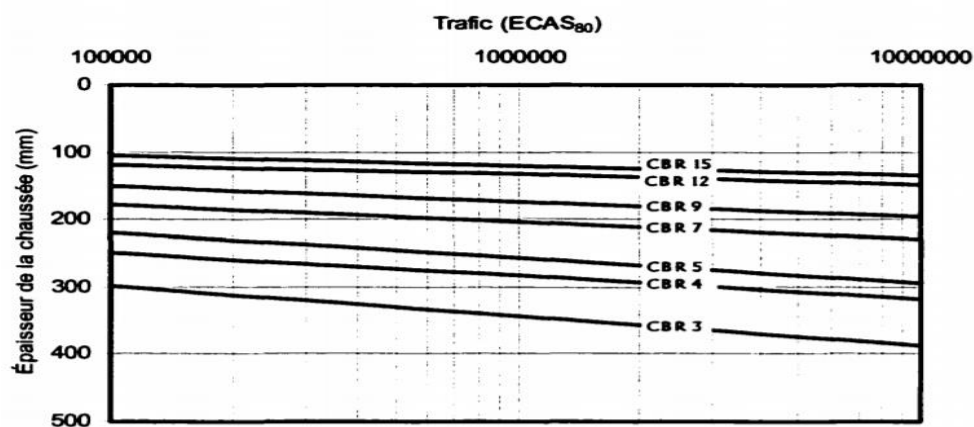


Figure 2.8: Abaque de Giummarra pour le calcul de l'épaisseur de la fondation de la chaussée. Tirée de (Giummarra, 2009).

Le coût total de la chaussée traitée calculé par Légère (2001) dépend des coûts d'excavation, du coût de la chaux, des travaux *in situ* incluant l'épandage de la chaux, le malaxage, le compactage et le coût des travailleurs sur le chantier. Le résultat de cette étude montre que le coût total de construction d'une chaussée non stabilisée est supérieur à une route stabilisée pour les distances de transport de gravier entre 12 et 30 km, tandis que pour les distances de transport comprises entre 2 et 10 km, le coût d'une route non traitée est moindre. Le coût de la route conventionnelle s'élève à 50 000 \$/km et il peut aller jusqu'à 100 000 \$/km dans quelques cas, tandis que le coût de la route stabilisée à la chaux dans cette étude est de 21 750 \$/km.

2.6.1.2 Exemple d'analyse de la rentabilité économique d'une route traitée en Inde

Sarkar et Dawson (2017) ont étudié différentes variantes d'une route traitée à base des cendres volantes à Delhi en Inde. Ces cendres proviennent de l'usine de Badarpur de la National Thermal Power Corporation, située dans la région de la capitale nationale-Delhi. Il s'agit de matériaux pouzzolaniques non cristallins et légèrement cimentés. Elles sont principalement constituées de silice SiO_2 (49,5%) et d'oxyde de l'aluminium Al_2O_3 (25,01%). Les données de conception pour cette analyse des coûts sont les suivantes: (1) la charge de trafic à la fin de l'année de construction est de 100 millions d'essieux standard, c'est-à-dire deux roues assemblées par un axe transversal pour une période de conception de 15 ans, et (2) la couche de fondation possède un CBR de 9% (Sarkar & Dawson, 2017).

La variable qui influence le plus l'analyse économique entre une route non stabilisée conventionnelle et l'utilisation de cendres volantes est le coût de préparation des différentes couches, qui dépend de l'épaisseur et des matériaux utilisés pour la sous fondation, des ouvriers sur le chantier, des machines utilisées (Niveleur, réservoir d'eau, compacteur vibrant, tracteur avec rotateur), ainsi que des prix des matériaux utilisés (cendres, fibre, chaux). La sous-fondation utilisée dans cette étude est de type limon de Delhi. L'étude compare le coût de construction de la sous fondation de la chaussée selon quatre cas. Le premier cas est celui de la route conventionnelle, auquel s'ajoutent trois variantes : (1) la couche de la sous fondation est construite à base de cendres volantes seules, (2) la stabilisation est effectuée avec des cendres additionnées à différents dosages de fibres de polypropylène, et (3) la stabilisation consiste en un traitement à la chaux, aussi avec différents dosages ; le but étant de trouver les dosages optimaux pour chaque cas étudié. Dans

cette étude, la route étudiée est représentée selon une structure de chaussée typique en Inde (The Indian Road Congress, 2001) avec une épaisseur totale de la chaussée de 635 mm en utilisant l'abaques de la norme IRC :37-2001 (Figure 2.9).

IRC:37-2001

PAVEMENT DESIGN CATALOGUE
PLATE 2 – RECOMMENDED DESIGNS FOR TRAFFIC RANGE 10-150 msa

CBR 9%				
Cumulative Traffic (msa)	Total Pavement Thickness (mm)	PAVEMENT COMPOSITION		
		Bituminous Surfacing		Granular Base & Sub-base (mm)
		BC (mm)	DBM (mm)	
10	540	40	50	Base = 250
20	570	40	80	
30	585	40	95	
50	605	40	115	
100	635	50	135	Sub-base = 200
150	655	50	155	

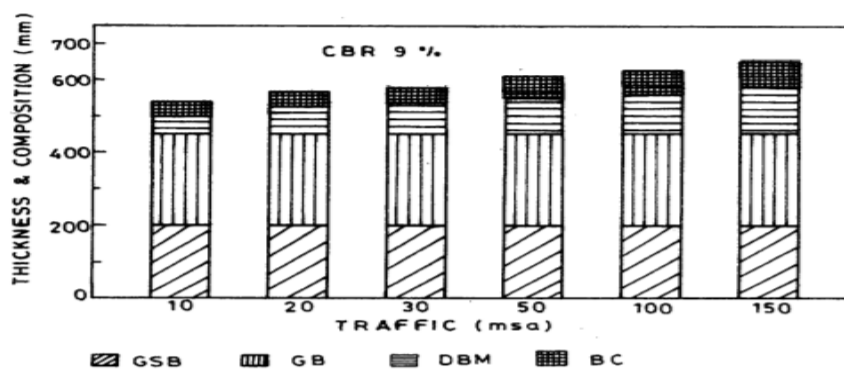


Figure 2.9: Abaque donnant l'épaisseur totale de la chaussée selon la norme IRC:37-2001.

Tirée de (The Indian Road Congress, 2001)

Sarkar et Dawson (2017) ont modifié l'épaisseur de la couche de sous-fondation traitée selon les trois variantes étudiées, à savoir : (1) les cendres d'étang de Badarpur seules, (2) les cendres d'étang stabilisées avec des fibres de polypropylène (0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) et (3) la chaux (2%, 3%, 5%). Les déformations de la sous-fondation sous une compression verticale et ou sous l'application d'une contrainte de traction ont montré que les dosages sont optimaux lorsque le traitement est réalisé avec 0.5% de fibres ajoutées aux cendres d'étang ou lorsqu'il est réalisé avec 2% de chaux.

Les résultats de cette étude ont donné les épaisseurs à retenir qui correspondent au minimum de déformation verticale. Pour la sous-fondation (sous-base) construite à partir de cendres d'étang seules, l'épaisseur est de 315 mm. Dans le cas où elle est stabilisée avec 0.5% de fibres, l'épaisseur

est 145 mm, alors que dans le cas de la stabilisation avec 2% de la chaux, l'épaisseur est 222 mm. Pour les autres couches de chaussées, les épaisseurs utilisées sont définies par la norme IRC :37,2001 : Bituminous Concrete (BC) de 50 mm; Dense Bituminous Macadam (DBM) de 135 mm; Water Bound Macadam (WBM) de 250 mm et le sous-sol (500 mm). La Figure 2.10 montre, quant à elle, la structure de la chaussée conventionnelle aux fins de comparaison.

Les résultats de l'étude économique présentent l'avantage de la construction d'une sous-fondation avec la technique de stabilisation des cendres d'étang dans le cas d'utilisation de 2% de la chaux, et dans le cas de l'utilisation de 0.5% de fibres de polypropylène. Le coût total est réduit de 3,82 % pour la première technique par rapport au coût de la chaussée conventionnelle, et la réduction est de 8,37 % dans le cas d'application de la fibre de polypropylène en comparaison avec la route conventionnelle.

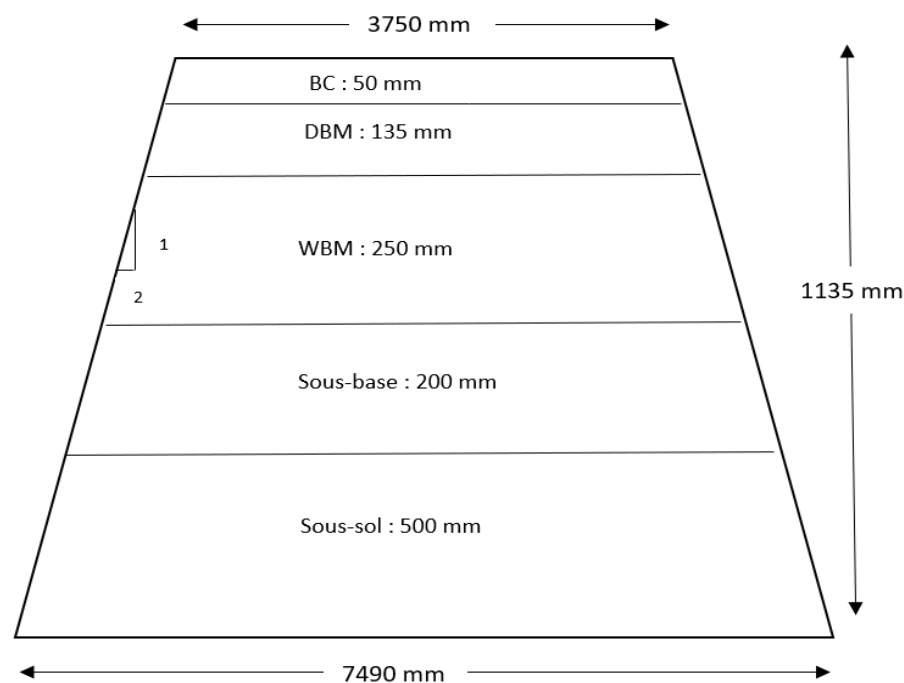


Figure 2.10: Coupe typique de la route en Inde. Adaptée de (Graymont, 2019b; Sarkar & Dawson, 2017).

De ce qui précède, on comprend que la stabilisation des sols avec la chaux donne de bons résultats dans le domaine routier, autant techniquement qu'économiquement. Le sol traité peut ainsi être utilisé comme matériaux de fondation ou de sous-fondation pour les routes non revêtues comme

dans le cas des routes forestières et des routes minières du Québec. Toutefois, le traitement des sols en place n'est pas uniquement possible pour les travaux routiers et les parties suivantes servent d'état des lieux afin de trouver des débouchés alternatifs aux sols traités.

2.7 Réutilisation des sols contaminés au Québec

Au Québec, l'enfouissement des sols contaminés était la solution la plus directe depuis plusieurs années afin de se débarrasser des sols inutilisables, or cette solution n'est plus valide dans le contexte actuel compte-tenu de l'augmentation des sites contaminés et de la saturation des sites d'enfouissement. Une étude faite par Chalifoux (2013) porte sur la détermination des techniques de valorisation des sols peu contaminés de type A-B au Québec en se référant aux avis des experts dans le domaine et montre que 74% des experts souhaitent une solution de valorisation des sols peu contaminés. Les sols de type A-B sont des sols faiblement contaminés et « les concentrations des contaminants sont supérieures aux teneurs de fond naturelles, mais inférieures ou égales aux critères applicables à un terrain résidentiel » (Dufresne et al., 2019). Selon la même étude, les techniques de valorisation envisagées sont : (1) le recouvrement journalier dans un Lieu d'Enfouissement Sanitaire (LES), (2) la réutilisation des sols traités dans les projets routiers, et (3) la réutilisation de ces sols comme matériaux dans les projets de construction. Les sols argileux faiblement contaminés pourraient donc être traités à l'aide de la technique objet du présent mémoire de manière à privilégier les options de valorisation (2) et (3), en réduisant l'option d'enfouissement (1). Cette approche permettrait également de valoriser les résidus de chaux et donc d'amplifier la quantité de matériaux valorisés.

Cet objectif de valorisation est clairement inscrit dans les cibles du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC (2017)) qui, selon sa politique de développement durable, vise à valoriser 80% des sols contaminés d'ici la fin de 2021. En outre, le marché de la réhabilitation environnementale est en croissance au Québec. De 1988 à 2015, le MDDELCC a pu réhabiliter plus de 5 000 terrains au Québec, d'une superficie de 75 km², ce qui représente 16% de la superficie de l'Île de Montréal. La Figure 2.11 illustre l'augmentation des quantités de sols enfouis ou traités au Québec entre 1991 et 2015.

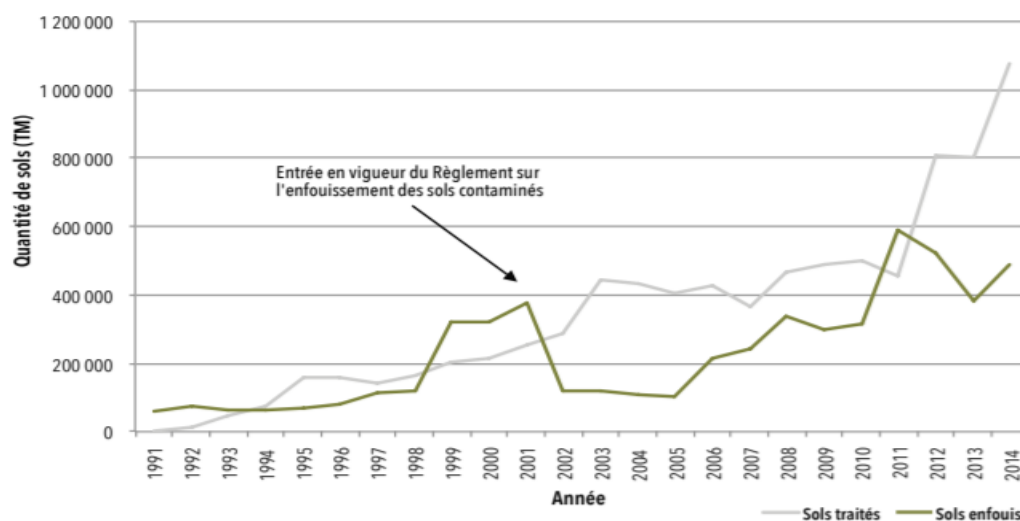


Figure 2.11: Évolution des quantités de sols contaminés traités et des sols contaminés enfouis. Tirée de (MDDELCC, 2017).

De ce fait, un plan d'action du gouvernement du Québec a été instauré en 2017 afin de redéfinir les stratégies à suivre pour faire face aux enjeux en matière de valorisation des sols contaminés. Ces enjeux concernent d'une part le côté environnemental puisque le sol est une ressource naturelle à protéger et qu'il est une réserve d'eau importante ; et d'autre part la revivification du territoire québécois afin de donner une vie aux terrains contaminés. Pour ce faire, un montant de 120 M\$ a été investi afin de l'investir dans les travaux de réhabilitation des sites contaminés, ce qui correspond à 75 terrains traités en place, 100 stations-service et 200 terrains résidentiels entre les années 2017 et 2021. Actuellement, selon le Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada (2021), 120 sites sont classés parmi les sites devant avoir une priorité d'intervention élevée, 588 sites une priorité d'intervention moyenne, 423 sites une priorité faible et 324 sites une priorité faible, tandis que 49 sites manquent de renseignements et que 949 sites ne sont pas encore classifiés.

Dans la même perspective, le programme ClimatSol-Plus vient renforcer le concept de réhabilitation des sols contaminés en permettant de disposer d'un financement de la part de Fonds d'électrification et de changements climatiques, dont l'enveloppe globale est de 30 M\$, pour les projets de décontamination pour la période entre 2017 et 2020 (MDDELCC, 2021).

De ce qui précède, la réutilisation et la valorisation des sols peu contaminés a un poids dans la réglementation actuelle au Québec. Outre le traitement conventionnel d'argile non contaminée, il

pourrait ainsi être envisagé de traiter des argiles faiblement contaminées à des fins de valorisation sur site ou dans des projets de réaménagement. Une telle revalorisation devrait toutefois être accompagnée des études d'impacts sur l'environnement requises.

CHAPITRE 3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre présente les essais de caractérisation de l'argile de St-Marc-sur-Richelieu, ainsi que les essais exigés par le Ministère des Transports de Québec. Ces derniers visent la validité de l'adéquation de l'argile traitée comme matériau de construction pour les chaussées dans le contexte du Québec. Le but de ce chapitre est ainsi de vérifier l'adéquation l'argile stabilisée par les résidus industriels de chaux, en prévision de la détermination des débouchées pour l'argile traitée.

3.1 Essais de caractérisation de l'argile de Saint-Marc-sur-Richelieu

3.1.1 Prélèvement d'échantillons

L'échantillon de sol utilisé dans la présente étude est l'argile de St-Marc-Sur-Richelieu. Cette argile a été prélevée dans la ville St-Marc-Sur-Richelieu, entre la Montée Deslauriers et la Rue Richelieu. La profondeur de prélèvement était de 3 mètres et les échantillons ont été prélevés sous forme de blocs de 30 cm de côté, paraffinés et conservés en chambre humide de manière à assurer la conservation de leur teneur en eau avant les essais. Comme le but des essais était d'obtenir des ordres de grandeur des performances et non pas de dimensionner un ouvrage, les essais réalisés dans ce chapitre n'ont pas été faits en duplicatas, à l'exception de l'essai de point de fixation de la chaux qui suit la norme ASTM D6276–19.

3.1.2 Limites d'Atterberg

La limite de liquidité w_L est obtenue par la méthode coupelle de Casagrande et la limite de plasticité w_P par la méthode du rouleau suivant la norme ASTM D4318. Les résultats des essais ont donné une limite de liquidité de 71,60% (Figure 3.1) et une limite de plasticité de 21,60%. L'indice de plasticité est donc de 50%.

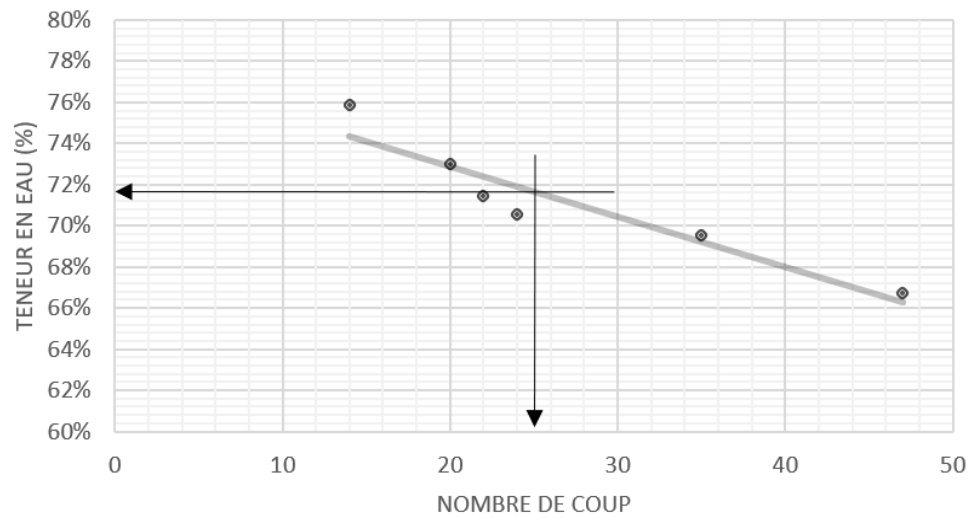


Figure 3.1: Courbe de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité.

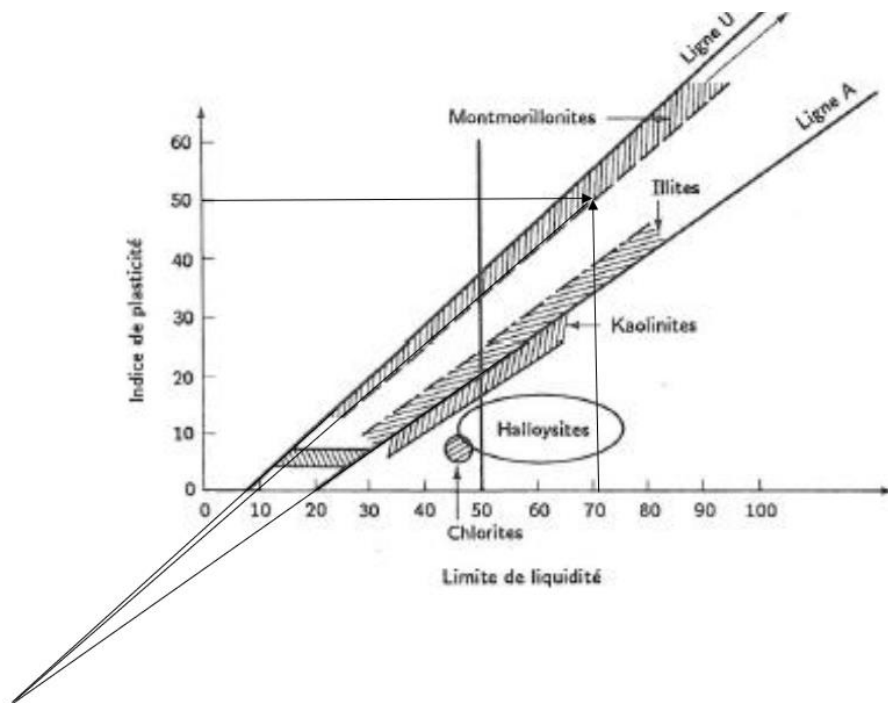


Figure 3.2: Abaque de Casagrande pour la détermination du type d'argile et de la limite de retrait.

Les abaques de Casagrande permettent de caractériser le type d'argile. L'intersection des points de la limite de liquidité et l'indice de plasticité montre que l'argile est inorganique et de haute plasticité et qu'elle se situe dans la même zone que les montmorillonites qui se caractérisent par leur affinité importante avec l'eau. À partir de la construction géométrique sur l'abaque de Casagrande présentée à la Figure 3.2, la limite de retrait w_s est de l'ordre de 10%.

3.1.3 Essai de sédimentométrie

L'essai de sédimentométrie est réalisé conformément à la norme ASTM D7928-17 sur le passant à 80 μ m (Sols fins). La courbe granulométrique est présentée à la Figure 3.3. Elle indique que le sol étudié contient 76% d'argile et 16,65% de silt.

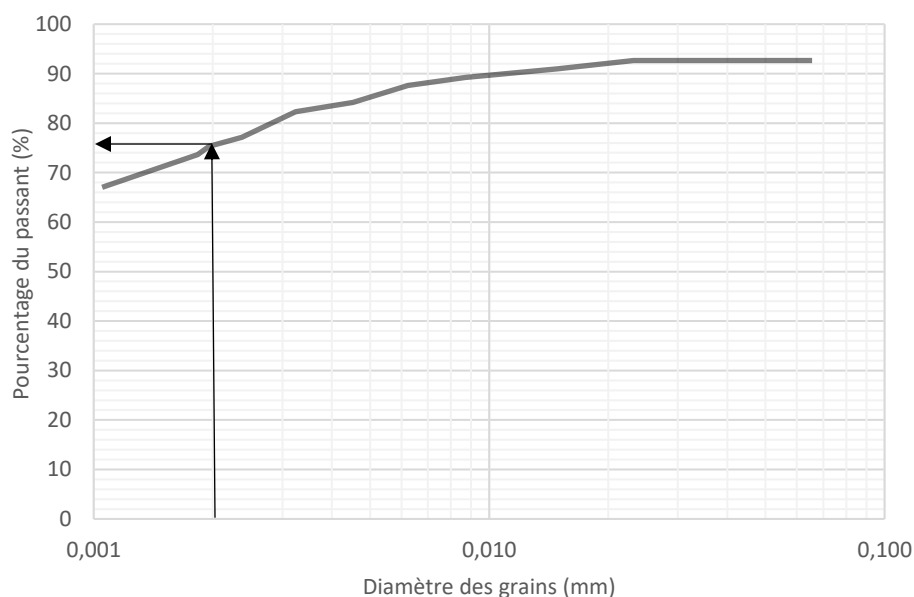


Figure 3.3: Courbe de sédimentométrie de l'argile avant traitement.

3.1.4 Essai de densité relative

La densité relative des grains solides a été déterminée par la méthode au pycnomètre selon la norme ASTM D854. La densité relative moyenne de l'argile est de 2,69, valeur dans la gamme attendue puisque selon Leroueil et al. (1983), les argiles de la mer de Champlain se caractérisent par une densité relative des grains solides situant entre 2,70 et 2,80. La valeur de la densité relative de

l'argile de St-Marc-sur-Richelieu fait donc partie de cette gamme de densité des argiles de la mer de Champlain.

3.1.5 Résistance au cisaillement du sol

La résistance au cisaillement du sol étudié a été déterminée selon deux méthodes : l'essai au cône Suédois et l'essai de compression simple.

3.1.5.1 Essai au cône Suédois

L'essai est conçu pour déterminer la résistance au cisaillement à court terme d'un sol argileux à l'état intact et à l'état remanié, dans le but de calculer la sensibilité de l'argile conformément à la norme BNQ 2501-110. La teneur en eau de l'échantillon intact est de 58,2%, la résistance au cisaillement trouvée est de 70,61 kPa, tandis que l'échantillon remanié a une résistance au cisaillement de 3,90 kPa à une teneur en eau de 56,90%. L'argile étudiée a donc une sensibilité (Résistance intacte / résistance remaniée) de 18,11. Sur la base de l'échelle des valeurs de sensibilité présentées dans le Tableau 3.1 utilisées au Canada et de l'échelle des valeurs de sensibilité utilisées aux États-Unis et en Suède, il s'agit d'une argile extra-sensible (argile liquide).

Tableau 3.1: Échelle des valeurs de sensibilité utilisées au Canada et É.U./Suède (Lafleur, 1991)

Échelle des valeurs de sensibilité utilisées au Canada		Échelle des valeurs de sensibilité utilisées aux États-Unis et en Suède.		
Sensibilité	S_t	État	États-Unis	Suède
Faible	$S_t < 2$	Peu sensible	2 – 4	< 10
Moyenne	$2 < S_t < 4$	Modérément sensible	4 – 8	10 – 30
Élevée	$4 < S_t < 8$	Très sensible	8 – 16	> 30
Très élevée	$8 < S_t < 16$	Extra-sensible	> 16	> 50
Argile liquide	$S_t > 16$	Ultra-sensible	-	> 100

3.1.5.2 Essai de compression simple

L'essai consiste à soumettre un échantillon d'argile cylindrique à une charge axiale qui est progressivement augmentée jusqu'à ce que l'échantillon se rompe à une vitesse d'environ 2 mm/min. La résistance au cisaillement non drainée C_u est égale à $\sigma_{rupt}/2$, où σ_{rupt} vaut la valeur maximale de la contrainte appliquée à l'échantillon d'argile conformément à la norme ASTM D2166-16.

La hauteur de l'échantillon testé est de 109,4 mm et son diamètre de 53,56 mm. Sa teneur en eau initiale est de 59,1%, ce qui donne un degré de saturation S_r de 95,05%.

La courbe de compression simple est présentée à la Figure 3.4 et donne une résistance à la compression simple de 127,27 kPa. La résistance au cisaillement est ainsi de 62,64 kPa et le plan de rupture trace un angle de 80° avec l'horizontale (Figure 3.5). La détermination de la valeur de la résistance au cisaillement de l'argile étudiée avant traitement, permettra par la suite d'évaluer l'influence des résidus de la chaux sur la résistance de l'argile St-Marc-sur-Richelieu.

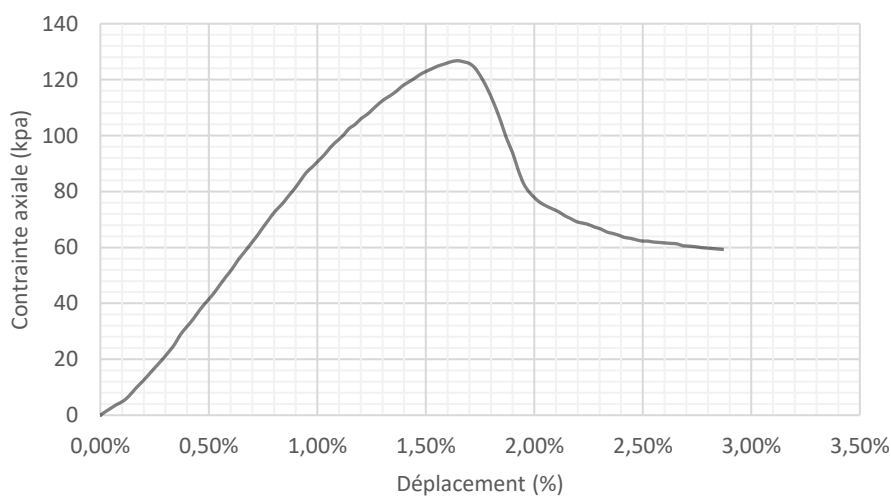


Figure 3.4: Courbe de l'essai de la compression simple.



Figure 3.5: Plan de rupture à la suite de l'essai de compression simple.

3.1.6 Essai Proctor Normal

L'essai est réalisé selon la norme ASTM D698. L'énergie de compactage appliquée à l'échantillon est de 600 kN.m/m^3 . La hauteur de l'échantillon est 116,55 mm et le diamètre moyen est de 101,38 mm. La courbe Proctor est présentée à la Figure 3.6. La teneur en eau optimale est ainsi de 31,25% et la masse volumique sèche est $1,42 \text{ Mg/m}^3$. L'échantillon est saturé à 95,60%.

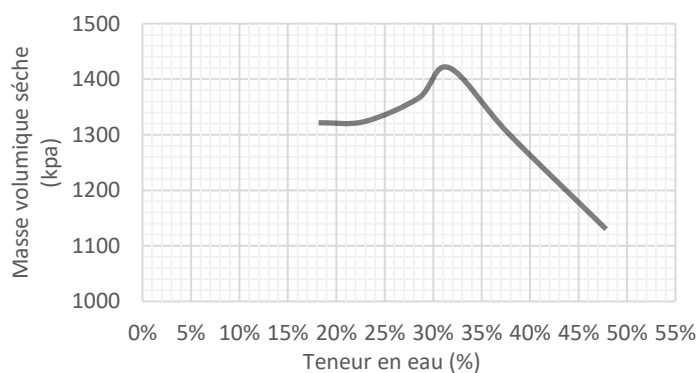


Figure 3.6: Courbe Proctor de l'argile St-Marc-sur-Richelieu avant traitement.

3.1.7 Essai à l'œdomètre

Un essai de consolidation œdométrique par chargements successifs a été effectué sur des échantillons intacts de sol, conformément à la norme D2435/D2435M-11. Les résultats sont représentés par la courbe de consolidation (Figure 3.7), qui montre que l'argile non traitée à une contrainte de préconsolidation de 143,48 kPa. Sur la base de la contrainte de préconsolidation, la valeur de OCR (over consolidation ratio) est de : $OCR = \sigma_p' / \sigma_{v0}' = 143,48 / ((24.653 - 9.81) * 3) = 3.22$. La valeur de OCR est supérieure à 1, cela veut dire que l'argile de St-Marc-sur-Richelieu est une argile sur-consolidée.

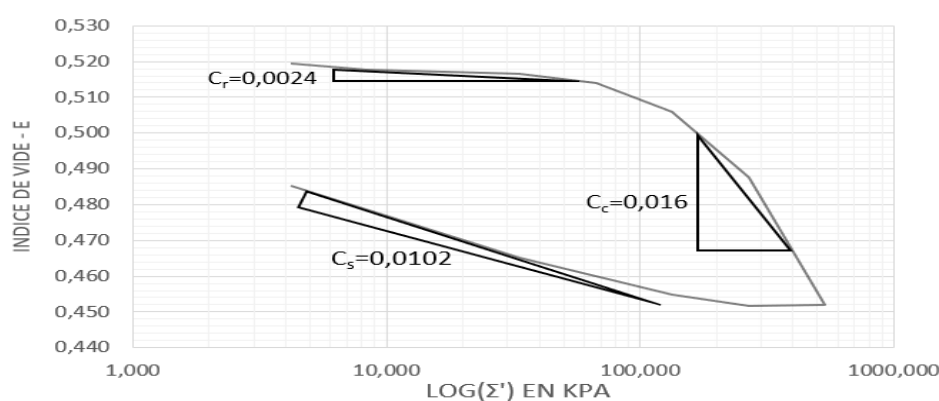


Figure 3.7: L'indice de vide vertical en fonction de la contrainte effective appliquée dans l'essai CS.

3.2 Choix du résidu industriel de la chaux pour le traitement

Avant de déterminer le point de fixation de la chaux, il faut choisir le type de résidu à utiliser parmi deux types reçus du distributeur Produits BCC, à savoir un amendement calcique poussière de four à chaux de référence TDS-257-3524 et un autre de référence TDS-257-3534 de la compagnie Graymont. Ce choix du résidu est basé sur la norme NF EN 459 (IDRRIM, 2015). Le Tableau 3.2 et 3.3 montrent la comparaison entre les caractéristiques chimiques de la chaux calcique CL (calcium lime, tel que présentée dans la section 2.5.2.1 de la revue de littérature), deux chaux conventionnelles de la compagnie Graymont (une **chaux calcique vive** de référence TDS-260-1152 et une **chaux calcique éteinte** de référence TDS-257-2080) et les deux résidus à l'étude. Le but est de choisir, parmi les deux types de résidus de la chaux, celui qui s'approche le plus de la chaux calcique CL et des chaux conventionnelles de Graymont.

Pour la présente étude, le type de résidus industriel utilisé est l'amendement calcique poussière de four à chaux de type TDS-257-3524, car ses caractéristiques chimiques s'approchent le plus des exigences demandées. Ces résidus de chaux sont issus du procédé de chauffage du calcaire et récupérés dans les fours à chaux. Habituellement moins réactive que la chaux conventionnelle, la poussière de four à chaux est utilisée comme amendement dans les sols agricoles et n'est pas destinée aux ouvrages géotechniques. Ces poussières sont aussi stockées en pile sur le site de production durant plusieurs mois avant d'être envoyées sur le marché. La réalisation d'essais de traitement avec ces poussières permettra également d'évaluer le niveau d'altération de leurs performances par le stockage extérieur.

Tableau 3.2: Tableau de comparaison entre les quatre types de chaux reçues de la part de la compagnie Graymont

Type de la chaux Caractéristiques chimiques	Chaux calcique (CL)			Chaux calcique vive (TDS-260-1152)	Chaux Calcique éteinte (TDS-257-2080)	Amendement calcique poussière de four à chaux (TDS-257-3534)	Amendement calcique poussière de four à chaux (TDS-257-3524)
	CL 90	CL 80	CL 70				
CaO+ MgO	>=90	>=80	>=70	96,30%	% de Ca(OH) ₂ + MgO (96,2%)	% de Mg+ Ca (>=25,25%)	% de CaCO ₃ +MgO (33,9%)
MgO	<=5%	<=5%	<=5%	1%	1%	% de Mg (>=0,25%)	0,80%
CO ₂	<=4	<=7	<=12	***	***	***	***
SO ₃	<=2	<=2	<=2	S (0,04%)	% de S (0,08%)	***	% de S (2,7%)
Chaux libre	>=80%	>=65	>=55	92,30%	Ca(OH) ₂ (93,8%)	31,10%	48,50%

Tableau 3.3: Tableau de comparaison entre les quatre types de chaux reçues de la part de la compagnie Graymont (Suite)

Type de la chaux Caractéristiques chimiques	Chaux calcique (CL)			Chaux calcique vive (TDS-260-1152)	Chaux Calcique éteinte (TDS-257-2080)	Amendement calcique poussière de four à chaux (TDS-257-3534)	Amendement calcique poussière de four à chaux (TDS-257-3524)
	CL 90	CL 80	CL 70				
T ₆₀	<25 min	<25 min	<25 min	***	***	***	***
Granulométrie	0/2 mm	0/2 mm	0/2 mm	0/2 mm	0/2 mm	0/2 mm	0/2 mm

3.3 Point de fixation de la chaux (PFC)

Avant de réaliser les essais de performance avec les résidus industriels, il faut déterminer le point de fixation de la chaux (PFC) qui donne le pourcentage de matière qui doit être mélangé au sol pour son traitement. Il correspond à la quantité de chaux requise pour atteindre un pH de 12,4 dans le sol.

L'essai de détermination du PFC suit la norme ASTM D6276–19 (ASTM International, 2019). Il consiste à préparer cinq échantillons de 25 g d'argile sèche, passant 425µm, dans quatre boîtes. Des quatre boîtes contiennent respectivement 2, 3, 4, 5 et 6 % de résidus de chaux et une sixième boîte contient uniquement 8% (2g) de ces résidus (TDS-257-3524), sans ajout de sol (Figure 3.8).



Figure 3.8: Six boîtes secouées prêtes pour la mesure de pH.

Par la suite, 100 ml d'eau sont ajoutés aux six boîtes, puis chacune des boîtes est secouée 10 secondes toutes les 10 minutes pendant 1h. Enfin, le pH des six boîtes est mesuré avec un pH-mètre. Le mode opératoire de l'essai PFC est illustré sur la Figure 3.9.



Figure 3.9: Mode opératoire de l'essai PFC.

Pour s'assurer de la bonne répétabilité des essais, ces derniers ont été réalisés en triplicata avec un pH-mètre modèle E.MT.5-pH.413SG de marque Mettler Toledo. Les 3 essais ont donné des valeurs respectives 3,7 %, 6,04 % et 3,02 %. Compte-tenu de l'écart du deuxième essai avec les autres, une nouvelle itération a été effectuée avec un pH-mètre modèle PH100 de marque Extech Instruments, afin de s'assurer de la qualité des résultats. La nouvelle valeur a été de 3,1 %, ce qui est très proche de la première et de la troisième itération de l'essai, tel qu'illustré sur la Figure 3.10

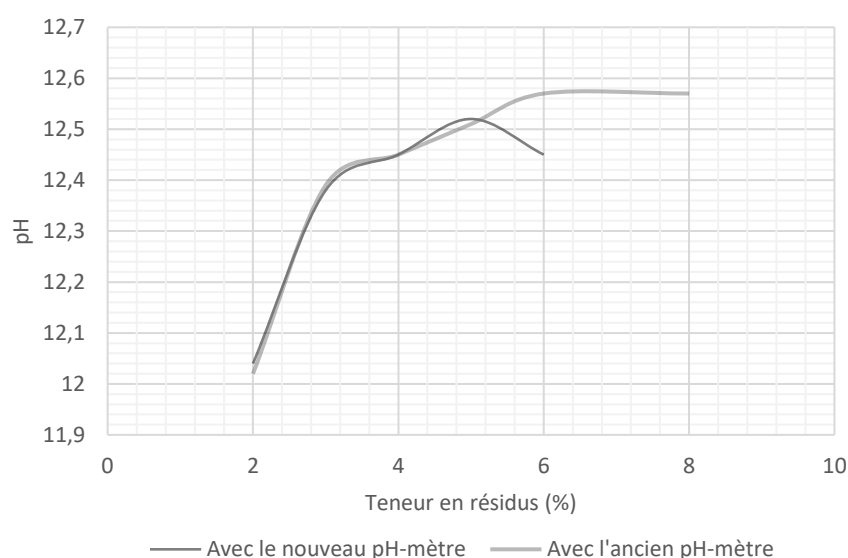


Figure 3.10: Courbes PFC avec l'ancien pH-mètre et le pH-mètre numérique.

Le point de fixation de la chaux permet de choisir trois valeurs de dosages. Ces trois dosages correspondent à (1) une valeur de PFC inférieure à celle trouvée dans l'essai, (2) une valeur supérieure à la valeur de PFC, et (3) une valeur de PFC supérieure à la deuxième valeur. Les buts de ces dosages sont respectivement de tester (1) l'amélioration de l'argile, (2) la stabilisation et l'insensibilité à l'eau, et (3) la stabilisation de l'argile et la résistance au gel (Nguyen, 2015). Dans la suite des essais, le dosage retenu sera de 4%, ce qui est légèrement supérieur à la valeur obtenue par l'essai et permettra ainsi d'être conservateur dans les calculs économiques.

3.4 Essais exigés par le Ministère des Transports

Cette partie présente les essais géotechniques listés par le Ministère de Transport de Québec (MTQ), c'est-à-dire les essais de performance normalement réalisés en vue de qualifier un sol pour

une utilisation comme couche de fondation et ou de sous-fondation. Pour ces essais, nous utiliserons donc l'amendement calcique de poussière de four à chaux (TDS-257-3524) à un pourcentage de 4%.

3.4.1 Limites d'Atterberg du sol traité

Les limites d'Atterberg de l'argile de St-Marc-sur-Richelieu ont été réévaluées selon la norme ASTM D4318 après traitement et les résultats ont donné une limite de liquidité de 60,6% et une limite de plasticité de 39,81%. L'utilisation de l'abaque de Casagrande (Figure 3.11) permet ainsi d'identifier le sol traité et de le caractériser comme un sable fin silteux, ce qui traduit bien la formation de granulats à partir des feuillets d'agile. L'indice de plasticité est de 20,79%, tandis que les exigences du Ministère exigent un indice de plasticité nul (Tableau 2.2). L'argile de St-Marc-sur-Richelieu ne satisfait donc pas le premier critère du ministère pour la valeur de l'indice de plasticité.

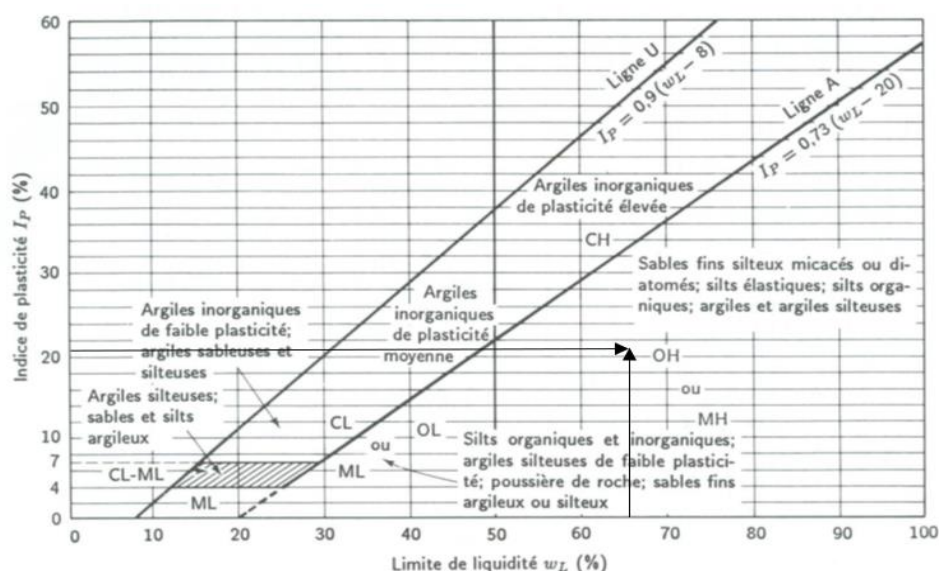


Figure 3.11: Abaque de plasticité de Casagrande pour différents types de sols (D'après Casagrande, 1948 et Howard, 1977). Tiré de (CIV3415- Mécanique des sols: propriétés des sols et classification, 2020).

3.4.2 Essai de granulométrie du sol traité

Un essai de sédimentométrie a été réalisé sur l'argile St-Marc-sur-Richelieu stabilisée avec 4% de résidus industriels selon la norme (ASTM International, 2021). La courbe granulométrique obtenue est illustrée sur la Figure 3.12. Le pourcentage des particules fines de l'argile traité est de 6%.

Le ministère exige une teneur en particules fine inférieur à 7 % pour les matériaux de fondation et aussi de la sous-fondation. L'argile traitée dans cette étude respecte cette exigence.

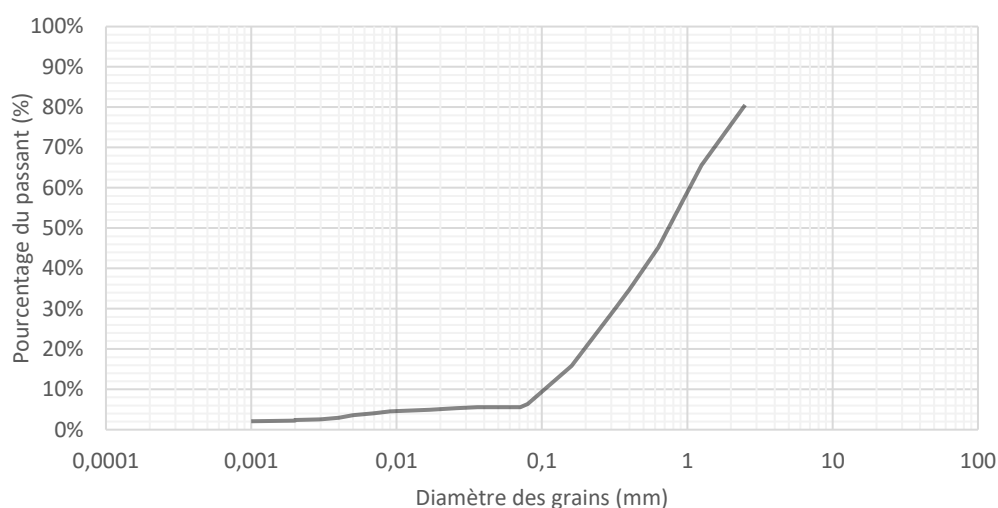


Figure 3.12: Courbe granulométrique du sol traité à 4%.

3.4.3 Essai de densité relative des particules fines et des particules grossiers

Un essai de densité relative a été réalisé selon la norme ASTM D854 sur la partie fine et la partie grossière de l'argile traitée. La partie grossière et la partie fine ont été séparé par le tamis numéro 80. La détermination des valeurs de la densité relative pour les deux parties est le même selon la norme ASTM D854. Les résultats ont donné une valeur de 2,65 pour la partie fine et de 2,61 pour la partie grossière. Le protocole expérimental de l'essai de densité relative prévoit une défloculation complète des particules, cette défloculation n'est pas possible dans le cas des sols traités, car ces derniers peuvent contenir de l'air dans les conglo­mé­rats, c'est ce qui justifie la différence entre la valeur de la densité relative entre la partie fine et celle grossière. Le ministère des transports exige

une valeur de supérieure à 2% pour la densité des particules fines et grossières. Ce critère a donc été atteint pour l'argile traitée à 4% avec des résidus de chaux.

3.4.4 Valeur de pH du sol traité

La valeur du pH du sol traité est déterminée suivant la norme ASTM D4972-19. Pour ce faire, on place 20 g du sol traité à 4% des résidus dans une éprouvette et on ajoute la même quantité d'eau (20 ml) pour constituer une suspension de 1 pour 1. On place dans une autre éprouvette 20 g du sol traité et on ajoute la même quantité de solution de chlorure de calcium (20 ml) pour former une autre suspension de 1 pour 1. On mélange ensuite les deux boues et on les laisse reposer pendant 1 h à température ambiante 25°C avant de mesurer le pH. Si le sol contient une quantité de particules fines non négligeable, il est possible qu'il n'y ait plus de phase aqueuse après une heure et la norme prévoit l'utilisation de suspensions de 1 pour 2 (40 ml), c'est ce qui a été réalisé pour le sol traité compte-tenu de la quantité importante de fines.

Les résultats de cet essai donnent une valeur de pH de 9,32 à une température de 25°C. Le ministère des transports exigeant une valeur supérieure à 7, le critère sur le pH du matériau est respecté.

3.4.5 Essai d'absorption d'eau avec immersion

Selon la norme ASTM C1794-19, le but de l'essai est de calculer le coefficient d'absorption d'eau du sol par immersion. La procédure de l'essai consiste à mesurer le changement du poids de l'échantillon lorsqu'il est en contact direct avec l'eau. L'échantillon est sous forme d'un cylindre de diamètre 101,33 mm et de hauteur 51,06 mm.

Dans notre cas, l'échantillon a été traité avec 4% d'amendement calcique et soumis à une période de cure de 10 jours, puis mis à l'étuve durant 2 jours pour séchage. Pour éviter tout effondrement de l'échantillon lors de la mise en contact avec l'eau, la norme ASTM C1794-19 a été adaptée en ajoutant un papier filtre et un grillage à la base de l'échantillon. La partie de l'échantillon qui n'était pas en contact avec l'eau ainsi que la surface supérieure ont été paraffinée de manière que la partie externe de l'échantillon ne s'effrite pas lors de la réalisation de l'essai.

Pour la réalisation de l'essai, l'ensemble de l'échantillon et du grillage est placé sur des rehausseurs de manière à permettre le passage de l'eau à la base de l'échantillon (Figure 3.13). Le niveau d'eau

ne devant pas excéder la hauteur des rehausseurs (Figure 3.14), une petite pompe hydraulique permet de contrôler le niveau d'eau à la base de l'échantillon (Figure 3.15). L'essai se termine lorsque l'eau absorbée apparaît à la surface haute de l'échantillon.



Figure 3.13: Échantillon d'argile traitée mis sur un grillage et un papier filtre.

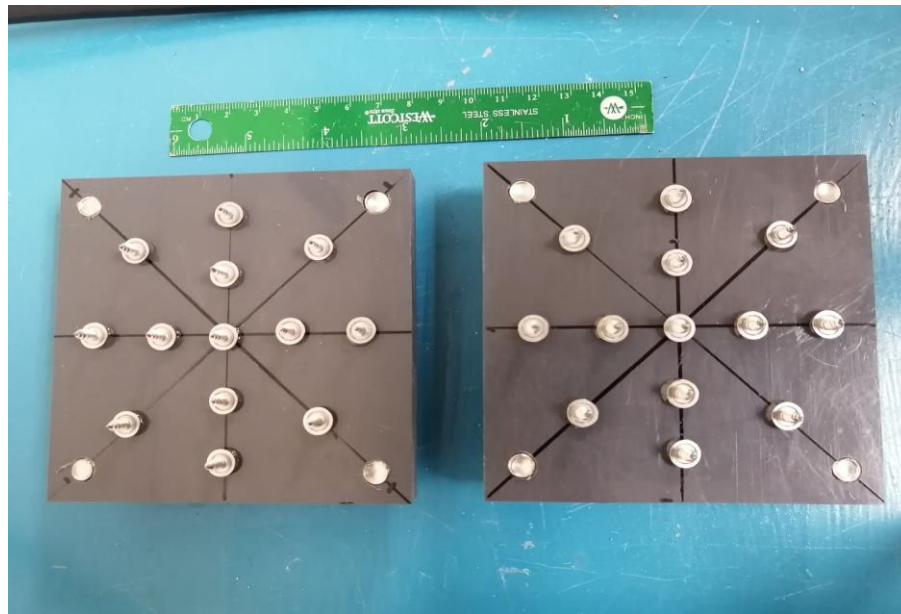


Figure 3.14: Rehausseurs utilisés comme support de l'échantillon.



Figure 3.15: Mode opératoire de l'essai d'absorption d'eau avec immersion.

Les résultats de l'essai ont permis de tracer la courbe du changement du poids de l'échantillon en fonction de la racine carrée du temps (Figure 3.16).

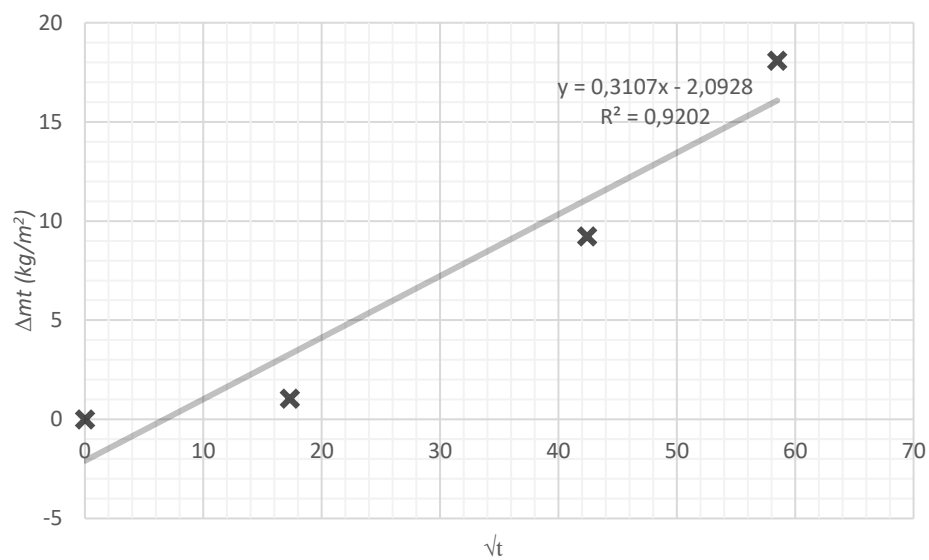


Figure 3.16: Régression linéaire de l'essai d'absorption d'eau.

Le coefficient d'absorption est calculé par la formule suivante selon la norme ASTM C1794-19:

$$A_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}} 3^{-1}$$

Avec :

A_w : Le coefficient d'absorption (%)

$\Delta m'_{tf}$: valeur de la différence en masse sur la courbe de régression au temps t_f (kg/m²).

$\Delta m'_0$: valeur de la différence en masse sur la courbe de régression au temps t_0 (kg/m²).

$\sqrt{t_f}$: Temps final de l'essai (s).

La norme C1794-19 demande une durée de l'essai de 24h, mais l'essai doit être arrêté si l'eau est aperçue dans la surface de l'échantillon. Le présent essai a donc duré uniquement 57 min. Selon la formule précédente, la valeur du coefficient d'absorption est ainsi de 30,07%. Le ministère des transports exigeant une valeur inférieure à 10 %, ce critère n'a pas été atteint pour l'argile traitée.

3.4.6 Essai Proctor Normal sur le sol traité

L'essai Proctor du sol traité a été réalisé après une période de cure de 2h. Les résultats de l'essai donnent une teneur en eau optimale $w_{opt}=28.5\%$ et une masse volumique sèche $\rho_{d-opt}=1\,306\text{ kg/m}^3$. Le ministère exige toutefois une valeur supérieure à $1\,800\text{ kg/m}^3$ pour la densité maximum sèche, et une teneur en eau optimale entre 8 et 15 %. Le critère n'est donc respecté ni pour la densité sèche, ni pour la teneur en eau puisque la valeur trouvée de 28,5 % n'est pas comprise dans l'intervalle exigé.

La Figure 3.17 montre les deux courbes Proctor : celle de l'argile non traitée et celle de l'argile traitée avec 4 % de résidus. La courbe de l'argile traitée s'applatit et la masse volumique sèche diminue, de même que la teneur en eau optimale. Cette observation est conforme aux observations habituelles pour la masse volumique, mais moins pour la teneur en eau. En effet, le guide technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (LCPC & SETRA, 2000) indique que la courbe de Proctor s'applatit et que la teneur en eau optimale augmente avec le traitement. Cela montre que la période retenue n'était pas suffisante pour activer toutes les réactions

d'hydratation et les réactions pouzzolaniques. Toutefois, comme la teneur en eau à l'optimum dépassait déjà le critère, son augmentation n'aurait pas permis la qualification du matériau.

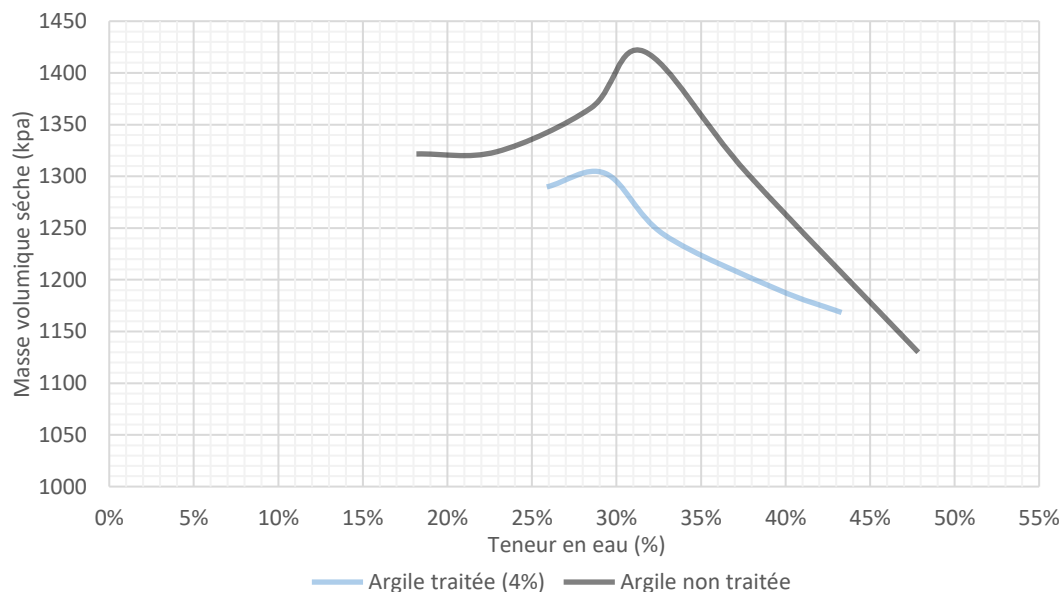


Figure 3.17: Courbe Proctor du sol traité (4%).

3.4.7 Essai de compression simple sur le sol traité

L'essai de compression simple a été réalisé conformément à la norme ASTM D2166-16 pour caractériser l'évolution de la résistance de l'argile traitée, ainsi que l'influence des résidus de la chaux sur les caractéristiques de l'argile naturelle. L'échantillon a été préparé à l'optimum Proctor et conservé dans des sacs hermétiques pendant 2h avant de faire l'essai de compression simple. Cette durée de 2h est la même durée que le temps de cure adopté pour l'essai Proctor. La résistance à la compression simple de l'argile traitée est de 760 kPa (Figure 3.18), ce qui correspond à une

résistance au cisaillement est de 380 kPa. Le plan de rupture présente un angle de 65° avec l'horizontale.

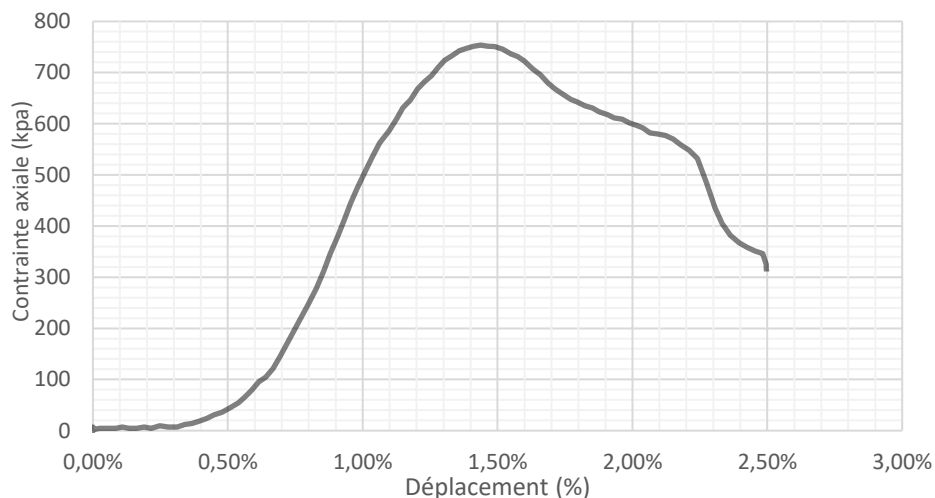


Figure 3.18: Courbe de la compression simple de l'argile traitée (4%).

Cet essai ne figure pas parmi les exigences du ministère, le but est de déterminer l'influence du traitement sur la résistance de l'argile après traitement. La résistance de l'argile traitée est passée de 127,27 kPa à 760 kPa, tandis que l'angle du plan de rupture a diminué de 80° à 65° .

3.4.8 Essai de cisaillement direct sur le sol traité

L'essai de cisaillement direct a été réalisé afin de déterminer l'angle de frottement et de la cohésion du sol après traitement selon la norme ASTM D3080. Les exigences du ministère obligent de faire un essai triaxial, mais à cause de contraintes de disponibilité du dispositif de l'essai triaxial à charge cyclique, l'essai de cisaillement direct a été réalisé. Ce dernier nous a toutefois permis d'avoir la cohésion et aussi l'angle de frottement interne de l'argile traitée. Les courbes de résultat des essais à des charges de 50, 100 et 150 kPa sont disponibles à la Figure 3.19.

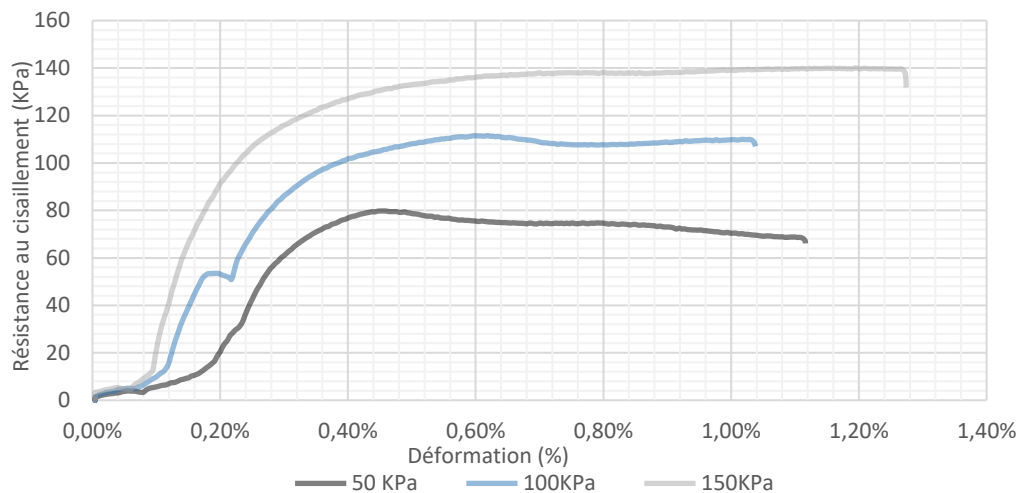


Figure 3.19: Courbe de cisaillement direct sur 3 paliers de chargement.

Les cercles de Mohr-Coulomb pour chacun des essais sont illustrés sur la Figure 3.20 pour déterminer l'angle de frottement interne et la cohésion du sol traité. L'angle de frottement interne du sol traité est ainsi $\phi' = 22,5^\circ$ et la cohésion est de 36 kPa. Le ministère des transports exige une valeur de cohésion supérieure à 35 kPa, cette valeur est respectée. Cependant, l'angle de frottement interne doit être supérieur à 35° , ce qui n'est pas le cas avec un angle de $22,5^\circ$ de l'argile traitée.

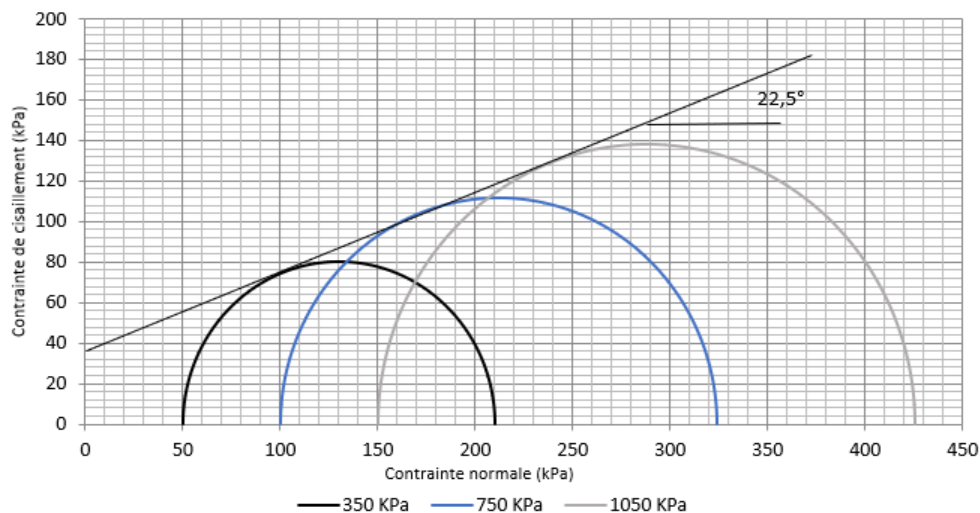


Figure 3.20: Cercles de Mohr-Coulomb de l'argile traitée.

3.5 Bilan des résultats des essais réalisés sur l'argile non traitée et traitée

Les tableaux 3.4 et 3.5 montrent les résultats des tests appliqués avant et après traitement de l'argile de St-Marc-sur-Richelieu avec des poussières de four à chaux à 4%. Les valeurs de l'argile traitée ne respectant pas les critères du Ministère sont grisées.

Tableau 3.4: Résultats des essais sur le sol avant et après traitement à 4% de TDS-257-3524.

Essai réalisé	Argile non traitée	Argile traitée à 4% des résidus	Seuils fixés par le MTQ
Essai de sédimentométrie	92% d'argile – 0,65% de silt	6% de fines	< 7%
Essai de densité relative	2,69	D _R partie fine (<80µm)=2,65 D _R partie grossière (>80µm) =2,61	> 2,0
Limites d'Atterberg	W _L =71,60% W _P =21,60% W _S =10% I _P =50%	W _L =60,60% W _P =39,81% I _P =20,79%	I _P =0
Essai d'absorption d'eau	-----	A _w = 30,07 %	<10
Essai Proctor Normal	W _{opt} = 31,25% , ρ _d = 1,420 Mg/m ³	W _{opt} = 28,5% , ρ _{dopt} = 1,306 Mg/m ³	8%<W _{opt} < 15% , ρ _{dopt} > 1,8Mg/m ³

Tableau 3.5: Résultats des essais sur le sol avant et après traitement à 4% de TDS-257-3524 (Suite).

Essai réalisé	Argile non traitée	Argile traitée à 4% des résidus	Seuils fixés par le MTQ
Essai de compression simple	$q_u = 127,27 \text{ kPa}$ $S_u = 62,64 \text{ KPa}$; $\Phi' = 80^\circ$	$q_u = 760 \text{ kPa}$ $S_u = 380 \text{ KPa}$; $\Phi = 65^\circ$	-----
Essai de cône Suédois	$Cu_{\text{intact}} = 70,62 \text{ KPa}$ $Cu_{\text{remanié}} = 3,9 \text{ KPa}$	-----	-----
Essai œdométrique	$\sigma'_p = 143,48 \text{ kPa}$; $C_C = 0,016$ $C_R = 0,0024$ $C_S = 0,0102$	-----	-----
Essai pH du sol	-----	pH= 9,32 à T= 25°C	>7
Essai de cisaillement direct	-----	$c = 36 \text{ KPa}$ $\phi = 22,5^\circ$	$c > 35 \text{ kPa}$, $\phi > 35^\circ$

Le sol traité n'arrive pas aux performances exigées par le MTQ. Le traitement a transformé l'argile en un sable fin silteux, contenant 34% des particules fines, mais sa plasticité est de 20,79 %, alors que le MTQ exige un indice de plasticité nul. De même, les résultats de l'essai Proctor normal ont donné des valeurs inférieures à ce qui est exigé par le MTQ en termes de densité sèche et en dehors de la gamme acceptable en ce qui a trait à la teneur en eau. L'essai de cisaillement direct a donné une cohésion de 36 kPa, ce qui est conforme avec la MTQ. L'angle de friction interne de 22,5° est toutefois inférieur à la valeur exigée, ceci montre que l'effort que le sol peut y résister est faible.

L'utilisation des courbes granulométriques de MG 20 généralement utilisé dans la couche de fondation pour les chaussées et celles de MG 112 pour la sous-fondation, permet de conclure qu'une portion du sol traité peut être utilisée et valorisée. La figure 3.22 montre que 0.08 mm jusqu'à 2.5 mm peut remplacer la même portion dans le matériau de sous-fondation de base, cependant la courbe granulométrique de sol traité est hors le fuseau granulométrique de MG20 (Figure 3.21). Toutefois, différents cas de courbe de granulométrie du sol traité peuvent être obtenus selon les concentrations en chaux et les courbes montrées ci-dessous ne sont qu'un exemple pour le traitement à 4%.

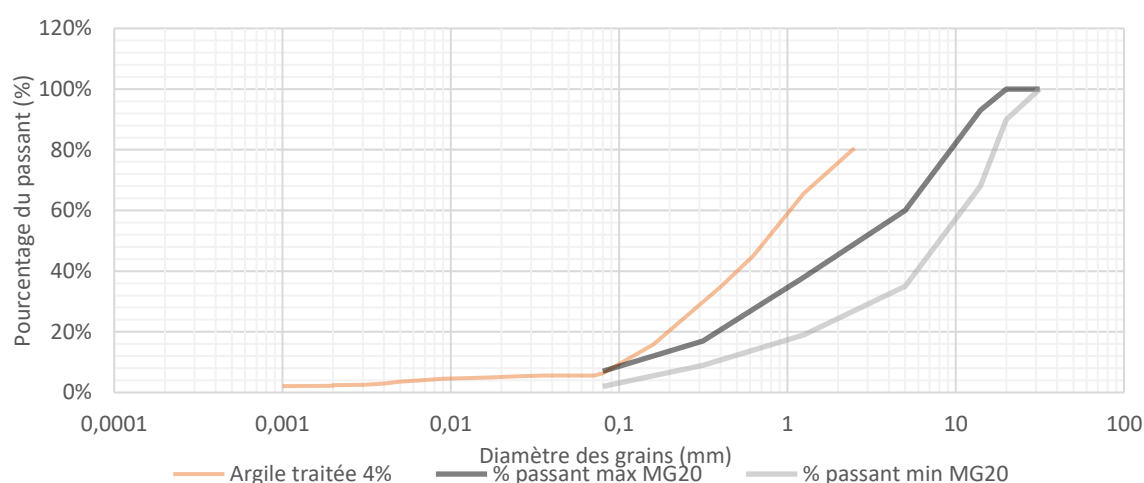


Figure 3.21: Fuseau granulométrique de MG 20 et courbe granulométrique du sol traité à 4%.

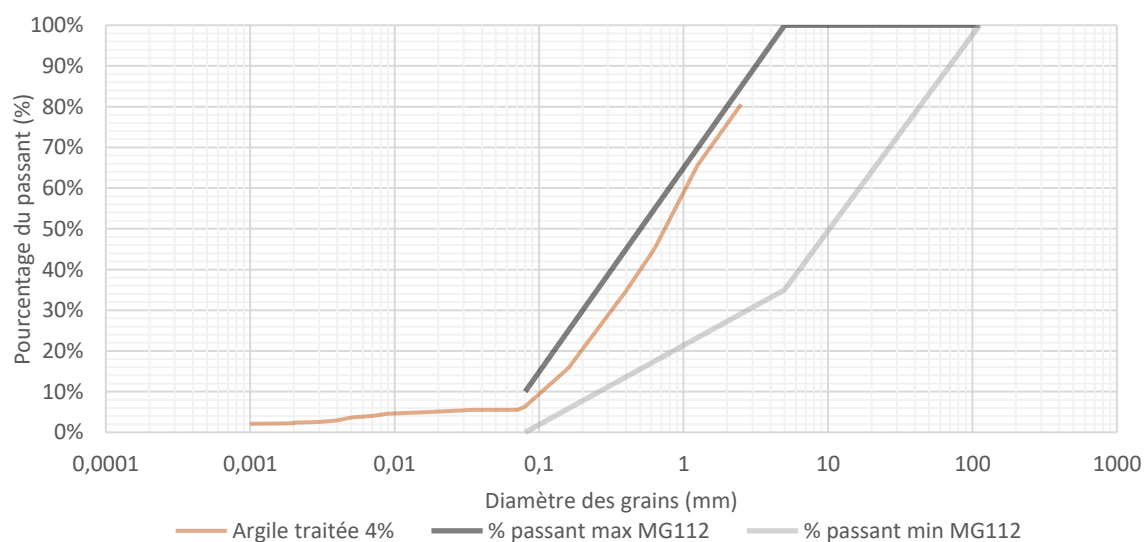


Figure 3.22: Fuseau granulométrique de MG 112 et courbe granulométrique du sol traité à 4%.

Les essais réalisés dans la présente section ont donc montré que l'argile traitée satisfaisait quelques exigences, mais pas toutes. L'argile traitée pourrait toutefois être utilisée pour des chaussées secondaires non revêtues, comme des routes minières et forestières. Cette technique permet de faciliter le déplacement des machines dans les zones argileuses et boueuses où la quantité d'eau est importante. La stabilisation est, dans ce cas, très intéressante dans l'approche technique et dans l'approche économique, car elle permet aux engins miniers de circuler facilement et de diminuer les coûts de construction des routes non revêtues en minimisant le coût de transport des matériaux conventionnels. Ce sujet est abordé dans le chapitre 4, qui vise à vérifier la rentabilité économique du traitement, en comparant le coût de construction d'une route traitée et celui d'une route conventionnelle.

CHAPITRE 4 ÉTUDE ÉCONOMIQUE DU PROJET

L'étude expérimentale au troisième chapitre a montré que l'argile traitée respecte les contraintes de granulométrie des fondations routières et les caractéristiques et performances mécaniques obtenues n'en restent pas moins intéressantes. Une valorisation des argiles traitées dans une route secondaire ou une route d'accès non revêtue est donc possible, d'autant plus qu'en région éloignée cela évite l'apport de matériaux granulaires coûteux. Le traitement est donc particulièrement intéressant dans le cas des zones agricoles, minières et forestières. Ce type de traitement n'est toutefois pas nouveau et est très fréquent, notamment en Europe. L'approche développée dans le présent chapitre vise à déterminer l'impact du traitement sur les coûts de construction. Il propose donc, d'une part, une comparaison économique des routes traitées et conventionnelles, ainsi qu'une étude d'opportunité pour une plateforme de traitement des argiles avec des résidus de chaux en vue d'une réutilisation dans diverses applications (Comblement de tranchées, parkings, aménagements paysagers, etc...).

4.1 Dimensionnement d'une route non revêtue traitée à l'aide de résidus de chaux et d'une route non revêtue conventionnelle

Le dimensionnement d'une route non revêtue traitée avec les résidus industriels de la chaux, minière ou forestière, se fait selon la méthode empirique basée sur le CBR. Cette méthode de dimensionnement est appliquée car le type de véhicules qui empruntent ce type de route est hors normes. Selon le Ministère des Transports de Québec (2021d), un véhicule est considéré hors normes lorsque une des caractéristiques du véhicule ne sont pas conformes aux limites décrites par le Ministère des Transports de Québec (2020b), dans le Règlement sur les normes de charges et de dimensions applicables aux véhicules routiers et aux ensembles de véhicules routiers, notamment en ce qui concerne la charge par essieu, la masse totale en charge et les dimensions maximales des véhicules. Pour les besoins du calcul, nous considérerons le dimensionnement d'une route non revêtue sur un site argileux. La chaussée sera dimensionnée avec deux scénarios : (1) traiter les argiles en place par les résidus de la chaux, puis faire le dimensionnement en utilisant la méthode empirique basée sur le CBR, (2) excaver la couche d'argile et de faire le dimensionnement de la chaussée en utilisant la méthode de dimensionnement des chaussées non revêtues de l'AASHTO

(CIV8450-dimensionnement de chaussées : routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues, 2020).

La méthode empirique basée sur le CBR se fait en trois étapes :

1. détermination de la valeur de CBR du sol d'infrastructure et de la sous-fondation,
2. détermination de la charge maximale appliquée par la roue sur la chaussée,
3. évaluation des épaisseurs de la sous-fondation et de la fondation.

Par ailleurs, la méthode AASHTO pour les chaussées non revêtues se base sur des abaques qui seront présentés dans la suite de la partie 4.1.2. Le but de cette partie est donc de juger la rentabilité de la méthode de traitement par rapport à la solution conventionnelle.

4.1.1 Cas 1 : Chaussée minière traitée

Le profil géologique de la route utilisée dans cette partie est illustré à la Figure 4.1. Le profil suivant se constitue d'un sous-sol argileux de module réversible 41 MPa, et au-dessus une couche d'argile. Pour cette étude, le type d'argile choisi est celui de St-Marc-Sur-Richelieu, le but est d'utiliser les résultats des études géotechniques faites dans le chapitre 3. L'argile en place n'est pas traitée, et ne présente pas des caractéristiques géotechniques favorables. Le but est de stabiliser cette argile et faire un dimensionnement de la couche d'argile traitée qui sera une couche de sous-fondation, puis par la suite dimensionner la couche de la fondation qui sera au-dessus, selon la méthode de dimensionnement basée sur le CBR. Il est à noter que des roches stériles, éventuellement concassées, sont généralement utilisées pour les routes minières. Cette approche permet de valoriser des résidus miniers tout en répondant aux exigences importantes en termes de charges. Dans la présente étude de cas, nous envisagerons l'utilisation alternative d'argile dans une perspective de valorisation des sols de surface excavés. Nous considérerons également que la méthode de dimensionnement AASHTO reste applicable pour ces chaussées particulières.

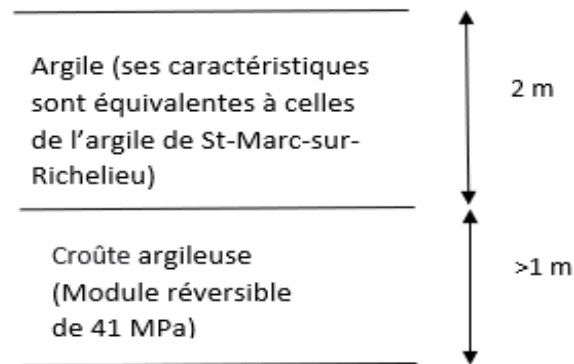


Figure 4.1: Profil géologique du site de construction.

Les hypothèses émises pour le dimensionnement sont les suivantes:

- La route est une route minière et se constitue de deux couches : une couche de sous-sol sous-forme de croûte argileuse ayant un module réversible de 41 MPa, d'épaisseur supérieure à 1 m, elle ne fera pas l'objet d'excavation,
- En utilisant le Tableau 4.1, le module réversible du sous-sol (Croûte argileuse) est donc de 41 MPa et la formule AASHTO (2004) permet de déduire le CBR du sous-sol:

$$Mr \text{ (MPa)} = 17,6 * CBR^{0,64} \quad 4-1$$

Ce qui donne :

$$CBR = 10^{\frac{1}{0,64} * \text{Log}(\frac{Mr}{17,6})} \quad 4-2$$

Ainsi le CBR du sous-sol est de 3,75.

Tableau 4.1: Module réversible d'AASHTO selon le type de sol. Adapté de : (CIV8450- dimensionnement de chaussées : routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues, 2020)

Type de sol	M _R (MPa)
CH, MH (I _L < 0.9)	21
CL (I _P ≤ 12), ML, ML-CL	38
Croûte argileuse (≥ 1m)	41
CL (I _P > 12), SC, SM (>30% fines)	48
SP, SM (< 30% des fines)	76
GC, GM, GP, GW, SW	90

- Au-dessus du sous-sol, une couche d'argile non traitée d'épaisseur 2 m. L'argile de cette route est considérée comme similaire à celle de l'argile de St-Marc-sur-Richelieu du Chapitre 3. Les résultats des essais réalisés dans le chapitre précédent seront donc utilisés dans la suite du dimensionnement.
- L'engin qui emprunte la route minière étudiée est de type Hitachi EH3000. La masse appliquée par essieu standard avant (deux roues) est de 33% du poids de l'engin, qui est de 278 964 kg (Ritchie Specs, 2018). La charge sur la roue est donc de 46,03 tonnes suivant l'équation 4.3.

$$\text{Charge sur la roue (tonnes)} = \frac{0,33 * 278\,964 * 10^{-3}}{2} = 46,03 \text{ tonnes} \quad 4-3$$

L'utilisation de l'abaque qui donne le CBR en fonction de la hauteur totale de la chaussée au-dessus du sous-sol est illustrée à la Figure 4.2.

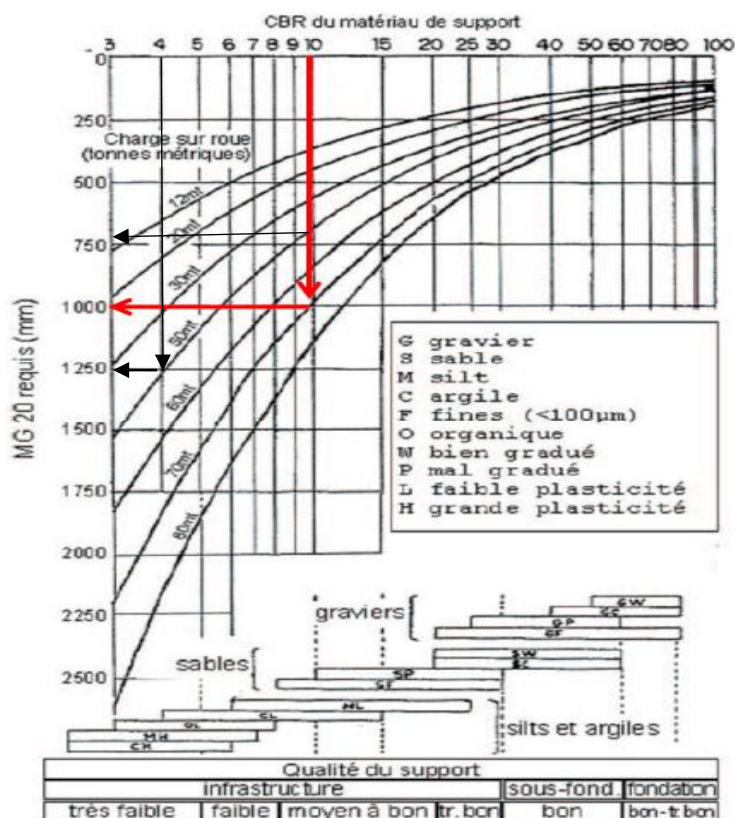


Figure 4.2: Abaque de dimensionnement selon la méthode empirique basée sur le CBR. Tiré de (CIV8450-dimensionnement de chaussées : routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues, 2020)

Le $CBR_{\text{sous-sol}}$ est de 3,75 (hypothèses 1 et 2) et la charge sur la roue est de 46,03 tonnes (hypothèse 4), ce qui donne une épaisseur totale de la chaussée $H_{\text{total}} = 1\,250$ mm. Pour la couche de la sous-fondation formée par l'argile traitée avec les résidus de la chaux, le CBR est tiré à partir de la valeur du module réversible (M_r) de l'argile traitée (hypothèse 3), sujet de ce mémoire. Le sol traité est de type SP. En se référant au Tableau 4.1, le module réversible estimé à M_r de 76 MPa, ainsi le $CBR_{\text{argile-traitée}}$ est de 9,83 en utilisant la formule (4-2).

L'utilisation du même abaque (Figure 4.2) donne une épaisseur requise de 687,5 mm, arrondie à 700 mm. L'épaisseur de la sous-fondation est $1\,250 - 700 = 550$ mm. La structure de la chaussée traitée est présentée dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2: Structure de la chaussée traitée

Élément	Matériaux	Épaisseur (mm)
Fondation	Gravier	700
Sous-fondation	Argile traitée	550
	Total	1 250

Le profil géologique de la chaussée traitée est montré dans la Figure 4.3 :

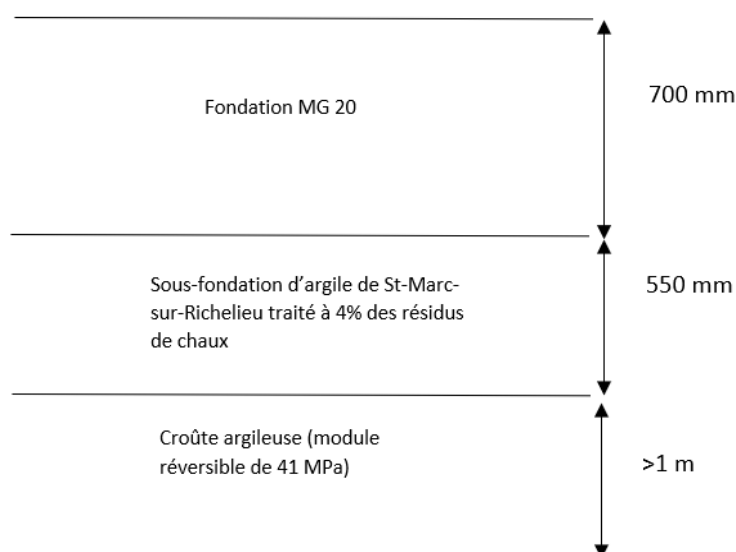


Figure 4.3: Profil géologique de la chaussée traitée

4.1.2 Cas 2 : Chaussée non revêtue conventionnelle

Le deuxième scénario est d'excaver toute la couche d'argile et de calculer les épaisseurs de la sous-fondation et de la fondation pour le dimensionnement de la chaussée non revêtue conventionnelle en utilisant la méthode AASHTO (1993).

Pour ce faire, la technique de dimensionnement nécessite d'autres hypothèses en plus des caractéristiques du sous-sol et de la charge appliquée par roue. Ces hypothèses sont les suivantes :

- ✓ L'équivalent de charge axiale simple (ÉCAS), qui représente le nombre total de passages d'essieux équivalent à un essieu de référence de 8 165 kg (18 000 lbs) est de $W_{18} = 200\,000$ essieux de 80 kN.
- ✓ La perte de performance, qui est un indice qui indique la qualité de la chaussée, varie entre 0 et 5 Δ PSI est donc l'écart entre une chaussée nouvellement construite et une dégradée. On supposera ici une valeur de 3.
- ✓ La profondeur maximale des ornières $RD = 50\text{ mm} = 1.97\text{ po.} \approx 2\text{ po.}$
- ✓ Le module réversible E sert à mesurer la rigidité du matériau granulaire de la fondation. On considèrera, pour le type MG 20, $E_{BS}(\text{base}) = 200\text{ MPa} = 29\,000\text{ PSI}$.
- ✓ Le module réversible E de la sous-fondation en MG 112 sera $E_{SB}(\text{sub-base}) = 100\text{ MPa} = 14\,500\text{ PSI}$.
- ✓ Le sol d'infrastructure sera de type croute argileuse ($M_r = 41\text{ MPa} = 6000\text{ PSI}$ selon le cas 1).
- ✓ La perte de granulats de la chaussée due aux passages des véhicules GL (Aggregat loss) = 40 mm
- ✓ Le module effectif M_R de l'argile en place sera de 76 MPa (tableau 4.1).

L'utilisation de l'abaque AASHTO présenté à la Figure 4.4 permet de calculer la valeur de l'épaisseur de la couche de fondation D_{BS} qui est égale à 393,7mm (15,5 inches) arrondi à 400 mm.

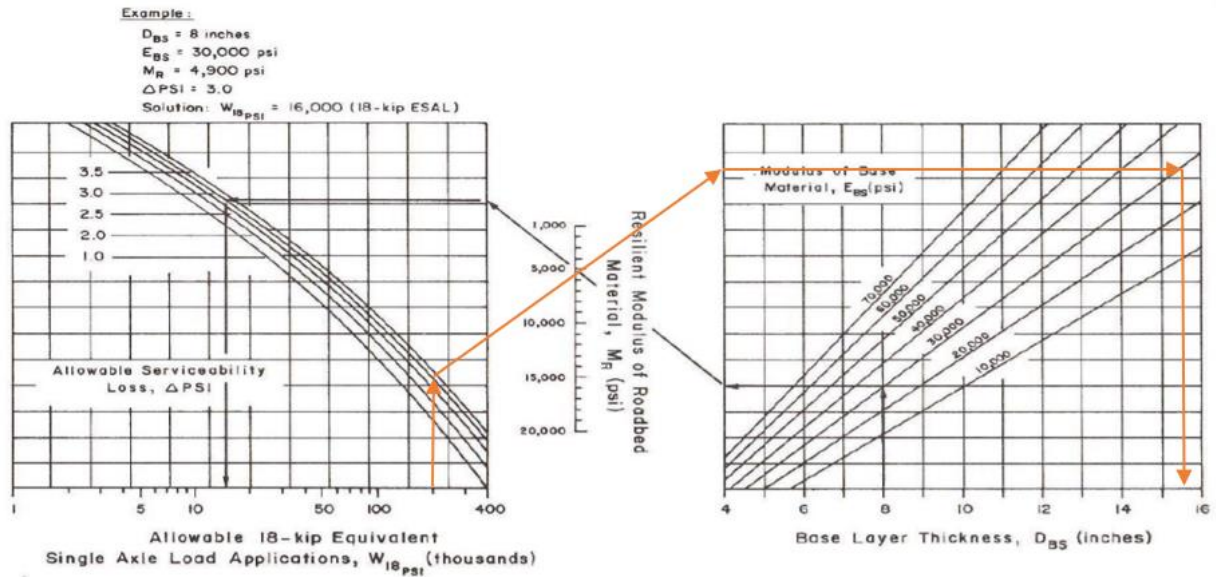


Figure 4.4: Détermination du D_{BS} pour la chaussée conventionnelle. Tiré de (CIV8450-*dimensionnement de chaussées : routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues*, 2020).

L'abaque de la Figure 4.5 donne la valeur de l'épaisseur de la couche de fondation face à l'orniérage qui est le suivant : $D_{BS\text{ rut}} = 508$ mm (20 inches).

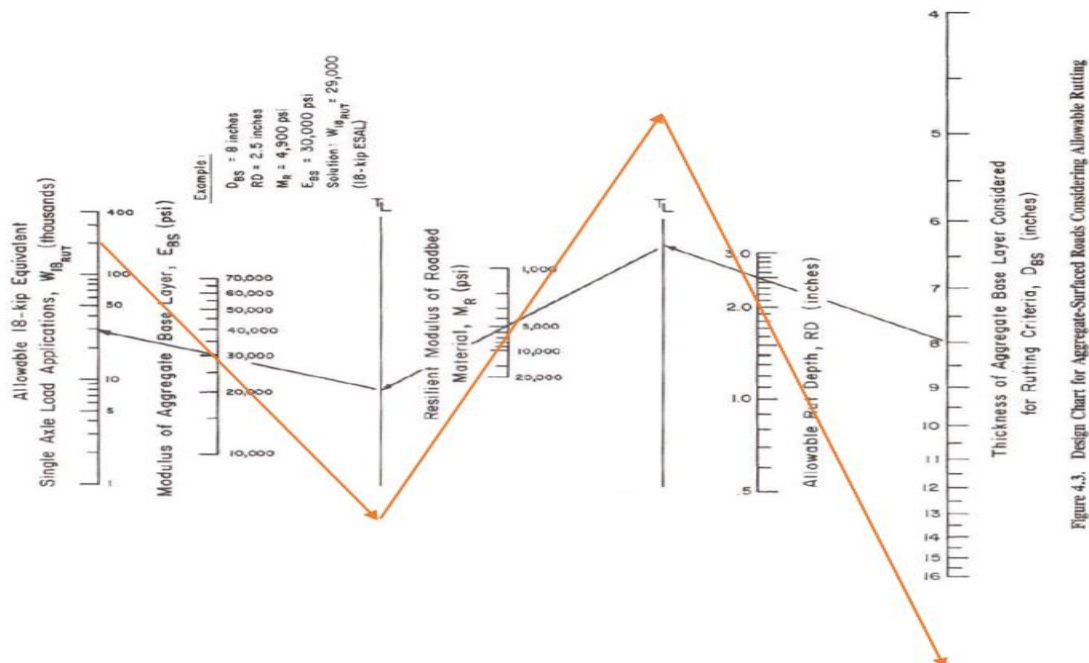


Figure 4.3. Design Chart for Aggregate-Surfaced Roads Considering Allowable Rutting

Figure 4.5: Abaque déterminant la valeur du D_{BS} finale compte tenue de la perte des granulats. Tirée de (CIV8450-*dimensionnement de chaussées : routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues*, 2020)

L'épaisseur de la fondation MG 20 devra être de 250 mm incluant 50 mm pour tenir compte de la perte des granulats, en utilisant la formule suivante :

$$DBS = DBS' + (0.5 * GL) \quad 4-4$$

Ce qui donne : $250 = DBS' + (0.5 * 50)$, d'où $DBS' = 225$ mm (8,86 inches). La réduction de l'épaisseur est donc de 508 mm (20 inches) – 225 mm = 283 mm (11,14 inches). La conversion de 283 mm (11,14 inches) de MG 20 en MG 112 (figure 4.6) donne finalement l'épaisseur final de la sous-fondation qui est de 406,4 mm (16 po), arrondi à 410 mm.

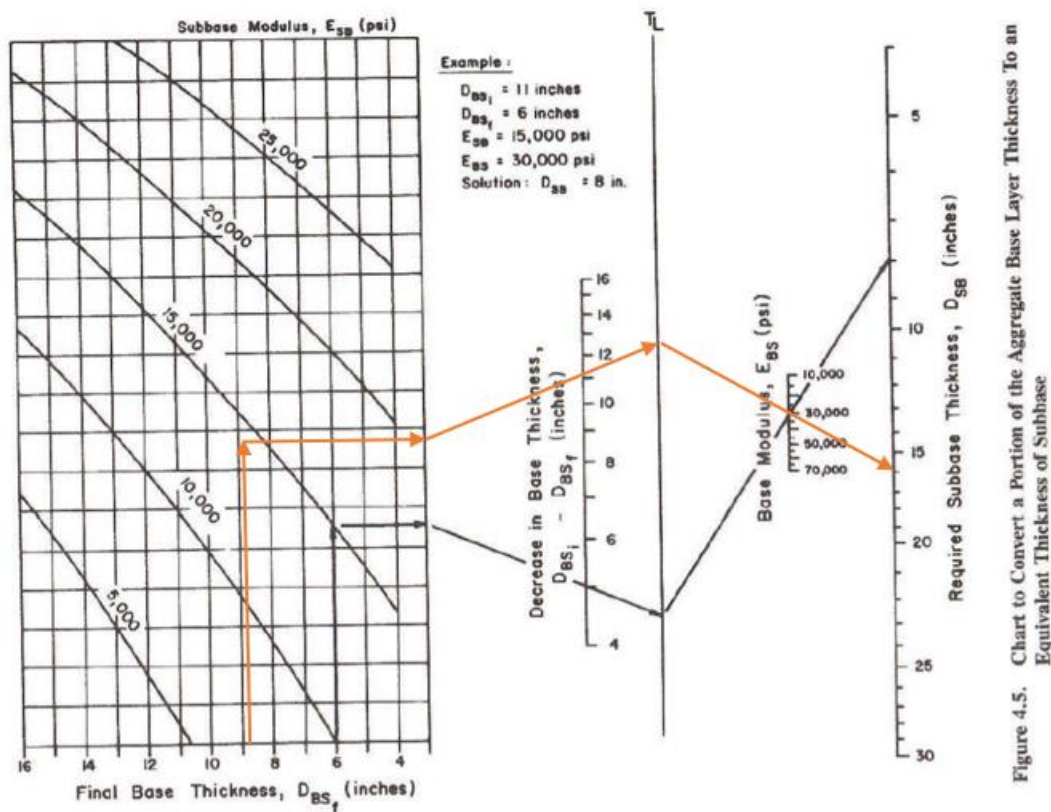


Figure 4.5. Chart to Convert a Portion of the Aggregate Base Layer Thickness To an Equivalent Thickness of Subbase

Figure 4.6: Abaque déterminant la valeur de DSB pour la sous-fondation. Tiré de (CIV8450- dimensionnement de chaussées : routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues, 2020).

La structure finale de la chaussée non revêtue est résumée dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Structure de la chaussée conventionnelle.

Élément	Matériaux	Épaisseur (mm)
Fondation	MG 20	250
Sous-fondation	MG 112	410
	Total	660

4.1.3 Bilan de dimensionnement

Le Tableau 4.4 montre les résultats de dimensionnement des deux cas étudiés en 4.1.1 et 4.1.2. L'épaisseur totale de la chaussée traitée est plus grande que celle de la chaussée non traitée de 590 mm. La partie suivante vise à calculer le coût de construction de chacune des chaussées et le but est de déterminer la rentabilité économique du traitement.

Tableau 4.4: Tableau récapitulatif des résultats de dimensionnement des deux cas.

Type de chaussée	Élément	Matériaux	Épaisseur (mm)
Chaussée traitée (Cas 1)	Fondation	MG 20	700
	Sous-fondation	Argile traitée à 4% avec résidus	550
Chaussée non traitée (Cas 2)	Fondation	MG 20	250
	Sous-fondation	MG 112	410

4.2 Calcul de la rentabilité du traitement dans le cas routier

Le but de la présente section est de calculer la rentabilité du traitement des sols avec les résidus de chaux en comparant le coût de la chaussée traitée avec le coût d'une chaussée conventionnelle non revêtue. Pour cela, les dimensions de la chaussée seront fixées à 6 m de largeur et 200 m de longueur.

Les données de la compagnie Blumetric Environmental Inc (2020) et de la Direction du Laboratoire des Chaussées (Direction du laboratoire des chaussées, 2010) ont permis de calculer le coût des matériaux granulaires MG 20 et MG 112, et par la suite, de calculer le coût de construction de la route traitée et la chaussée non traitée. Les prix des matériaux granulaires utilisés dans les chaussées au Québec s'élèvent à 39,20 \$/m³ pour le MG 20, et de 22.56 \$/m³ pour le MG 112 (Ministère des transports de Québec, 2020a).

Le Tableau 4.5 montre les paramètres de stabilisation fournis par la compagnie Graymont. Ces paramètres englobent les dimensions de la chaussée traitée, les caractéristiques du broyeur et le pourcentage des résidus utilisés pour le traitement de l'argile. Les données utilisées sont celles des résultats de l'étude expérimentale faite au Chapitre 3.

Tableau 4.5: Tableau des paramètres de stabilisation utilisés pour le calcul du coût de la chaussée traitée

Paramètres de stabilisation						
Profondeur de stabilisation (m)	Largeur du chemin (m)	Largeur du broyeur (m)	Vitesse d'avancement du broyeur (m/h)	Profondeur du broyeur par passage (m)	Poids de l'argile (kg/m ³)	% de LKD
0,55	6	1,5	300	0,15	1 420	4
Longueur à traiter (m)		Superficie (m ²)	Volume de sol à traiter	Quantité LKD	Volume par passage m ³ /h	Temps en continu
200		1 200	660	26,4	67,5	9,78

Le Tableau 4.6 présente les facteurs entrant dans le calcul du coût de la chaussée traitée en utilisant les résultats de dimensionnement de la chaussée de la partie 4.1.3. Le coût total de la chaussée traitée est de 50 870 \$.

Tableau 4.6: Tableau du coût de construction de la chaussée traitée

Couches de la chaussée traitée	Travaux	Quantité	Unité	Prix unitaire	Unité	Total (\$) (Arrondi)
Couche de sous-fondation (Argile traitée)	Excavation de l'argile	2 400	m ³	4,57	\$/m ³	10 970
	LKD #3524	26,4	tonnes	27,56	\$/t	730
	Épandeur	8	heure	40	\$/h	320
	Tracteur et Broyeur	8	heure	200	\$/h	1 600
	Compaction	8	heure	120	\$/h	960
Couche de fondation MG 20	Chargement	8	heure	150	\$/h	1 200
	Nivellement (bouteur)	8	heure	150	\$/m ²	1 200
	Compaction	8	heure	120	\$/h	960
	MG 20	840	m ³	39,2	\$/m ³	32 930
Coût total de construction de la chaussée traitée (\$)						50 870

Pour le cas de la chaussée non traitée, le sous-sol de la chaussée est de type croûte argileuse (matériau fin), la mise en place directement de la couche de sous-fondation sur ce sous-sol oblige d'insérer une protection anti-contaminante (granulaire ou géotextile). Le coût unitaire d'un géotextile est de 3,97 \$/m². Ainsi, le Tableau 4.7 montre la démarche de calcul du coût de la chaussée non traitée non revêtue. Le coût total est de 59 440 \$.

Tableau 4.7: Tableau explicatif du coût de construction de la chaussée non traitée.

Travaux de construction	Quantité		Unité	Prix unitaire	Unité	Total (\$) (Arrondi)
Excavation de 2 m d'argile	2 400		m ³	4,57	\$/m ³	10 970
Nivellement du sous-sol	1 200		m ²	2,64	\$/m ²	3 170
Géotextile	1 200		m ²	3,97	\$/m ²	4 770
Pose du géotextile	1 200		m ²	2,64	\$/m ²	3 170
Matériaux	Quantité MG 20	Quantité MG 112	Unité	Prix unitaire	Unité	Total
Chargement	8	8	heure	150	\$/h	2 400
Nivellement	1 200	1 200	m ²	2,64	\$/m ²	6 340
Compaction	1 200	1 200	m ²	2,4	\$/m ²	5 760
MG 20	300		m ³	39,2	\$/m ³	11 760
MG 112		492	m ³	22,56	\$/m ³	11 100
Coût total de construction de la chaussée non revêtue conventionnelle (\$)						59 440

Le Tableau 4.8 montre ainsi la rentabilité du traitement qui a été évaluée à 14,40 %.

Tableau 4.8: Rentabilité économique du traitement des argiles à 4% des résidus de la chaux.

Type de la chaussée	Coût total (\$)	Économie (%)
Chaussée traitée	50 870	14,40
Chaussée non traitée	59 440	

Le traitement des sols en place offre une rentabilité économique intéressante pour les chaussées non revêtues, il permet non seulement la valorisation des argiles en place dans le domaine routier, mais aussi la valorisation des résidus de la chaux. À cette étape, l'argile traitée a montré sa rentabilité économique pour le cas des chaussées, mais il serait intéressant d'étudier l'applicabilité de l'argile traitée dans d'autres applications. La recherche des débouchés alternatifs de l'argile traitée offrira une large gamme d'opportunité de son champ de réutilisation.

4.3 Abaque généralisé de comparaison économique entre le coût de chaussée traitée et une chaussée conventionnelle non revêtue

Le but de la partie suivante est de construire deux abaques qui permettront de visualiser les différents paramètres qui entrent dans le calcul économique de la chaussée traitée et aussi pour la chaussée non revêtue conventionnelle. La fabrication des deux abaques a obligé à fixer la superficie de la chaussée et modifier les autres paramètres de calcul. Les données utilisées pour la généralisation des deux abaques sont des données récentes de la compagnie Blumetric. La superficie de la chaussée est donc fixée à 800 m², cette valeur sera conservée tout le long de la section.

4.3.1 Cas 1 : Abaque généralisé pour le calcul du coût de construction d'une couche de sol traitée

Les facteurs influençant le calcul du coût total de la couche traitée sont :

- ✓ le pourcentage des résidus de chaux;
- ✓ la profondeur de traitement;

- ✓ le nombre d'heure de travail des machineries par journée.

Ces facteurs ont été intégrés dans l'abaque présenté à la Figure 4.7. Ce dernier est composé de 3 zones, définies comme suit :

- la première section (zone 1) montre la relation entre la variation du pourcentage des résidus et la variation de la profondeur de traitement sur la quantité des résidus de chaux à utiliser. La quantité des résidus de chaux à utiliser est calculée en multipliant le pourcentage des résidus par la profondeur de traitement, le tout est multiplié par 800 m²;
- la deuxième section (zone 2) montre la relation entre la variation de la quantité des résidus de chaux (résultat de la zone 1) et le coût total des résidus de la chaux. Ce dernier est calculé en multipliant la quantité des résidus par le coût unitaire des résidus (27,56 \$/t est la valeur utilisée dans les calculs le long de ce mémoire);
- la troisième section (zone 3) montre finalement la variation du coût total des résidus de chaux (résultats de la zone 2) et la variation du nombre d'heures de travail des machines par journée sur le coût total de la couche traitée. Le coût total de la couche traitée est calculé à partir de l'équation suivante : $\text{Coût total (\$)} = \text{coût des résidus (\$)} + \text{nombre d'heures de travail des machineries} \times (\text{coût unitaire de l'épandeur (40\$/h)} + \text{coût unitaire du tracteur et broyeur (200 \$/h)} + \text{coût unitaire pour de compaction (120\$/h)})$.

La connaissance du pourcentage des résidus de chaux à utiliser dans le traitement et de la profondeur de la couche à traiter permet de savoir la quantité de résidus qui sera appliquée dans le processus de stabilisation. Le coût des résidus de la chaux dépend de la quantité des résidus utilisée. Une fois tous ces paramètres sont définis, le coût total de construction de la couche de la chaussée traitée sur le chantier est ainsi déterminé.

La Figure 4.7 montre un exemple de calcul sur l'abaque, illustrant ainsi le cheminement à suivre expliqué dans les paragraphes précédents.

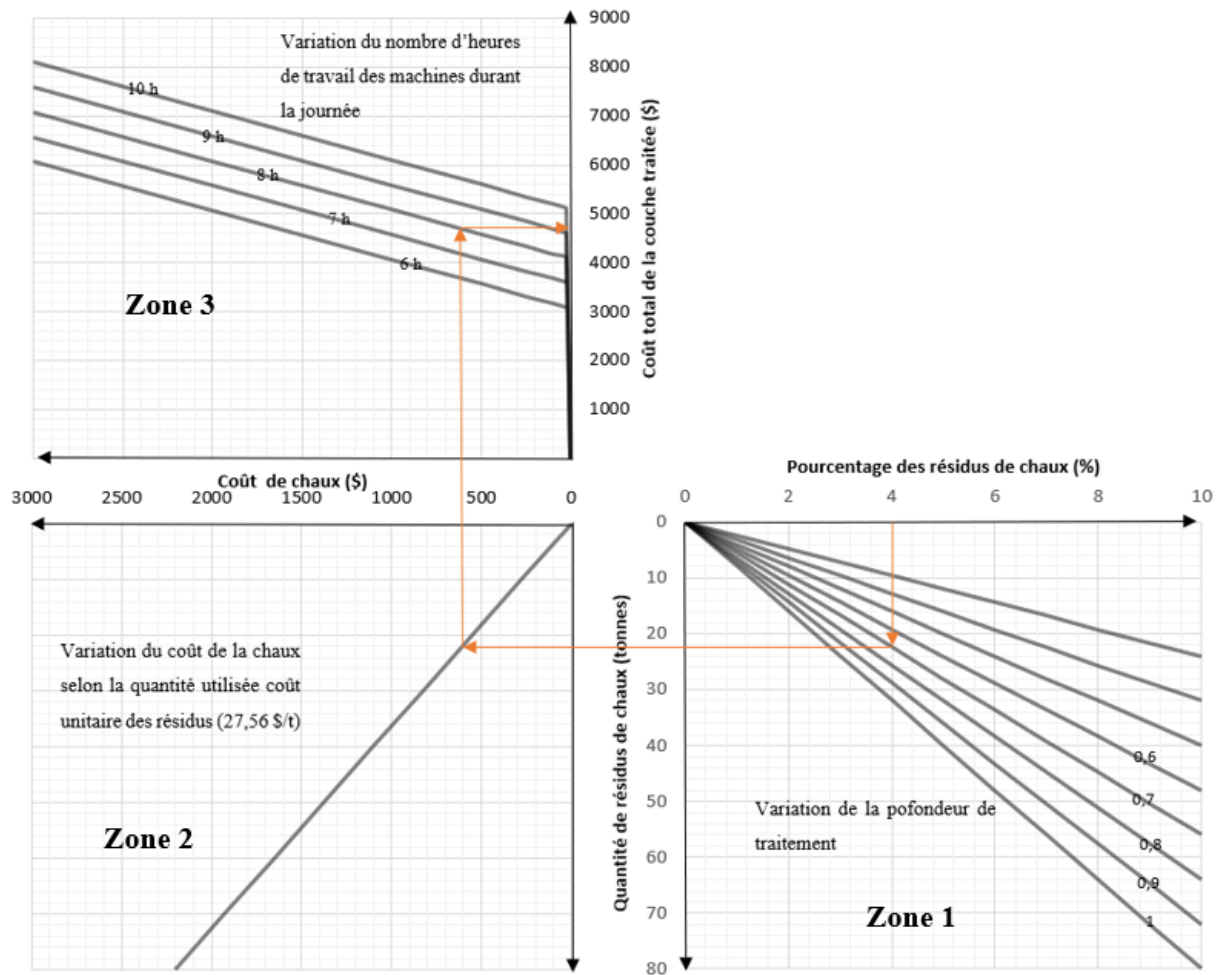


Figure 4.7: Abaque de calcul du coût de la couche traitée avec les résidus de chaux

4.3.2 Cas 2 : Abaque généralisé pour le calcul du coût de construction d'une couche de sol non traité

Les facteurs influençant le calcul du coût total de la couche de la chaussée conventionnelle sont les suivants :

- ✓ le coût de transport des matériaux de construction;
- ✓ la distance d'emprunt des matériaux entre la carrière et le chantier;
- ✓ la profondeur de la couche de la chaussée à construire;
- ✓ la variation du coût de fabrication des matériaux de construction.

L'abaque dédié aux constructions conventionnelles est présenté à la Figure 4.8. Il est également composé de différentes zones :

- la première section (zone (a)) montre la relation entre la variation de la distance d'emprunt entre la carrière et le chantier et la variation du coût unitaire de transport des matériaux sur le coût total de transport des matériaux. La somme des deux distances donne la distance équivalente de transport. Les courbes montrées dans cette zone sont déterminées par multiplication du chaque coût unitaire de transport par la distance équivalente. Donc, on projette la distance équivalente sur la courbe du coût unitaire de transport choisi, puis une deuxième projection sur l'axe des ordonnées donne le coût total de transport;
- la deuxième section (zone (b)) montre la relation entre la variation du coût de transport des matériaux de construction et la variation du coût de construction des matériaux sur le coût total de construction des matériaux conventionnels. Ce dernier est égal à la somme du coût de transport déterminé à partir de la zone (a) et du coût d'extraction et construction des matériaux de chaussées;
- la troisième section (zone (c)) montre l'influence de la variation du coût total des matériaux (résultat de la zone (b)) et de la variation de la profondeur de la couche conventionnelle sur le coût total de la couche conventionnelle. Ce coût total est calculé à partir de l'équation suivante : $\text{Coût total (\$)} = \text{coût de construction des matériaux (\$)} + 800 \text{ m}^2 * (\text{profondeur de traitement} * \text{coût unitaire d'excavation (4,57 \$/\text{m}^3)} + \text{coût unitaire de nivellement (2,64 \$/\text{m}^2)} + \text{coût unitaire du compactage (2,4 \$/\text{m}^2)})$.

La distance de transport entre la carrière et le chantier contribue au calcul du coût total de la couche de la chaussée conventionnelle. Le coût de transport des matériaux granulaires (\$/m3) est ainsi déterminé à partir du coût unitaire de transport des matériaux (\$/m3.km). La deuxième étape consiste à calculer le coût de fabrication de ces matériaux (\$/m3), la variation de ces derniers permet de définir le coût de construction des matériaux granulaires (\$/m3). Finalement, les dimensions de la couche varient spécialement avec sa profondeur (m), selon la variation de la profondeur de la couche, le coût total de la couche de la chaussée conventionnelle est ainsi calculé. La Figure 4.8 montre le cheminement à suivre avec les données requises.

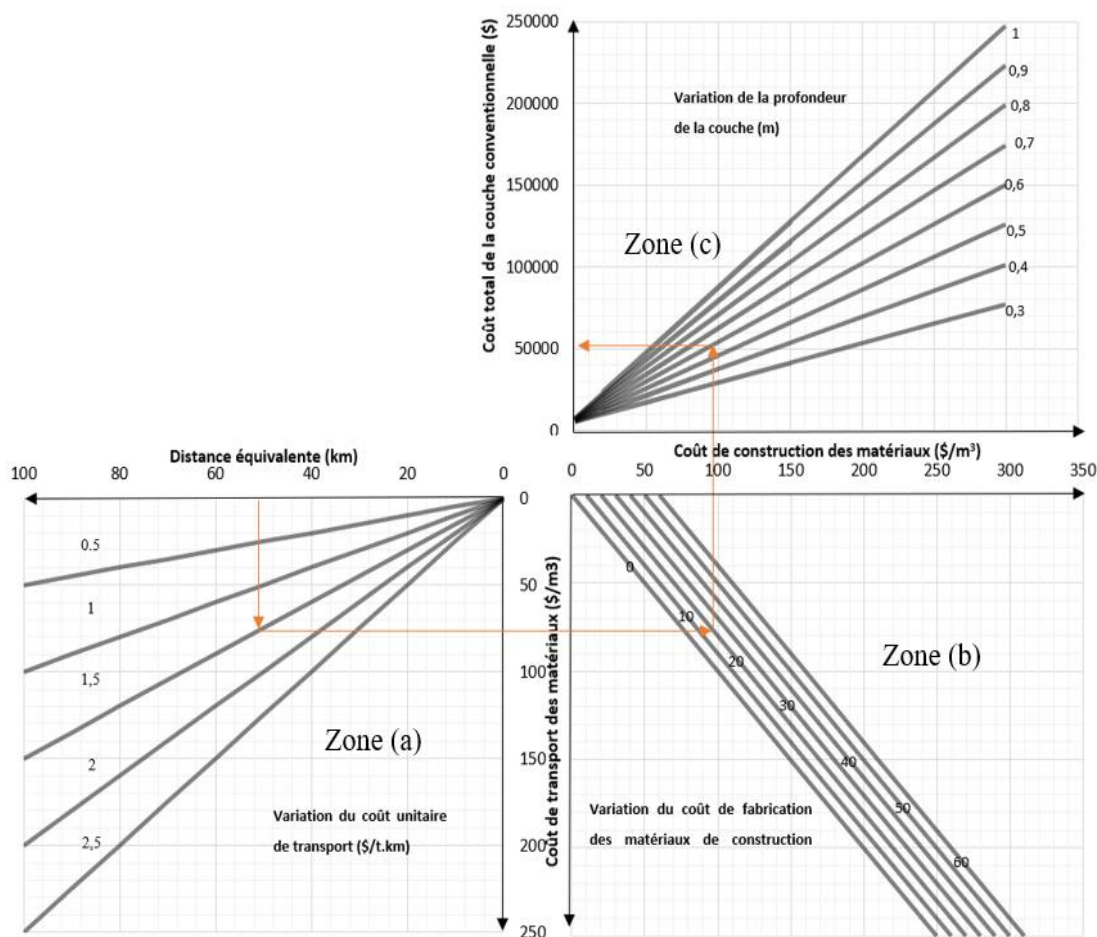


Figure 4.8: Abaque de calcul du coût de la couche conventionnelle.

Les deux abaques permettent d'inclure tous les facteurs qui jouent un rôle dans le calcul du coût de construction, soit dans le cas d'une couche traitée ou non traitée. Ces deux abaques donnent ainsi, comme résultat final, le coût de construction pour chacun des cas et la comparaison entre ces résultats donne la rentabilité économique qui sera générée. Cela veut dire que ces deux abaques seront un outil de décision pour choisir le mode de construction le plus économique à appliquer sur un chantier.

La section suivante a pour but de calculer la rentabilité économique pour une plateforme de traitement des argiles, ainsi que la formation de deux abaques qui permettent de comparer entre le coût de l'argile traitée avec le coût de vente des sables; ces abaques prennent en considération différents facteurs qui entrent dans le calcul.

4.4 Calcul de la rentabilité pour une plateforme de traitement

4.4.1 Calcul de la distance optimale de transport des argiles traitées vers la plateforme

Le but de cette partie est de faire un calcul de rentabilité d'une plateforme de traitement, qui viserait à traiter des sols argileux excavés et à les reconditionner pour une réutilisation dans diverses applications dans la construction. Pour cela, le calcul de la rentabilité se base sur le coût de transport et de préparation des sols sur une plateforme de traitement, en comparaison avec les coûts des matières premières avec lesquelles les sols traités seraient en compétition (ex : sables).

Pour ce faire, et à des fins d'illustration, le choix de la plateforme est choisi d'être construite à Marbleton, près de lieu de la construction de la chaux, située dans la région de l'Estrie au Québec, mais cette analyse reste valable indépendamment de l'emplacement de la plateforme. Avant une généralisation du calcul, celui-ci est fait en faisant référence aux résultats expérimentaux du traitement de l'argile St-Marc-sur-Richelieu avec les résidus de chaux (Chapitre 3).

La plateforme envisage ainsi de livrer l'argile traitée qui sera sous forme de sable silteux vers un chantier de construction comme matériau granulaire prêt à l'utilisation.

Les travaux à exécuter pour traiter le 1 m³ d'argile sont déterminés afin de calculer le coût de production de l'argile traitée. Le coût de traitement d'un mètre cube d'argile avec les résidus de la chaux est de 4,07 \$/m³. Ce coût englobe le coût des résidus de chaux et le coût de broyeur pour le malaxage des argiles avec les résidus. La durée de malaxage a été déduite à partir des données de Blumetric (Tableau 4.9). Le coût des manipulations de l'argile pour la mise en pile ainsi que le coût d'entreposage pour la cure ne sont pas pris en compte dans le calcul. Le coût de production est montré dans le Tableau 4.10.

Tableau 4.9: Calcul du temps de broyage

Largeur du broyeur (m)	Vitesse d'avancement du broyeur (m/h)	Profondeur du broyeur par passage (m)	Volume par passage (m ³ /h)	Temps de broyage (h) pour 1m ³ de sol
1,5	300	0,15	$0,15 \times 300 \times 1,5 = 67,5$	$1/67,5 = 0,015$

La production d'un mètre cube d'argile traitée à 4% implique une masse sèche de l'argile de :

1006,5 kg calculée à partir de l'équation 4-5, avec le $V_{Total} = 1\text{m}^3$, $\rho_d = 1006,5 \text{ kg/m}^3$.

$$M_s = V_{Total} * \rho_d \quad 4-5$$

Tableau 4.10: Coût de production du sol traité

Travaux	Quantité	Prix unitaire	Prix (\$)
Résidus de la chaux à 4%	$0,04 * M_s = 0,04 * 1,0065 * 1 = 0,0403 \text{ tonne}$	27,56 \$/t	1,11
Malaxage (Broyeur)	0,015 heure	200 \$/h	2,96
Coût d'excavation de l'argile	1 m ³	4,57 \$/m ³	4,57
Coût de production de 1 m ³			8,64

Le coût de transport de l'argile traitée est de : 1,616 \$/t.km (Ministère de transport de Québec, 2021).

La prochaine étape consiste à convertir le coût de transport en \$/km.m³. Cette étape nous permet de comparer les différents coûts avec la même unité, car le coût de production ainsi que le coût de vente des sables sont en \$/t. Cela sera possible si on suppose que le volume du sol après traitement reste fixe et égal à 1m³. Ainsi, la masse volumique sèche après traitement sera égale à la masse volumique initiale de l'argile plus la masse volumique de la chaux ajoutée correspondant à 4% de la masse de l'argile dans le volume de 1m³ :

$$\rho_d(\text{après traitement}) = \rho_d(\text{avant traitement}) + 0,04 \rho_d(\text{initial}) = 1,04 \rho_d(\text{initial}) = 1,04 * 1006,5 = 1046,76 \text{ kg/m}^3$$

Le coût de transport de l'argile traitée en \$/km.m³ est donc de :

$$\text{Coût de transport de l'argile traitée} \left(\frac{\$}{\text{m}^3 \cdot \text{km}} \right) = \text{Coût de transport} \left(\frac{\$}{\text{t} \cdot \text{km}} \right) * \frac{\rho_d(\text{après traitement}) \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{1000} \quad 4-6$$

$$\text{Coût de transport} \left(\frac{\$}{\text{m}^3 \cdot \text{km}} \right) = 1,692 \frac{\$}{\text{m}^3 \cdot \text{km}} \quad 4-7$$

Le coût de vente d'un sable utilisé comme matériau d'emprunt pour les travaux de terrassement est d'environ 10 \$/m³ selon les prix délivrés par le Ministère des transports de Québec (2020a).

L'intérêt de cette étude est ainsi de trouver la distance maximale x (km) de transport des argiles vers la plateforme de traitement pour laquelle le coût de vente de l'argile traitée reste inférieur au coût de vente du sable. L'évaluation de cette distance permettra ainsi d'adopter la technique de traitement des argiles à la place de l'achat des matières premières (sable).

Le coût de vente de l'argile traitée est la somme du coût de production (8,64 \$/m³) et le coût de transport (1,692 \$/m³.km). On multiplie le coût de transport par la distance (x) recherchée, et cette formule doit être inférieur au coût de vente du sable 10 \$/m³.

La formulation de l'équation est donc la suivante :

$$1,692 \frac{\$}{\text{m}^3 \cdot \text{km}} * x + 8,64 \frac{\$}{\text{m}^3} \leq 10 \frac{\$}{\text{m}^3} \quad 4-8$$

$$1,692 \frac{\$}{\text{m}^3 \cdot \text{km}} * x \leq 10 \frac{\$}{\text{m}^3} - 8,64 \frac{\$}{\text{m}^3} = 1,36 \frac{\$}{\text{m}^3} \quad 4-9$$

$$x \leq \frac{1,36 \frac{\$}{\text{m}^3}}{1,692 \frac{\$}{\text{m}^3 \cdot \text{km}}} = 0,804 \text{ km} \quad 4-10$$

Donc la distance maximale est de 0,804 km (804 mètres). Cette distance de moins d'un kilomètre permet de déduire que les sols doivent être traités pour une utilisation essentiellement sur site, cela veut dire que la construction d'une plateforme entière pour transporter l'argile traitée (sable fin) vers des chantiers voisins ne serait intéressant que si la distance de transport est faible. Cependant, les sablières et les carrières actives qui produisent du sable au Québec, et plus particulièrement celles qui sont proches de la région de Montréal, sont de nombre restreint (Direction de la géomatique, 2021). Le coût des sables augmente avec la distance de transport vers les chantiers et la mise en place d'une plateforme de traitement dans les zones dépourvues de sablières sera une solution à privilégier, afin de valoriser l'argile locale et de proposer une solution alternative à l'extraction de sable. Une plateforme de traitement localisée à côté d'une carrière ne pourrait être compétitive si les débouchés sont identiques, car elle pourrait uniquement exploiter l'argile du voisinage et ne permettrait pas de valoriser les déblais argileux issus des chantiers de la région.

La distance optimale obtenue dans cette section reste petite et elle dépend du pourcentage des résidus utilisé et du coût actuel du sable. Dans la partie suivante, un abaque sera généralisé, illustrant la relation entre l'évolution du coût de vente des sables et la distance entre la plateforme de traitement et le site d'extraction. Cet abaque permettra ainsi d'analyser l'influence de l'augmentation du coût des matières premières, qui proviendra nécessairement de la rareté du sable en cas de pénurie, sur la stratégie de remplacement.

4.4.2 Influence du coût des matières premières sur la stratégie de remplacement

La technique de traitement en place de l'argile St-Marc-sur-Richelieu avec les résidus de la chaux, a permis de former du sable fin. Son utilisation comme matériau de sous-fondation pour les chaussées a permis de générer une économie de 14,40 % et la recherche d'opportunité d'utilisation de l'argile traitée dans des débouchés alternatifs nous a ouvert la porte vers une stratégie de remplacement du sable provenant des carrières et des sablières par de l'argile traitée. La courbe représentée dans la Figure 4.9 montre l'évolution du coût de vente du sable comme matière première et son influence sur la distance maximale de transport de l'argile traitée vers les sites de construction visés. Une augmentation du coût de vente de sable est représentée en ajoutant un incrément au coût initial (10 \$/m³). La droite de la Figure 4.9 représente l'évolution de la distance

maximale de transport des argiles traitées selon l'équation 4-8 ($1,692 \frac{\$}{m^3.km} * x + 8,64 \frac{\$}{m^3} \leq 10 \frac{\$}{m^3}$). En faisant sortir la distance de transport x de l'équation et en remplaçant le coût de vente de sable initial par son coût actuel, on trouve l'expression de la fonction de la droite $f(a) = (a - 8,64)/1,692$. Ainsi, l'axe des ordonnées présente la distance maximale de transport des argiles traitées et l'axe des abscisses montre le coût de vente de sable. Comme exemple, la Figure 4.9 montre que pour un coût de sable de $15 \$/m^3$, l'argile traitée peut être transporté jusqu'à 3,8 km de la plateforme.

Cette courbe est représentée dans le cas de la stabilisation de l'argile St-Marc-sur-Richelieu avec 4% des résidus de résidus de chaux. Cependant, le changement de l'argile et de la valeur du point de fixation de la chaux PFC (4%) impliquent des modifications des coûts de production. Cette remarque mène à déduire que la Figure 4.9 change avec le pourcentage du point PFC.

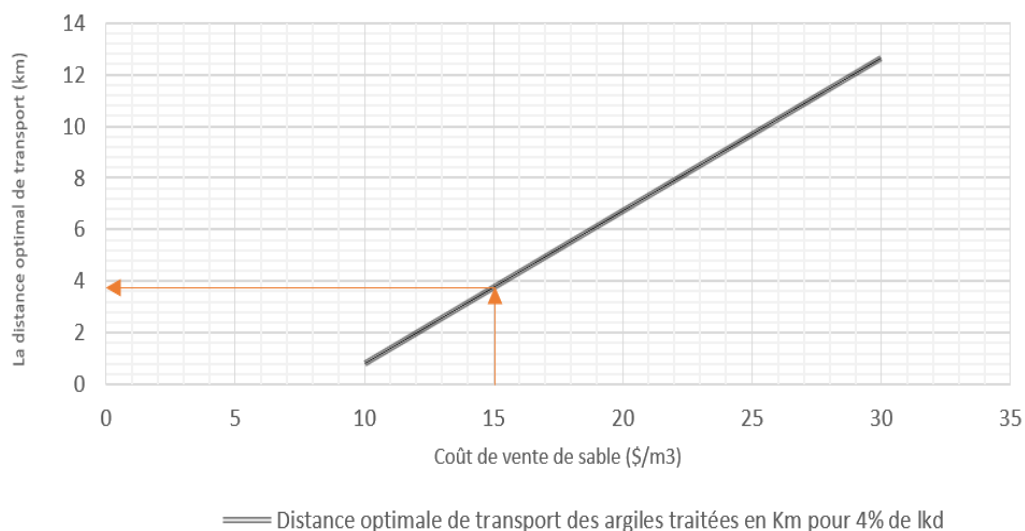


Figure 4.9: droite expliquant l'influence du coût de vente du sable sur la distance de transport des argiles traitées.

L'abaque présenté dans la Figure 4.9 est intéressant, mais il ne tient cependant pas compte de la variation du pourcentage des résidus utilisés dans la stabilisation. De ce fait, la Figure 4.10 complète l'étude en ajoutant cette variable et permet finalement de définir le gain ou le déficit qui sera généré lors de l'utilisation de l'argile traitée ou du sable fin. La comparaison entre le coût de

vente de ses deux produits permet de valider ou non, de point de vue économique, la substitution du sable fin des carrières par l'argile traitée avec les résidus de chaux.

L'abaque 4.10 se compose de trois zones. La première zone permet de déterminer le coût de vente du sable. Les deuxième et la troisième zones permettent de calculer le coût de vente de l'argile traitée. La zone 2 calcule le coût de transport des argiles traitées selon la distance voulue (la droite est calculée en multipliant la distance par le coût unitaire de transport ($1,692 \text{ \$/m}^3 \cdot \text{km}$)). La zone 3 calcule, finalement, le coût de production de l'argile traitée selon la variation du dosage en chaux utilisée (La droite est déterminée à partir de l'équation suivante : $(1000/((1+\% \text{chaux}) * 1006,5)) * (2,96 + 4,57 + (\% \text{chaux} * 1,0065 * 1 * 27,56))$), qui est celle utilisée pour le calcul du coût de production dans le Tableau 4.10). Finalement, la valeur trouvée dans la zone 2 et celle de la zone 3 sont additionnées pour comparaison avec le coût de vente des sables. L'abaque permet donc de comparer les deux valeurs, puis de prendre une décision du choix à faire (acheter le sable des carrières ou traiter les argiles par la chaux). Le coût de transport vers le chantier restera toutefois le facteur déterminant et sera à calculer au cas par cas.

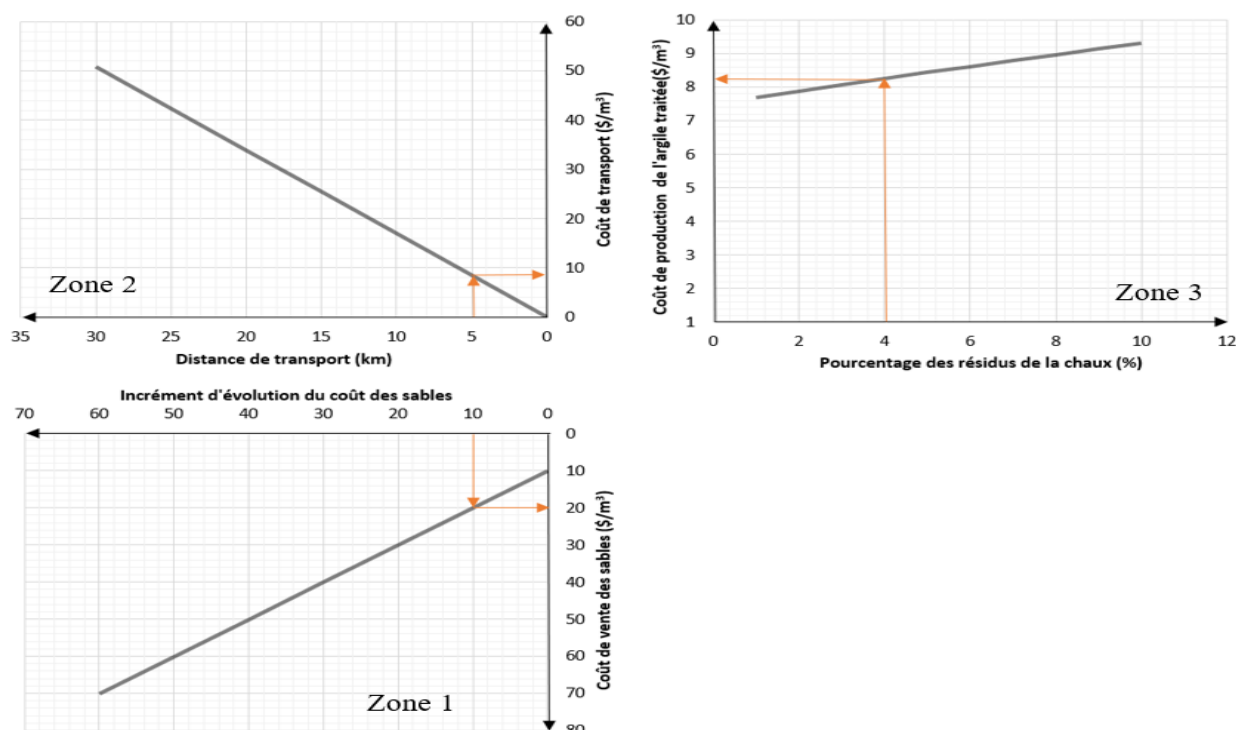


Figure 4.10: Abaque généralisé qui permet la comparaison entre le coût de vente des sables (\$/m³) et le coût de vente de l'argile traitée (\$/m³).

CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS

Cette étude visait à valider la technique de stabilisation des argiles avec des résidus industriels de la chaux, ainsi que l'utilisation de l'argile traitée comme couche de fondation ou de sous-fondation pour les chaussées au Québec. Cette étude visait aussi à faire une étude économique du projet pour le calcul du gain lors de l'utilisation de la méthode de stabilisation des sols en place en compétition avec les chaussées conventionnelles. Le processus a débuté par la détermination du point de fixation de la chaux, suivi par les essais géotechniques listés par la MTQ pour la caractérisation d'un matériau comme couche de fondation ou de sous-fondation pour les chaussées. Ces objectifs ont été atteints au travers le chapitre 3 et le chapitre 4 a permis la validation de la rentabilité économique du traitement. Le présent chapitre vise à discuter des résultats ainsi obtenus.

5.1 Avantage technico-économique de stabilisation des argiles avec les résidus de la chaux de type LKD

Dans cette partie, le but est de discuter des performances mécaniques obtenues à la suite de la stabilisation de l'argile avec les résidus industriels de la chaux (TDS-257-3524). Les résultats des essais expérimentaux montrent que le traitement de l'argile avec 4% des résidus de la chaux est efficace sur les caractéristiques mécaniques de l'argile. Plusieurs remarques ont toutefois été soulevées. Le sol traité a présenté des avantages ainsi que des désavantages. Les avantages reflètent les caractéristiques positives du traitement, qui sont les suivantes : (1) le passage d'une argile à un sable silteux de type SP, (2) la diminution de l'indice de plasticité du sol de 50% à 20,79%, (3) un décalage de la courbe Proctor vers les teneurs en eau faibles, une diminution de la teneur en eau optimale de 31,25% à 28,5 % et une diminution de la masse volumique sèche optimal de 1,42 Mg/m³ à 1,306 Mg/m³, ainsi (4) qu'une augmentation de la résistance à la compression du sol de 127,27 kPa à 760 kPa. Pour les désavantages, ils montrent à leur tour des caractéristiques négatives du traitement, qui sont que : (a) l'argile traitée n'arrive pas à satisfaire toutes les performances mécaniques exigées par le MTQ, (b) l'indice de plasticité n'est pas nul et vaut à 20,79%, ce qui montre que le sol traité reste plastique, et que (c) seule la portion du sol traité entre 0,08 mm et 2,5 mm peut être utilisée pour remplacer cette même portion dans le MG 112.

L'étude économique réalisée dans le présent mémoire a montré que la technique de traitement permet de réaliser une rentabilité intéressante, soit dans le domaine routier (14,40 % de gain), soit dans l'optimisation de la distance maximale de transport de l'argile traitée de la plateforme de traitement vers les débouchés visés (804 m). Cette valeur est faible, et montre ainsi que la plateforme de traitement est rentable si le chantier devant utiliser les matières premières est proche de la plateforme de traitement comparativement aux sablières.

Il est toutefois à noter que le gain économique obtenu (14,40%) est un gain minimal, car des coûts supplémentaires peuvent être ajoutés dans le calcul du coût de la chaussée conventionnelle. Ces coûts sont relatifs au prix de transport des matériaux granulaires, ce qui montre que la rentabilité économique augmentera avec l'augmentation de la distance de transport des matériaux. Par ailleurs, d'autres coûts doivent être pris en considération dans les deux cas d'études, à savoir : les coûts environnementaux liés à la génération des gaz à effet de serre (GES) du fait du transport des matériaux (résidus de chaux par rapport au MG20 et MG112), ainsi que les coûts d'entreposage des résidus de chaux s'ils ne sont pas valorisés.

L'abaque réalisé permet de déterminer la distance de transport des argiles à traiter lorsque le coût de vente du sable augmente à cause de la pénurie de sable. Le mémoire a également proposé trois autres abaques, dont deux dans le cadre des chaussées (section 4.3). L'avantage de ces deux abaques est qu'ils prennent en considération la variation de plusieurs facteurs (variation de la teneur du dosage, du coût des travaux et de la distance de transport), et qu'ils s'inscrivent comme un outil de décision du choix économique de la méthode à appliquer. Le troisième abaque (section 4.4.2) est destiné à la plateforme de traitement. Ce dernier vise à comparer le coût de l'argile traitée et celui du sable de construction; il prend en considération la variation du dosage et la distance de transport des argiles vers la plateforme de traitement. Ainsi, pour un coût de production de l'argile traitée à 10% de chaux et un coût de vente des sables de 20 \$/m³, le sol traité sera rentable si la distance de transport est inférieure à 9,5 km. Ceci montre que la distance de transport a un grand impact sur la prise de décision de la méthode à appliquer. Sachant que la distance de transport du sol à traiter et le dosage seront déterminés au début (données de base), l'utilisation de l'abaque permet finalement de choisir la méthode à suivre : (1) traitement des sols en place, (2) mise en place d'une plateforme au voisinage du site ou bien (3) l'achat de sable.

À l'heure actuelle, la protection de l'environnement est un sujet de valeur très élevée et les mesures à prendre en considération sont en hausse afin de limiter les impacts de l'activité de l'homme sur l'environnement. Dans le but de suivre les tendances du marché et de permettre la préservation des ressources naturelles, la présente étude propose donc de traiter les argiles en place avec les résidus de la chaux afin de chercher des solutions alternatives de production des sables pour s'éloigner du problème de la pénurie des sables. Cette technique a deux autres avantages, la première est d'utiliser les argiles prépondérantes du Québec, et la deuxième est de valoriser les résidus de la chaux, qui ont montré d'après l'étude expérimental une amélioration des propriétés géotechniques de l'argile comme il est le cas du comportement des argiles avec la chaux pure normalement utilisée pour la stabilisation des argiles. Dans la même perspective, il est intéressant de voir d'autres applications de l'argile traitée dans la construction, c'est ce qui sera présenté dans la section 5.2 suivante.

5.2 Débouchés alternatifs de la technique du traitement des argiles avec LKD

5.2.1 Application du sol traité aux fondations des bâtiments au Québec

« Au Québec, les sols argileux se situent dans les parties les plus habitées, comme la vallée du Saint-Laurent, la vallée de l'Outaouais et la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean. Ainsi, construire une maison sur un tel type de sol est une pratique courante » (Écohabitation, 2020). Ces argiles causent, en été, de graves fissurations et des tassements importants. Le choix de fondation dépend de la capacité portante du sol (CIV3420 - Fondations et mécanique des sols. Méthodes et applications, 2021), mais également de la profondeur des sols sujets au phénomène de retrait/gonflement, du degré de réaction des couches jusqu'à cette profondeur et de l'action du gel (Hamilton, 1977). Dans le cas d'une construction de fondations peu profondes sur des dépôts argileux gonflables, habituellement rencontrés dans les dépôts lacustres au centre et à l'Ouest du Canada, ou sur des argiles sujet au retrait, habituellement rencontrées dans les vallées du Saint-Laurent et de l'Outaouais, les semelles superficielles étendues et les dalles sur terre-plein sont les techniques généralement utilisées, mais cela n'empêche pas d'avoir des soulèvements différentiels qui présentent un risque allant de modéré à fort (Hamilton, 1977). Par ailleurs, dans le cas des fondations profondes utilisant des pieux, la charge appliquée par le bâtiment est transférée aux

parties profondes du sol, donc les mouvements différentiels peuvent toucher les autres composantes enterrées du bâtiment. Il serait donc pertinent de penser à ces problématiques et d'essayer de réduire le potentiel de gonflement par un traitement aux résidus de chaux. L'étude réalisée dans ce mémoire permettrait ainsi de diminuer les frais d'entretien des dégâts structuraux liés aux fissurations et aux fléchissements des dalles.

5.2.2 Autres applications possibles de l'argile traitée

Le but de cette section est d'étudier autres possibilités d'utilisation de l'argile traitée en dehors des projets routiers. La recherche des applications de l'argile traitée est une voie très intéressante qui permet de valoriser les matériaux prépondérants dans l'environnement québécois, cette vision s'inscrit dans le processus du développement durable qui vise à préserver les ressources naturelles non renouvelables.

L'argile traitée peut être utilisée comme matériau de remblayage des tranchées et des fossés qui font partie des structures des chaussées. L'entretien des réseaux souterrains sous les chaussées comme la mise en place des fils d'électricité, du gaz naturel, réseaux sanitaires et pluviales, implique le creusement des tranchées dans les chaussées. Ces tranchées entraînent une augmentation des frais d'entretien des chaussées sans mentionner l'endommagement qui sera attribué au confort de roulement, ainsi que le problème d'infiltration d'eau aux couches de la chaussée. De ce qui précède, le remblaiement des tranchées sera nécessaire par des matériaux convenables qui seront à la fois des matériaux judicieux et qui ne font pas nuire aux coûts d'entretien. Selon le centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) (2006), les matériaux recyclés peuvent être utilisés comme matériau de remblaiement au lieu d'utiliser les matériaux naturels comme le sable ou le gravier sablonneux. Cette indication permet de voir une application de l'argile traitée comme matériau de remblayage des tranchées, avec un géotextile en dessus afin d'empêcher l'infiltration d'eau en dessous de la tranchée. Cela permettrait d'utiliser les argiles prépondérantes au Québec à des fins de construction.

Une autre application des argiles traitées serait de les utiliser comme des merlons au pied des versants qui présentent un risque d'effondrement de roches ou de pierres. Ces merlons sous forme de remblais d'argiles traitées pourraient jouer un rôle d'écran phonique ou bien visuel, ou même comme un masque permettant de détourner le sens des pierres ou des roches qui tombent d'une falaise ou d'un versant ("Merlon (génie civil)," 2021).

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Éléments de synthèse

L'objectif de cette recherche était d'effectuer une série d'essais dans le but de :

- (1) valider la méthode de stabilisation de l'argile de Saint-Marc-sur-Richelieu avec des résidus industriels de chaux,
- (2) améliorer les propriétés mécaniques des argiles en place et valider leur utilisation comme couche de fondation ou de sous-fondation d'une chaussée,
- (3) réaliser une étude économique du projet afin de calculer le gain produit lors de l'utilisation de la technique de stabilisation avec les résidus et au lieu de la solution conventionnelle dans le domaine routier,
- (4) trouver le rayon maximal d'une plateforme de traitement des argiles qui viserait à traiter les argiles et à les proposer en remplacement des matières premières (sable des carrières ou des sablières).

Plusieurs conclusions ont été obtenues :

- (1) un traitement de l'argile de Saint-Marc-sur-Richelieu basé sur le calcul du point de fixation de la chaux a été établi, permettant de trouver le pourcentage des résidus industriels à utiliser pour le sol étudié : 4% de LKD;
- (2) en appliquant les spécifications du MTQ concernant les essais géotechniques pour la caractérisation d'un matériau granulaire dans les chaussées au Québec, les résultats montrent qu'une portion du sol de 0,08 mm à 2,5 mm peut remplacer cette même portion dans les matériaux de construction de base, en termes de granulométrie, mais que plusieurs caractéristiques ne sont pas atteintes,
- (3) la comparaison des coûts de construction d'une chaussée traitée montre que l'utilisation des résidus industriels de la chaux comme stabilisateur offre une économie de 14,40% par rapport au coût de la chaussée conventionnelle,
- (4) à distances de transport égales vers le chantier de construction, la mise en place d'une plateforme de traitement ne serait rentable par rapport à l'achat de matières premières

(sable) que si elle utilise de l'argile locale. La construction de plateformes de traitement dans des secteurs dépourvus de carrières ou sablières irait toutefois en leur faveur, les rendant compétitives par rapport au coût de transport du sable.

- (5) La création d'un abaque dans le cas de la stabilisation avec 4 % des résidus de la chaux, a permis de voir l'impact de l'augmentation du coût de vente des sables sur la distance maximale de transport des argiles à traiter (sable fin). L'hypothèse d'augmentation du coût de vente des sables est élaborée à la suite de la pénurie mondiale des sables. La rareté des sables entraînera l'augmentation de son coût. La courbe réalisée montre que la distance de transport des argiles à traiter augmentera avec l'élévation du coût de vente des sables et qu'une plateforme de traitement pourrait ainsi récupérer les argiles d'un plus grand secteur.
- (6) L'argile traitée pourrait être utilisée dans la construction des chaussées non revêtues, ce qui permettrait de diminuer les coûts engendrés par le transport des matériaux granulaires vers les sites éloignés.
- (7) La stabilisation des argiles permet de produire des sables fins silteux et de lutter contre la pénurie annoncée de sables.

6.2 Recherches futures

Au terme de cette étude, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour de futurs travaux de recherche :

- (1) Comme les essais de laboratoire ont porté spécifiquement sur l'argile de St-Marc-sur-Richelieu, il serait opportun de vérifier la réponse mécanique d'autres types d'argile face au traitement avec les résidus de la chaux,
- (2) Il serait également intéressant d'étudier l'effet de la stabilisation avec les résidus sur le sol dans des conditions climatiques sévères (cycles gel/dégel),
- (3) Finalement, le comportement de fondations de bâtiments sur argiles traitées pourrait être étudié.

RÉFÉRENCES

- AASHTO. (1993). *Guide for design of pavement structures*. American association of state highway and transportation officials <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>
- Association québécoise des transports. (2012). *Mesures de performance des réseaux routiers*. <https://www.tac-atc.ca/sites/default/files/site/doc/Bookstore/ptm-phwyn-f-finalpub.pdf>
- ASTM International. (2019). *Standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization* (Norme ASTM D6276–2019). <https://doi.org/10.1520/D6276-19>
- ASTM International. (2020). *Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys* (Norme ASTM D6433 – 2020). <https://doi.org/10.1520/D6433-20>
- ASTM International. (2021). *Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis* (Norme ASTM D7928–(2021)). <https://doi.org/10.1520/D7928-21>
- Autret, P. (1997). *Étude des routes non revêtues VIZIRET système de gestion de l'entretien d'un réseau routier*. Laboratoires des ponts et chaussées. https://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc_210_3-22.pdf
- Balasubramaniam, A., & Buensuceso Jr, B. (1989). *On the overconsolidated behavior of lime treated soft clay*. Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. 12 (p. 1335-1338).
- Bamako. (2006). *Dégradations de surface des routes non revêtues* [Présentation PowerPoint]. <https://www.piarc.org/ressources/documents/actes-seminaires06/c42-mali06/8676,8-MOuedraogo.pdf>
- Bergeron, G. (2005). *Performance des techniques de retraitement en place et de recyclage à froid au Québec*. Association des transports du Canada à Calgary. <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2005/docs/s19/bergeron-f.pdf>
- Bergeron, G. (2008). *Performance des techniques de retraitement en place et recyclage à froid au Québec*. <https://www.bitumequebec.ca/wp-content/uploads/2015/06/performancedestechniquesafroid-gbergeron.pdf>

Bernier Racine, M.-A. (2018). *Étude expérimentale sur la formulation des sols-ciment en contexte québécois* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec]. Espace ETS. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2202/>

[#115 est un type de document non défini dans ce style].

Brandl, H. (1981). *Alteration of soil parameters by stabilization with lime*. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume 3, Stockholm.

Bufalo, M., Gandille, D., & Vezole, P. (2009). *Guide pour la réalisation des terrassements des plateformes de bâtiments et d'aires industrielles dans le cas de sols sensibles à l'eau*. https://www.egfbtp.com/sites/default/files/dt0021_terrassements.pdf

Bureau de normalisation du Québec. (2014). *Spécifications NQ 2560-114*. https://ena.etsmtl.ca/pluginfile.php/123735/mod_resource/content/2/Module%201%20-%20Sp%C3%A9cifications%20du%20MT.pdf

Carter, A. (2018). *Reconnaitre les types de dégradation des chaussées municipales*. https://www.etsmtl.ca/Publications/Articles/2018/viabitume_carter_20180423

centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU). (2006). *Remblayage des tranchées, sommaire des pratiques courantes au Québec et recommandations*. <https://ceriu.qc.ca/system/files/2018-06/RAPPORT-remblayage-des-tranchees-sommaire-des-pratiques-courantes-au-Quebec-et-recommandations.pdf>

CERIU. (2010). *Guide de bonnes pratiques de réparation de nids de poule*. <https://ceriu.qc.ca/system/files/2018-06/GUIDE-de-bonnes-pratiques-de-reparation-de-nids-de-poule.pdf>

Chalifoux, J. (2013). *La valorisation des sols peu contaminés au Québec* [Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke]. Savoirs UDES. <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7098>

CIV3420 - Fondations et mécanique des sols. Méthodes et applications. (2021). Moodle@Polytechnique Montreal. <https://moodle.polymtl.ca/>

CIV8450-dimensionnement de chaussées : routes pour véhicules hors normes et routes non revêtues. (2020). Moodle@Polytechnique Montreal. <https://moodle.polymtl.ca/>

Cuisinier, O., Auriol, J.-C., Le Borgne, T., & Deneele, D. (2011). Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Elsevier*, 123(3), 187-193. <https://doi.org/doi:10.1016/j.enggeo.2011.07.010>

Diffiné, T. (2012). *Analyse des déformations d'une chaussée contenant des matériaux bitumineux recyclés à froid*, École de technologie supérieure]. Espace ETS. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1076/>

Direction de la géomatique. (2021). *Carrières et sablières susceptibles de servir à la fabrication de l'enrobé bitumineux*. Direction de la qualification des produits, de l'approvisionnement et des opérations contractuelles centralisées. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussees/cartes-carrieres-sablieres-centrales-enrobage/Documents/25CarteCarrieresSablieresMontrealEnvirons.pdf>

Direction du laboratoire des chaussées. (2003). *Analyse de la fissuration des chaussées au moyen d'images vidéo*. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/info-dglc/Documents/2003/03-10.PDF>

Direction du laboratoire des chaussées. (2010). *Comparaison des coûts de construction routière entre le Québec, le Nouveau-Brunswick et l'Ontario*. Ministère des transports du Québec. https://www.ceic.gouv.qc.ca/fileadmin/Fichiers_client/centre_documentaire/Piece_4P-109.pdf

Dufresne, S., Gaulin, J.-P., Bonneau, L., & Laporte-Saumure, M. (2019). *Analyse d'impact réglementaire des règlements sur la gestion des sols contaminés* [20]. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/terrains/tracabilite/air-201907.pdf>

Écohabitation. (22 juillet 2020). *Construction d'une dalle sur sol argileux: le guide de A à Z*. <https://www.ecohabitation.com/guides/3585/construction-une-dalle-sur-sol-argileux-le-guide-de-A-a-Z/>

Flon, P., & Besner, J. (1987). *Étude en laboratoire de mélanges d'argiles ou de sable avec des additifs minéraux pour le traitement d'infrastructures routières : Rapport final* (RTQ-87-08). M. d. transports. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1137885.pdf>

Giroux, A. (1947). *Dépôts d'argile et de shiste du Québec*. Ministère des richesses naturelles du Québec. <http://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/examine/GM13929/GM13929.pdf>

Giummarra, G. J. (2009). *Unsealed Roads Manual: Guidelines to Good Practice*. ARRB Group,.

Gouvernement du Québec. (2021a). *Thésaurus de l'activité gouvernementale - route nationale*.
<http://www.thesaurus.gouv.qc.ca/tag/terme.do?id=11273>

Gouvernement du Québec. (2021b). *Thésaurus de l'activité gouvernementale - route régionale*.
<http://www.thesaurus.gouv.qc.ca/tag/terme.do?id=11275>

Graymont. (2019a). *Applications du lait de chaux*.
<https://www.graymont.com/fr/marches/construction-de-batiments/lait-de-chaux>

[#110 utilise un type de document non défini dans ce style].

Graymont. (2019c). *Sous-produits*. <https://www.graymont.com/fr/produits/sous-produits>

Graymont. (2019d). *What is lime?* <https://graymont.com/en/what-lime>

Hamilton, J. J. (1977). *Fondations dans les sols sujets à des gonflements ou à des retraits : Rapport final*. Conseil national de recherches du Canada. Division des recherches en construction.
<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/td/?id=b537e918-7c6c-455e-87ea-463b0e8d1d2f>

Hérard, P. (11 février 2020). *Pénurie de sable : un enjeu planétaire environnemental et économique*. TV5Monde. <https://information.tv5monde.com/info/penurie-de-sable-un-enjeu-planetaire-environnemental-et-economique-185813>

Histoire de la Grande Muraille. (8 avril 2021). Dans Wikipédia.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_Grande_Muraille

Holt, C. (2010). *Chemical stabilization of inherently weak subgrade soils for road construction-applicability in Canada*. Association des transports du Canada. <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2010/docs/d1/holt-2.pdf>

Holtz, R., & Kovacs, W. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall, Inc.

Huot, P.-Y., Huppé, J., & Langlois, P. (2006). *Mesures d'orniérage à l'aide d'un transversoprofilographe*. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1164490.pdf>

IDRRIM. (2015). *Chaux de construction* (Norme NF EN 459-1:(2012)).
https://www.idrrim.com/ressources/documents/6/3254,Note-d-Info-29-IDRRIM-Norme-Chaux_F.pdf

InfraStructures. (2021). *Drainage des chaussées*.
<http://www.infrastructures.com/ceriu/ceri0103.htm>

Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1972). *Soil stabilization principles and practice*.

Julien, B., & Pamart, L. (2019). Géopolitique du sable. Entre rareté, conséquences environnementales et enjeux diplomatiques. *Diploweb.com : la revue géopolitique*, 13(2111-4307), 2-8. file:///C:/Users/Admin/Downloads/article_2022%20(1).pdf

La Direction des chaussées. (2019). *Bilan de l'état des chaussées du réseau supérieur québécois*. Ministère des Transports. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussees/Documents/bilan-chaussees.pdf>

Lacroix, P., Ait Bouzaid, M., Gagné, A., Fakhfakh, Y., & Niox, G. (2020). *Granulats pour fondation, assise et remblai*. file:///C:/Users/Admin/Downloads/dtni-10c_20200803.pdf

Lafleur. (1991). *Cours CTN 504 Mécanique des sols*. <https://slideplayer.fr/slide/1584244/>

LCPC, & SETRA. (2000). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques-application à la réalisation des remblais et des couches de forme-guide technique* (ISBN : 2-7208-3810-1). d. T. Ministère de l'Équipement, et du Logement. <https://www.chercheinfo.com/uploads/1958-0cc46bff31.pdf>

Légère, G. (2001). *Étude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestière* [Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure]. Espaces ETS. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/846/>

Leroueil, S., Tavenas, F., & Le Bihan, J.-P. (1983). Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 20, 682-705. <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.1139/t83-076>

Les argiles sensibles au Québec. (2011). <http://www.simplegeo.ca/2011/05/les-argiles-sensibles-au-quebec.html>

Little, D. N. (1987). *Fundamentals of the Stabilization of Soil with Lime*. National Lime Association.

MDDELCC. (2017). *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés: Plan d'action 2017-2021* [34].

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/politique.pdf>

MDDELCC. (2021). *Programme ClimatSol-Plus*.

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/climatsol-plus/>

Merlon (génie civil). (13 juillet 2021). Dans Wikipédia.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Merlon_\(g%C3%A9nie_civil\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Merlon_(g%C3%A9nie_civil))

Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, & Ministère de l'économie et des finances. (2016). *Prospective - Marché actuel et offre de la filière minérale de construction et évaluation à échéance de 2030- Rapport final*.

https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2016-11-Filiere-minerale-construction-Rapport-pipame.pdf

Ministère de l'équipement, des transports et du logement. (1998). *Assises de chaussées- Guide d'application des normes pour le réseau routier national*. <http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0001/Dtrf-0001927/DT1927.pdf?openerPage=notice>

Ministère de transport de Québec. (2021). *Recueil des tarifs de camionnage en vrac*. file:///C:/Users/Admin/Downloads/recueil-tarifs-2021%20Mars%20(3).pdf

Ministère des transports de Québec. (2020a). *Liste et prix des ouvrages d'infrastructures de transport*. file:///C:/Users/Admin/Downloads/2017_20.pdf

Ministère des Transports de Québec. (2020b). *Règlement sur les normes de charges et de dimensions applicables aux véhicules routiers et aux ensembles de véhicules routiers*. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/cr/C-24.2.%20R.%2031.pdf>

Ministère des transports de Québec. (2021a). *Dégel – Période de restrictions de charges*. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/degel/Pages/periode-restrictions.aspx>

Ministère des transports de Québec. (2021b). *Guide d'élaboration d'un plan d'intervention 2021-2024*. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/aide-finan/municipalites/programme-aide-voirie/Documents/pav1-2021-2024/Guide-elaboration-plan-intervention-2021-2024.pdf>

Ministère des transports de Québec. (2021c). *Guide d'assurance de la qualité – sols et matériaux granulaires*, édition 2021.

http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier/guides/guide36.fr.html

Ministère des Transports de Québec. (2021d). *Permis spéciaux pour excès de charges et dimensions – Classes 1 à 7*. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/permis-speciaux/Pages/classes-1-a-7.aspx>

Ministère des Transports du Québec. (2020). *Information sur le réseau routier*. <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/projets-infrastructures/info-reseau-routier/Pages/information-sur-le-reseau-routier.aspx>

MTQ. (2019). *La protection du réseau routier: une priorité*. Ministère des Transports. https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/degel/Documents/fiches_degel.pdf

Nguyen, T.-T.-H. (2015). *Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel* [Thèse de doctorat, Université Paris-Est]. <https://core.ac.uk/download/pdf/48320229.pdf>

Paskoff, R. (1998). *La crise des plages: pénurie de sédiments* [11-15]. Mappemonde. <http://www.mgm.fr/PUB/Mappemonde/M498/Paskoff.pdf>

Pelletier, D. B. (2019a). *Comment éviter la pénurie annoncée de sable?* Radio-Canada. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1115759/penurie-sable-comment-eviter-canada-quebec-recycler>

Pelletier, D. B. (2019b). *Le sable, autant indispensable que surexploité*. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1115734/sable-construction-quotidien-penurie-monde>

Pelletier, L. (2007). *Étude comparative de la performance en laboratoire de matériaux granulaires stabilisés utilisés comme surfaces de roulement pour les chaussées non revêtues* [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. CorpusUL, Université Laval's Institutional repository. <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/19575>

Plante, S., & Leroux, D. (1995). *Évaluation subjective du confort de roulement*. Ministère de Transport de Québec <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1144000.pdf>

Pouliot, N., Savard, Y., De Blois, K., & Boutonnet, M. (19-22 septembre 2004). *Comportement de fondations stabilisées au ciment et au bitume dans un climat froid* [Communication de conférence]. l'Association des transports du Canada, Québec, QC. <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2004/docs/s3/pouliot-f.pdf>

Ressources naturelles Canada. (2008). *Argiles*. <https://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/mineralsmetals/pdf/mms-smm/busi-indu/cmy-amc/2008revu/pdf/cla-arg-fra.pdf>

Ritchie Specs. (2018). *Hitachi eh3000 rock truck*. <https://www.ritchiespecs.com/model/hitachi-eh3000-rock-truck>

Ruffenach, E. (2019). *L'extraction de sable marin en France, une activité très encadrée*. Le Figaro. https://immobilier.lefigaro.fr/article/l-extraction-de-sable-marin-en-france-une-activite-tres-encadree_13154504-929d-11e9-bbe0-3557fdf7f672/

Sambe, A. M., Doyon, P., & Beaulieu, J. (2016). *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier* (ISBN 978-2-550-76774-9). Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1192666.pdf>

Sarkar, R., & Dawson, A. R. (2017). Economic assessment of use of pond ash in pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 18, 578-594. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1095915>

Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada. (2021). *Trouver des sites selon la classification*. <https://www.tbs-sct.gc.ca/fcsi-rscf/classification-fra.aspx?qid=416262>

The Indian Road Congress. (2001). *Guidelines for the design of flexible pavements* [40]. <https://thelibraryofcivilengineer.files.wordpress.com/2015/09/irc-37-2001-guidelines-for-the-design-of-flexible-pavements-2nd-revision.pdf>