

LUC BEAULIEU

**INFLUENCE DE LA GRANULOMÉTRIE ET DE LA
MINÉRALOGIE SUR LE COMPORTEMENT D'UN
MATÉRIAU GRANULAIRE STABILISÉ OU
TRAITÉ À L'AIDE D'ABAT-POUSSIÈRE**

Mémoire présenté
à la Faculté des Études Supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise avec mémoire en génie civil
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
FACULTÉ DE SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2011

Résumé

Les travaux réalisés dans le cadre de cette maîtrise s'inscrivent dans le vaste projet CARRLo (Chemin d'Accès aux Ressources et Routes LOcales) visant à améliorer la qualité des routes non revêtues en contexte climatique nordique canadien.

À cause entre autres de l'achalandage réduit et de l'éloignement de la plupart des routes non revêtues, le pavage de ces dernières est une tâche ardue et dispendieuse qui est très peu réaliste, du moins à grande échelle. Toutefois, devant la place sans cesse grandissante qu'occupe la sécurité dans les transports, le contrôle de la stabilisation des routes non revêtues et de la poussière engendrée par la circulation est devenu nécessaire. De plus, face à la rigueur du climat nordique le défi n'est pas seulement de contrôler la poussière, mais aussi de stabiliser les chemins non revêtus en trouvant des produits efficaces dans un contexte de gel et de dégel afin d'augmenter la période où les routes sont praticables.

Plusieurs travaux portent sur la performance de divers agents stabilisants et produits d'abat-poussière. Le caractère novateur du présent travail se situe dans l'étude de l'influence de la granulométrie et de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière. Pour ce faire, un programme expérimental d'envergure comprenant des essais de module réversible modifié, de capacité portante, de compression non confinée et de cisaillement direct sont réalisés. Une validation des résultats du programme expérimental sera également effectuée en conditions réelles à l'aide de planches d'essais. L'objectif final des travaux consiste à être en mesure de proposer des familles de produits stabilisants et d'abat-poussière dans un contexte minéralogique et granulométrique précis et en fonction d'objectifs déterminés.

Les résultats montrent une réelle influence de la granulométrie et de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière. De plus, les agents stabilisants à l'étude ont démontré qu'ils contribuent à améliorer de manière considérable les propriétés mécaniques d'un matériau granulaire.

Remerciement

Dans un premier temps, je tiens à remercier ma directrice de recherche Pascale Pierre pour ses précieux conseils et sa disponibilité. Elle a su rendre cette expérience a priori académique des plus enrichissantes sur le plan professionnel et personnel.

Je tiens également à remercier Sylvain Juneau, Edmond Rousseau, Christian Juneau, Philippe Poulin, Olivier Sigouin, Rémi Roy, Simon Hébert-Daigle et Sophie Lepage pour leur aide et leurs conseils tout au long de mes travaux.

De plus, un merci spécial à Glen Légère et Luc Lebel qui ont accepté de se joindre à Pascale afin d'évaluer mes travaux de recherche.

Finalement, je remercie du fond du cœur mes parents qui m'ont supporté moralement et financièrement tout au long de mes études universitaires et sans qui je n'aurais probablement pas réalisé ce projet de maîtrise.

À mes parents,

Table des matières

Résumé.....	II
Remerciement.....	III
Liste des tableaux.....	8
Liste des figures.....	12
1. Introduction.....	18
1.1 Mise en contexte	18
1.2 Problématique	19
1.3 Objectif	19
1.4 Méthodologie	20
2. État des connaissances.....	21
2.1 Les défauts de la route	21
2.2 Les différentes familles de produits.....	25
2.2.1 Les sels et produits hygroscopiques.....	25
2.2.2 Les polymères.....	26
2.2.3 Les produits organiques.....	27
2.2.4 Les produits synthétiques.....	29
2.2.5 Les produits dérivés du pétrole.....	29
2.2.6 Les produits électrochimiques	31
2.2.7 Les enzymes.....	32
2.2.8 Les produits cimentaires	33
2.3 Conclusion	33
3. Programme expérimental.....	35
3.1 Paramètres visés.....	35
3.1.1 Module Réversible modifié	35
3.1.1.1 Préparation des échantillons	37
3.1.1.2 Réalisation des essais	38
3.1.2 Capacité portante (CBR modifié)	40
3.1.2.1 Préparation des échantillons	41
3.1.2.2 Réalisation des essais	42
3.1.3 Compression non confinée.....	44

3.1.3.1 Préparation des échantillons	45
3.1.3.2 Réalisation des essais	47
3.1.4 Cisaillement direct	49
3.1.4.1 Préparation des échantillons	49
3.1.4.2 Réalisation des essais	50
3.2 Essais de caractérisation géotechnique des matériaux granulaires utilisés.....	54
3.2.1 Analyse granulométrique par tamisage (BNQ 2560-040)	54
3.2.2 Proctor modifié (BNQ 2501-255).....	59
3.2.3 Capacité portante (CBR modifié) (ASTM D 1883).....	63
3.2.4 Résistance à l'abrasion à l'aide de l'appareil Los Angeles (BNQ 2560-400)	64
3.2.5 Coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil micro-Deval (BNQ 2560-070)	66
3.2.6 Densité et Absorptivité des gros granulats (BNQ 2560-065) et des granulats fins (BNQ 2560-067).....	68
3.2.7 Bleu de méthylène (LC 21-255)	71
3.2.8 Conclusion des essais de caractérisation géotechnique	72
3.3 Produits abat-poussière et agents stabilisants à l'étude	72
3.4 Présentation et discussion des résultats de laboratoire	75
3.4.1 Influence de la granulométrie	81
3.4.2 Influence de la minéralogie.....	92
3.4.3 Remarques générales sur les abat-poussière et les agents stabilisants à l'étude.....	102
4. Validation des résultats	113
4.1 Essais sur le terrain en conditions réelles	113
4.1.1 Réalisation des travaux à Rivière-aux-Rats	113
4.1.1.1 Caractérisation du matériau granulaire.....	115
4.1.1.2 Réalisation des planches.....	120
4.1.2 Résultats.....	123
4.1.2.1 Paramètres visés	123
4.1.2.1.1 <i>Détériorations de la route</i>	123
4.1.2.1.2 <i>Essais de déflectomètre à masse tombante portatif (LWD)</i>	125
4.1.2.2 Présentation des résultats	129
5. Conclusions et recommandations	139
5.1 Performance d'un matériau granulaire traité ou non	139
5.2 Validation en conditions réelles.....	141
5.3 Conclusion générale.....	142

Bibliographie	144
Annexe A : Données des essais sur le terrain en conditions réelles.....	149
Annexe B : Résultats absolus des différents produits pour chaque essai effectué sur les différentes minéralogies et granulométries	161

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Appellation des matériaux granulaires en fonction de la taille des particules (selon le Ministère des Transports du Québec, tiré de Leroueil 2004).....	55
Tableau 3.2: Résultat des coefficients d'uniformité et de courbure pour les différentes granulométries et minéralogies.....	59
Tableau 3.3 : Résultats des essais de Proctor modifié pour les différentes granulométries des trois minéralogies.	61
Tableau 3.4 : Résultats pour l'essai de la capacité portante pour les différentes granulométries des trois minéralogies.	63
Tableau 3.5 : Résultats obtenus pour l'essai de la résistance à l'abrasion à l'aide de l'appareil Los Angeles.	65
Tableau 3.6 : Résultats obtenus pour l'essai de la résistance à l'usure à l'aide de l'appareil micro-Deval.	67
Tableau 3.7 : Résultats obtenus pour les essais de densité et d'absorption.	70
Tableau 3.8 : Résultats obtenus pour les essais au bleu de méthylène	71
Tableau 3.9 : Produits à l'étude et leurs différents taux de pose.	73
Tableau 3.10 : Propriétés des différents produits à l'étude.....	74
Tableau 3.11 : Résultats relatifs du programme expérimental pour le gneiss granitique.	77
Tableau 3.12 : Résultats relatifs du programme expérimental pour le basalte.	78
Tableau 3.13 : Résultats relatifs du programme expérimental pour le calcaire.....	79
Tableau 4.1 : Résultats de la caractérisation du matériau granulaire sur les planches d'essai à Rivière-aux-Rats.	116
Tableau 4.2 : Échelle de sévérité pour les ornières et les planches à laver.....	124
Tableau 4.3 : Échelle de sévérité pour les nids-de-poule.....	124
Tableau 4.4 : Tableau présentant l'analyse des défauts de la route en fonction du temps pour les planches témoin et stabilisée.....	130
Tableau 4.5 : Évolution des paramètres SCI et BDI à différentes pressions pour la section de référence et la section stabilisée.....	136

Tableau A-1: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 11 juillet 2008.....	150
Tableau A-2: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 11 juillet 2008.	150
Tableau A-3: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 28 juillet 2008.....	151
Tableau A-4: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 28 juillet 2008.	151
Tableau A-5: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 5 août 2008.....	152
Tableau A-6: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 5 août 2008.....	152
Tableau A-7: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 19 août 2008.....	153
Tableau A-8: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 19 août 2008.....	153
Tableau A-9: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 4 septembre 2008.	154
Tableau A-10: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 4 septembre 2008.	154
Tableau A-11: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 18 septembre 2008.	155
Tableau A-12: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 18 septembre 2008.	155
Tableau A-13: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 8 octobre 2008.....	156
Tableau A-14: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 8 octobre 2008.....	156
Tableau A-15: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 11 juillet 2008.....	157

Tableau A-16 : Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 28 juillet 2008.....	157
Tableau A-17 : Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 5 août 2008.....	158
Tableau A-18: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 19 août 2008.....	158
Tableau A-19: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 4 septembre 2008.....	159
Tableau A-20: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 18 septembre 2008.....	159
Tableau A-21: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 8 octobre 2008.....	160

Tableau B-1 : Résultats absolus pour l'essai du cisaillement direct pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	162
Tableau B-2 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la compression non confinée pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	162
Tableau B-3 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai du MR modifié pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	163
Tableau B-4 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 2,5 mm d'enfoncement pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	163
Tableau B-5 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 5 mm pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	164
Tableau B-6 : Résultats absolus pour l'essai du cisaillement direct pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	164

Tableau B-7 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la compression non confinée pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	165
Tableau B-8 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai du MR modifié pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	165
Tableau B-9 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 2,5 mm d'enfoncement pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.....	166
Tableau B-10 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 5 mm pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	166
Tableau B-11 : Résultats absolus pour l'essai du cisaillement direct pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	167
Tableau B-12 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la compression non confinée pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	167
Tableau B-13 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai du MR modifié pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	168
Tableau B-14 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 2,5 mm d'enfoncement pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.....	168
Tableau B-15 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 5 mm pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.	169

Liste des figures

Figure 2.1: Présence de planches à laver sur une route non revêtue (source : Skorseth et Salim (2000)).	21
Figure 2.2 : Présence d'ornières sur une route non revêtue due au passage répétitif de véhicules et à la mauvaise qualité de la surface de roulement (source : http://arnaud.meunier.chez-alice.fr).	22
Figure 2.3 : Présence de nids-de-poule sur une route non revêtue (source : http://voyageenislande.free.fr).	23
Figure 3.1 : Montage pour la réalisation des échantillons pour les essais du module réversible modifié et de la capacité portante.	37
Figure 3.2 : Représentation du confinement lors de l'essai de module réversible modifié.	38
Figure 3.3 : Montage pour la réalisation des essais du module réversible modifié.	39
Figure 3.4 : Exemple du graphique obtenu lors de l'essai du module réversible modifié (la courbe en vert représente la déformation réversible tandis que celle en rouge représente le module réversible).	40
Figure 3.5 : Confinement de l'échantillon lors de l'essai de la capacité portante.	41
Figure 3.6 : Schéma de la structure classique d'une route revêtue (A) et d'une route non revêtue (B).	42
Figure 3.7 : Montage pour la réalisation de l'essai de la capacité portante.	43
Figure 3.8 : Exemple du graphique obtenu et de la correction apportée lors de l'essai de la capacité portante (la courbe en vert représente l'enfoncement du piston tandis que la courbe en rouge représente la force appliquée sur le piston).	44
Figure 3.9 : Montage pour la réalisation des échantillons pour l'essai de la compression non confinée.	46
Figure 3.10 : Échantillon muni d'une moustiquaire pour l'essai de la compression non confinée.	46
Figure 3.11 : Montage pour la réalisation de l'essai de la compression non confinée.	47

Figure 3.12 : Exemple du graphique obtenu pour l'essai de la compression non confinée (la courbe rouge correspond à la force appliquée sur l'échantillon alors que la verte correspond à la déformation de l'échantillon.....	48
Figure 3.13 : Exemple d'un plan de cisaillement sur un échantillon après avoir effectué un essai de la compression non confinée.	49
Figure 3.14 : Schéma de la boîte de cisaillement.....	51
Figure 3.15 : Schéma de montage de la presse à cisaillement.	51
Figure 3.16 : Presse utilisée pour les essais du cisaillement direct.....	52
Figure 3.17 : Schéma du cheminement de la résistance au cisaillement en fonction de la déformation pour deux types de sol (selon Foriero (2009)).	53
Figure 3.18 : Schéma de l'imbrication des particules d'un sol lâche (a) comparativement à un sol dense (b) (selon Foriero (2009)).....	53
Figure 3.19 : Courbes granulométriques des différentes granulométries pour le gneiss granitique.	56
Figure 3.20 : Courbes granulométriques des différentes granulométries pour le basalte.	57
Figure 3.21 : Courbes granulométriques des différentes granulométries pour le calcaire.	57
Figure 3.22 : Exemple de graphique obtenu pour un essai de Proctor modifié pour le basalte ayant une granulométrie comportant 6,4% de particules fines.	60
Figure 3.23 : Appareil Los Angeles utilisé pour la réalisation des essais.....	65
Figure 3.24 : Appareil micro-Deval utilisé pour la réalisation des essais.	67
Figure 3.25 : Schéma résumant le programme expérimental réalisé.	75
Figure 3.26 : Schéma d'un squelette granulaire contrôlé par les particules plus grossières (A) et par les particules de plus petite taille (B).	83
Figure 3.27 : Résultats relatifs des différents produits pour le gneiss granitique pour l'essai du cisaillement direct.	86
Figure 3.28 : Résultats relatifs des différents produits pour le gneiss granitique pour l'essai de la compression non confinée.....	86
Figure 3.29 : Résultats relatifs des différents produits pour le gneiss granitique pour l'essai du module réversible modifié.	87
Figure 3.30 : Résultats relatifs des différents produits pour le gneiss granitique pour l'essai de la capacité portante pour un enfoncement du piston de 5 mm.....	87

Figure 3.31 : Résultats relatifs des différents produits pour le basalte pour l'essai du cisaillement direct.	88
Figure 3.32 : Résultats relatifs des différents produits pour le basalte pour l'essai de la compression non confinée.....	88
Figure 3.33 : Résultats relatifs des différents produits pour le basalte pour l'essai du module réversible modifié.	89
Figure 3.34 : Résultats relatifs des différents produits pour le basalte pour l'essai de la capacité portante pour un enfoncement du piston de 5 mm.....	89
Figure 3.35 : Résultats relatifs des différents produits pour le calcaire pour l'essai du cisaillement direct.	90
Figure 3.36 : Résultats relatifs des différents produits pour le calcaire pour l'essai de la compression non confinée.....	90
Figure 3.37 : Résultats relatifs des différents produits pour le calcaire pour l'essai du module réversible modifié.	91
Figure 3.38 : Résultats relatifs des différents produits pour le calcaire pour l'essai de la capacité portante pour un enfoncement du piston de 5 mm.....	91
Figure 3.39 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le chlorure de calcium pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.	96
Figure 3.40 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour la saumure naturelle pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.	96
Figure 3.41 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le ciment pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.	97
Figure 3.42 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour l'émulsion polymère pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.	97
Figure 3.43 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le chlorure de calcium pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.	98
Figure 3.44 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour la saumure naturelle pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.	98
Figure 3.45 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le ciment pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.	99

Figure 3.46 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour l'émulsion polymère pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.	99
Figure 3.47 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le chlorure de calcium pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.	100
Figure 3.48 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour la saumure naturelle pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.	100
Figure 3.49 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le ciment pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.	101
Figure 3.50 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour l'émulsion polymère pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.	101
Figure 3.51 : Résultats relatifs pour l'essai du cisaillement direct pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.	106
Figure 3.52: Résultats relatifs pour l'essai de la compression non confinée pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.	107
Figure 3.53: Résultats relatifs pour l'essai du module réversible modifié pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.	107
Figure 3.54: Résultats relatifs pour l'essai de la capacité portante à 5 mm d'enfoncement du piston pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.	108
Figure 3.55 : Résultats relatifs pour l'essai du cisaillement direct pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.	108
Figure 3.56: Résultats relatifs pour l'essai de la compression non confinée pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.	109
Figure 3.57: Résultats relatifs pour l'essai du module réversible modifié pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.	109
Figure 3.58: Résultats relatifs pour l'essai de la capacité portante à 5 mm d'enfoncement du piston pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.	110
Figure 3.59 : Résultats relatifs pour l'essai du cisaillement direct pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.	110
Figure 3.60: Résultats relatifs pour l'essai de la compression non confinée pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.	111

Figure 3.61: Résultats relatifs pour l'essai du module réversible modifié pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.	111
Figure 3.62: Résultats relatifs pour l'essai de la capacité portante à 5 mm d'enfoncement du piston pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.	112
Figure 4.1 : Camion transportant le bois sur une route forestière à Rivière-aux-Rats....	114
Figure 4.2 : Courbe granulométrique pour la section référence et pour celle stabilisée à l'aide de l'émulsion polymère.	115
Figure 4.3 : Graphique obtenu pour l'essai de la capacité portante pour le matériau granulaire des planches d'essai à Rivière-aux-Rats.....	118
Figure 4.4 : Moule utilisé pour l'essai du CBR normalisé.	119
Figure 4.5 : Résultat de la force en fonction du temps pour l'essai du CBR.....	120
Figure 4.6 : Épandage de la couche inférieure (profondeur de 5 cm) de l'agent stabilisant sur la partie gauche de la route.	121
Figure 4.7 : Niveleuse remplaçant le matériel initialement enlevé afin de permettre l'épandage de la couche inférieure de l'émulsion polymère.	122
Figure 4.8 : Rouleau compacteur servant à la compaction de la planche référence et de celle stabilisée.	123
Figure 4.9 : Règle à ornière et coin biseauté servant à mesurer la profondeur des défauts de la route (il est ici possible de voir la présence d'une ornière).....	125
Figure 4.10 : Déflexomètre à masse tombante portatif utilisé pour les essais.	126
Figure 4.11 : Schéma de la ligne d'influence sous laquelle 95% de la déflexion a lieu.	127
Figure 4.12 : Schéma des essais de LWD effectués à Rivière-aux-Rats.	128
Figure 4.13 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 14 jours.....	131
Figure 4.14 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 31 jours.....	132
Figure 4.15 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 39 jours.....	132
Figure 4.16 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 53 jours.....	133

Figure 4.17 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 69 jours.....	133
Figure 4.18 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 83 jours.....	134
Figure 4.19 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 103 jours.....	134
Figure 4.20 : Résultats relatifs des déflexions en fonction du temps à différentes profondeurs.	137

1. Introduction

1.1 Mise en contexte

Les routes locales, les chemins principaux et les routes d'accès aux ressources constituent une proportion importante du réseau routier canadien. Au Québec, cela représente environ 150 000 à 170 000 kilomètres de routes soit environ 90% de tous les réseaux provincial, municipaux et privés. À cause entre autres de l'achalandage réduit et de l'éloignement de la plupart de ces routes, le pavage de ces dernières est une tâche ardue et dispendieuse qui est très peu réaliste. Dans ce contexte, les routes recouvertes de matériaux granulaires apparaissent comme la meilleure solution. Toutefois, devant la place sans cesse grandissante qu'occupe la sécurité dans les transports, le contrôle de la stabilisation des routes non pavées et de la poussière engendrée par la circulation est devenu nécessaire. En effet, la poussière engendre de nombreux problèmes comme une réduction de la visibilité, l'inhalation de particules de toutes sortes et la perte de matériaux entraînant inévitablement des coûts supplémentaires. De plus, face à la rigueur du climat nordique le défi n'est pas seulement de contrôler la poussière, mais aussi de stabiliser les chemins non revêtus en trouvant des produits efficaces dans un contexte de gel et de dégel afin d'augmenter la période où les routes sont praticables. Il est également primordial que les produits utilisés soient sans risque pour l'environnement. Dans cet optique, ils devraient tous être certifiés conformes à la norme NQ 2410- 300/2002 ayant pour titre *Abat-poussières pour routes non asphaltées et autres surfaces similaires*. Cette norme, inspirée d'une étude du ministère des Transports du Québec (1992) et publiée par le Bureau de normalisation du Québec, repose principalement sur une approche d'évaluation du danger écotoxicologique.

1.2 Problématique

De nombreuses recherches ont déjà porté sur la stabilisation et le contrôle de la poussière des routes non revêtues. En effet, de nombreux produits stabilisants et abat-poussière ont déjà été testés sur des minéralogies et granulométries précises, majoritairement ailleurs qu'au Québec. Sachant que la performance d'un produit peut être grandement affectée par les caractéristiques d'un matériau granulaire (Pierre et coll. (2008)), le caractère novateur de ce projet consiste donc à évaluer le comportement de certains produits en faisant varier la minéralogie et la granulométrie des matériaux granulaires étudiés dans un contexte de gel et dégel fréquent (climat québécois).

1.3 Objectif

Le projet de recherche CARRLo (Chemins d'Accès aux Ressources et Routes Locales), auquel est rattaché le projet de maîtrise, a pour but de trouver des solutions adaptées et économiques afin de concevoir, réhabiliter et entretenir des surfaces de roulement performantes, sécuritaires, durables et confortables. Plus précisément, le projet de maîtrise vise à étudier l'influence de la granulométrie et de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière.

L'objectif final consiste à être en mesure de proposer des familles de produits stabilisants et d'abat-poussière dans une situation ou un contexte précis et en fonction d'objectifs déterminés.

1.4 Méthodologie

Dans le but de réaliser l'objectif, plusieurs étapes sont réalisées.

Premièrement, afin de choisir les produits les plus aptes à être testés dans le contexte recherché, une revue des connaissances est effectuée afin de connaître les différentes familles de produits, de comprendre le mode d'interaction de chaque famille de produits et de connaître les avantages et inconvénients de chacune.

Ensuite, un programme expérimental complet en laboratoire est réalisé et effectué afin d'étudier différentes propriétés mécaniques des matériaux testés et de voir l'influence des différents produits stabilisants et abat-poussière sur ces propriétés.

Finalement, des planches en contexte réel sont réalisées dans le but de valider les résultats obtenus en laboratoire.

2. État des connaissances

2.1 Les défauts de la route

Les routes recouvertes de matériaux granulaires sont susceptibles d'être affectées par plusieurs types de détériorations. En effet, la formation de planches à laver, d'ornières et de nids-de-poule est fréquente. De plus, la poussière produite par la circulation des véhicules entraîne une diminution de la visibilité et une perte de matériau.

Premièrement, le défaut de la planche à laver consiste en la présence de plusieurs petites ondulations consécutives qui entraînent un sautellement lors du roulement (figure 2.1). Selon Doré (2009), la formation de planche à laver peut se produire en raison d'une mauvaise mise en place ou mise en œuvre de la surface de roulement. La planche à laver peut également se développer dans certaines zones précises où les freinages et les accélérations sont omniprésents. Les courbes accentuées sont également des zones où la planche à laver est susceptible de se former.



Figure 2.1: Présence de planches à laver sur une route non revêtue (source : Skorseth et Salim (2000)).

Pour leur part, les ornières sont habituellement formées lors du passage répétitif de véhicules au même endroit (figure 2.2). Il s'agit donc de la formation de dépressions au niveau des sentiers de roue. Toutefois, dans certains cas, un seul passage peut suffire à créer une ornière. Pour les routes non revêtues, les ornières sont principalement causées par le passage répétitif des véhicules au même endroit. Une mauvaise qualité de la surface de roulement peut donc être à l'origine de la formation d'ornières. De plus, selon Owende et coll. (2001), le passage répétitif de véhicules lourds entraîne des déformations permanentes du sol d'infrastructure ce qui peut éventuellement créer de l'orniérage structural (orniérage au niveau du sol d'infrastructure).



Figure 2.2 : Présence d'ornières sur une route non revêtue due au passage répétitif de véhicules et à la mauvaise qualité de la surface de roulement (source : <http://arnaud.meunier.chez-alice.fr>).

Les nids-de-poule sont quant à eux des trous qui se forment dans la route (figure 2.3). Ils sont très souvent la manifestation extrême d'un autre défaut de la route. Selon Tremblay (2006), trois conditions sont nécessaires à la formation de nids-de-poule, soit la présence de défauts, la présence d'eau et l'application d'une charge.



Figure 2.3 : Présence de nids-de-poule sur une route non revêtue (source : <http://voyageenislande.free.fr>).

Dans le but de remédier à ces situations de détériorations de la route, plusieurs techniques de stabilisation ont été réalisées. Par exemple, Henry et coll. (2005) ont étudié différentes méthodes de stabilisation dans un contexte printanier de dégel s'apparentant à celui du nord canadien. Ils ont étudié plusieurs types de géotextiles, de géogrilles et de géocellules. Il s'agit en fait de différentes sortes de séparateurs faits respectivement de tissus, d'un grillage et d'un confinement de cellules de quelques centimètres de hauteur. Ils ont également étudié une stabilisation à l'aide de ciment. La stabilisation à l'aide de ciment et les géocellules contribuent à améliorer la dureté et la force de la surface ce qui améliore la route durant la saison printanière. Pour leur part, les géotextiles et les géogrilles ne démontrent aucune amélioration remarquable. Il est à noter que certaines de ces techniques peuvent améliorer la condition d'une route, mais qu'elles sont toutes très dispendieuses, principalement les géocellules.

De plus, Vitton (2008) a étudié l'abattement de la poussière produite lors de la sublimation de l'eau à la surface d'un sol. Les conditions favorisant la présence de ce type de poussière sont des vents très importants et des températures sèches inférieures au point de congélation. Vitton (2008) affirme que l'application de boues résiduelles de papetières sur le sol permet d'obtenir une réduction de la poussière d'environ 80%. Ce résultat est intéressant considérant la disponibilité de ces boues au Québec due à la

présence de nombreuses de papetières. Toutefois, cette technique n'a pas été testée sur une route non revêtue et semble inappropriée à l'abondance d'eau et à la circulation de véhicules.

Face à ces résultats, l'utilisation de produits stabilisant et d'abat-poussière apparaît comme une solution efficace pour l'entretien d'une route non revêtue. D'ailleurs, Jones et coll. (2008) corroborent cette idée en affirmant que les produits abat-poussière et les agents stabilisants sont indispensables et font partie intégrante des solutions actuelles et futures pour le bon maintien des routes non revêtues. Ils suggèrent donc la création de guides offrant des lignes directrices pour éduquer les utilisateurs des produits afin d'en faciliter leur utilisation et de retirer un maximum d'efficacité pour chaque traitement appliqué à un chemin non revêtu. Il est à noter que les produits stabilisants ont le rôle de stabiliser la route (la rendre plus résistante aux détériorations) en plus diminuer considérablement la poussière produite par la circulation des véhicules. De leur côté, les produits abat-poussière n'apportent habituellement aucune stabilisation à la route et sont donc utilisés exclusivement afin d'éliminer la poussière.

Or, il existe plusieurs familles de produits abat-poussière et d'agents stabilisants. Il y a les sels et produits hygroscopiques, les polymères, les produits organiques, les produits synthétiques, les produits dérivés du pétrole, les produits électrochimiques, les enzymes et les produits cimentaires. Chaque famille est traitée séparément afin de connaître son mode d'interaction, ses avantages, ses inconvénients et ses limites.

2.2 Les différentes familles de produits

2.2.1 Les sels et produits hygroscopiques

Premièrement, les sels et produits hygroscopiques agissent principalement comme abat-poussière même s'ils jouent parfois un rôle de stabilisants. Selon Tingle et coll. (2007), les sels ont le potentiel d'effectuer des échanges cationiques ce qui a pour conséquence de réduire l'espace entre les particules se traduisant donc par une floculation. De plus, la recristallisation des sels crée des liens physiques entre les particules ce qui augmente la densité des matériaux stabilisés. De plus, en absorbant l'humidité de l'air ambiant, ce type de produit forme une pellicule d'eau qui améliore la tension de surface et favorise les liens entre les particules fines. Zilionieve et coll. (2007) corroborent cette idée en affirmant que le pourcentage de particules fines, ayant grande influence sur la surface spécifique, doit donc être pris en compte dans le calcul de la quantité de produit qui doit être ajouté à un matériau afin de réduire la poussière. Ce type de produit est bien connu et son action a été démontrée à plusieurs reprises.

Par exemple, selon Monlux et coll. (2007), le traitement au chlorure de calcium et au chlorure de magnésium (produits hygroscopiques) est efficace et permet de réduire jusqu'à huit fois les coûts d'entretien et de maintenance. De plus, la concentration en produit dépend majoritairement de la quantité d'eau présente dans le sol et du climat. En effet, plus le milieu est humide, plus la quantité de produit doit être importante. Aussi, selon Monlux et coll. (2006), le coût d'un traitement au chlorure de calcium varie entre 5000 et 6250\$ par kilomètre et permet d'économiser annuellement environ 2050\$ par kilomètre (moins d'usures, pertes de matériaux diminuées, entretiens moins courants). De plus, ce type de traitement permet de réduire la poussière jusqu'à 90% ce qui, en plus de minimiser la perte de matériaux, diminue les risques de santé liés à l'inhalation de poussière et accentue la sécurité routière (meilleure visibilité).

D'autres conclusions ont pu être tirées de l'étude de cette famille de produits suite aux travaux de Bolander et coll. (1999). En effet, ces derniers spécifient qu'il doit y avoir un

pourcentage d'humidité minimum dans l'air afin que les produits hygroscopiques puissent absorber l'humidité et être, par le fait même, efficaces. De plus, le chlorure de calcium est plus efficace que le chlorure de magnésium dans des conditions d'humidité élevées et moins efficace lors de longues périodes de sécheresse. Ce produit peut également provoquer une corrosion accélérée de certains métaux et être lessivé lors de la présence d'importante quantité d'eau. Enfin, les impacts environnementaux de ces produits ne sont pas encore tellement bien identifiés.

Finalement, les produits hygroscopiques et les sels peuvent aider au compactage et augmenter la densité de la surface principalement à cause du maintien d'une bonne teneur en eau.

En conclusion, les produits hygroscopiques, principalement le chlorure de calcium, sont très utilisés et leur efficacité en tant qu'abat-poussière n'est plus à démontrer. Cette famille de produit peut même parfois servir de référence afin de statuer sur l'efficacité d'abat-poussière non traditionnels qui n'ont pratiquement jamais été testés sur les routes et très peu étudiés. De plus, pour un climat humide comme celui du Québec, les produits hygroscopiques semblent appropriés. Cependant, leur impact environnemental est encore peu connu.

2.2.2 Les polymères

Selon Tingle et coll. (2007), les polymères, qui peuvent être utilisés à la fois comme abat-poussière et comme agent stabilisant, lient les particules ensemble par des liens physiques très forts. Des composants polaires de certains polymères peuvent s'adsorber fortement aux particules du matériau et des échanges d'ions peuvent même se produire entre le polymère et le matériau. Selon Rushing et coll. (2007), les émulsions polymères donnent une excellente réduction de la poussière dans les 30 premiers jours, mais l'efficacité diminue après 80 jours et diminue davantage après 220 jours. Ce produit crée des liens avec le matériau, mais ces liens sont brisés par le trafic lourd. Une fois les liens brisés, il

est impossible de les former de nouveau. La seule solution est d'ajouter une quantité supplémentaire d'émulsion polymère. Par contre, Pierre et coll. (2007), suite à l'étude de deux types de polymères, soutiennent que ces derniers augmentent le comportement mécanique d'un sol, et ce, même après des opérations de nivelage. Il peut donc être déduit de cette étude que la stabilisation aide les matériaux granulaires à acquérir une certaine résistance mécanique. Pour sa part, Visser (2007) affirme que les polymères n'augmentent pas vraiment la rigidité des surfaces, mais qu'ils agissent surtout comme scellant à la surface ce qui permet une réduction de la perméabilité, de la sensibilité à l'humidité et de l'abrasion dues à la circulation des véhicules.

De plus, Bolander et coll. (1999) affirment que le maintien d'une surface suffisamment rigide, qui permet l'atténuation des poussières, est difficile lors de l'utilisation de polymères. Il soutient également que les impacts environnementaux des polymères sont pratiquement nuls.

Bref, les polymères peuvent s'avérer efficaces dans certaines conditions, mais les études ne convergent pas toutes vers la même conclusion en ce qui a trait aux effets et aux limites de ce produit sur la route. Il reste donc à vérifier s'ils sont adaptés au trafic du nord québécois qui est caractérisé entre autres par une circulation de camions lourds.

2.2.3 Les produits organiques

Les produits organiques, majoritairement utilisés comme abat-poussière, agissent principalement comme liants assurant l'agrégation des particules superficielles par le biais de faibles liens physiques entre les particules. Parmi ces produits, on retrouve entre autres les lignosulfonates et les résines à base d'arbre. Ces derniers recouvrent les particules du matériau à l'aide d'un film (mince couche) qui permet de retenir les particules ensemble. Selon Zilionieva et coll. (2007), les lignosulfonates permettent de réduire la poussière de 70 à 80%. Toutefois, il ajoute que lors de période de sécheresse, l'humidité des sols diminue, ce qui influence la quantité de poussière produite et a, par le

fait même, un effet négatif sur le pourcentage de réduction des particules poussiéreuses. Zilionieva et coll. (2007) affirment même que le nombre de jours de sécheresse est la principale caractéristique dictant la quantité de poussière produite par la circulation d'un véhicule. De plus, après 7 jours sans pluie, l'impact des produits lignosulfonates sur l'humidité du sol devient négligeable. L'utilisation de ces derniers n'est pas recommandée lorsqu'on est en présence d'un pourcentage de particules fines en deçà de 8%. Les données sur les résines à base d'arbre sont plus restreintes; toutefois leur efficacité et mode d'utilisation s'apparente à celui des lignosulfonates. Finalement, les lignosulfonates permettent d'augmenter la densité de surface et offrent une meilleure performance s'ils sont mélangés au matériau.

Bolander et coll. (1999) ont étudié principalement les lignosulfonates, les huiles végétales et les dérivés du «tall oil». Ils stipulent que, pour les lignosulfonates, il est difficile de conserver une surface de roulement rigide et donc une capacité portante maximale. De plus, les liens produits par ces derniers peuvent être détruits par des pluies intenses. Dans des conditions d'humidité élevée, les sols traités par des lignosulfonates peuvent devenir boueux tandis qu'ils peuvent devenir cassants dans des conditions sèches. Les impacts environnementaux sont inexistantes excluant la possibilité de voir la demande biologique en oxygène de l'eau augmenter lors d'importants lessivages. Pour leur part, les huiles végétales s'oxydent rapidement ce qui rend les sols traités fragiles et cassants. Les impacts sur l'environnement sont inconnus. Les dérivés du «tall oil», un sous-produit important de la mise en pâte de résineux comme le pin, s'avèrent efficaces afin d'augmenter la dureté d'un sol sous des conditions sèches. Toutefois, les liens créés par ce produit sont réduits et peuvent même être complètement détruits par l'exposition à long terme à d'importantes pluies. Les impacts de ce produit sur l'environnement sont également inconnus.

Il est à noter que très peu de recherche a été effectuée sur les solutions à base de polysaccharides (un autre type de produit organique) et que les résultats présents à ce jour ne sont pas tellement positifs dû notamment à un lessivage important lors de la présence d'importantes quantités d'eau (Rushing et coll. (2007)).

En conclusion, malgré des résultats plus ou moins convaincants, les produits organiques, principalement les dérivés du «tall oil» demeurent une avenue intéressante en considérant la proximité de la ressource à la base de ce type de produit (le bois). En effet, ce produit pourrait entre autres permettre d'importante économie de transport pour l'application d'abat-poussière sur des chemins forestiers aux alentours d'usines de pâtes et papiers.

2.2.4 Les produits synthétiques

Pour leur part, les produits synthétiques favorisent l'agglomération des particules fines de surface en créant des liens physiques entre les particules. Ils agissent comme abat-poussière ou comme stabilisants. Ils permettent d'augmenter la densité de surface et peuvent être efficaces durant les saisons sèches. Ils offrent habituellement une meilleure performance lorsqu'ils sont mélangés au sol comparativement à lorsqu'ils sont appliqués seulement en surface. Selon Rushing et coll. (2007), l'arrangement granulaire du matériau de surface traité à l'aide de produits synthétiques demeure relativement constante à court terme ce qui permet d'obtenir des résultats intéressants. Par contre, après environ 80 jours, la route se détériore, l'arrangement granulaire du matériau de surface devient plus lâche et la poussière augmente rapidement.

En résumé, cette famille de produit n'a pas beaucoup été étudiée, mais elle semble toutefois prometteuse. Par contre, devant une détérioration rapide de la route, il serait intéressant de vérifier si cette famille de produit est adaptée au trafic lourd qui pourrait éventuellement occasionner une détérioration encore plus rapide.

2.2.5 Les produits dérivés du pétrole

Les produits dérivés du pétrole, utilisés à la fois comme abat-poussière et comme agent stabilisant, lient les matériaux superficiels par adhésion en formant une mince couche en

surface. En effet, selon Tingle et coll. (2007), les résines de pétrole créent des liens physiques entre les particules ce qui retient ces dernières au sol. Ce type de produit a été étudié à plusieurs reprises. En effet, selon Zilionieva et coll. (2007), dans le cas de sécheresse, l'efficacité des émulsions bitumineuses ne semble pas vraiment affectée, car ces dernières forment des agglomérations de particules. De plus, ce dernier affirme que comparativement au chlorure de calcium et aux lignosulfonates de calcium, l'émulsion bitumineuse est la méthode la plus efficace afin de réduire la poussière à long terme. Toutefois, devant l'intérêt grandissant porté à l'environnement, les produits à base de pétrole sont à l'origine de controverses. Ces produits doivent donc être soumis à des études approfondies afin d'assurer leurs respects des normes environnementales avant d'être utilisés sur les routes non revêtues.

Bennett et coll. (1994) ont étudié l'effet d'une «tall oil pitch emulsion» sur les routes forestières canadiennes. Lors de ses essais, ils ont remarqué qu'une quantité insuffisante de particules fines peut nuire aux propriétés d'adhésions des particules entre elles tandis qu'une quantité trop importante contribue à retenir trop d'humidité ce qui peut entraîner des problèmes lors du gel. De plus, il soutient qu'en hiver, en l'absence d'une mince couche de neige sur la route, celle-ci est plus sujette à se détériorer. Autrement dit, la neige agit comme une couche protectrice. Le traitement doit également être effectué pendant au moins cinq ans afin de réaliser des profits comparativement à l'entretien d'une route non traitée. Finalement, ce produit peut demeurer efficace durant de longues périodes de sécheresse. Toutefois, à cause de ses propriétés d'imperméabilité, la conception des routes traitées avec ces produits doit toujours comprendre un drainage de surface important afin d'éviter l'accumulation d'eau en surface.

Bolander et coll. (1999) ajoutent que la résilience (capacité à absorber les contraintes) des matériaux granulaires traités par cette famille de produit peut être affectée dans des conditions sèches. Ce dernier ajoute que la présence d'une trop grande quantité de particules fines combinée à une concentration élevée en asphaltènes provoque l'apparition d'une croûte qui peut se briser lors de la présence de trafic ou de conditions humides. De plus, certains produits peuvent s'avérer toxiques. Dans cette optique,

Bolander et coll. (1999) suggèrent une étude environnementale spécifique lors de l'utilisation de cette famille de produits. Finalement, Marshall et coll. (1984) cités par Bergeron (1992) ont remarqué une perte de portance pour les matériaux traités à l'aide de bitume.

En conclusion, les produits dérivés du pétrole ont fait leurs preuves et leur efficacité est connue. Toutefois, devant une possible perte de portance pour les matériaux granulaires traités au bitume, il serait intéressant de vérifier si cette perte ne serait pas seulement due à un problème de cure du produit. Dans cette optique, l'ajout d'une petite quantité d'agent stabilisant comme le ciment pourrait s'avérer une avenue intéressante dans le but de compenser la perte de portance pour la durée de la cure du bitume. Toutefois, les produits à base de pétrole sont à l'origine de controverses et des études approfondies doivent être réalisées dans le but de s'assurer que ces derniers respectent les normes environnementales.

2.2.6 Les produits électrochimiques

Les produits électrochimiques, utilisés comme abat-poussière ou comme agent stabilisant, réduisent la teneur en eau et augmentent la densité d'un sol. Il n'y a pas de liens physiques entre les particules du sol, l'efficacité du produit étant assurée par des réactions chimiques. Ce type de produit est efficace particulièrement en présence de sols argileux. En effet, selon Visser (2007), les huiles sulfonées sont très efficaces et augmentent la dureté des sols contenant de l'argile (test CBR élevé). Autrement, les huiles sulfonées ne sont pratiquement pas efficaces. Tingle et coll. (2007) corroborent également cette idée en affirmant que la stabilisation à l'aide de réactions chimiques est généralement favorisée pour les sols argileux et vaseux tandis que la stabilisation à l'aide de liens physiques est recommandée pour les sols contenant principalement du gravier et du sable.

De plus, selon Bolander et coll. (1999), l'efficacité des produits électrochimiques dépend de la minéralogie. De plus, la durée d'efficacité de ce type de produits est parfois courte

et un temps de conditionnement relativement long est parfois nécessaire afin de soutirer le maximum d'efficacité du produit. Les impacts environnementaux ne sont pas réellement connus et une analyse de chaque produit électrochimique est donc recommandée.

En conclusion, les réactions chimiques, qui sont à l'origine de l'efficacité des agents électrochimiques semblent très sélectives et un moindre changement des caractéristiques environnantes provoque une diminution de l'efficacité de ces produits. Ceci se traduit par des résultats très intéressants ou plutôt médiocres. Les produits électrochimiques ne semblent donc pas adaptés à des conditions d'exposition variables. Avant leur application, il paraît donc très important de s'assurer que les conditions d'exposition de cette famille de produit demeureront constantes dans le but de préserver leur efficacité.

2.2.7 Les enzymes

Les informations sur les enzymes sont moins nombreuses, mais il est possible de savoir que ces dernières fonctionnent essentiellement comme les produits électrochimiques et qu'elles peuvent donc jouer le rôle d'abat-poussière ou d'agent stabilisant. Toutefois, leur rôle est plutôt de catalyser certaines réactions chimiques qui sont utiles et efficaces pour la stabilisation d'une route ou la diminution de la quantité de poussière. Tingle et coll. (2007) vont en ce sens en affirmant que les enzymes ont pour fonction de catalyser des réactions chimiques très spécifiques.

Comme les enzymes sont très sensibles aux changements et que leur étendue d'utilisation est très restreinte, elles peuvent elles aussi présenter des performances élevées ou médiocres.

2.2.8 Les produits cimentaires

Pierre et coll. (2008, 2007) et Henry et coll. (2005) affirment que le ciment, produit de stabilisation traditionnel, permet d'accentuer les propriétés mécaniques d'un matériau granulaire de façon importante (essai CBR et compression non confinée). Pierre et coll. (2008, 2007) ajoutent par contre qu'il n'a pas un effet bénéfique aussi prononcé sur le module réversible, c'est-à-dire que le ciment ne permet pas d'améliorer de manière considérable le module réversible d'un matériau granulaire.

Bref, le ciment semble être un produit stabilisant très efficace. Par contre, son coût élevé et le fait qu'il doit être mélangé au matériau et tenu à l'écart de l'humidité avant son application limite son utilisation. Par contre, il offre une perspective intéressante en s'avérant utile et efficace lors de problèmes de détériorations extrêmes de la route.

2.3 Conclusion

En conclusion, chaque famille de produit semble avoir une efficacité dans certaines conditions plus ou moins restreintes. Par contre, comme le mentionnent Surdahl et coll. (2007), les essais sont souvent effectués à un seul endroit et les résultats sont sujets à certains changements selon le type de sol présent. Mokwa et coll. (2007) confirment ce résultat. En effet, ces derniers ont étudié différentes propriétés physiques en fonction de la granulométrie de différents matériaux. Deux sont des matériaux plus grossiers utilisés davantage pour les fondations tandis que le troisième est plus fin et s'apparente à un matériau de surface. De cette étude, il est possible de conclure que les matériaux plus grossiers sont les plus rigides et solides. Dans un autre ordre d'idées, il soutient également que la perméabilité semble dépendre davantage de la fraction de vides des particules fines que du type de matériau ou qu'à la grosseur maximale des particules. En considérant qu'il y a suffisamment de particules fines afin de remplir les interstices créés par les particules plus grossières, la perméabilité est donc favorisée par un matériau de surface comportant davantage de particules de plus petit diamètre.

Aussi, selon Surdahl et coll. (2007), le prix des produits diffère beaucoup selon leur nature et l'endroit où ils doivent être livrés. De plus, chaque produit doit être appliqué de nouveau à des intervalles de temps différents. Il est donc recommandé avant de procéder à un choix de produit de bien vérifier le type de matériau, le climat, le type et la quantité de véhicules circulant, l'environnement, le budget et les objectifs ciblés.

3. Programme expérimental

3.1 Paramètres visés

L'objectif final du projet de maîtrise consiste à être en mesure de proposer des familles de produits stabilisants et abat-poussière pour une situation minéralogique et granulométrique précise en fonction d'objectifs déterminés.

Le but du programme expérimental est d'étudier différentes propriétés mécaniques des matériaux testés et de vérifier l'influence de la minéralogie et de la granulométrie sur ces propriétés. Le programme expérimental permet également d'étudier l'influence des différents produits stabilisants et abat-poussière sur les propriétés mécaniques des matériaux testés.

Pour ce faire, des essais de module réversible modifié, de capacité portante (CBR modifié), de compression non confinée et de cisaillement direct sont réalisés.

3.1.1 Module Réversible modifié

L'essai de module réversible consiste à soumettre l'échantillon à plusieurs charges cycliques et permet d'avoir une idée du comportement contrainte-déformation du matériau. Cette méthode permet de représenter fidèlement l'état de contrainte et les conditions de sollicitation des matériaux routiers. Selon Doré (2009), le module réversible est largement accepté comme étant la meilleure mesure des propriétés mécaniques des sols et des matériaux routiers.

Les équations 1 à 4 montrent théoriquement à quoi correspond le module réversible.

$$P_{cyclique} = P_{max} - P_{contact} \quad [1]$$

Donc, $P_{cyclique}$ est la pression de compression appliquée de façon cyclique à l'échantillon.

$$\sigma_{cyclique} = \frac{P_{cyclique}}{Aire_{surface\ échantillon}} \quad [2]$$

où $\sigma_{cyclique}$ est la contrainte réversible cyclique.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta L}{L} \quad [3]$$

où L est la hauteur de l'échantillon, ΔL est l'enfoncement de l'échantillon sous la contrainte et ε_r est la déformation axiale réversible due à la pression cyclique répétitive.

$$M_r = \frac{\sigma_{cyclique}}{\varepsilon_r} \quad [4]$$

où M_r est le module réversible.

Il est à noter que les essais effectués sont des modules réversibles modifiés, dû à l'envergure du programme expérimental qui nécessite la réalisation d'une quantité importante d'échantillons. L'essai de module réversible est dit modifié, car il est effectué à l'aide d'un moule en plastique rigide (tuyau ABS) comparativement à la norme pour la détermination du module réversible (AASHTO (2000)) qui impose un moule en acier. Le fait d'utiliser des moules en plastique permet de réaliser plusieurs échantillons en une journée. Pour leur part, les moules en acier sont beaucoup plus dispendieux et leur quantité était donc très limitée ce qui permettait d'effectuer seulement deux échantillons par jour.

3.1.1.1 Préparation des échantillons

Pour la réalisation des échantillons, on doit connaître la quantité d'eau dans le mélange final afin d'être à la valeur Proctor et assurer par le fait même un compactage maximal. Pour ce faire, on doit mesurer le pourcentage d'eau dans le produit stabilisant ou d'abat-poussière afin de connaître la quantité d'eau à ajouter au matériau pour avoir le pourcentage d'eau final voulu. Le matériau est considéré comme ayant 0% d'eau, car il a été préalablement mis environ 24 heures à l'étuve. Une fois homogène, le mélange entre le matériau, l'eau et le produit est compacté en quatre couches égales dans un cylindre en plastique très résistant (tuyau ABS). Le compactage est effectué à l'aide d'un marteau pneumatique (figure 3.1). Chaque couche est compactée une minute, le temps étant calculé automatiquement à l'aide d'une minuterie contrôlant l'apport en électricité au marteau pneumatique. Une scarification est effectuée entre chaque couche dans le but d'assurer une homogénéité de l'échantillon et d'ainsi éviter la formation de plans préférentiels. Il est à noter que les échantillons, une fois réalisés, ont un temps de cure de sept jours.



Figure 3.1 : Montage pour la réalisation des échantillons pour les essais du module réversible modifié et de la capacité portante.

3.1.1.2 Réalisation des essais

Les essais du module réversible modifié sont effectués sur une presse hydraulique. L'échantillon est placé de manière à assurer un confinement sur toutes ses surfaces. La figure 3.2 schématise le confinement de l'échantillon lors de l'essai du module réversible modifié. Les pressions appliquées sur l'échantillon et le temps entre chaque contrainte cyclique sont conformes à la norme AASHTO T 307-99 pour la détermination du module réversible. La hauteur de chaque échantillon est mesurée à quatre endroits différents sur la circonférence du cylindre et pour que l'échantillon soit considéré conforme, la différence de hauteur entre ces mesures ne doit pas excéder 1 mm afin de s'assurer que la pression cyclique est appliquée de façon homogène sur toute la surface de l'échantillon. Une bille est également insérée au-dessus de la plaque sur laquelle la force est appliquée afin d'assurer une répartition uniforme de la contrainte (figure 3.3).

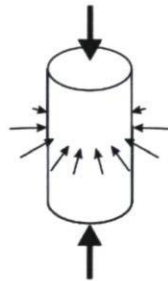


Figure 3.2 : Représentation du confinement lors de l'essai de module réversible modifié.



Figure 3.3 : Montage pour la réalisation des essais du module réversible modifié.

L'essai a une durée 300 cycles. La valeur du module réversible retenue est la moyenne du module réversible calculé pour les pressions cycliques correspondant aux cycles 296 à 300. Lors des 150 à 200 premiers cycles, l'application de la contrainte cyclique induit des déformations permanentes. En effet, selon Pierre et coll. (2007), la déformation se stabilise après environ 150 à 200 cycles. À environ 300 cycles, la déformation permanente peut donc être considérée comme négligeable et le module réversible est valable. En d'autres termes, les nombreuses contraintes cycliques servent à conditionner l'échantillon. Les cycles ont une durée de 1 seconde. L'impulsion de charge se fait en 0,1 seconde suivie d'une période de repos de 0,9 seconde. La contrainte verticale imposée à l'échantillon est de 280 kPa ce qui correspond à une charge de 40 kN imposée à un essieu standard. Afin d'assurer un contact uniforme entre l'échantillon et la plaque sur laquelle la contrainte est appliquée, 10% de la contrainte totale demeure statique tandis que 90% de la contrainte totale est cyclique.

Malgré les résultats différents selon la minéralogie, la granulométrie et les produits testés, les graphiques obtenus du module réversible et de la déformation réversible en fonction du nombre de cycles suivent tous la même tendance (figure 3.4). En effet, la déformation

réversible tend à se stabiliser lorsque le nombre de cycles augmente ce qui est un résultat logique considérant qu'au début les effets de surface engendrent une certaine instabilité. Le module réversible tend également à se stabiliser car théoriquement, il est défini par la contrainte cyclique (qui est constante) divisé par la déformation réversible qui elle tend à se stabiliser.

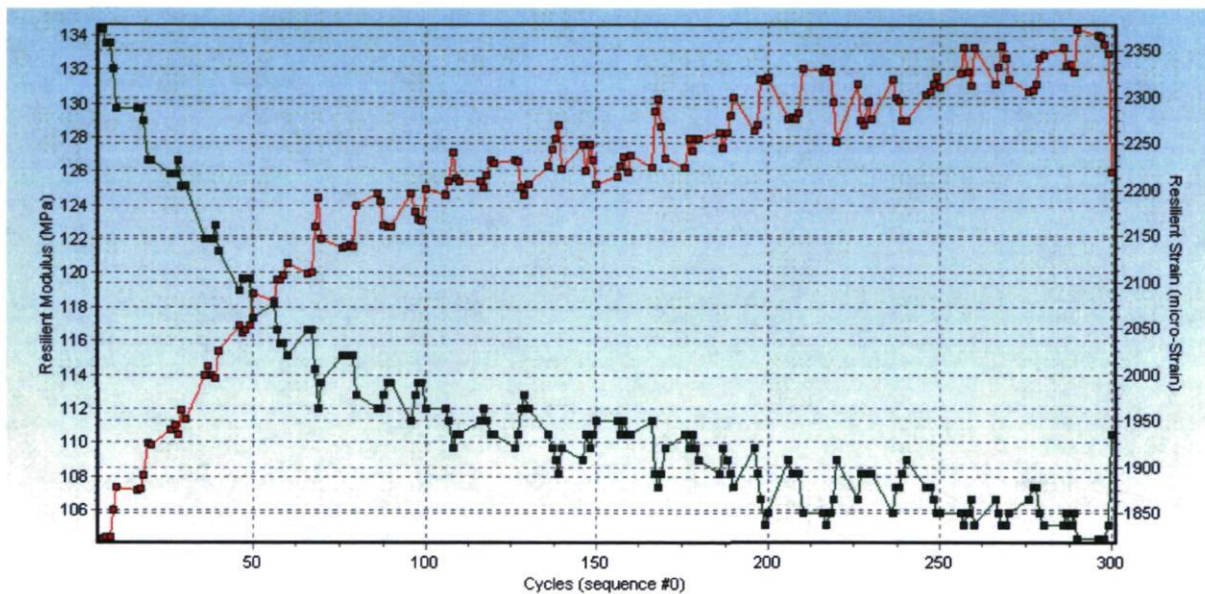


Figure 3.4 : Exemple du graphique obtenu lors de l'essai du module réversible modifié (la courbe en vert représente la déformation réversible tandis que celle en rouge représente le module réversible).

3.1.2 Capacité portante (CBR modifié)

L'essai de capacité portante permet de connaître la portance mécanique d'un matériau compacté avec une teneur en eau et une densité optimales. De cette manière, il est possible de déterminer la rigidité du matériau.

3.1.2.1 Préparation des échantillons

Tout comme l'essai du module réversible modifié, l'essai de capacité portante nécessite un temps de cure de sept jours après la réalisation de l'échantillon. L'essai du module réversible modifié n'étant pas destructif, l'échantillon peut être réutilisé pour l'essai de la capacité portante. Le confinement de l'échantillon diffère pour l'essai de capacité portante comparativement à l'essai du module réversible modifié. Dans le cas de ces essais de capacité portante, il n'y a pas de confinement exercé à la surface supérieure, ce qui permet de reproduire les conditions réelles de sollicitation (figure 3.5). En effet, lorsque le piston pénètre l'échantillon, le matériau autour de ce dernier réagit librement, comme c'est le cas lorsqu'un véhicule circule sur une route non revêtue comparativement à une route revêtue (le matériau autour de la roue ne subit aucune force provenant de sa surface supérieure et peut réagir librement sous la contrainte exercée par la roue). La figure 3.6 montre la structure classique d'une route revêtue et d'une route non revêtue. En plus de jouer un rôle structural, la fondation sert de surface de roulement dans le cas d'une route non revêtue. Pour une route revêtue, la fondation est comprise entre le revêtement de surface et la sous-fondation. L'essai CBR classique qui s'effectue avec un confinement de la surface supérieure est alors plus représentatif de la réalité dans le cas d'une route revêtue.

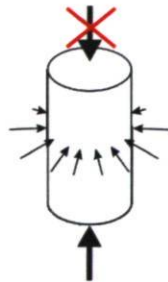


Figure 3.5 : Confinement de l'échantillon lors de l'essai de la capacité portante.

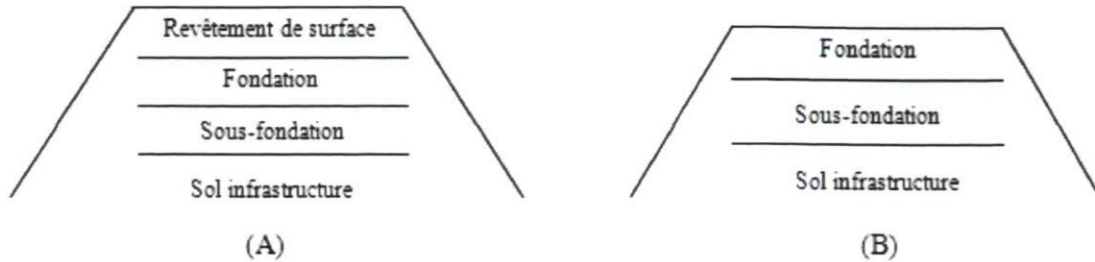


Figure 3.6 : Schéma de la structure classique d'une route revêtue (A) et d'une route non revêtue (B).

3.1.2.2 Réalisation des essais

L'essai de capacité portante mesure la force qui doit être appliquée afin d'enfoncer l'échantillon de 2,5 mm et 5 mm à l'aide d'un piston circulaire. Le diamètre de ce piston est de 49,6 mm et la vitesse de pénétration est de 0,033 mm/s ce qui est conforme à la norme pour l'essai de CBR (ASTM D 1883). Comme pour le module réversible, le confinement latéral de l'échantillon est assuré par le tuyau d'ABS.

L'enfoncement du piston est réalisé sur une presse (figure 3.7). Il est important de s'assurer que la surface du piston soit complètement en contact avec la surface de l'échantillon au début du test afin de ne pas fausser les résultats.

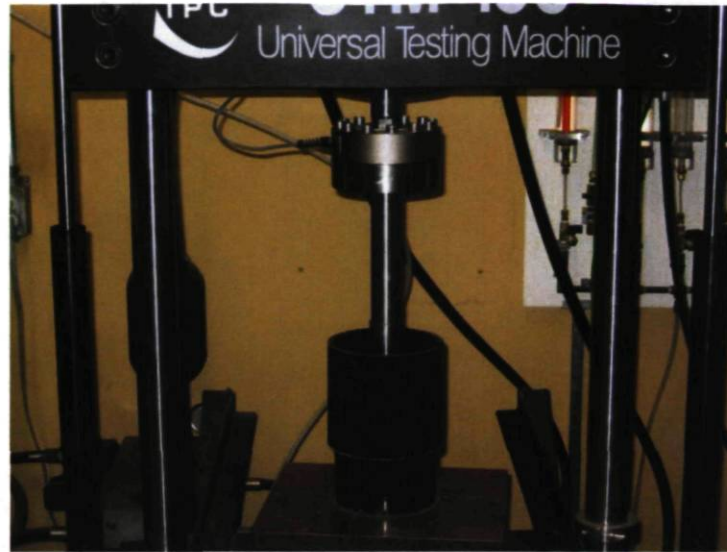


Figure 3.7 : Montage pour la réalisation de l'essai de la capacité portante.

Malgré les résultats qui diffèrent, les graphiques de la force appliquée à l'échantillon et de l'enfoncement du piston en fonction du temps suivent toujours la même tendance. En effet, la contrainte augmente rapidement lors des deux premières minutes et son ascension ralentie par la suite (figure 3.8). Ceci est dû au fait qu'au début, l'enfoncement est plus difficile dû à la diminution du pourcentage de vides. Lorsque l'enfoncement progresse, le squelette granulaire se réarrange et la pénétration du piston devient alors plus facile.

Donc, au début le pourcentage de vides diminue plus rapidement ce qui explique la croissance rapide de la contrainte en fonction de la pénétration dans les deux premières minutes de l'essai (en omettant les effets de surface des 20 premières secondes). D'un autre côté, la droite de l'enfoncement du piston en fonction du temps est toujours identique. Elle est linéaire dû à la vitesse de pénétration du piston qui est constante.

Une correction est effectuée sur les résultats afin d'éliminer les effets de surface qui engendre une certaine imprécision. Un exemple est donné à la figure 3.8 :

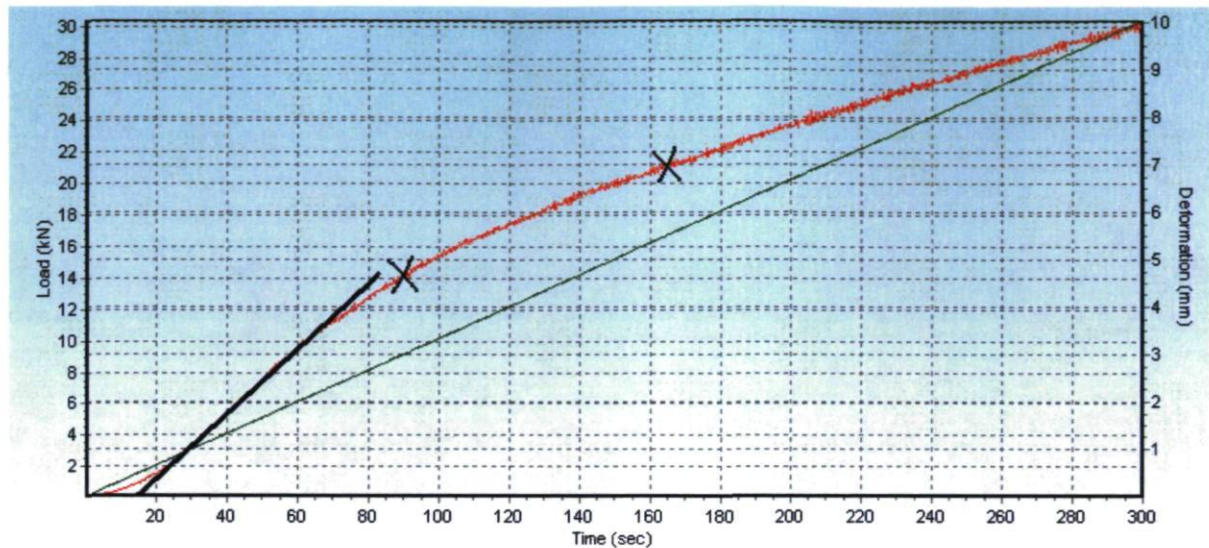


Figure 3.8 : Exemple du graphique obtenu et de la correction apportée lors de l'essai de la capacité portante (la courbe en vert représente l'enfoncement du piston tandis que la courbe en rouge représente la force appliquée sur le piston).

Pour effectuer cette correction, une droite est tracée dans la partie linéaire de la courbe de la force. Le prolongement de cette droite sur l'axe des abscisses donne le temps qui doit être ajouté pour effectuer la lecture de la force à 2,5 mm et 5 mm d'enfoncement en éliminant les effets de surface. Par exemple, la force à 5 mm de pénétration non corrigée est environ 20 kN et est obtenue à 150 secondes. Pour corriger ce résultat, on doit ajouter environ 16 secondes au temps de pénétration. La force corrigée est donc lue à 166 secondes et correspond à environ 21 kN. La figure 3.8 montre un exemple de la correction apportée. Les «X» sur cette figure correspondent aux résultats corrigés des forces pour la pénétration à 2,5 mm et 5 mm.

3.1.3 Compression non confinée

La compression non confinée permet de définir la contrainte maximale que peut supporter un échantillon cylindrique de matériau granulaire avant qu'il y ait rupture.

Dans le cadre de cette étude, ceci permet de déterminer la résistance au cisaillement indirect de différents matériaux à différentes granulométries. Cet essai permet également d'évaluer la cohésion entre le matériau et les produits à l'essai.

3.1.3.1 Préparation des échantillons

Pour la préparation des échantillons, tout comme l'essai du module réversible modifié, on doit connaître la quantité d'eau dans le mélange final afin d'être à la valeur Proctor et assurer, par le fait même, un compactage maximal. Pour ce faire, on doit mesurer le pourcentage d'eau dans le produit stabilisant ou d'abat-poussière afin de connaître la quantité d'eau que l'on doit ajouter au matériau pour avoir le pourcentage final désiré. Le matériau est considéré comme ayant 0% d'eau, car il a été préalablement mis environ 24 heures à l'étuve. Une fois homogène, le mélange entre le matériau, l'eau et le produit est compacté en cinq couches égales dans un moule. Chaque couche est compactée une minute et une scarification est effectuée entre chaque couche dans le but d'assurer une homogénéité de l'échantillon et d'ainsi éviter la formation de plans préférentiels. La compaction se fait automatiquement à l'aide d'une minuterie située à l'extérieur de la boîte dans laquelle le marteau pneumatique est installé (figure 3.9). La partie supérieure du moule est amovible afin de pouvoir éventuellement araser l'échantillon et avoir deux surfaces régulières. Le moule se défait aussi en deux demi-cylindres afin de faciliter le démoulage de l'échantillon. Ce dernier a une hauteur finale de huit pouces et un diamètre de quatre pouces ce qui correspond à la norme ASTM D 5102. Une fois l'échantillon réalisé, un temps de cure de trois jours est nécessaire avant d'effectuer l'essai de la compression non confinée. Ce temps de cure a été déterminé par expérience (Pierre et coll. (2008)) comme le temps minimum afin que l'échantillon soit sec.

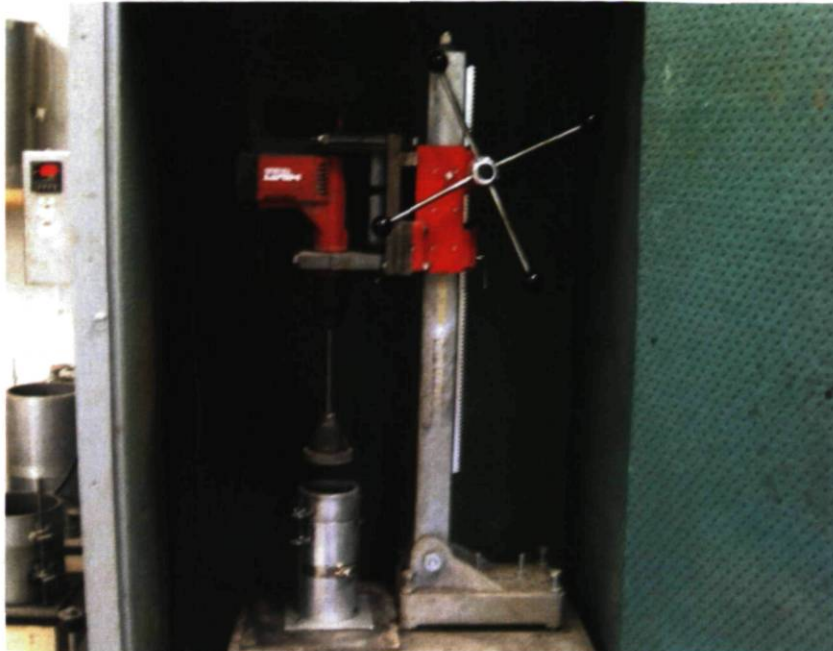


Figure 3.9 : Montage pour la réalisation des échantillons pour l'essai de la compression non confinée.

Le démoulage des échantillons contenant une faible quantité de particules fines (environ 4%) est difficile et souvent, le matériau granulaire s'effondre. Dans le cas de ces granulométries, une moustiquaire ayant la forme de l'échantillon est insérée à l'intérieur du moule ce qui facilite grandement le démoulage (figure 3.10).



Figure 3.10 : Échantillon muni d'une moustiquaire pour l'essai de la compression non confinée.

Il est à noter que la moustiquaire est placée de manière lâche autour de l'échantillon afin de ne pas induire de confinement latéral. De plus, la cure n'est pas modifiée, la moustiquaire permettant à l'échantillon de sécher convenablement. Les conditions de l'essai ne sont donc pas modifiées et les résultats entre un échantillon sans moustiquaire et un échantillon avec moustiquaire peuvent être comparés.

3.1.3.2 Réalisation des essais

Les essais de la compression non confinée sont effectués sur la même presse que les essais du module réversible modifié et de la capacité portante. Une plaque est apposée sur le dessus de l'échantillon afin que la force soit appliquée sur toute la surface. Une bille est aussi déposée sur le dessus de cette plaque pour que la force soit répartie uniformément sur la surface de l'échantillon (figure 3.11). La vitesse de descente de la presse est de 0,0133 mm/s, ce qui satisfait aux exigences ASTM D 5102 pour la compression non confinée.

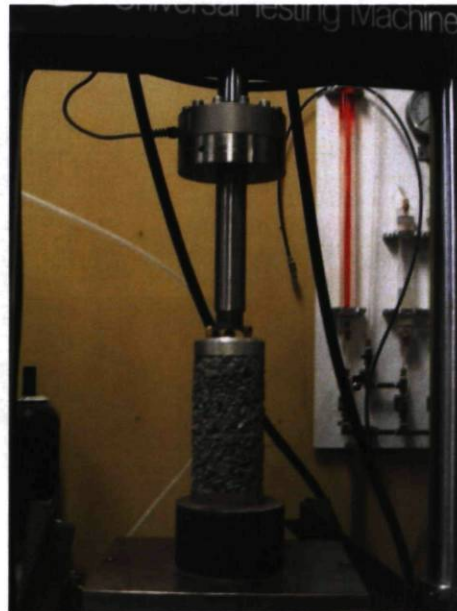


Figure 3.11 : Montage pour la réalisation de l'essai de la compression non confinée.

Le résultat recherché dans ce cas-ci est la contrainte maximale que peut supporter l'échantillon sans qu'il y ait rupture. Les contraintes maximales enregistrées varient beaucoup selon la minéralogie, la granulométrie et le produit testé, mais l'allure du graphique de la contrainte appliquée sur l'échantillon en fonction du temps est semblable d'un essai à un autre. En effet, la force augmente de manière linéaire jusqu'à l'obtention d'un plateau pour ensuite diminuer (figure 3.12). Lorsque la courbe forme un plateau, la force maximale est atteinte et un plan de cisaillement a donc été créé à l'intérieur de l'échantillon (figure 3.13). Suite à la création de ce plan de cisaillement, la contrainte se met alors à diminuer. La contrainte maximale recherchée correspond donc à la valeur de la contrainte pour laquelle le plateau commence à se former et qui correspond à la rupture par cisaillement indirect du matériau.

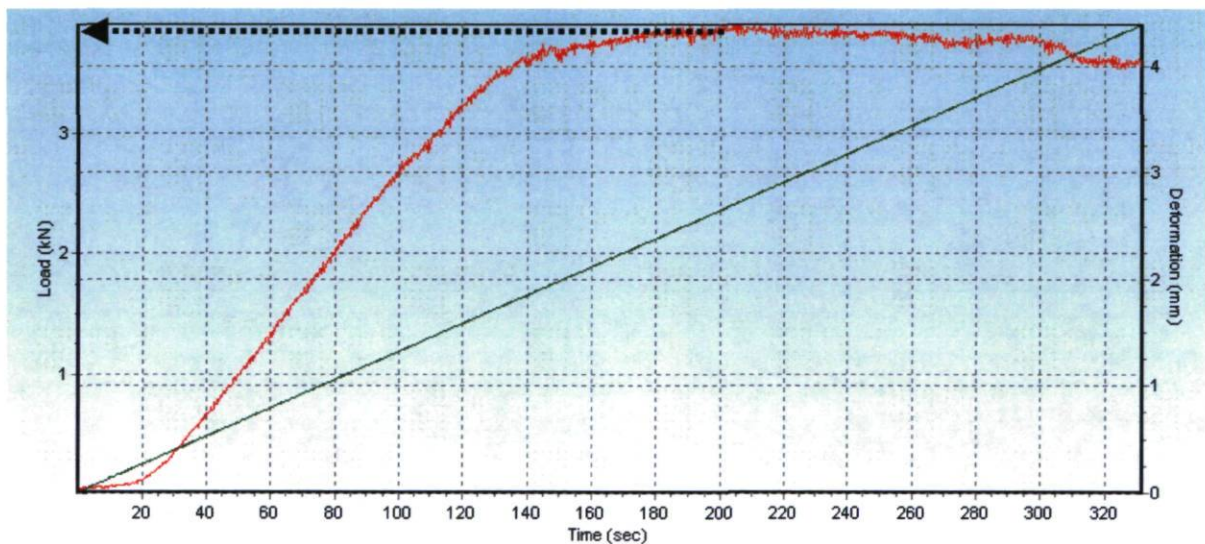


Figure 3.12 : Exemple du graphique obtenu pour l'essai de la compression non confinée (la courbe rouge correspond à la force appliquée sur l'échantillon alors que la verte correspond à la déformation de l'échantillon).

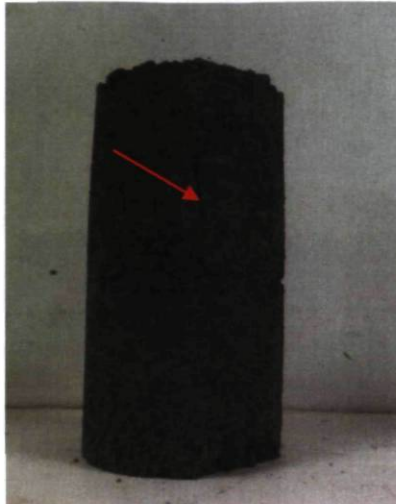


Figure 3.13 : Exemple d'un plan de cisaillement sur un échantillon après avoir effectué un essai de la compression non confinée.

3.1.4 Cisaillement direct

La stabilité mécanique d'un matériau repose en grande partie sur sa capacité à résister au cisaillement. Cette caractéristique est donc très importante en géotechnique routière. L'objectif de cet essai est donc de déterminer la force qui doit être déployée afin de briser les liens présents à l'intérieur d'un matériau granulaire traité à l'aide de produits d'abat-poussière ou d'agents stabilisants. Le plan de cisaillement étant imposée pour cet essai, la cohésion de surface du matériau granulaire peut être évaluée.

3.1.4.1 Préparation des échantillons

Tout comme les trois essais précédents, le matériau granulaire, initialement sec, est mélangé avec le produit d'abat-poussière ou stabilisant. La quantité d'eau est ensuite ajoutée à ce mélange afin d'atteindre la valeur Proctor et d'assurer un compactage maximal.

La boîte de cisaillement est carrée et a 254 mm de côtés et une hauteur de 124 mm pour un volume de 0,008 m³. Une masse carrée est posée au dessus de l'échantillon afin d'appliquer une certaine contrainte normale sur ce dernier. Cette masse a 247 mm de côtés pour une aire de 0,061 m². Sa masse est de 25,1 kg. Elle exerce donc sur l'échantillon une contrainte de 4,1 kPa (équation 5).

$$P_{tête} = \frac{25,1kg \cdot 9,81m/s^2}{0,061m^2} * \frac{1kPa}{1000Pa} = 4,1kPa \quad [5]$$

L'échantillon est compacté en cinq couches égales à l'aide du même marteau pneumatique utilisé pour la compaction des échantillons des trois essais précédents. Après le compactage d'une couche, la surface est scarifiée afin d'obtenir un échantillon homogène sans plan de cisaillement préférentiel. Les essais sont réalisés immédiatement après la réalisation de l'échantillon et vise donc à vérifier l'efficacité des matériaux granulaires traités ou non juste après leur application.

3.1.4.2 Réalisation des essais

Pour cet essai, le paramètre recherché est la contrainte maximale qui doit être appliquée afin de briser les liens à l'intérieur du matériau granulaire et d'ainsi créer un plan de cisaillement. La boîte de cisaillement est munie d'une partie inférieure mobile et d'une partie supérieure fixe. Une contrainte est appliquée sur la partie mobile de la boîte. La hauteur de chaque partie est identique afin que le plan de cisaillement soit créé au milieu de l'échantillon (figure 3.14). De plus, le fait que la compaction soit réalisée en cinq couches égales oblige le plan de cisaillement à être au milieu d'une couche (milieu de la troisième couche) et non entre deux couches. Il peut s'introduire des faiblesses entre les couches dues à un manque d'uniformité du compactage et ainsi influencer la force à appliquer afin de créer un plan de cisaillement et ce, même s'il y a eu scarification entre la compaction de chacune des couches.

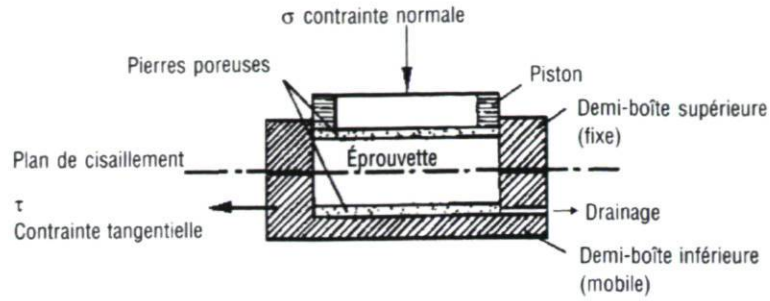


Figure 3.14 : Schéma de la boîte de cisaillement.

La contrainte appliquée sur la partie inférieure de la boîte est créée par un moteur. Une cellule de charge est placée sur la partie supérieure afin de quantifier la contrainte de résistance au cisaillement introduite par le matériau granulaire. Le montage est également muni d'un capteur de déplacement horizontal et vertical afin de connaître les variations de position de la boîte de cisaillement. La figure 3.15 résume le montage de la presse à cisaillement. La figure 3.16 montre la presse à cisaillement utilisée pour réaliser les essais de cisaillement direct.

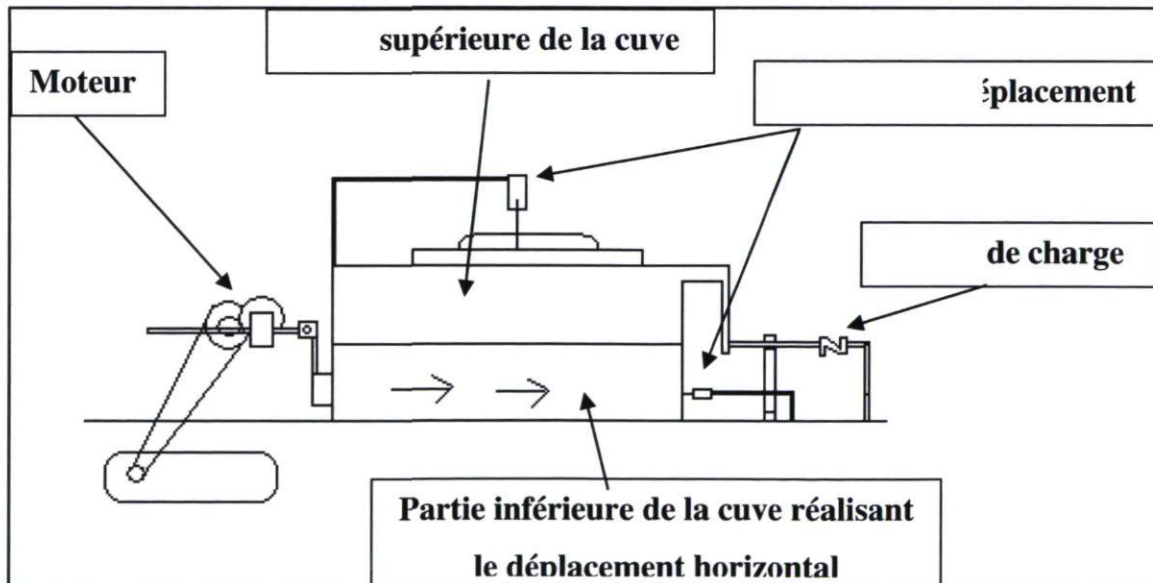


Figure 3.15 : Schéma de montage de la presse à cisaillement.

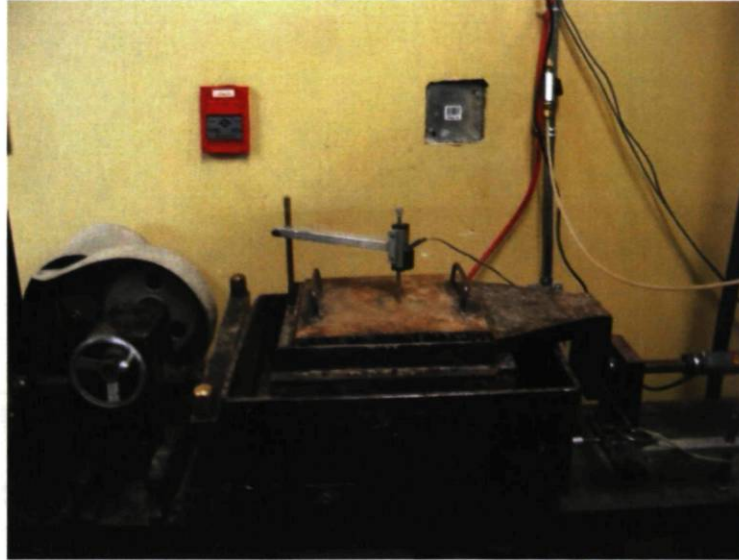


Figure 3.16 : Presse utilisée pour les essais du cisaillement direct.

La vitesse de déplacement de la partie inférieure est de 0,107 mm/min ce qui correspond à la vitesse prescrite par la norme ASTM D 3080 pour l'essai du cisaillement direct. Lorsque l'essai débute, la force de résistance du matériau augmente jusqu'à l'obtention de la contrainte maximale. Lorsque cette contrainte maximale est atteinte, le plan de cisaillement est alors créé. Après cette étape, la résistance au cisaillement diminue légèrement avant de tendre vers une constante. L'ordinateur enregistre la contrainte et les déplacements horizontaux et verticaux à chaque seconde. Il est à noter que la valeur retenue est la résistance maximale, soit la résistance au pic.

En effet, les matériaux granulaires testés passent par une valeur limite appelée couramment résistance au pic pour ensuite diminuer légèrement et tendre vers une valeur constante appelée résistance à l'état critique. Ce comportement était à prévoir puisque les matériaux granulaires testés sont denses et appartiennent donc aux matériaux de type II sur la figure 3.17. Le cheminement de la résistance au cisaillement passe donc par un pic. Ce pic se traduit par l'énergie supplémentaire qui doit être fournie afin de permettre aux particules situées au-dessus du plan de cisaillement de surmonter les particules situées sur le rang inférieur (figure 3.18). En raison de l'arrangement de leurs particules, les matériaux lâches n'ont pour leur part pas à surmonter les particules du rang inférieur

lorsqu'ils sont soumis à un essai de cisaillement et suivent donc le cheminement des sols de type I comme le montre la figure 3.17.

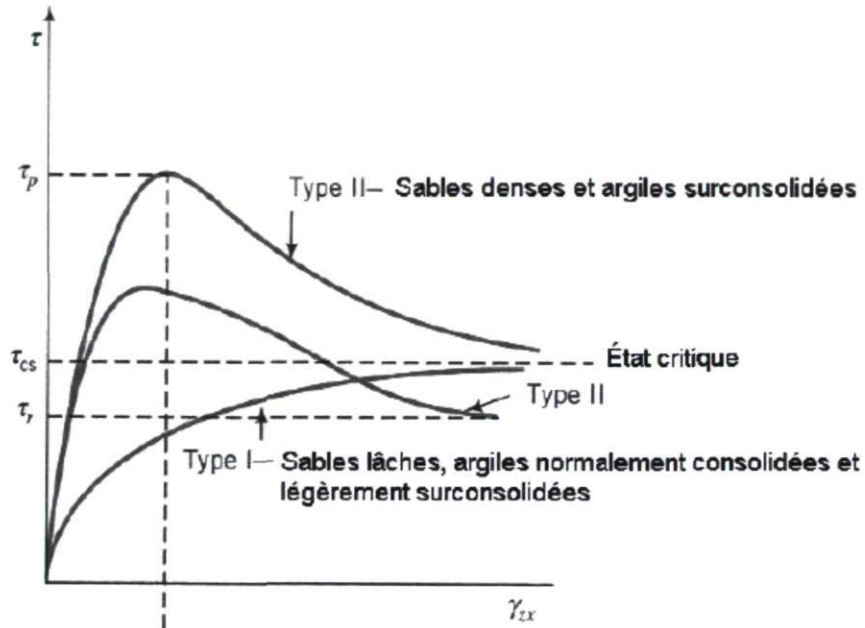


Figure 3.17 : Schéma du cheminement de la résistance au cisaillement en fonction de la déformation pour deux types de sol (selon Foriero (2009)).

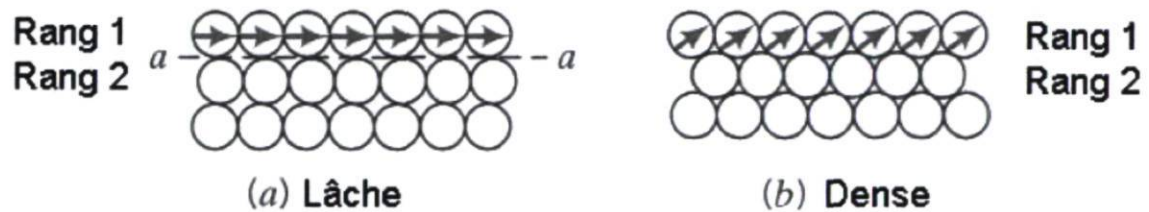


Figure 3.18 : Schéma de l'imbrication des particules d'un sol lâche (a) comparativement à un sol dense (b) (selon Foriero (2009)).

3.2 Essais de caractérisation géotechnique des matériaux granulaires utilisés

Les essais de caractérisation géotechnique sont réalisés afin de connaître précisément les matériaux granulaires à l'étude et d'en déterminer les différentes propriétés. La connaissance de ces résultats peut éventuellement s'avérer utiles afin d'expliquer certains résultats obtenus. Voici les différents essais effectués afin de caractériser les matériaux granulaires à l'étude :

- Analyse granulométrique par tamisage (BNQ 2560-040)
- Proctor modifié (BNQ 2501-255)
- Capacité portante (CBR modifié) (ASTM D 1883)
- Los Angeles (BNQ 2560-400)
- Micro-Deval (BNQ 2560-070)
- Densité absorption (BNQ 2560-065 et 067)
- Essai au bleu de méthylène (LC 21-255)

Ces essais sont réalisés pour les trois minéralogies à l'étude pour ce projet soient le gneiss granitique, le basalte et le calcaire.

Il est à noter que l'essai d'analyse granulométrique par sédimentation n'est pas réalisé, car seulement le pourcentage de particules passant le tamis ayant des mèches de 80 μm est recherché et non la granulométrie précise des particules passant le tamis ayant des mèches de 80 μm . De plus, les différents matériaux caractérisés ont tous un faible pourcentage de particules fines (particules passant le tamis ayant des mèches de 80 μm) ce qui ne justifie pas une analyse granulométrique par sédimentation.

3.2.1 Analyse granulométrique par tamisage (BNQ 2560-040)

L'objectif de cet essai est de déterminer la distribution granulométrique des matériaux granulaires à l'étude. Ceci permet d'identifier la proportion de gravier, de sable et de

particules fines présente à l'intérieur d'un matériau. Le tableau 3.1 définit le nom d'un matériau granulaire en fonction de la taille des particules qui le compose.

La granulométrie des matériaux à l'étude s'apparente à celle d'un MG-20B. Un fuseau granulaire est défini afin de pouvoir statuer si le matériau en question est un MG-20B. Ce fuseau granulaire est déterminé en fonction des exigences auxquelles les matériaux de fondation et de sous-fondation doivent répondre selon le Ministère des Transports du Québec. Ces critères à respecter ont pour objectif d'uniformiser les matériaux utilisés lors de la construction des routes dans le but d'optimiser leurs performances mécaniques et de les rendre plus sécuritaires (figure 3.19, figure 3.20, figure 3.21, tableau 3.5, tableau 3.6 et tableau 3.8).

Tableau 3.1 Appellation des matériaux granulaires en fonction de la taille des particules (selon le Ministère des Transports du Québec, tiré de Leroueil 2004).

		<u>Taille des particules</u>
	Blocs	$> 300 \text{ mm}$
	Cailloux	$\leq 300 \text{ mm}, > 80 \text{ mm}$
Graviers	Graviers grossiers	$\leq 80 \text{ mm}, > 20 \text{ mm}$
	Graviers fins	$\leq 20 \text{ mm}, > 5 \text{ mm}$
Sable	Sables grossiers	$\leq 5 \text{ mm}, > 2 \text{ mm}$
	Sables moyens	$\leq 2 \text{ mm}, > 0,4 \text{ mm}$
	Sables fins	$\leq 0,4 \text{ mm}, > 0,08 \text{ mm}$
Particules fines	Silts	$\leq 0,08 \text{ mm}, > 0,002 \text{ mm}$
	Argiles	$\leq 0,002$

Trois minéralogies différentes sont à l'étude pour ce projet : le gneiss granitique, le basalte et le calcaire. De plus, chaque minéralogie est modifiée de manière à obtenir trois granulométries différentes. Ces dernières sont calculées en fonction du pourcentage de particules fines et sont réalisées conformément à la norme BNQ 2560-040. Les granulométries modifiées sont obtenues en ajoutant ou en enlevant des particules fines et

du sable au matériel tel que vendu tout en essayant d'obtenir une courbe granulométrique la plus régulière possible. Les figures 3.19 à 3.21 présentent les différentes granulométries pour le gneiss granitique, le basalte et le calcaire. Il est à noter que le fuseau granulaire du MG-20B respectant les exigences du Ministère des Transports du Québec est présent en noir sur chaque figure.

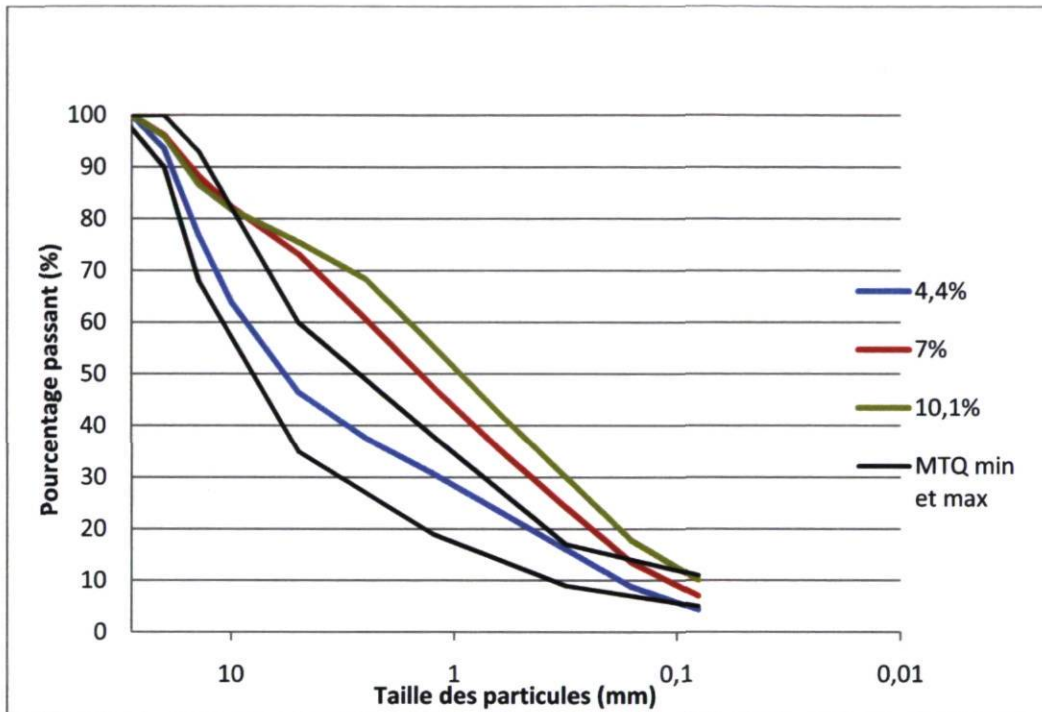


Figure 3.19 : Courbes granulométriques des différentes granulométries pour le gneiss granitique.

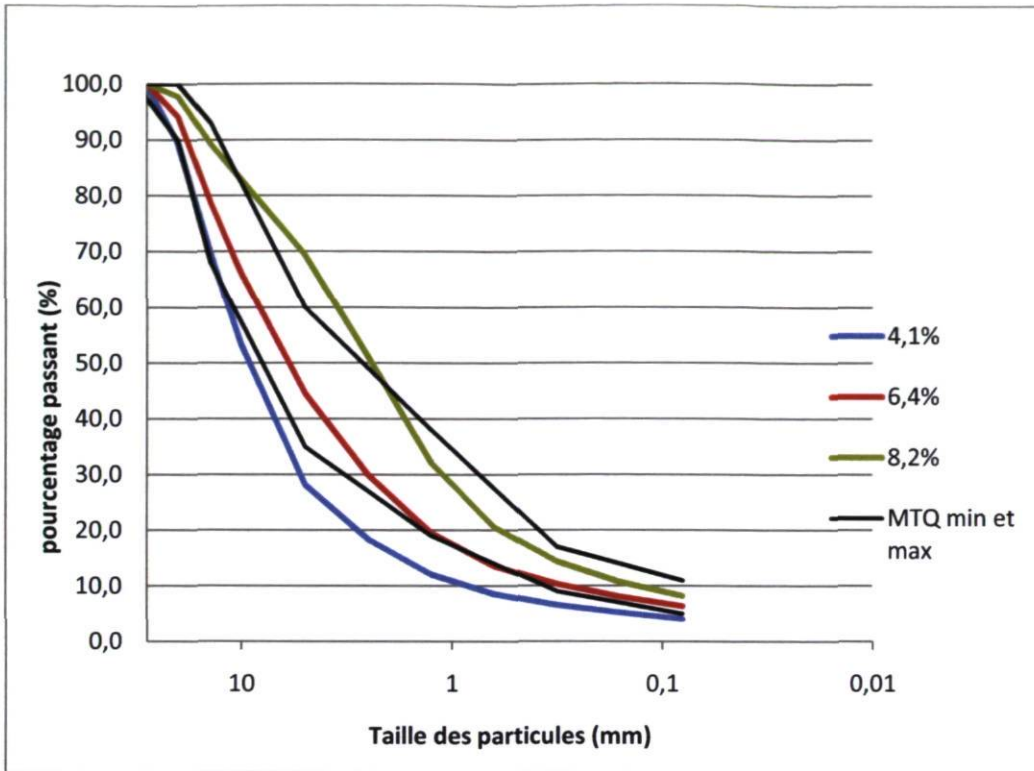


Figure 3.20 : Courbes granulométriques des différentes granulométries pour le basalte.

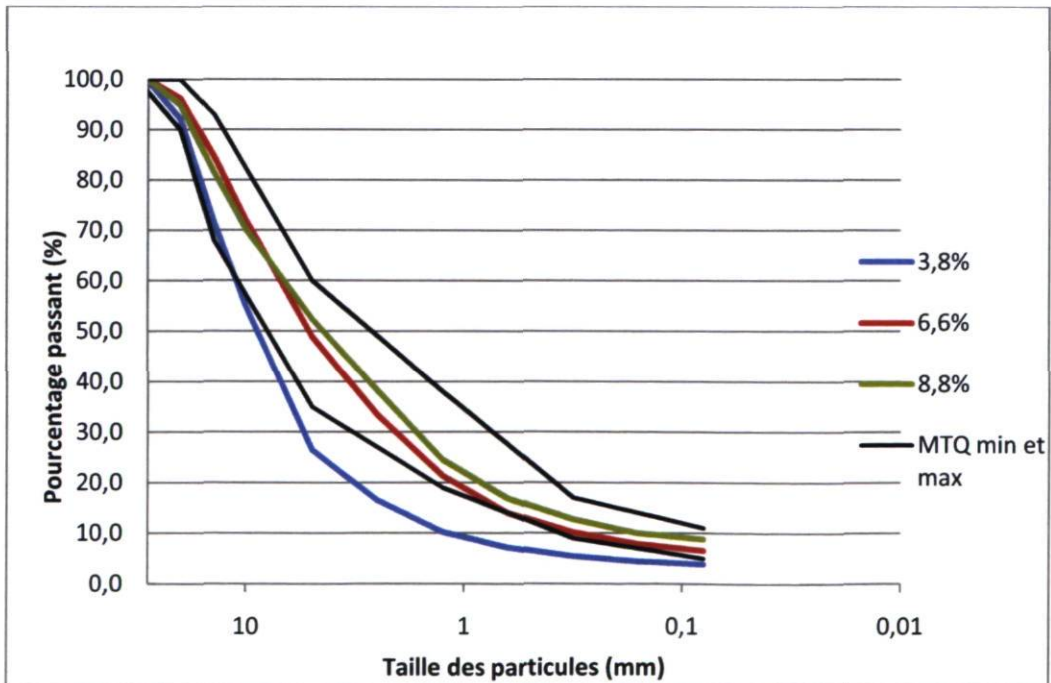


Figure 3.21: Courbes granulométriques des différentes granulométries pour le calcaire.

Pour les trois minéralogies, les différentes granulométries ont été reconstruites de manière à respecter le fuseau granulaire du MG-20B tout en tentant de conserver une courbe granulaire régulière. Toutefois, les granulométries de 3,8% de fines pour le calcaire et de 4,1% de fines pour le basalte ont une proportion un peu faible en sable. Il est également possible de remarquer que le gneiss granitique est un matériau plus sablonneux en observant les courbes granulométriques contenant 7% et 10,1% de particules fines.

Afin de statuer sur la validité des différentes granulométries, les coefficients d'uniformité et de courbure sont illustrés dans le tableau 3.2. Le coefficient d'uniformité (C_u) indique si une granulométrie est uniforme. Une granulométrie est considérée uniforme pour des valeurs du C_u inférieures à 5. Pour ce projet, des sols uniformes sont proscrits et des valeurs de C_u supérieures à 5 sont donc recherchées, dans le but d'obtenir un matériau granulaire ayant une capacité portante maximale.

De plus, le coefficient de courbure (C_c) permet de déterminer l'étalement d'une courbe granulométrique. Des valeurs du C_c entre 1 et 3 indiquent que la granulométrie d'un sol est bien étalée. Les équations 6 et 7 définissent respectivement le C_u et le C_c .

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [6]$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad [7]$$

où : d_{10} = diamètre effectif, diamètre des grains correspondant à 10% de passant

d_{30} = diamètre des grains correspondant à 30% de passant

d_{60} = diamètre des grains correspondant à 60% de passant

Tableau 3.2: Résultat des coefficients d'uniformité et de courbure pour les différentes granulométries et minéralogies.

Minéralogies	Granulométrie	C_u	C_c
(-)	(% de particules fines)	(-)	(-)
<i>Gneiss granitique</i>	4,4	49	0,9
	7	22	0,8
	10,1	19	0,8
<i>Basalte</i>	4,1	13	3
	6,4	28	2,4
	8,2	25	2,6
<i>Calcaire</i>	3,8	10	2,4
	6,6	24	2,0
	8,8	43	2,4

En résumé, les granulométries réalisées en laboratoire pour les différentes minéralogies balayent le fuseau granulaire du MG-20B et s'avèrent donc valides afin de pouvoir éventuellement les comparer aux différentes distributions granulométriques présentes sur le terrain. De plus, les coefficients d'uniformité et de courbure montrent que les matériaux à l'étude ont des granulométries non uniformes et étalées, caractéristiques essentielles à la performance d'un matériau granulaire utilisé comme fondation sur une route non revêtue.

3.2.2 Proctor modifié (BNQ 2501-255)

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un matériau granulaire donné dans des conditions de compactage fixées. Cette teneur en eau optimale permet un compactage plus efficace ce qui se traduit par l'atteinte de la densité sèche la plus élevée du matériau granulaire. La capacité portante maximale du matériau en

question peut ainsi être atteinte. Les équations 8, 9 et 10 définissent respectivement la teneur en eau, la masse volumique humide et la masse volumique sèche.

$$W = \text{Teneur eau}(\%) = \frac{M_{eau}}{M_{sol\ sec}} \quad [8]$$

$$\rho_{humide} = \frac{\text{masse sol humide}}{\text{volume}} \quad [9]$$

$$\rho_{sec} = \frac{\rho_{humide}}{(1+W)} \quad [10]$$

Différentes teneurs en eau pour chaque granulométrie de chaque minéralogie sont testées afin de déterminer la teneur en eau qui permet d'obtenir un compactage maximal. En traçant le graphique de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau, il est possible de trouver la teneur en eau au Proctor. Cette dernière est tout simplement la teneur en eau pour laquelle la masse volumique sèche est la plus élevée. La figure 3.22 montre un exemple d'un résultat qui est obtenu suite à un essai de Proctor modifié pour l'échantillon de basalte ayant une granulométrie comportant 6,4% de particules fines.

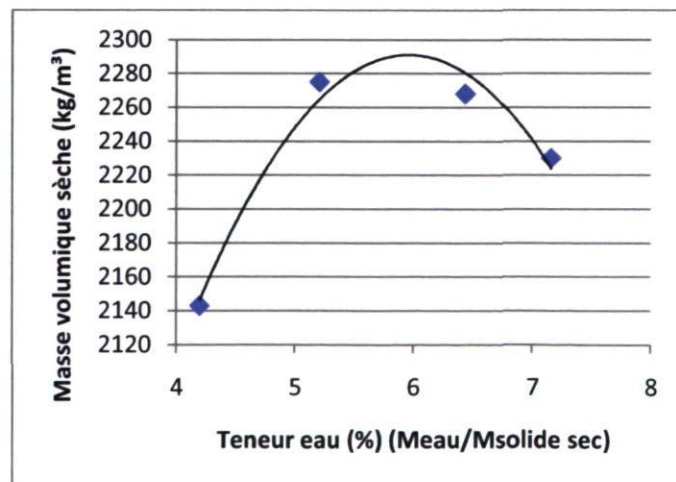


Figure 3.22 : Exemple de graphique obtenu pour un essai de Proctor modifié pour le basalte ayant une granulométrie comportant 6,4% de particules fines.

L'essai consiste à prendre environ 5 kg de matériel, à y ajouter la quantité d'eau voulue et à compacter l'échantillon en 5 couches égales à l'aide d'une masse tombante normalisée. La masse tombe 56 fois par couche. À la fin, l'échantillon est arasé afin d'occuper exactement le volume du moule. Après avoir pesé le moule afin de connaître la masse du matériel à l'intérieur, l'échantillon de sol est placé à l'étuve afin de vérifier si la teneur en eau réelle est similaire à celle visée au début. Le tableau 3.3 présente les résultats obtenus.

Tableau 3.3 : Résultats des essais de Proctor modifié pour les différentes granulométries des trois minéralogies.

Minéralogies	Granulométries	Proctor	(Masse vol. sèche)
(-)	(% particules fines)	(% eau optimal)	(kg/m³)
<i>Gneiss</i>	4,4	4,5	2212
	7	6,8	2045
	10,1	7,4	2020
<i>Basalte</i>	4,1	4,5	2180
	6,4	5,75	2288
	8,2	6,2	2327
<i>Calcaire</i>	3,8	4,2	2192
	6,6	5,6	2220
	8,8	6	2315

Il est à noter que les résultats de Proctor modifié obtenus suite aux essais peuvent être sujets à de légères variations. Parfois, lors de la réalisation de différents échantillons, il est évident que le mélange contient une quantité d'eau trop importante. En effet, suite à un compactage, si le matériau suinte, la teneur en eau optimale est dépassée. Dans ce cas, le mélange est refait avec des quantités d'eau inférieures jusqu'à l'obtention d'une valeur Proctor permettant un compactage optimal.

Bref, selon les résultats obtenus, il est possible de déduire que plus le matériau granulaire contient une quantité importante de particules fines (particules ayant un diamètre inférieur à 80 μm) plus la quantité d'eau nécessaire pour avoir un compactage maximal est grande. Cette conclusion est due au fait que plus la quantité de particules fines est importante, plus la surface spécifique est grande. Le matériau granulaire est alors en mesure d'absorber une plus grande quantité d'eau.

Finalement, il est intéressant de remarquer que pour le gneiss granitique, la masse volumique sèche maximale diminue lorsque le pourcentage de particules fines augmente. Par contre, pour le basalte et le calcaire, la masse volumique sèche maximale augmente lorsque le pourcentage de particules fines augmente. Ce résultat est dû au fait que le gneiss granitique est un matériau plus sablonneux et qu'il a un pourcentage de vides plus grand. En effet, en regardant les courbes granulométriques (figure 3.19, figure 3.20 et figure 3.21), il est possible de remarquer que le pourcentage de particules ayant un diamètre inférieur à 5 mm est beaucoup plus important pour le gneiss que pour le basalte et le calcaire, et ce, pour toutes les granulométries. En effet, pour le gneiss, une certaine quantité de gneiss granitique de granulométrie 0-5 mm et de granulométrie 0-2,5 mm était ajouté au MG-20 de base afin d'augmenter le pourcentage de particules fines. Inévitablement, la quantité de sable était alors augmentée. Ceci se traduit donc par une augmentation du pourcentage des vides, les interstices créés par les particules plus grossières étant déjà remplis par les particules fines et sablonneuses du MG-20 de base. Par contre, le basalte et le calcaire contiennent une quantité plus importante de gravier (particules plus grossières). Lorsqu'on veut augmenter le pourcentage de particules fines et qu'on ajoute un mélange de sable, de silt et d'argile, ces particules vont se localiser dans les interstices créés par les particules plus grossières et remplissent donc une partie de ces interstices ce qui a pour effet d'augmenter la masse volumique sèche et donc de diminuer le pourcentage des vides.

3.2.3 Capacité portante (CBR modifié) (ASTM D 1883)

L'essai de la capacité portante a pour objectif de déterminer la portance d'un matériau granulaire. Ce dernier est compacté à une teneur en eau optimale et donc à une densité maximale. Suite à cet essai, il est alors possible de définir la rigidité du matériau. Cet essai de la capacité portante est le même que celui présenté à la section 3.1.2. Les échantillons sont fabriqués exactement de la même manière et l'essai est réalisé suivant les mêmes conditions. Les paramètres visés sont donc les mêmes, soit la force appliquée à 2,5 mm et à 5 mm d'enfoncement. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Résultats pour l'essai de la capacité portante pour les différentes granulométries des trois minéralogies.

Minéralogies	Granulométrie (% particules fines)	Force à 2,5 mm (kN)	Force à 5 mm (kN)
<i>Gneiss granitique</i>	4,4	18,4	20,7
	7,0	15,0	16,8
	10,1	15,1	18,9
<i>Basalte</i>	4,1	10,7	16,7
	6,4	13,8	22,4
	8,2	13,9	23,9
<i>Calcaire</i>	3,8	10,9	14,7
	6,6	8,9	13,9
	8,8	16,3	25,6

Pour tous les essais, la force à appliquer pour enfoncer le piston de 5 mm est toujours plus grande que celle à 2,5 mm ce qui est logique, car pour enfoncer le piston d'une profondeur deux fois plus grande, cela nécessite une force plus importante.

En général, il est également possible de remarquer que pour le gneiss, la force à appliquer pour enfoncer le piston diminue lorsque le pourcentage de particules fines augmente tandis que pour le calcaire et le basalte, cette force augmente lorsque le pourcentage de particules fines augmente. Ce résultat est dû au fait que la masse volumique sèche du basalte et du calcaire augmente lorsque le pourcentage de particules fines augmente tandis que celle du gneiss granitique diminue lorsque le pourcentage de particules fines augmente. En effet, un matériau contenant un pourcentage de vides plus important est moins rigide et l'enfoncement du piston nécessite donc une force d'application moindre.

Malgré le fait que le gneiss granitique possède la masse volumique sèche la plus faible, il obtient les résultats les plus élevés pour la force à 2,5 mm d'enfoncement ce qui veut dire qu'il est donc un matériau très rigide. Toutefois, à 5 mm d'enfoncement, le gneiss ne se démarque pas autant que le basalte et le calcaire qui sont des matériaux plus résistants à l'abrasion et à la fragmentation des granulats. En effet, l'écart entre la force à 2,5 mm et 5 mm d'enfoncement est beaucoup plus important pour le basalte et le calcaire que pour le gneiss granitique.

3.2.4 Résistance à l'abrasion à l'aide de l'appareil Los Angeles (BNQ 2560-400)

L'objectif de cet essai est d'identifier la résistance à l'abrasion ainsi qu'à la fragmentation des granulats. Cet essai consiste à introduire une certaine quantité de matériau (environ 5000 g) et des charges abrasives (boulets) normées dans un cylindre et de mettre ce dernier en rotation 15 minutes. La taille des particules qui sont testées dépend de la granulométrie du matériau en question. Pour ce projet, le grade B est utilisé (2500 g de passé 20 mm, retenu 14 mm et 2500 g de passé 14 mm, retenu 10 mm). La figure 3.23 illustre l'appareil Los Angeles utilisé pour la réalisation des essais.

Après l'essai, le matériel est récupéré et tamisé à l'aide d'un tamis ayant des mailles de 1,7 mm. Le pourcentage d'abrasion est défini comme le pourcentage de particules passant ce tamis (équation 11).

$$\%_{\text{abrasion}} = \left(\frac{M_{\text{initiale}} - M_{\text{finale}}}{M_{\text{initiale}}} \right) * 100$$

[11]



Figure 3.23 : Appareil Los Angeles utilisé pour la réalisation des essais.

Plus le pourcentage d'abrasion est faible plus le matériau résiste à l'abrasion et il est donc plus apte à supporter diverses contraintes sans subir de changements granulométriques importants. Le tableau 3.5 présentent les résultats obtenus :

Tableau 3.5 : Résultats obtenus pour l'essai de la résistance à l'abrasion à l'aide de l'appareil Los Angeles.

Minéralogies	% _{abrasion}
<i>Gneiss granitique</i>	50,9 %
<i>Basalte</i>	20,1 %
<i>Calcaire</i>	26,2 %
<i>Exigences MTQ pour MG-20 B*</i>	≤ 50 %

* Selon (Géolab inc., 2002)

Les résultats démontrent que le basalte et le calcaire sont des matériaux plus résistants que le gneiss et qu'ils sont donc en mesure de supporter des contraintes plus importantes sans subir de changement granulométrique.

3.2.5 Coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil micro-Deval (BNQ 2560-070)

Cet essai a pour objectif de mesurer la dureté d'un granulat et de statuer sur sa résistance à l'abrasion et à l'usure. Cette qualité est essentielle entre autres afin de s'assurer que les matériaux granulaires utilisés pour la construction des routes conservent des courbes granulométriques similaires avant, pendant et après les travaux. En effet, l'attrition causée par les véhicules lourds et l'usure causée par l'action des pneus des véhicules de toutes sortes sur les granulats de surface peuvent être à l'origine de modifications de leur granulométrie.

Cet essai consiste à introduire une certaine quantité de matériau (environ 500 g), des charges abrasives (boulets) normées et de l'eau dans un cylindre et de mettre ce dernier en rotation pendant deux heures. La taille des particules qui sont testées dépend de la granulométrie du matériau en question. Pour ce projet, le grade B est utilisé (250 g de passé 20 mm, retenu 14 mm et 250 g de passé 14 mm, retenu 10 mm). Il est à noter que les boulets et le contenant cylindrique utilisés sont beaucoup plus petits que ceux de l'essai réalisé à l'aide de l'appareil Los Angeles. De plus, la rotation est plus rapide ce qui sollicite davantage les propriétés de résistance à l'usure des matériaux testés.

Une fois l'essai terminé, les charges abrasives sont retirées du cylindre et les 500 g de matériau sont récupérés pour ensuite être tamisés sur un tamis ayant des mailles de 1,25 mm. Le coefficient de perte à l'usure micro-Deval est défini comme le pourcentage de particules passant le tamis ayant des mailles de 1,25 mm suite à deux heures de rotation du cylindre. La figure 3.24 montre l'appareil micro-Deval utilisé pour la réalisation des essais. Le coefficient micro-Deval est obtenu à l'aide de l'équation 12.

$$\text{Coefficient micro - Deval} = \left(\frac{500-m}{500} \right) * 100 \quad [12]$$

Où : m = la masse des particules retenues sur les tamis dont les ouvertures sont égales à 1,25 mm.

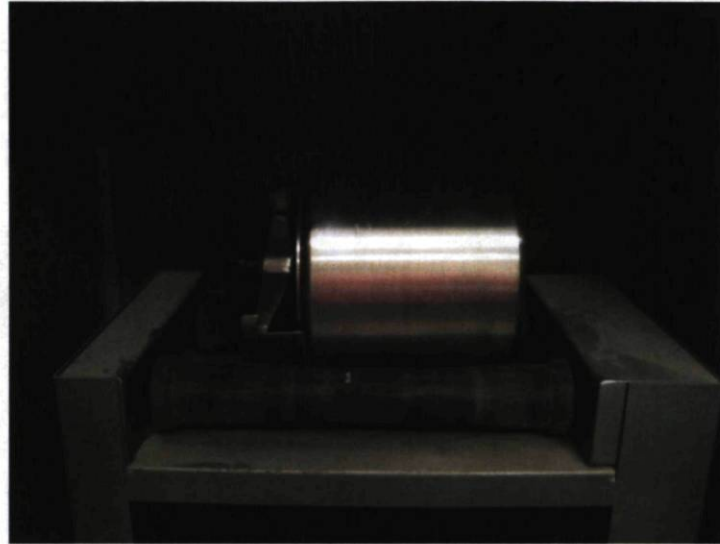


Figure 3.24 : Appareil micro-Deval utilisé pour la réalisation des essais.

Les résultats obtenus pour cet essai sont présentés au tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Résultats obtenus pour l'essai de la résistance à l'usure à l'aide de l'appareil micro-Deval.

Minéralogies	Coefficient micro-Deval
<i>Gneiss granitique</i>	12,7 %
<i>Basalte</i>	16,7 %
<i>Calcaire</i>	32,1 %
<i>Exigences MTQ pour MG-20B*</i>	≤ 25 %

* Selon (Géolab inc., 2002)

Les résultats démontrent donc que le gneiss et le basalte sont des matériaux très résistants à l'usure et que le calcaire l'est moins. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le calcaire est un type de granulat de source sédimentaire (généralement plus friable et donc moins résistant à l'usure) comparativement au basalte et au gneiss granitique qui sont respectivement des granulats de source volcanique et plutonique métamorphisée (Bilodeau (2009)).

3.2.6 Densité et Absorptivité des gros granulats (BNQ 2560-065) et des granulats fins (BNQ 2560-067)

L'objectif des essais de la densité et de l'absorption est de déterminer la densité brute et apparente ainsi que le pourcentage d'absorption du gros granulat (10 mm < diamètre des particules < 28 mm) et du granulat fin (diamètre des particules ≤ 5 mm) après 24 heures d'immersion dans l'eau. L'essai est basé sur un granulat à l'état saturé et sur un granulat à l'état saturé superficiellement sec (état sss). Comparativement à l'état saturé, pour lequel toute la surface du matériau granulaire est saturée, seulement les pores du matériau granulaire sont saturés pour l'état sss. Une quantité d'environ 3000 grammes de gros granulats et 1000 grammes de granulats fins est suffisante. Il est important de s'assurer que la granulométrie des échantillons recueillis est représentative de la granulométrie générale du matériau testé. La densité est une propriété qui permet entre autres de déterminer la quantité de vides d'un matériau granulaire. La densité permet également d'avoir une idée de la masse volumique du matériau, celle-ci étant définie comme le rapport entre la masse volumique du matériau et celle d'un matériau de référence (très souvent l'eau). Pour sa part, l'essai de l'absorption est surtout utilisé afin de déterminer le changement de masse d'un granulat sec comparativement à un granulat qui a absorbé un maximum d'eau par ses pores. Voici plus précisément les définitions et formules utilisées des essais réalisés dans le cadre de la détermination de la densité et de l'absorptivité des gros granulats et des granulats fins.

Densité brute : Rapport, à une température donnée, entre la masse dans l'air d'une unité de volume d'un matériau perméable (incluant à la fois les vides perméables et ceux imperméables, cela dans des conditions normales), et la masse dans l'air de même densité d'un égal volume d'eau distillée et désaérée, toujours à la température donnée (équation 13, 14, 17 et 18).

Densité apparente : Rapport, à une température donnée, entre la masse dans l'air d'une unité de volume d'un matériau et la masse dans l'air de même densité d'un égal volume d'eau distillée et désaérée. Dans le cas d'un matériau solide, le volume correspond à celui de la portion imperméable (équation 15 et 19).

Absorptivité : Propriété par laquelle un liquide pénètre et remplit les pores perméables d'un corps solide poreux. L'absorptivité représente donc l'augmentation de la masse du corps solide poreux, suite à la pénétration du liquide dans ses pores perméables (équation 16 et 20).

Formules utilisées pour les gros granulats

$$D_{brute}(\text{état sec}) = \left(\frac{M_{air}}{M_{air\ sss} - M_{eau}} \right) \quad [13]$$

$$D_{brute}(\text{état sss}) = \left(\frac{M_{air\ sss}}{M_{air\ sss} - M_{eau}} \right) \quad [14]$$

$$D_{apparente} = \left(\frac{M_{air}}{M_{air} - M_{eau}} \right) \quad [15]$$

$$\% \text{absorption eau} = \left(\frac{M_{air\ sss} - M_{air}}{M_{air}} \right) * 100 \quad [16]$$

Où : M_{air} = masse dans l'air de l'échantillon séché.

$M_{air\ sss}$ = masse dans l'air de l'échantillon saturé superficiellement sec (sss).

M_{eau} = masse dans l'eau de l'échantillon saturé.

Formules utilisées pour les granulats fins

$$D_{brute}(\text{état sec}) = \left(\frac{M_{éch.sec}}{M_{pycno\ eau} + 500 - M_{pycno\ éch.}} \right) \quad [17]$$

$$D_{brute}(\text{état sss}) = \left(\frac{500}{M_{pycno\ eau} + 500 - M_{pycno\ éch.}} \right) \quad [18]$$

$$D_{apparente} = \left(\frac{M_{éch.sec}}{M_{pycno\ eau} + M_{éch.sec} - M_{pycno\ éch.}} \right) \quad [19]$$

$$\%_{absorption\ eau} = \left(\frac{500 - M_{éch.sec}}{M_{éch.sec}} \right) * 100 \quad [20]$$

Où : $M_{éch.sec}$: masse de l'échantillon séché à l'étuve, en grammes.

$M_{pycno\ eau}$: masse du pycnomètre rempli d'eau, en grammes.

$M_{pycno\ éch.}$: masse du pycnomètre contenant l'échantillon et rempli d'eau jusqu'au trait de jauge, en grammes.

Les résultats obtenus pour la densité et l'absorptivité des différentes minéralogies sont présentés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Résultats obtenus pour les essais de densité et d'absorption.

Minéralogies	Gros granulats				Granulats fins			
	D _{Brute} (sec)	D _{Brute} (sss)	D _{apparente}	% _{absorption}	D _{Brute} (sec)	D _{Brute} (sss)	D _{apparente}	% _{absorption}
-								
<i>Gneiss granitique</i>	2,64	2,66	2,70	0,82 %	2,63	2,64	2,65	0,22 %
<i>Basalte</i>	2,78	2,83	2,94	1,98 %	2,66	2,72	2,85	2,54 %
<i>Calcaire</i>	2,61	2,65	2,72	1,51 %	2,52	2,57	2,65	1,96 %

En résumé, la densité est similaire pour toutes les minéralogies même si le basalte se démarque en ayant une densité légèrement plus élevée. De plus, ce dernier est le matériau ayant le pourcentage d'absorption le plus élevé, suivi du calcaire. Pour sa part, le gneiss montre le pourcentage d'absorption le plus faible (valeurs très basses).

3.2.7 Bleu de méthylène (LC 21-255)

L'objectif de cet essai est de déterminer la capacité d'adsorption ionique des granulats en question et donc, de statuer sur la fraction argileuse comprise dans l'arrangement granulaire du matériau. En effet, le bleu de méthylène se fixe préférentiellement sur les particules argileuses qui sont chargées. Lorsque la surface spécifique des particules argileuses est saturée, le bleu de méthylène se fixe donc aux particules d'eau, qui prend alors une couleur bleutée. Il s'agit donc de déterminer la quantité de bleu nécessaire à ajouter à une quantité de matériau précise (le matériau en question est constitué de particules de diamètre égal ou inférieur à 470 µm) afin d'en saturer la surface spécifique des particules argileuses contenues dans ce matériau.

Il est à noter que les particules argileuses ont la caractéristique d'avoir une très grande surface spécifique et donc, une grande capacité d'adsorption. Donc, plus un granulat adsorbe de bleu de méthylène, plus il contient de particules argileuses.

La valeur au bleu se définit comme étant le rapport entre le volume de bleu utilisé et la masse sèche de l'échantillon (équation 21).

$$\text{Valeur au bleu} = \frac{\text{Volume de bleu utilisé}}{\text{Masse sèche échantillon}} \quad [21]$$

Le tableau 3.8 montrent les résultats obtenus pour les trois minéralogies.

Tableau 3.8 : Résultats obtenus pour les essais au bleu de méthylène

Minéralogies	Valeur au bleu (cm³/g)
<i>Gneiss granitique</i>	0,05
<i>Basalte</i>	0,38
<i>Calcaire</i>	0,60
<i>Exigences MTQ pour MG-20B*</i>	≤ 0,20

* Selon (Géolab inc., 2002)

En résumé, le calcaire est un matériau très argileux. Le basalte peut aussi être qualifié d'argileux même s'il l'est beaucoup moins que le calcaire. Finalement, le gneiss ne comprend presque aucune particule argileuse. Il est à noter que seulement le gneiss respecte les exigences du MTQ pour cet essai.

3.2.8 Conclusion des essais de caractérisation géotechnique

Le gneiss granitique à l'étude se caractérise par un matériau granulaire sablonneux qui est très dur et très résistant à l'usure, mais qui est sujet à la fragmentation et à l'abrasion. De plus, il ne possède pas un grand pourcentage d'absorption et contient très peu de particules argileuses. Pour sa part, le basalte comporte plus de particules grossières que le gneiss et est donc moins sablonneux. C'est le matériau qui possède le plus grand pourcentage d'absorption. Il contient aussi beaucoup de particules argileuses. Le basalte est moins dur que le gneiss. Il est par contre résistant à l'usure, ainsi qu'à la fragmentation et à l'abrasion. Finalement, le calcaire possède une granulométrie semblable à celle du basalte. Son pourcentage d'absorption se situe entre ceux du gneiss et du basalte. Le calcaire est également assez résistant à l'abrasion et à la fragmentation. Sa résistance à l'usure est toutefois assez faible. Finalement, le calcaire contient énormément de particules argileuses.

3.3 Produits abat-poussière et agents stabilisants à l'étude

Tout d'abord, il est important de mentionner les différences entre les produits abat-poussière et les agents stabilisants et de définir les rôles de chacun. Les abat-poussière ont pour but de réduire le soulèvement de la poussière lors de la circulation de véhicules. Ils ne contribuent habituellement pas à améliorer de façon considérable les propriétés mécaniques des routes non revêtues. Pour leur part, les produits stabilisants contribuent à réduire ou à éliminer les défauts de la route en améliorant les propriétés mécaniques des matériaux granulaires en place. En plus de stabiliser la route, les produits stabilisants contribuent parfois à réduire la poussière.

Pour la réalisation des travaux liés à ce mémoire, deux abat-poussière et deux produits stabilisants sont à l'étude. Les abat-poussière sont le chlorure de calcium (CaCl_2) et une saumure naturelle composée de 60% de CaCl_2 , de 37% de NaCl , de 2% de MgCl_2 et de 1% de KCl ayant un degré de salinité environ 10 à 12 fois supérieur à celui de l'eau de la mer. Un des produits stabilisants est une émulsion polymère et l'autre est le ciment. Chaque produit est testé à trois différents taux de pose excepté le ciment qui en a quatre. Les différents taux de pose pour le CaCl_2 , la saumure et l'émulsion polymère sont choisis de manière à ce que les valeurs médianes soient celles recommandées par le manufacturier du produit et en fonction d'études antérieures réalisées dans le cadre du projet CARRLo (Pelletier (2007)). Les taux de pose inférieurs et supérieurs ont principalement été choisis en fonction d'études antérieures (Pelletier (2007), Pierre et coll. (2007) et Pierre et coll. (2008)). Ces études ont entre autres permis de déterminer la variation dans le taux de pose qui apportait des changements significatifs sur la performance d'un matériau granulaire traité à l'aide d'abat-poussière ou d'agents stabilisants. Le ciment est pour sa part testé à quatre taux de pose différents afin de déterminer le taux de pose idéal à la formation de la matrice cimentaire dans le matériau granulaire (le taux de pose requis pour la formation de la matrice cimentaire peut varier de manière considérable en fonction de la minéralogie et de la granulométrie ce qui explique la plage de concentrations plus étendue). Le tableau 3.9 présente les différents taux de pose pour chaque produit testé.

Tableau 3.9 : Produits à l'étude et leurs différents taux de pose.

<i>Produits</i>	<i>Taux de pose</i>
CaCl_2	1,3 – 1,8 – 2,3 (l/m^2)
Saumure	1,3 – 1,5 – 1,8 (l/m^2)
Ciment	1,5 – 3,5 – 4,5 – 6 (%)
Émulsion polymère	1,4 – 2,4 – 3,4 (l/m^2)

Les abat-poussière agissant seulement en surface (aucune stabilisation), le calcul des différents taux de pose en l/m² est idéal. Par contre, pour l'émulsion polymère, il est tenu pour acquis en fonction d'études antérieures (Pierre et coll. (2007) et Pierre et coll. (2008)) et de recommandations du manufacturier que le produit stabilisant agit sur environ 10 cm de profondeur. Donc, une fois la surface à traiter connue, le produit doit être mélangé jusqu'à une profondeur de 10 cm afin de respecter les conditions d'application. Par exemple, s'il est décidé pour une section de stabiliser jusqu'à une profondeur de 20 cm la concentration devra être doublée. Ensuite, chacun des taux de pose des produits est testé sur les trois différentes granulométries de chacune des minéralogies (le gneiss granitique, le basalte et le calcaire). Il est à noter que chacun des quatre essais de laboratoire est effectué à trois reprises afin d'assurer une répétabilité des résultats.

Le tableau 3.10 présente les propriétés des différents produits abat-poussière et agents stabilisants testés dans le cadre de ce projet de maîtrise :

Tableau 3.10 : Propriétés des différents produits à l'étude.

<i>Produits</i>	<i>Masse volumique (kg/m³)</i>	<i>Pourcentage en eau (%)</i>
CaCl ₂	1388	57
Saumure naturelle	1231	67
Ciment	-	-
Émulsion polymère	1019	94

La masse volumique et le pourcentage en eau du ciment ne sont pas inscrits dans le tableau dû au fait que ce produit est solide, les autres étant en solution.

3.4 Présentation et discussion des résultats de laboratoire

Une récapitulation du programme expérimental est présentée afin de bien comprendre sa méthodologie, son intérêt et aussi son envergure.

Quatre différents essais en laboratoire ont été effectués : l'essai du module réversible modifié (AASHTO T 307-99), l'essai de la capacité portante (ASTM D 1883), l'essai de la compression non confinée (ASTM D 5102) l'essai du cisaillement direct (ASTM D 3080). De plus, quatre différents produits ont été étudiés à différentes concentrations. Pour chacune des trois minéralogies à l'étude, trois différentes granulométries ont été étudiées. Finalement, outre l'essai du cisaillement direct pour lequel les résultats varient très peu (Pelletier (2007)), chaque essai en laboratoire a été effectué à trois reprises afin d'assurer une répétabilité des résultats. La figure 3.25 résume le programme expérimental réalisé.

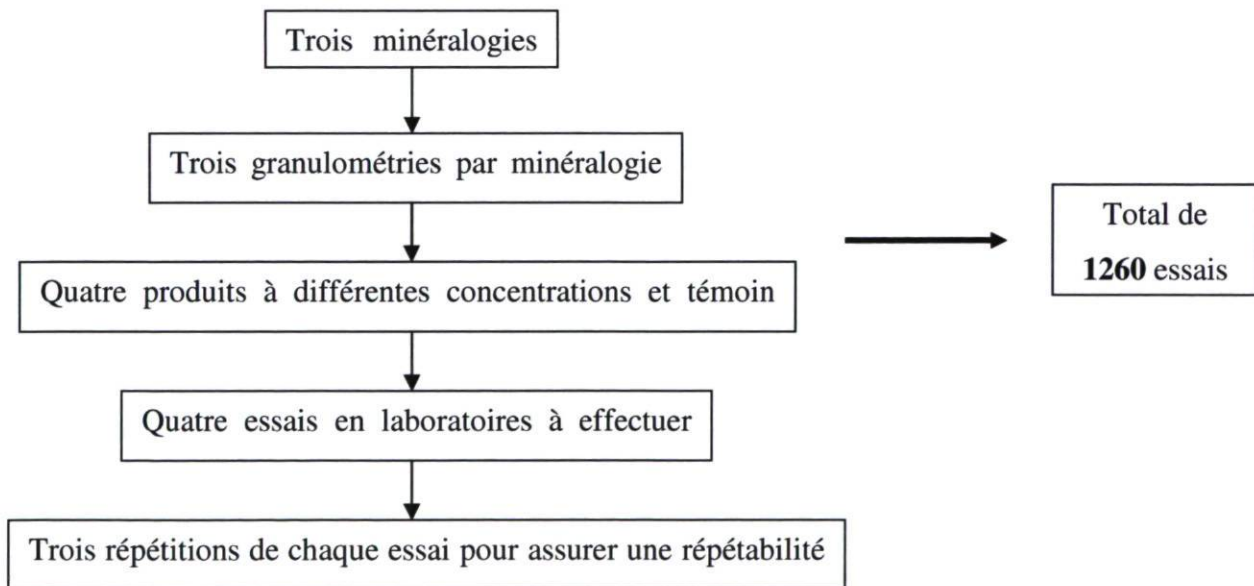


Figure 3.25 : Schéma résumant le programme expérimental réalisé.

Il est à noter que l'analyse des données recueillies en laboratoire est présentée sous forme de liste et débutera donc par des puces. Chaque puce est suivie d'une explication

justifiant l'analyse qui a été faite. Ceci permettra de faciliter la présentation des nombreuses conclusions issues des résultats du programme expérimental.

Les tableaux 3.11 à 3.13 présentent les résultats relatifs du programme expérimental pour les trois différentes minéralogies à l'étude soit le gneiss granitique, le basalte et le calcaire. Les résultats relatifs sont les résultats absolus obtenus pour un matériau granulaire traité à l'aide d'un abat-poussière ou d'un agent stabilisant divisés par les résultats absolus obtenus pour le même matériau granulaire non traité.

Les résultats des différents essais du programme expérimental sont présentés en résultats relatifs afin d'évaluer la performance des différents produits en termes d'amélioration des propriétés mécaniques. Majoritairement à cause de considérations économiques, les gestionnaires de réseaux routiers non revêtus doivent trouver des solutions pour l'entretien et la réfection de leur réseau avec les matériaux granulaires en place. Il serait beaucoup trop dispendieux, par exemple, de reconstruire une route avec du gneiss granitique alors que la route est composée de basalte. Le but est de trouver un traitement adapté au contexte minéralogique en place permettant d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau granulaire. Un compromis acceptable doit toujours être fait entre les coûts et les performances mécaniques. L'étude du programme expérimental permet de trouver le type de produit et sa concentration qui optimise l'amélioration des performances mécaniques du matériau granulaire dans un contexte de minéralogie et de granulométrie connus.

Tableau 3.11 : Résultats relatifs du programme expérimental pour le gneiss granitique.

<i>Granulométrie : 4,4 / 7 / 10,1 (% de particules fines)</i>					
<i>Produit</i>	<i>Conc. (l/m², %)</i>	<i>Cisaillement direct</i>	<i>Compression non confinée</i>	<i>Module réversible modifié</i>	<i>Capacité portante (5 mm)</i>
Saumure naturelle	1,2	1,4/1,1/1,2	1,4/1,1/1,1	0,9/1,1/1,3	1,2/1,8/1,2
	1,5	1,7/0,8/1,3	1,4/1,1/0,9	0,9/1,0/1,3	1,1/1,7/1,1
	1,8	1,4/0,9/1,2	1,3/1,3/0,9	0,9/1,0/1,3	1,0/1,7/1,2
Chlorure de calcium	1,3	1,4/0,8/1,1	1,3/1,0/0,8	0,9/0,9/1,2	1,1/1,5/1,1
	1,8	1,5/0,9/1,2	1,1/1,1/0,9	0,8/0,9/1,4	1,0/1,3/1,1
	2,3	1,3/0,8/1,1	1,0/0,8/0,9	0,8/1,0/1,3	1,2/1,4/1,3
Émulsion polymère	1,4	1,3/0,8/1,1	2,2/1,1/1,5	1,1/1,1/1,3	1,4/1,9/1,1
	2,4	1,3/1,0/1,1	3,3/1,1/1,2	1,1/1,1/1,3	1,3/1,9/1,0
	3,4	1,3/0,8/1,0	4,4/2,7/1,5	1,1/0,9/1,3	1,6/2,1/1,2
Ciment	1,5	1,6/0,9/1,4	3,8/3,8/3,2	0,9/1,1/1,4	3,7/1,9/2,5
	3,5	1,5/1,0/1,2	6,0/9,8/6,4	1,1/1,1/1,9	4,8/2,5/3,2
	4,5	1,9/1,0/1,2	10,0/11,3/14,4	1,0/1,2/1,8	6,3/2,9/3,3
	6,0	1,8/1,0/1,3	10,8/14,3/19,8	1,1/1,3/1,7	5,3/6,9/5,1
Référence	Relatif	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0
	Absolu*	1,3/1,7/1,3	2,8/2,5/2,4	153/137/100	21/17/19

* Pour les essais du module réversible modifié, les résultats absolus sont en MPa alors que pour les essais du cisaillement direct, de la compression non confinée et de la capacité portante, les résultats absolus sont en kN.

Tableau 3.12 : Résultats relatifs du programme expérimental pour le basalte.

<i>Granulométrie : 4,1 / 6,4 / 8,2 (% de particules fines)</i>					
<i>Produit</i>	<i>Conc. (l/m², %)</i>	<i>Cisaillement direct</i>	<i>Compression non confinée</i>	<i>Module réversible modifié</i>	<i>Capacité portante (5 mm)</i>
Saumure naturelle	1,2	1,2/0,9/0,8	0,8/1,0/0,8	0,9/0,8/1,0	0,6/0,6/0,9
	1,5	1,1/0,9/0,9	0,6/1,0/0,7	0,8/0,9/1,1	0,5/0,5/0,7
	1,8	1,1/1,0/0,8	0,5/0,7/0,6	0,8/0,7/1,1	0,7/0,6/0,7
Chlorure de calcium	1,3	2,0/1,1/1,0	0,7/0,8/1,0	0,7/0,8/1,0	0,6/0,7/0,7
	1,8	1,0/1,2/1,0	0,8/0,7/0,6	0,8/0,8/0,9	0,5/0,6/0,7
	2,3	0,9/1,0/0,9	0,4/0,5/0,5	0,8/0,7/0,8	0,6/0,7/0,7
Émulsion polymère	1,4	1,1/1,0/0,9	1,0/2,1/1,2	0,8/0,9/1,0	1,4/1,1/0,9
	2,4	1,1/1,4/0,9	1,2/2,4/1,1	1,1/0,9/1,1	1,3/1,1/0,9
	3,4	1,1/1,0/1,0	1,7/2,5/2,5	0,8/0,9/1,0	1,4/1,1/0,8
Ciment	1,5	1,1/1,1/0,9	2,0/2,6/3,8	1,0/0,9/1,4	1,5/1,4/1,0
	3,5	1,2/1,8/1,2	4,1/5,9/8,6	1,0/1,0/1,7	2,5/2,7/1,6
	4,5	1,3/1,7/1,2	6,0/8,7/11,3	1,0/1,0/1,8	2,4/3,1/2,3
	6,0	1,8/1,5/2,0	5,8/9,6/18,2	1,0/0,9/1,7	3,3/4,1/2,3
Référence	Relatif	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0
	Absolu*	1,1/1,2/1,2	3,6/2,6/3,1	163/170/130	17/22/24

* Pour les essais du module réversible modifié, les résultats absolus sont en MPa alors que pour les essais du cisaillement direct, de la compression non confinée et de la capacité portante, les résultats absolus sont en kN.

Tableau 3.13 : Résultats relatifs du programme expérimental pour le calcaire.

<i>Granulométrie : 3,8 / 6,6 / 8,8 (% de particules fines)</i>					
<i>Produit</i>	<i>Conc. (l/m², %)</i>	<i>Cisaillement direct</i>	<i>Compression non confinée</i>	<i>Module réversible modifié</i>	<i>Capacité portante (5 mm)</i>
Saumure naturelle	1,2	1,0/1,2/1,2	0,4/1,1/1,0	0,9/1,1/0,9	0,8/0,5/0,7
	1,5	1,1/0,9/1,3	0,4/1,0/0,9	0,9/0,9/1,0	0,9/0,5/0,7
	1,8	1,1/1,0/1,1	0,3/1,0/0,8	0,8/0,9/0,9	0,6/0,4/0,6
Chlorure de calcium	1,3	1,2/0,9/1,1	0,6/0,9/1,0	0,8/0,8/1,0	0,5/0,5/0,7
	1,8	1,1/0,9/1,2	0,3/0,8/1,1	0,8/0,8/0,9	0,5/0,7/0,8
	2,3	1,0/0,9/1,2	0,3/0,7/1,1	0,8/0,8/0,9	0,5/0,6/0,6
Émulsion polymère	1,4	1,0/0,9/1,1	1,8/2,4/1,5	1,1/1,2/1,0	1,6/1,4/0,9
	2,4	1,0/0,9/1,0	2,1/2,9/1,6	1,1/1,1/0,9	1,5/1,4/0,7
	3,4	1,0/0,8/0,9	2,1/3,4/1,7	1,1/1,1/0,9	1,5/1,3/0,8
Ciment	1,5	1,1/1,2/1,2	1,2/2,0/1,2	1,0/1,0/0,9	1,0/1,5/1,2
	3,5	1,2/1,2/1,4	3,3/3,0/2,5	1,0/1,2/0,9	2,2/3,2/1,9
	4,5	0,9/1,1/1,4	4,6/3,5/2,5	1,3/1,1/0,9	2,2/4,1/2,0
	6,0	1,3/1,1/1,0	6,1/5,8/3,7	1,4/1,2/1,0	2,4/5,0/2,3
Référence	Relatif	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0	1,0/1,0/1,0
	Absolu*	1,1/1,3/1,1	4,9/4,4/7,5	179/165/196	15/14/26

* Pour les essais du module réversible modifié, les résultats absolus sont en MPa alors que pour les essais du cisaillement direct, de la compression non confinée et de la capacité portante, les résultats absolus sont en kN.

- Les tableaux 3.11 à 3.13 montrent que les abat-poussière n'améliorent pas les caractéristiques mécaniques du basalte et du calcaire non traité (résultats relatifs généralement < 1.0). Les abat-poussière semblent plus adaptés pour le gneiss granitique même s'il n'améliore pas ses propriétés mécaniques de manière considérable (résultats relatifs généralement > 1.0).

La légère amélioration des propriétés mécaniques d'un gneiss granitique traité à l'aide d'abat-poussière hygroscopique peut être expliquée par la cristallisation du produit à l'intérieur des pores du matériau granulaire. Cette cristallisation peut augmenter les forces de cohésion dans le domaine élastique (petites déformations), mais semble affaiblir le squelette granulaire à grandes déformations. De plus, dû à leurs caractéristiques hygroscopiques, les deux abat-poussière testés diminuent les forces de friction entre les grains à grandes déformations ce qui a pour effet de diminuer les propriétés mécaniques du matériau granulaire. Les forces de friction sont diminuées dû à l'humidité absorbée par les abat-poussière hygroscopiques. L'humidité joue donc le rôle de lubrifiant et facilite le déplacement entre les granulats. Pour ce qui est du basalte et du calcaire, la présence de plus de particules argileuses augmente la surface spécifique du matériau granulaire et rend la cristallisation inefficace. Les propriétés mécaniques de ces matériaux granulaires ne sont donc pas augmentées et ce, même à petites déformations.

Les résultats absolus des différents essais sont également présentés dans le bas des tableaux 3.11 à 3.13. Ainsi, les résultats absolus pour l'ensemble du programme expérimental peuvent être calculés. Par exemple, pour le gneiss granitique ayant une granulométrie de 4,4% de particules fines et traité à l'aide de la saumure naturelle à un taux de pose de 1,2 l/m², le résultat absolu pour l'essai du module réversible modifié est 138 MPa (0,9*153 MPa).

Afin de faciliter l'analyse des résultats, des graphiques reprenant les résultats relatifs des tableaux 3.11 à 3.13 sont présentés dans le but d'étudier d'une part l'influence de la granulométrie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière (section 3.4.1) et d'autre part l'influence de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière (section 3.4.2). Il est à noter que pour les figures 3.27 à 3.62, les taux de pose utilisés pour les différents produits afin de tracer les courbes ou de réaliser les histogrammes sont les taux de pose qui ont permis d'obtenir les résultats relatifs optimaux. Par exemple, en prenant la figure 3.27 et le

tableau 3.11, il est possible de remarquer que pour la saumure naturelle, les résultats relatifs varient de 1,7 (pour un gneiss granitique ayant une granulométrie contenant 4,4% de particules fines) à 1,1 (pour un gneiss granitique ayant une granulométrie contenant 7% de particules fines) pour terminer à un résultat relatif de 1,3 (pour un gneiss granitique ayant une granulométrie contenant 10,1% de particules fines). Ceci correspond, selon le

tableau 3.11, à un taux de pose de saumure naturelle de respectivement 1,5 l/m², 1,2 l/m² et 1,5 l/m². Toutefois, les résultats relatifs pour un matériau granulaire traité à l'aide de ciment sont parfois présentés en fonction d'un taux de pose précis dans le but de comparer les résultats obtenus avec les résultats optimaux.

3.4.1 Influence de la granulométrie

- Comme le montrent la figure 3.27 et la figure 3.31, la granulométrie influence la performance d'un matériau granulaire. En effet, dans certains cas, pour le même produit et la même minéralogie, une variation de la granulométrie double la résistance au cisaillement intrinsèque (essai de la compression non confinée) et augmente donc la performance d'un matériau granulaire traité comparativement à un matériau granulaire non traité. Par exemple, la figure 3.28 montre que pour un gneiss granitique traité à l'aide de ciment, les résultats relatifs vont d'environ 10 pour une granulométrie comportant 4,4% de particules fines à environ 20 pour une granulométrie comportant 10,1% de particules fines.

Ceci montre donc que la granulométrie a un effet non négligeable et qu'elle influence le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière.

- Selon la figure 3.27, pour le gneiss granitique, plus la masse volumique sèche est élevée (donc plus le pourcentage de particules fines est faible, voir tableau 3.3), plus la résistance en compression non confinée est élevée pour tous les produits sauf pour le ciment.

Ce résultat peut être expliqué par le fait que la matrice cimentaire est plus résistante en présence d'une quantité plus importante de sable ce qui permet une meilleure cohésion. L'augmentation du pourcentage de particules fines pour le gneiss granitique a entraîné une augmentation importante des particules sableuses (voir figure 3.19) ce qui se traduit par augmentation des vides contenus dans le squelette granulaire du matériau (effet de desserrement). Ainsi, les particules de ciment vont se loger à l'intérieur de ces vides et lient les particules de plus petite taille ce qui a pour effet de rendre le matériel granulaire plus résistant aux forces de cisaillement. Pour une granulométrie contenant moins de vide, les liens créés par le ciment sont moins nombreux et moins efficaces et la résistance en compression non confinée est donc moindre.

Toutefois, le fait que la résistance en compression non confinée augmente avec le pourcentage de particules fines augmente est dû au fait que le taux de pose du ciment est élevé. En effet, pour chacun des pourcentages de particules fines de la figure 3.19, le taux de pose pour le ciment est de 6%. À titre d'exemple, la courbe du ciment pour un taux de pose de 1,5% est tracée. Cette courbe est davantage semblable aux autres produits. Ceci signifie que le ciment, à ce taux de pose, n'est pas en quantité suffisante pour remplir au complet les vides du squelette granulaire ce qui a pour conséquence de ne pas créer la matrice cimentaire. À ce taux de pose, le ciment joue alors seulement un rôle de remplissage. Il est évident que la stabilisation complète d'une route non revêtue à l'aide de ciment à un taux de pose de 6% serait beaucoup trop dispendieuse et non réaliste. Par contre, le ciment à taux de pose élevé peut s'avérer une solution intéressante pour la stabilisation de certaines portions de route plus critiques. Par exemple, elle pourrait être utilisée sur une section comportant une dénivellation importante, une courbe prononcée ou une zone d'accélération ou de freinage important, conditions entraînant habituellement une détérioration plus rapide de la route.

- Pour le gneiss granitique traité à l'aide d'un agent stabilisant, les résultats relatifs pour la capacité portante sont généralement optimaux pour une granulométrie contenant 7% de particules fines (figure 3.30, figure 3.34 et figure 3.38).

Dans un premier temps, il est important de mentionner que les résultats absolus optimaux pour l'essai de la capacité portante pour le gneiss granitique traité à l'aide d'agents stabilisants ou d'abat-poussière sont obtenus pour une granulométrie contenant 4,4% de particules fines (voir annexe B pour les résultats absolus). Ce résultat s'explique en analysant les différentes granulométries pour le gneiss granitique (figure 3.19). En effet, les deux granulométries contenant plus de particules fines (7% et 10,1%) contiennent une quantité beaucoup plus importante de sable que la granulométrie contenant 4,4% de particules fines. Comme le montre la figure 3.26, la trop grande quantité de sable a pour effet de modifier le squelette granulaire (effet de desserrement). Pour la granulométrie contenant 4,4% de particules fines, il y a un contact entre les particules grossières et il peut donc être déduit que le squelette granulaire est contrôlé par les particules plus grossières ce qui contribue à en augmenter la rigidité du matériau granulaire due à l'optimisation du squelette granulaire. Pour ce qui est des granulométries contenant 7% et 10,1% de particules fines, la quantité importante de sable a pour effet de desserrer le squelette granulaire qui est alors contrôlé par les particules de plus petite taille (majoritairement sableuse) ce qui entraîne donc une perte de rigidité du matériau granulaire (effet de relâchement).

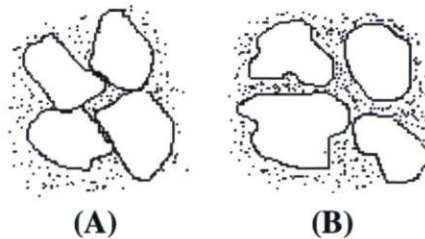


Figure 3.26 : Schéma d'un squelette granulaire contrôlé par les particules plus grossières (A) et par les particules de plus petite taille (B).

Il est toutefois intéressant de constater que la granulométrie contenant 7% de particules fines, qui n'est pas une granulométrie optimale, a obtenu les meilleurs résultats relatifs ce qui signifie qu'elle a montré la meilleure amélioration de capacité portante lorsque traité à l'aide d'agents stabilisants. Ce résultat est dû aux caractéristiques intrinsèques des

agents stabilisants. Le ciment joue un rôle de liant entre les particules tandis que l'émulsion polymère fixe les particules ensemble. Lorsque le matériau est trop dense (gneiss granitique contenant 4,4% de particules fines), il y a moins de vides dans le matériau granulaire et l'agent stabilisant ne peut agir de façon optimale. Toutefois, lorsqu'il y a une quantité suffisante de vides, l'agent stabilisant peut occuper tout le vide et ainsi fixer ou lier les particules de plus petite taille (majoritairement sableuses) ensemble. Toutefois, pour une granulométrie contenant trop de vides (gneiss granitique contenant 10,1% de particules fines), une perte de rigidité due à la trop grande quantité de particules de plus petites tailles à fixer ensemble est observable. Il existe donc une valeur seuil (ou critique) de particules de plus petites tailles au-delà de laquelle une perte de rigidité du matériau granulaire est notable.

- Pour le calcaire traité à l'aide de ciment, la performance d'un matériau granulaire diminue lorsque le pourcentage de particules fines augmente.

Comparativement au gneiss granitique, le calcaire est un matériau granulaire ayant une quantité importante de particules argileuses et donc, une surface spécifique beaucoup plus élevée. De plus, comme le montre le tableau 3.3, la masse volumique sèche du calcaire augmente lorsque le pourcentage de particules fines augmente comparativement à celle du gneiss granitique qui diminue lorsque le pourcentage de particules fines augmente. Donc, lorsque le ciment est utilisé pour un calcaire ayant un pourcentage de particules fines élevé, la matrice cimentaire est moins efficace. Dans un premier temps, les particules argileuses comblent les vides dans le squelette granulaire et le ciment ne peut donc se loger à l'intérieur de ces vides et créer une matrice efficace. Dans un deuxième temps, les particules fines argileuses ayant une surface spécifique plus élevée que les particules fines non argileuses, le ciment peut réagir avec les particules fines du calcaire au lieu de créer des liens cimentaires (liaisons de particules de ciment entre elles) et contribuer à la formation d'une matrice cimentaire. Le ciment semble donc plus approprié pour des minéralogies sans argile. Cette conclusion permet de mettre en évidence deux conditions qui semblent importantes afin de créer une matrice cimentaire

efficace. Premièrement, le squelette granulaire doit contenir une certaine quantité de vides afin de permettre au ciment de s'y loger pour ensuite créer une matrice cimentaire. De plus, le matériau granulaire ne doit pas avoir une quantité trop importante de particules argileuses qui nuisent à la formation de la matrice cimentaire.

- Comme le montre les figures 3.27 à 3.38, la granulométrie affecte beaucoup moins la performance d'un matériau granulaire traité à l'aide d'abat-poussière comparativement à un matériau granulaire traité à l'aide d'agents stabilisants.

Ce résultat est dû au mode d'action de chacun des deux produits (abat-poussière et agent stabilisant) sur le matériau granulaire. Premièrement, les deux abat-poussière, le chlorure de calcium et la saumure naturelle, sont des produits hygroscopiques. Ils captent donc l'humidité de l'air et humidifie le matériau granulaire ce qui contribue à réduire la poussière engendrée par la circulation de véhicules. Donc, peu importe la granulométrie et le pourcentage de particules fines, les produits hygroscopiques seront efficaces et capteront l'humidité de l'air ce qui contribuera à réduire la poussière. Par contre, les deux agents stabilisants ont des rôles différents. Respectivement, le ciment et l'émulsion polymère lient et fixent les particules ensemble. Le ciment lie les particules en créant une matrice cimentaire. La création et l'efficacité de cette matrice cimentaire est directement lié à la granulométrie. Les propriétés mécaniques du matériau granulaire traité varient donc de manière considérable en fonction de la granulométrie. Pour sa part, l'émulsion polymère est constituée de longues chaînes de polymères qui s'accrochent à plusieurs particules du matériau granulaire et les fixent ensemble. Son efficacité est donc également sensible aux variations granulométriques.

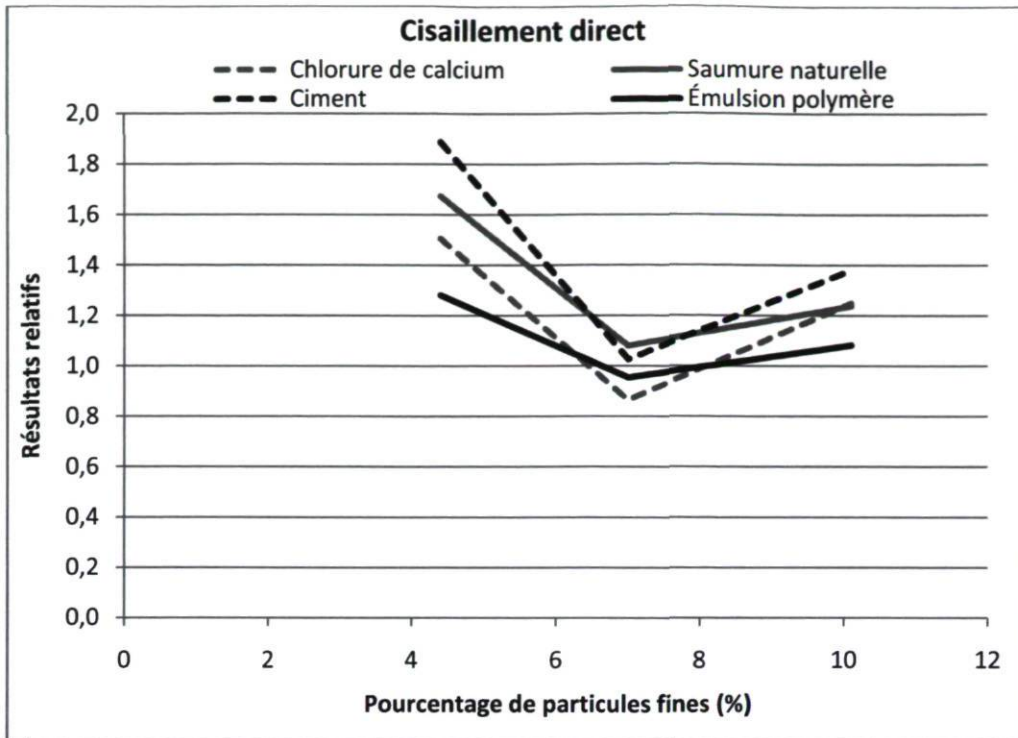


Figure 3.27 : Résultats relatifs des différents produits pour le gneiss granitique pour l'essai du cisaillement direct.

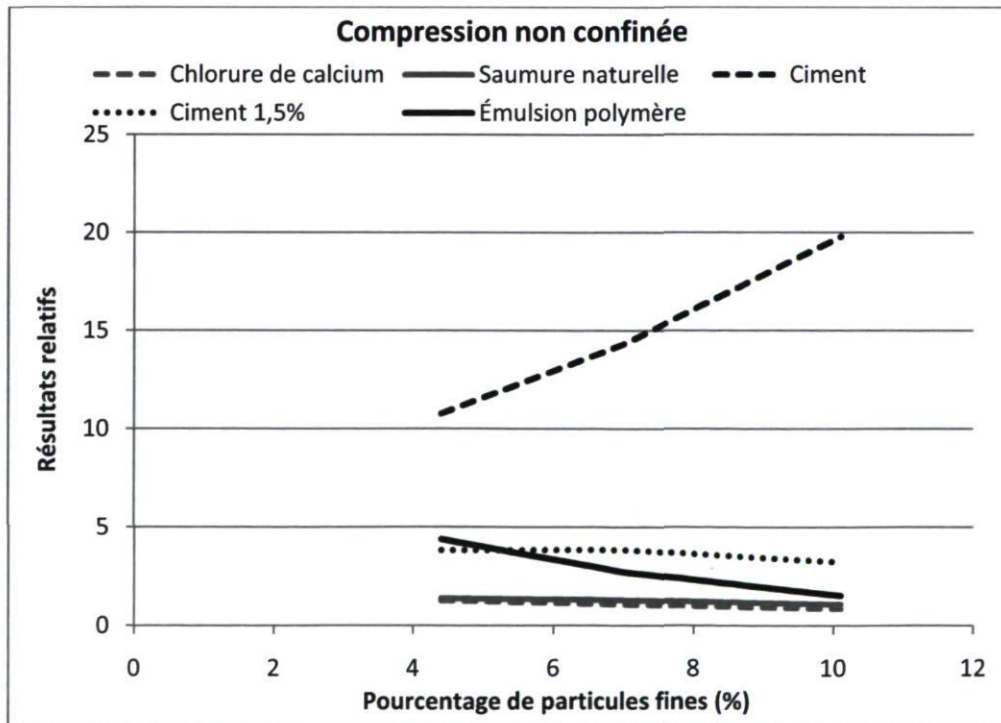


Figure 3.28 : Résultats relatifs des différents produits pour le gneiss granitique pour l'essai de la compression non confinée.

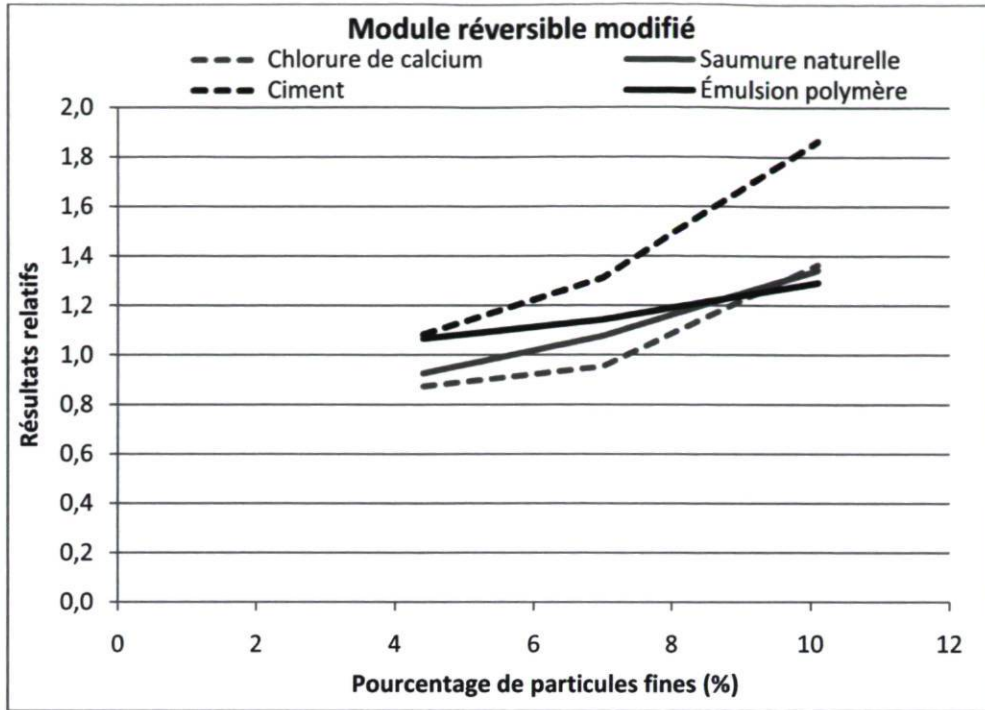


Figure 3.29 : Résultats relatifs des différents produits pour le gneiss granitique pour l'essai du module réversible modifié.

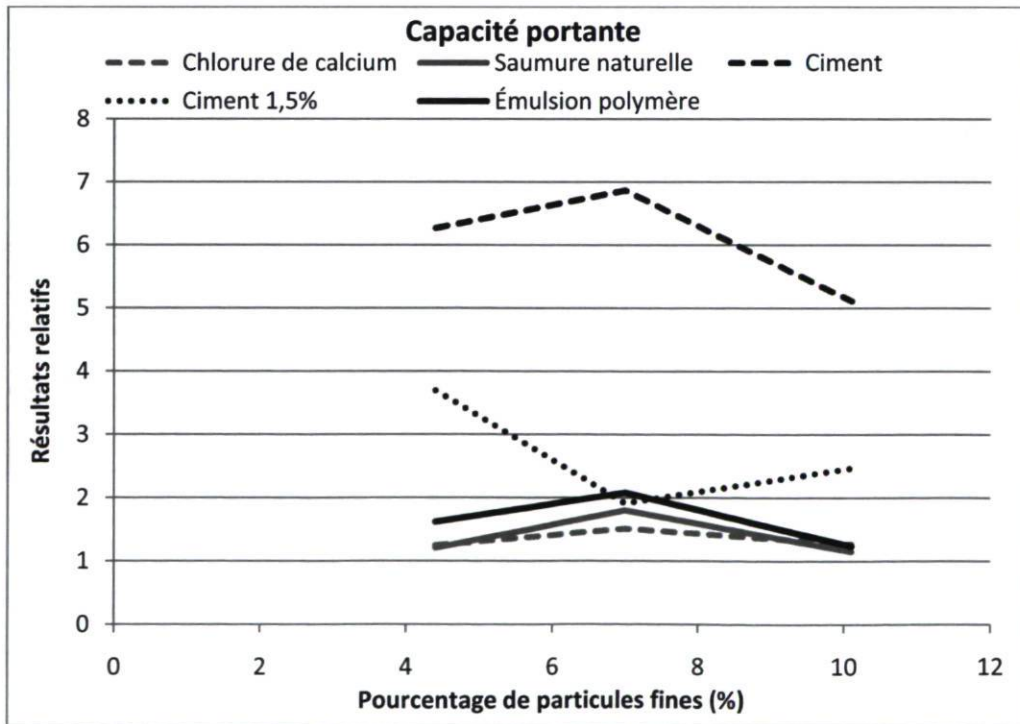


Figure 3.30 : Résultats relatifs des différents produits pour le gneiss granitique pour l'essai de la capacité portante pour un enfoncement du piston de 5 mm.

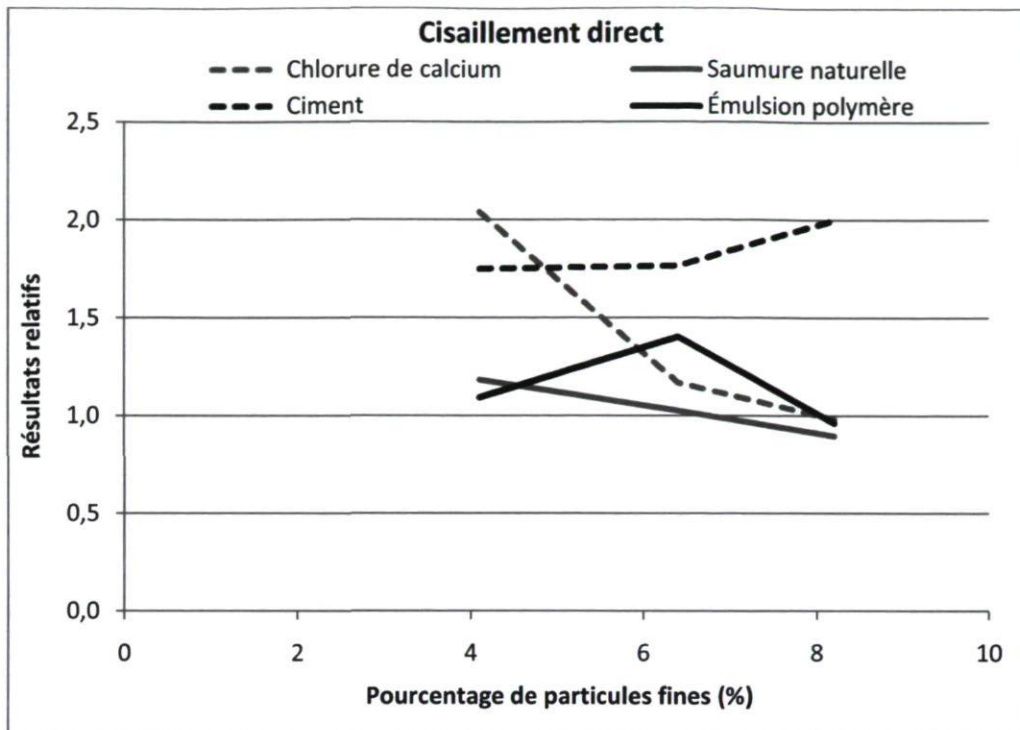


Figure 3.31 : Résultats relatifs des différents produits pour le basalte pour l'essai du cisaillement direct.

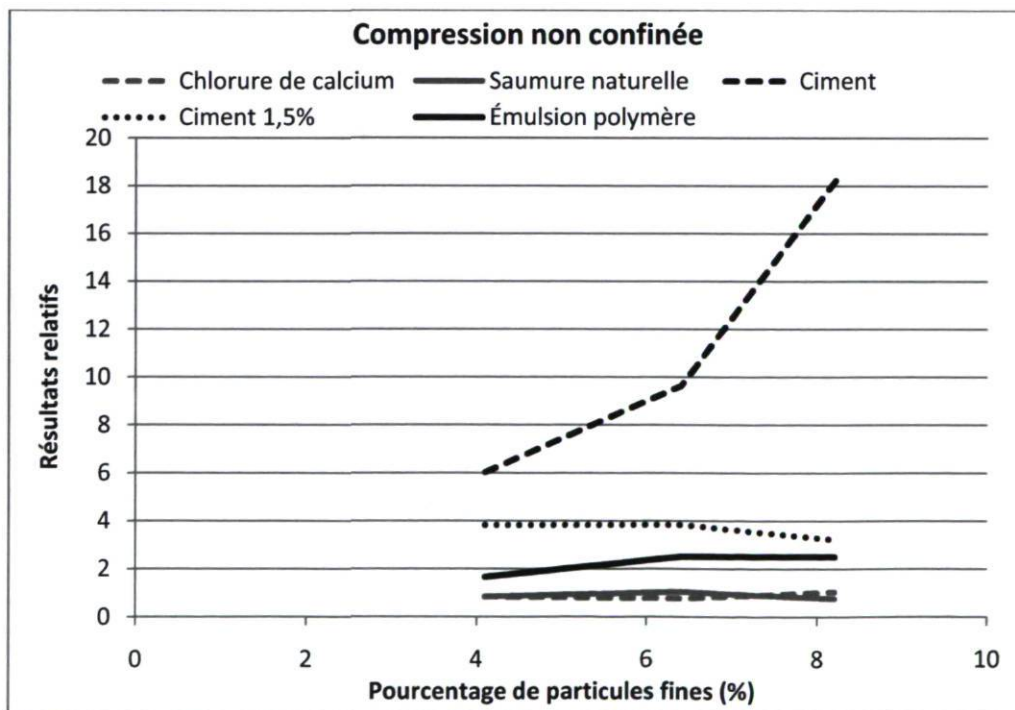


Figure 3.32 : Résultats relatifs des différents produits pour le basalte pour l'essai de la compression non confinée.

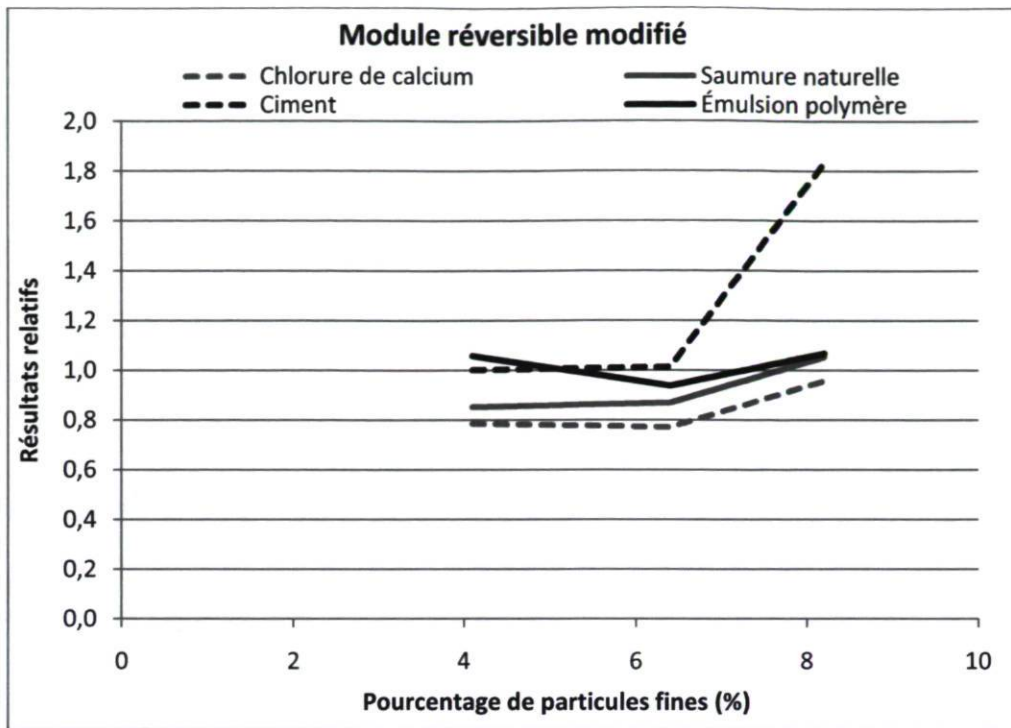


Figure 3.33 : Résultats relatifs des différents produits pour le basalte pour l'essai du module réversible modifié.

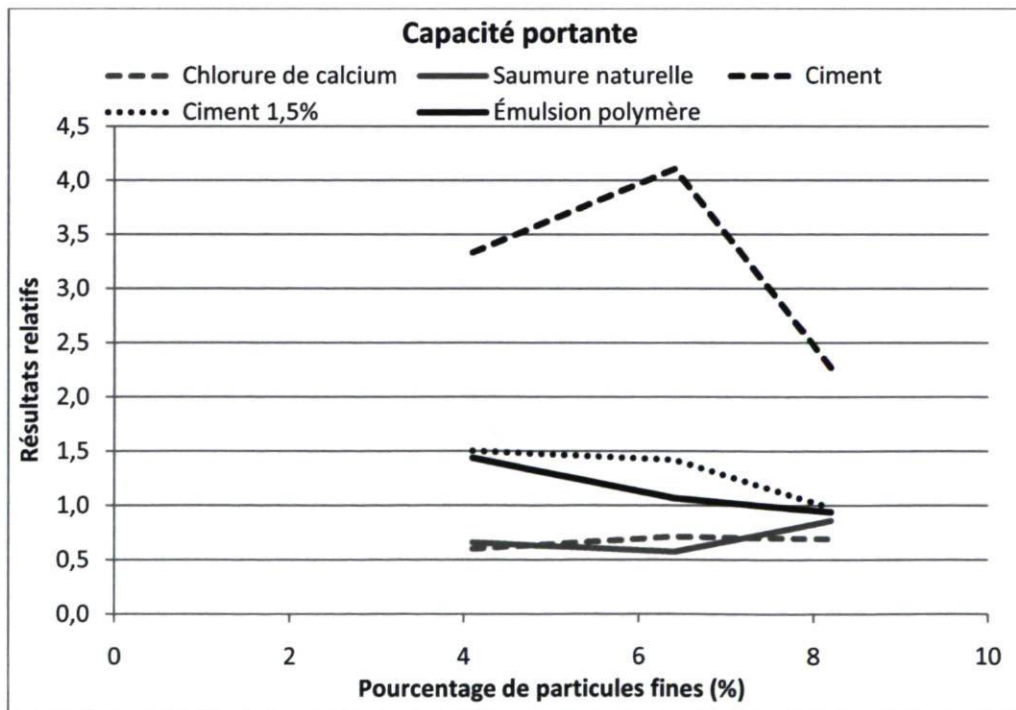


Figure 3.34 : Résultats relatifs des différents produits pour le basalte pour l'essai de la capacité portante pour un enfoncement du piston de 5 mm.

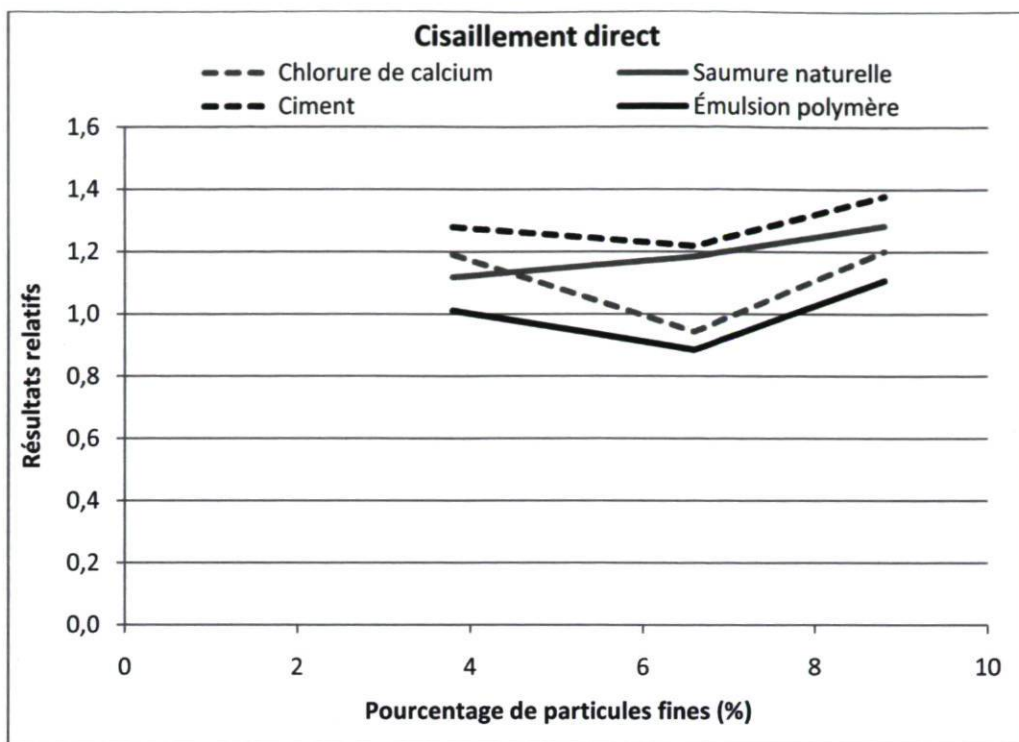


Figure 3.35 : Résultats relatifs des différents produits pour le calcaire pour l'essai du cisaillement direct.

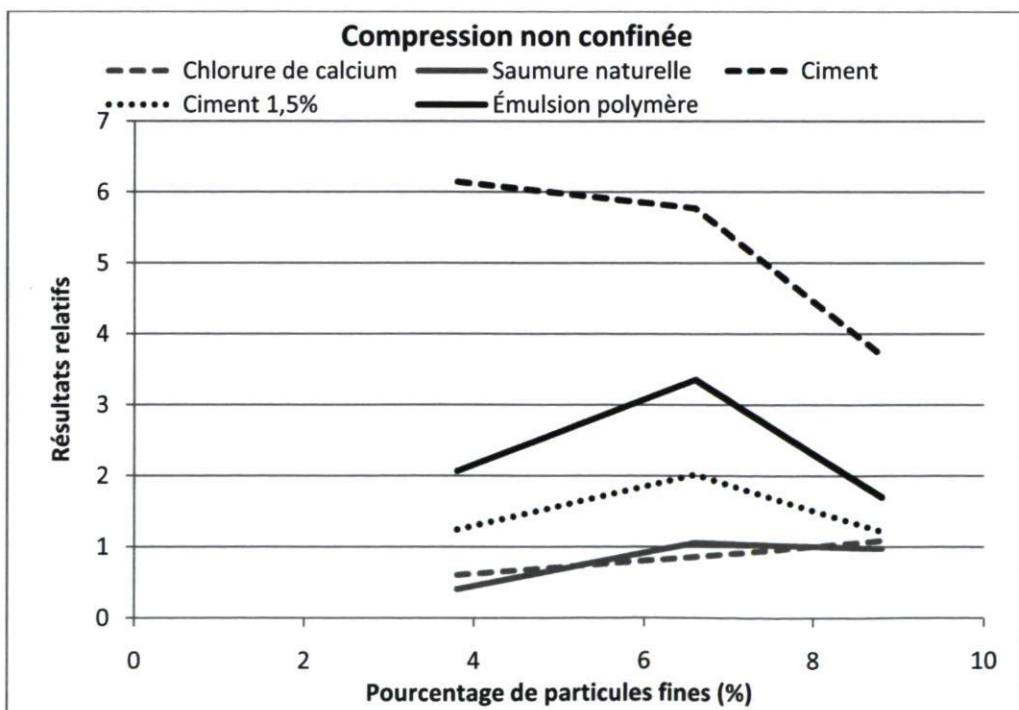


Figure 3.36 : Résultats relatifs des différents produits pour le calcaire pour l'essai de la compression non confinée.

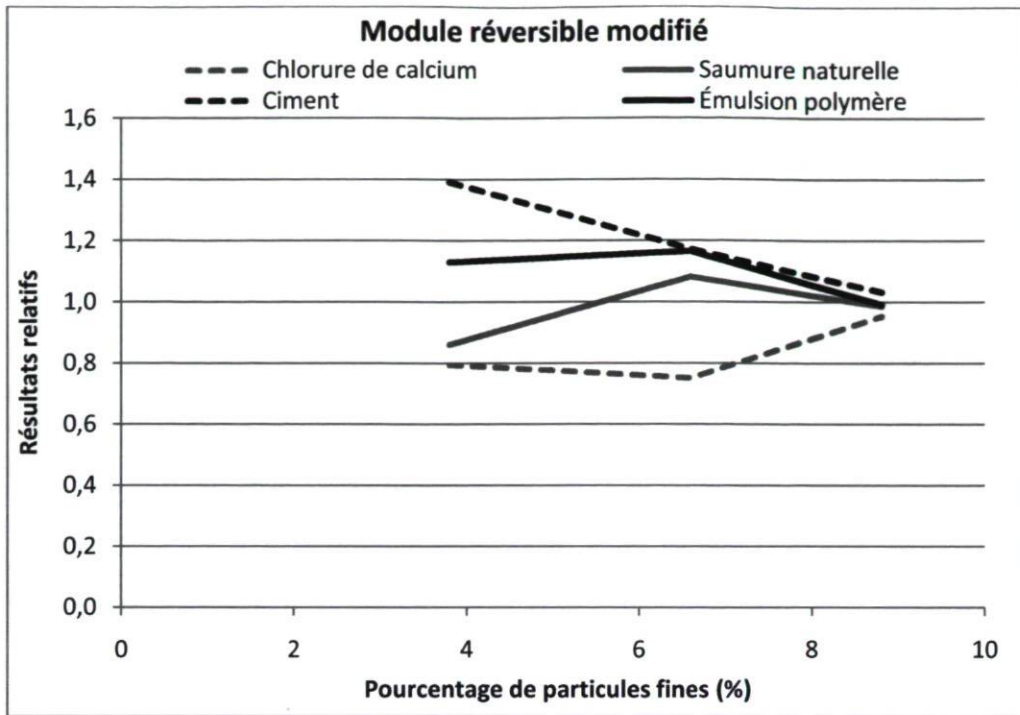


Figure 3.37 : Résultats relatifs des différents produits pour le calcaire pour l'essai du module réversible modifié.

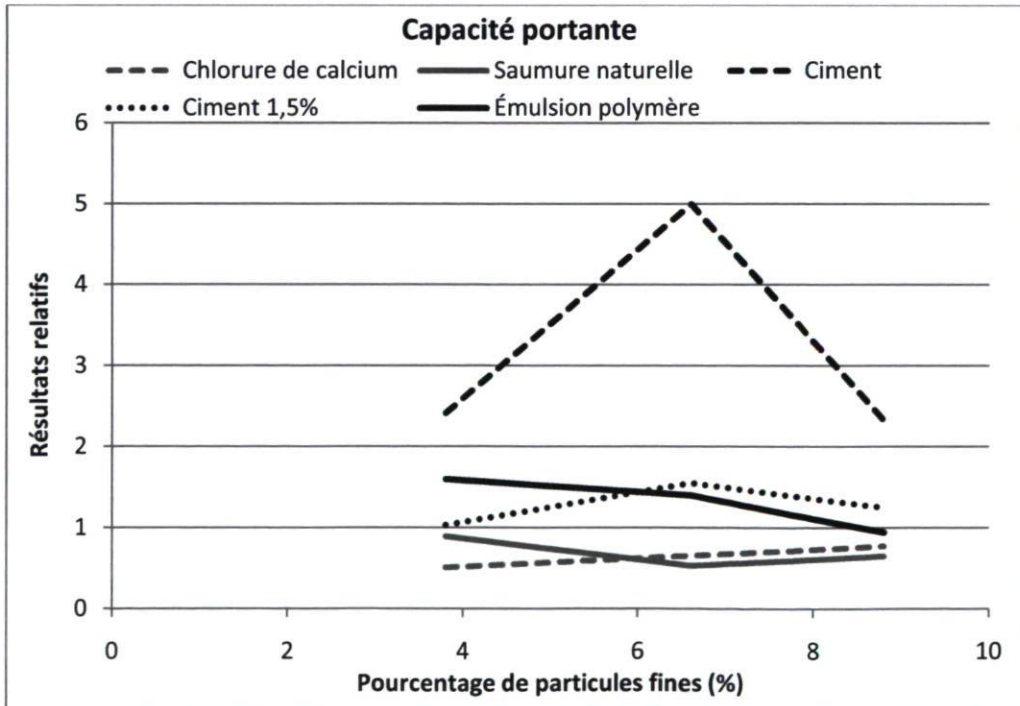


Figure 3.38 : Résultats relatifs des différents produits pour le calcaire pour l'essai de la capacité portante pour un enfoncement du piston de 5 mm.

3.4.2 Influence de la minéralogie

Les figures 3.39 à 3.50 illustrent l'influence de la minéralogie sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière. Ces figures présentent les résultats relatifs obtenus en fonction de la valeur au bleu. Cet essai et les résultats ont été présentés à la section 3.2.7. Les valeurs au bleu du gneiss granitique, du basalte et du calcaire sont respectivement 0,05, 0,38 et 0,60 cm³/g (tableau 3.8). Les valeurs au bleu sont donc utilisées afin de représenter les différentes minéralogies sur l'axe des abscisses et d'ainsi étudier l'influence de la minéralogie pour une granulométrie semblable fixe. Il est à noter que les résultats relatifs retenus pour la capacité portante sont ceux pour un enfoncement de 5 mm du piston.

- Pour une granulométrie semblable, la minéralogie influence la performance d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière.

Par exemple, les figures 3.39 à 3.42 montrent qu'en général, pour tous les produits, les résultats relatifs diminuent lorsque la valeur au bleu augmente.

- En général, le gneiss granitique est le matériau granulaire qui montre les meilleurs résultats relatifs lorsqu'il est traité à l'aide d'abat-poussière ou d'agents stabilisants.

En effet, pour les figures 3.39 à 3.50, les résultats relatifs les plus élevés sont habituellement obtenus pour des valeurs au bleu faibles, ce qui correspond au gneiss granitique. Cette minéralogie ne contient presque pas de particules argileuses et semble inerte envers les produits stabilisants et d'abat-poussière qui peuvent alors jouer pleinement leurs rôles respectifs.

- Le calcaire et le basalte ont sensiblement les mêmes performances mécaniques et montrent une amélioration lorsqu'ils sont traités à l'aide d'agents stabilisants, spécialement pour une granulométrie à faible pourcentage de particules fines.

La figure 3.41 et la figure 3.42 montrent que pour les différents essais, les résultats relatifs sont presque constants lorsque la valeur au bleu du basalte est atteinte, soit 0,38 cm³/g. Donc, à faible pourcentage de particules fines et pour un traitement à l'aide d'un des deux agents stabilisants, le basalte et le calcaire ont des résultats relatifs très similaires. Toutefois, il est important de demeurer critique envers cette conclusion. Le basalte et le calcaire ont certes des résultats relatifs semblables, mais il est important de se remémorer que les figures 3.39 à 3.50 sont réalisées à l'aide de seulement trois valeurs au bleu, soit 0,05 (gneiss granitique), 0,38 (basalte) et 0,60 (calcaire) cm³/g. Ceci signifie que la valeur au bleu pour laquelle les résultats relatifs demeurent à peu près constants est inconnue, mais qu'elle se situe entre 0,05 et 0,38 cm³/g. Il est par contre logique de penser que cette valeur seuil ou les résultats relatifs demeure constant se situe aux alentours de 0,20 cm³/g, valeur au bleu maximale selon les exigences du Ministère des Transports du Québec pour un MG-20B.

- La tendance générale montre que pour tous les produits et les granulométries, les résultats relatifs diminuent lorsque la surface spécifique augmente.

Plus la valeur au bleu d'un matériau granulaire est élevée, plus le matériau contient des particules argileuses et donc plus sa surface spécifique est élevée. Or, plus la surface spécifique est élevée, plus il est difficile pour le ciment et l'émulsion polymère de respectivement lier et fixer les particules ensemble. De plus, les particules argileuses vont se loger dans les vides du squelette granulaire et nuisent à la création de la matrice cimentaire. Pour leur part, les produits hygroscopiques suivent la même tendance que les agents stabilisants. Lorsque la valeur au bleu, et donc la surface spécifique des matériaux granulaires augmentent, les résultats relatifs diminuent. La variation des résultats relatifs est toutefois beaucoup moins importante (voir par exemple l'échelle de la figure 3.40 pour la saumure naturelle comparativement à celle de la figure 3.41 pour le ciment). Les deux produits abat-poussière à l'étude étant des produits hygroscopiques, le fait de capter l'humidité de l'air contribue à humidifier les particules du matériau granulaire. Le déplacement des granulats les uns par rapport aux autres est facilité par le fait que le

matériau granulaire soit humide. L'eau agit à la manière d'un lubrifiant. La friction entre les particules est alors diminuée. La présence de particules argileuses accentue cet effet lubrifiant et contribue donc d'autant plus à diminuer la résistance mécanique du matériau granulaire.

- Pour une granulométrie contenant environ 7% de particules fines, la performance de l'émulsion polymère augmente lorsque la surface spécifique augmente.

La figure 3.46 montre que pour la plupart des essais, les résultats relatifs sont optimaux pour les valeurs au bleu du gneiss granitique et du calcaire. Pour une granulométrie contenant environ 7% de particules fines, l'émulsion polymère semble donc efficace pour une minéralogie contenant presque pas ou beaucoup de particules argileuses (surface spécifique petite ou grande). Donc, pour une granulométrie de 7% de particules fines, les longues chaînes polymères semblent efficaces et fixent les particules fines ensemble ce qui contribue à améliorer les propriétés mécaniques du matériau granulaire. Ce résultat laisse penser qu'il existe une valeur seuil ou critique de pourcentage de particules fines.

- Les résultats relatifs de l'essai de capacité portante sont maximaux pour le gneiss granitique (valeur au bleu faible) et diminuent rapidement lorsque la surface spécifique augmente.

Les particules argileuses vont se loger dans les vides du matériau granulaire et nuisent donc à la formation de liens efficaces entre l'agent stabilisant et le matériau granulaire. Pour les abat-poussière, les particules argileuses, une fois humidifiées par l'action des produits hygroscopiques, agissent comme lubrifiant ce qui contribue à diminuer la rigidité du matériau granulaire. En effet, l'eau diminue la friction entre les granulats et favorise le déplacement entre les particules du matériau granulaire. Cette diminution de friction est accentuée par les particules argileuses, qui ont une surface spécifique élevée.

- Pour les surfaces spécifiques élevées, les résultats relatifs pour le ciment et l'émulsion polymère semblent demeurer constants. En effet, lorsqu'une valeur seuil de valeur au bleu est atteinte, l'augmentation de la valeur au bleu a beaucoup moins d'influence sur les résultats relatifs spécialement pour une granulométrie contenant environ 4% de particules fines.

La figure 3.41 et la figure 3.42 montrent que, pour de faibles valeurs au bleu, les résultats relatifs pour les différents essais de laboratoire diminuent lorsque la valeur au bleu augmente. Toutefois, il semble y avoir une valeur au bleu seuil pour laquelle les résultats relatifs demeurent constants, et ce, malgré une augmentation de la valeur au bleu au-delà de cette valeur seuil. Lorsque la valeur au bleu augmente, la quantité de particules argileuses augmente. Or, les particules argileuses vont se loger à l'intérieur des vides du squelette granulaire. Lorsque la quantité de particules argileuses permettant de remplir tous les vides du squelette granulaire est atteinte (ceci correspond à la valeur au bleu seuil), le ciment et l'émulsion polymère ne peuvent alors plus se loger à l'intérieur des vides de l'ensemble du squelette granulaire et jouer efficacement leurs rôles respectifs qui sont de lier et de fixer les particules du matériau granulaire ensemble. Donc, une fois les vides du squelette granulaire comblés par les particules argileuses, l'augmentation de la quantité de particules argileuses dans le matériau granulaire ne contribue pas à faire varier de manière importante les résultats relatifs pour les différents essais de laboratoire.

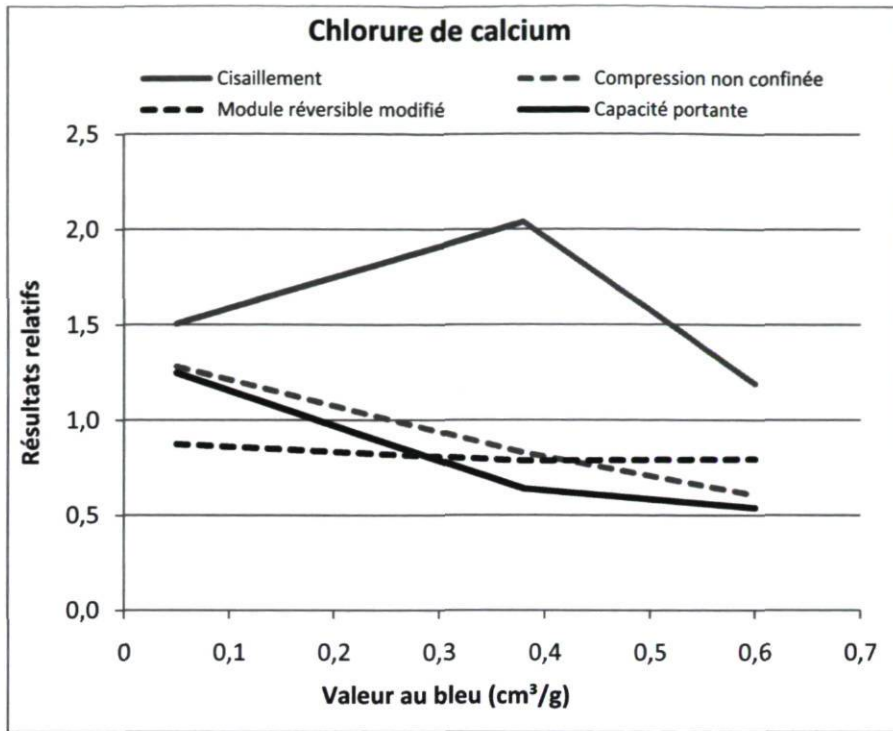


Figure 3.39 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le chlorure de calcium pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.

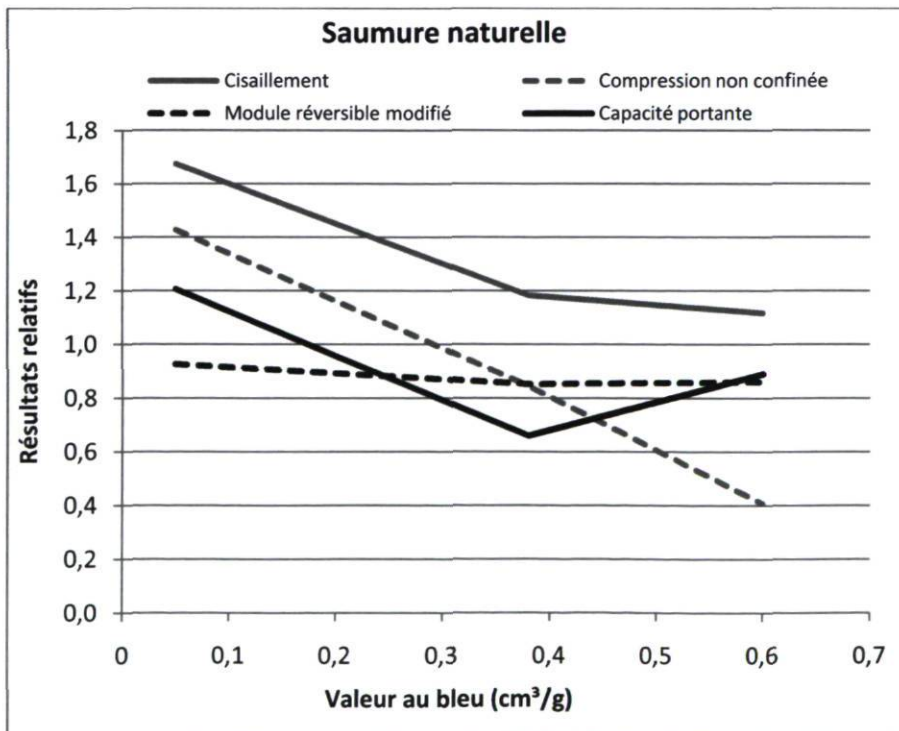


Figure 3.40 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour la saumure naturelle pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.

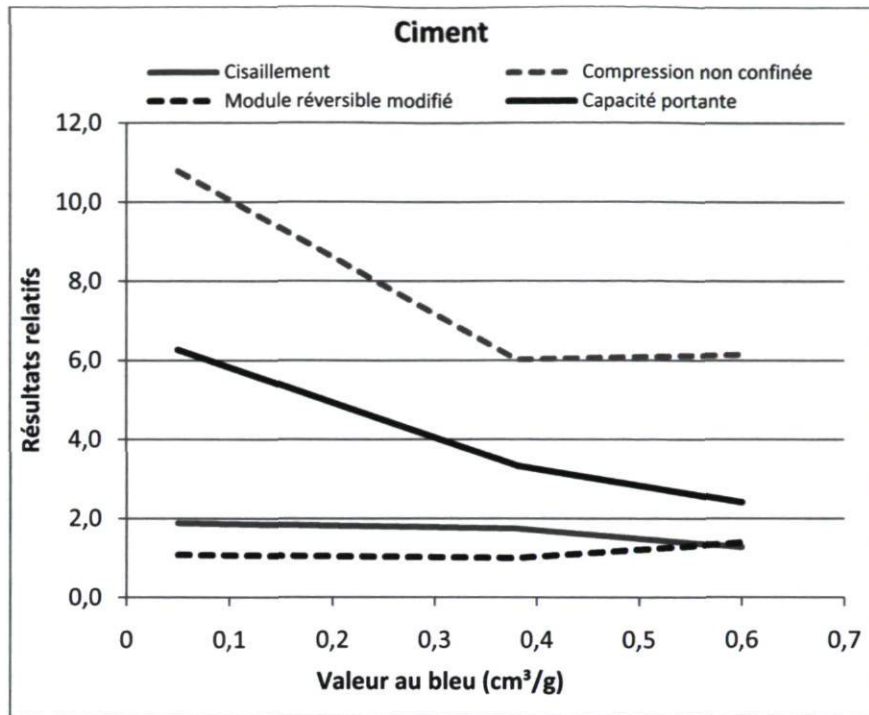


Figure 3.41 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le ciment pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.

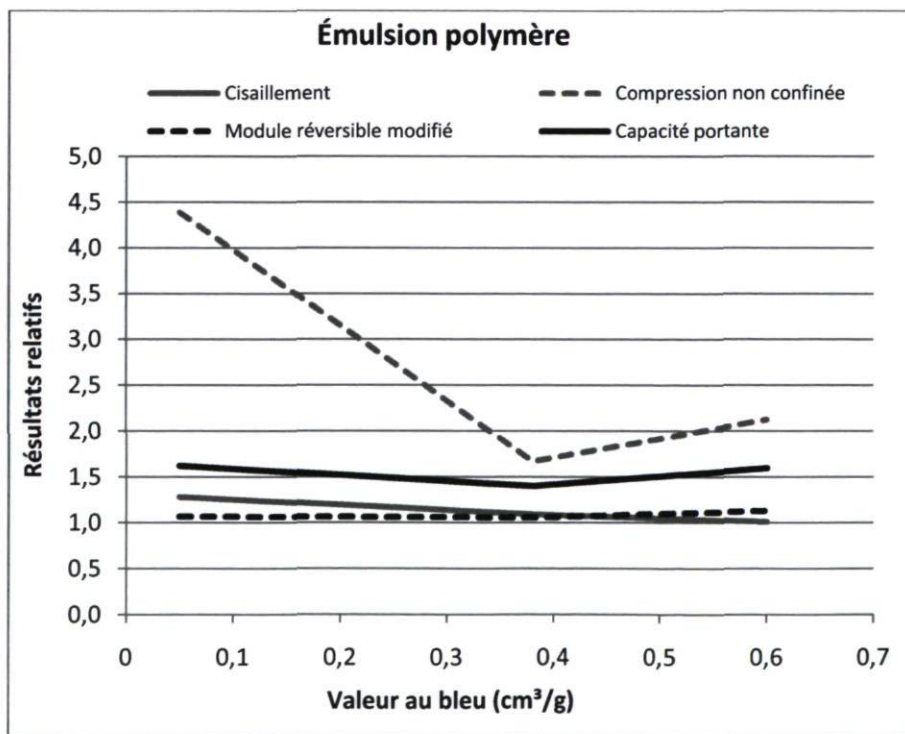


Figure 3.42 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour l'émulsion polymère pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.

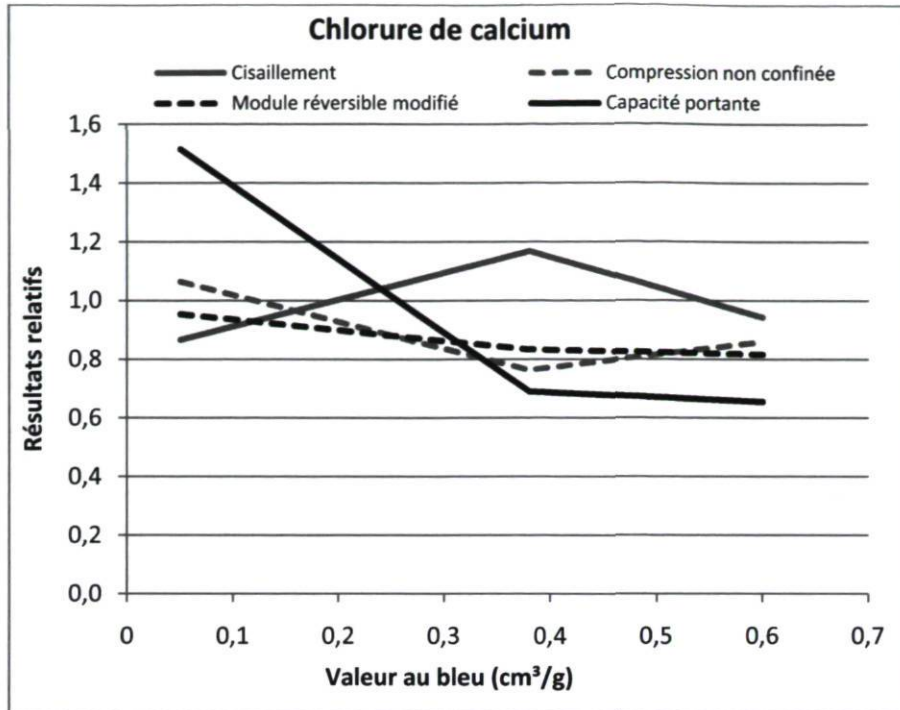


Figure 3.43 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le chlorure de calcium pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.

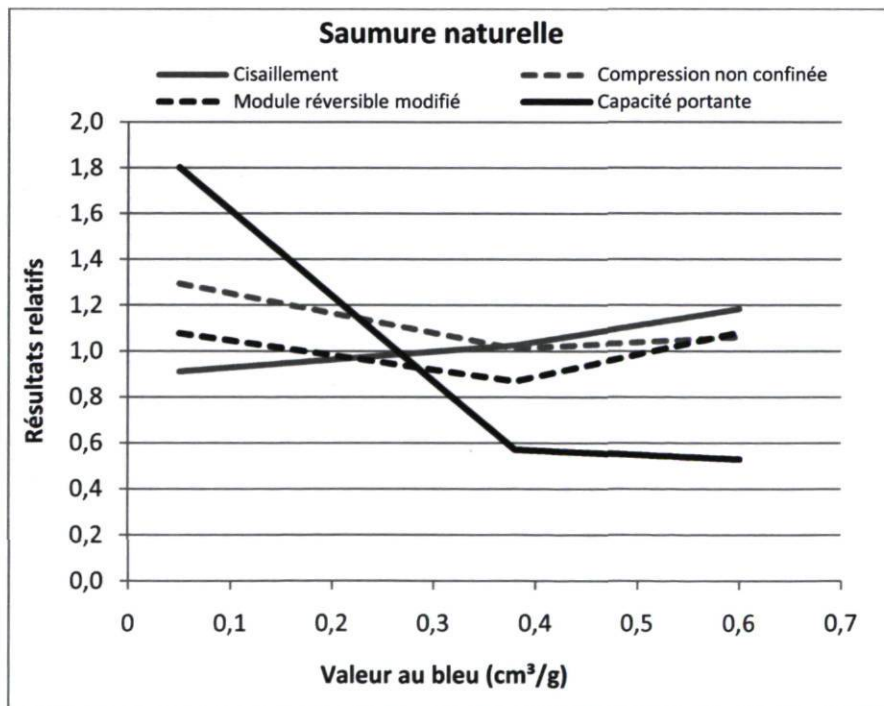


Figure 3.44 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour la saumure naturelle pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.

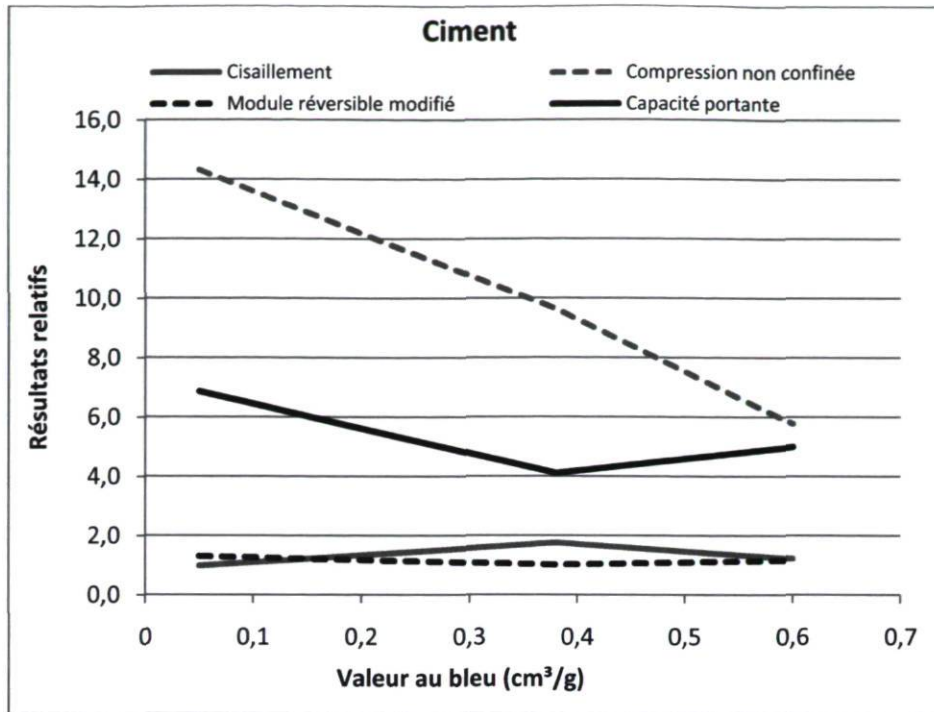


Figure 3.45 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le ciment pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.

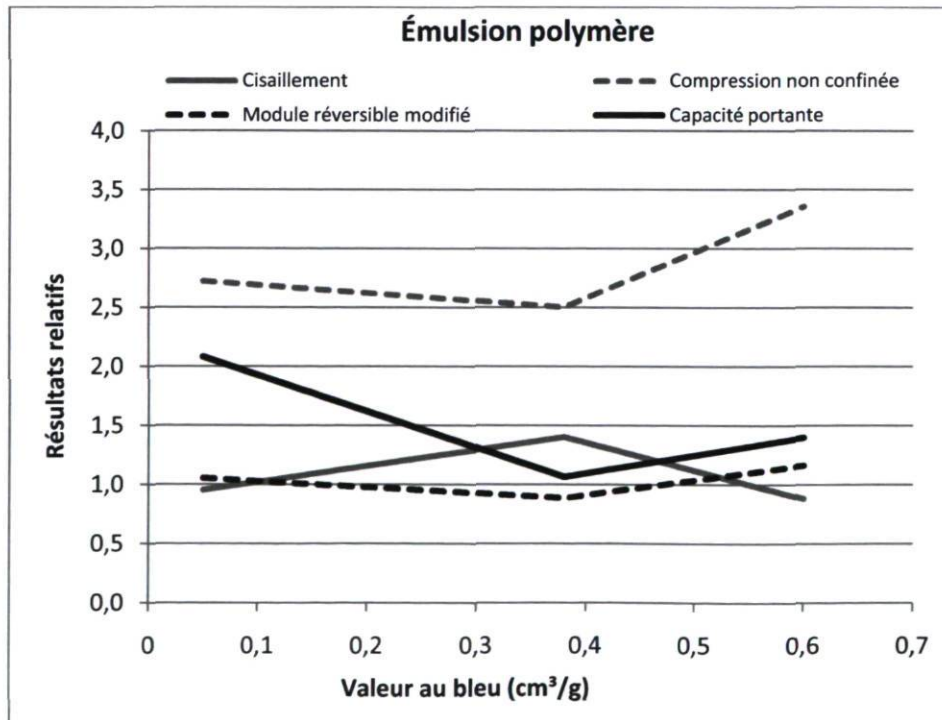


Figure 3.46 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour l'émulsion polymère pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.

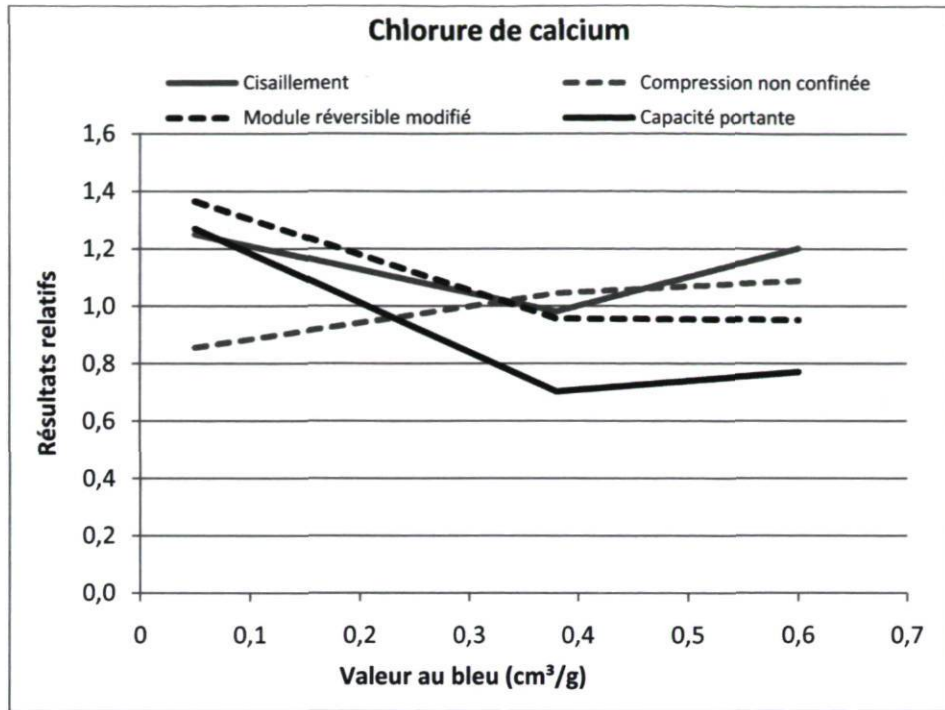


Figure 3.47 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le chlorure de calcium pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.

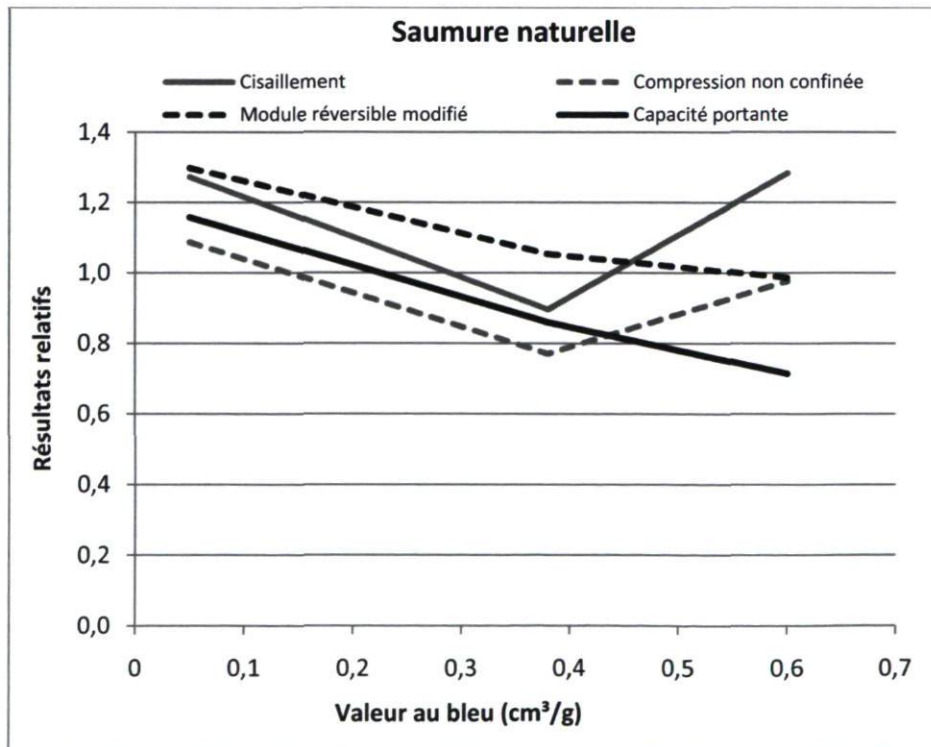


Figure 3.48 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour la saumure naturelle pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.

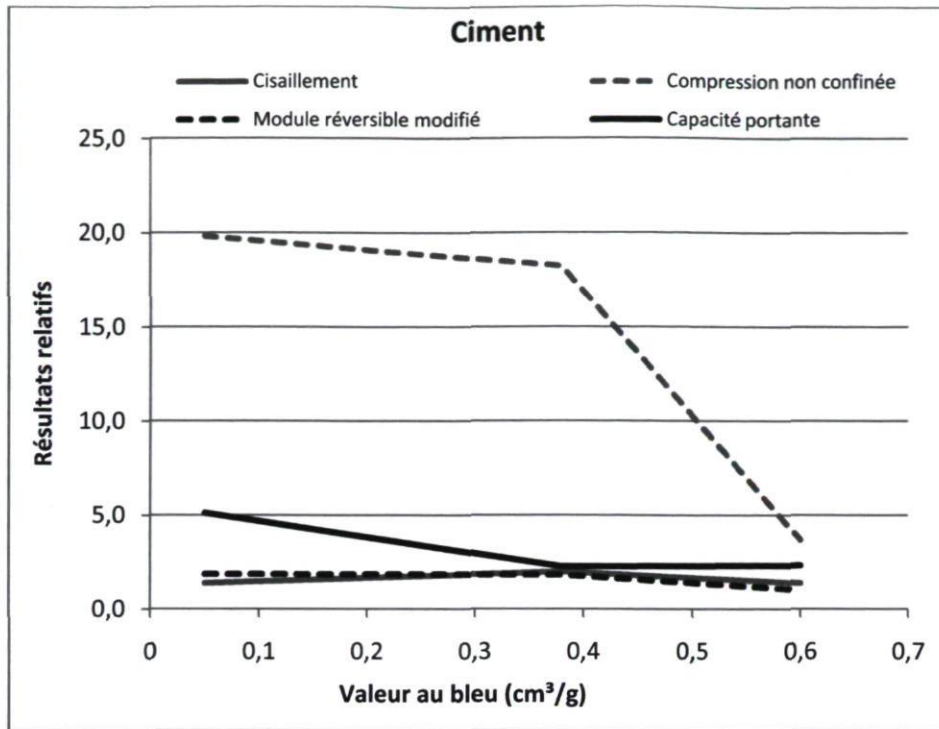


Figure 3.49 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour le ciment pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.

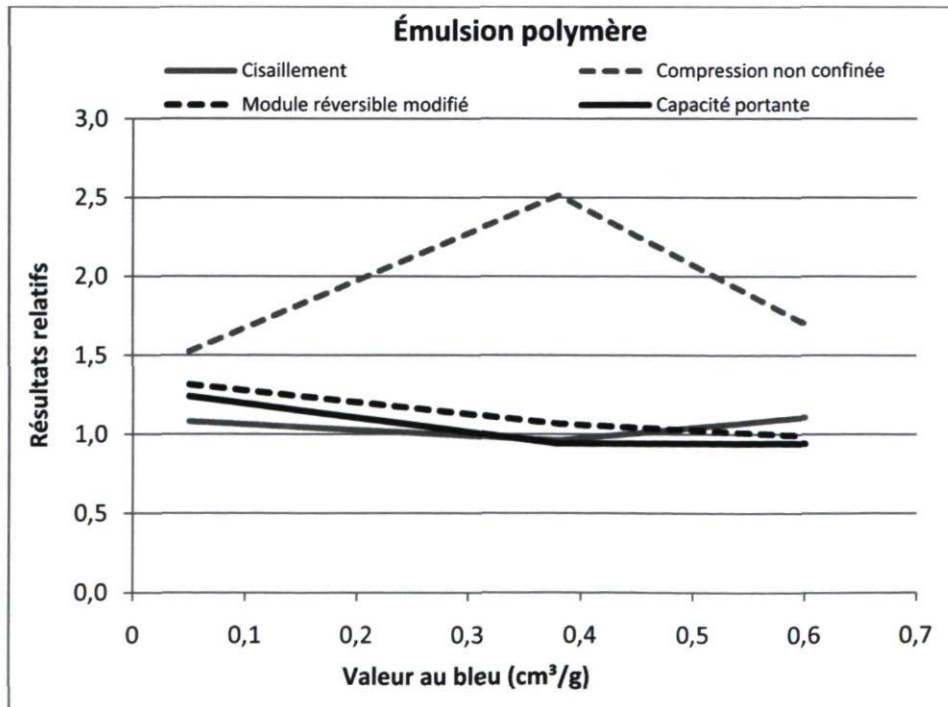


Figure 3.50 : Résultats relatifs des différents essais de laboratoire pour l'émulsion polymère pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.

3.4.3 Remarques générales sur les abat-poussière et les agents stabilisants à l'étude.

Les figures 3.51 à 3.62 se veulent un résumé des résultats relatifs du programme expérimental. Ils montrent, pour chacun des essais réalisés en laboratoire et chacune des granulométries à l'étude, les résultats relatifs aux taux de pose optimaux des différents produits pour chacune des minéralogies.

- Le basalte et le calcaire traités à l'aide d'abat-poussière ont en général des caractéristiques mécaniques légèrement inférieures comparativement aux matériaux granulaires non traités.

Ce résultat peut être expliqué par le caractère hygroscopique des deux abat-poussière à l'étude. En effet, le déplacement des granulats les uns par rapport aux autres est facilité par le fait que le matériau granulaire soit humide. L'eau agit en quelque sorte à la manière d'un lubrifiant et diminue la friction entre les particules ce qui contribue à diminuer les propriétés mécaniques (en particulier la résistance mécanique) du matériau granulaire en question. La diminution de la friction entre les granulats est d'autant plus importante en présence de particules argileuses (basalte et calcaire) qui ont un effet lubrifiant plus prononcé que les particules non argileuses.

- La figure 3.54, la figure 3.58 et la figure 3.62 montrent que les résultats relatifs pour la capacité portante pour le gneiss granitique sont légèrement supérieurs à 1.0 pour un traitement à l'aide des abat-poussière. Toutefois, toujours pour un traitement à l'aide des abat-poussière, les résultats relatifs de la capacité portante pour le calcaire et le basalte sont légèrement inférieurs à 1.0.

Les résultats relatifs supérieurs à 1.0 pour le gneiss granitique peuvent être expliqués par la cristallisation des abat-poussière à l'intérieur des vides du gneiss granitiques. En effet, les deux abat-poussière à l'étude peuvent effectuer des échanges ioniques avec le matériau granulaire et ainsi améliorer légèrement les propriétés mécaniques de ce dernier. Toutefois, en présence de particules argileuses (basalte et calcaire), l'échange ionique

semble inefficace et les particules argileuses agissent davantage comme lubrifiant sous l'influence de l'eau qui est captée par les abat-poussière hygroscopique et qui diminue la friction entre les particules. Cette présence d'eau favorise le déplacement des granulats les uns par rapport aux autres. Les propriétés mécaniques du matériau granulaire se voient donc diminuées.

- L'ajout de ciment à un gneiss granitique, à un basalte ou à un calcaire permet d'améliorer sa capacité portante de respectivement 690%, 410% et 500%. De plus, l'ajout d'émulsion polymère à un gneiss granitique, à un basalte ou à un calcaire permet d'en améliorer sa capacité portante de respectivement 210%, 140% et 160%.

Il est donc évident que les liens créés par le ciment avec le matériau granulaire sont plus forts que ceux créés par l'émulsion polymère et que les propriétés mécaniques d'un matériau granulaire traité au ciment sont par le fait même davantage améliorées. Toutefois, il est important de mentionner qu'une stabilisation au ciment est beaucoup plus complexe et dispendieuse qu'une stabilisation à l'aide d'une émulsion polymère. Ceci étant dit, le ciment peut s'avérer une option intéressante afin de stabiliser certaines portions de route où le passage des véhicules est plus agressif ce qui peut ainsi entraîner l'apparition prématurée de défauts de la route. Par exemple, une stabilisation au ciment pourrait être réalisée dans une portion de route où il y a une dénivellation importante, une courbe accentuée ou une zone de freinage et d'accélération. L'émulsion polymère permet pour sa part d'augmenter la rigidité d'un matériau granulaire d'un peu plus d'un facteur deux ce qui est plus modeste que le ciment, mais quand même très important et très intéressant pour la stabilisation d'une portion plus importante d'une route, étant donné entre autres son application qui est relativement facile et son coût qui est beaucoup moindre que celui du ciment.

- Pour un matériau granulaire contenant environ 9% de particules fines, il n'y a pas de différence significative entre un matériau granulaire traité à l'aide de saumure, de chlorure de calcium ou d'émulsion polymère et ce, peu importe la minéralogie.

Ceci signifie qu'en présence d'un pourcentage de particules fines trop élevé, les longues chaînes macromoléculaires de l'émulsion polymère ne sont pas en mesure de fixer les différentes particules du matériau granulaire ensemble de manière efficace. Il est fort probable qu'une certaine quantité de particules soient fixées, mais que la quantité trop importante de particules fines fait en sorte que la majorité des particules fines n'est pas fixée et que le squelette granulaire se comporte comme s'il n'était pas traité par l'émulsion polymère. Ce résultat est intéressant et signifie que la stabilisation d'une longue section contenant un pourcentage de particules fines élevé peut s'avérer inefficace (émulsion polymère) ou très dispendieuse (ciment). Dans ce cas, un rechargement ou la stabilisation à l'aide d'autres produits stabilisants qui pourrait être efficace en présence d'un pourcentage de particules fines élevé peut être nécessaire. Une combinaison de plusieurs solutions peut aussi être nécessaire comme par exemple un rechargement avec un matériau granulaire contenant un pourcentage de particules fines acceptable et une stabilisation à l'aide d'un agent stabilisant.

- L'émulsion polymère semble plus appropriée pour une utilisation en présence de calcaire.

En effet, en analysant les figures 3.51 à 3.62, il est possible de remarquer qu'en général, la différence de performance (en termes de résultats relatifs) entre le calcaire et le gneiss granitique est moins grande pour un traitement à l'émulsion polymère comparativement à un traitement à l'aide d'un des trois autres produits. Ce résultat peut être expliqué par la présence des macromolécules de l'émulsion polymère qui lient les particules d'argiles ensemble ce qui contribue à augmenter les propriétés mécaniques du matériau granulaire. Donc, en présence de calcaire, l'émulsion polymère est très certainement un choix à considérer.

- Pour toutes les minéralogies et les granulométries, les agents stabilisants augmentent les résultats relatifs pour l'essai de la compression non confinée, mais ne contribuent pas à augmenter de manière considérable les résultats relatifs de l'essai du cisaillement direct.

L'essai du cisaillement direct est effectué sans temps de cure et permet donc d'évaluer la cohésion du matériau granulaire directement après son application sur une route non revêtue. L'essai de la compression non confinée est pour sa part réalisé après trois jours de cure et permet d'évaluer la résistance au cisaillement indirect intrinsèque du matériau granulaire. Dans un contexte réel d'application d'agents stabilisants sur une route non revêtue, il est alors possible d'évaluer, à l'aide de l'essai du cisaillement direct, l'influence immédiate de la pose d'un agent stabilisant sur les propriétés mécaniques du matériau granulaire en question et ainsi évaluer si des mesures particulières doivent être prises afin de permettre au produit de curer. Les figures 3.51, 3.52, 3.55, 3.56, 3.59 et 3.60 montrent que le ciment et l'émulsion polymère sont plus efficaces après quelques jours de cure. Toutefois, l'application de ciment ou d'émulsion polymère ne diminue pas les propriétés mécaniques du matériau granulaire à court terme : les résultats relatifs des figures 3.51, 3.55 et 3.59 sont tous supérieurs ou égaux à 1.0 pour les deux agents stabilisants. Ce résultat est intéressant et montre qu'il est préférable, mais pas indispensable de fermer la route à toute circulation afin de permettre au produit de curer suite à l'application de ciment ou d'émulsion polymère sur une route non revêtue.

- Aucun produit n'a montré une amélioration significative du module réversible excepté le gneiss granitique et le basalte traité à l'aide du ciment pour un pourcentage de particules fines d'environ 9% (figure 3.61).

Ce résultat était attendu pour les produits hygroscopiques qui, une fois de plus, ont comme rôle d'humidifier le matériau granulaire et non d'améliorer les propriétés mécaniques de ce dernier. Toutefois, même lorsqu'une matrice cimentaire est créée dans le squelette d'un matériau granulaire ce qui a pour effet d'augmenter la rigidité et la résistance intrinsèque de ce dernier, le module réversible n'est pas significativement

élevé. De même, un traitement à l'aide d'émulsion polymère n'augmente pas les valeurs du module réversible. Ce résultat peut être expliqué par les longues chaînes de polymères qui entourent le squelette du matériau granulaire et ainsi le rend davantage apte à absorber les déformations créées par la circulation des véhicules.

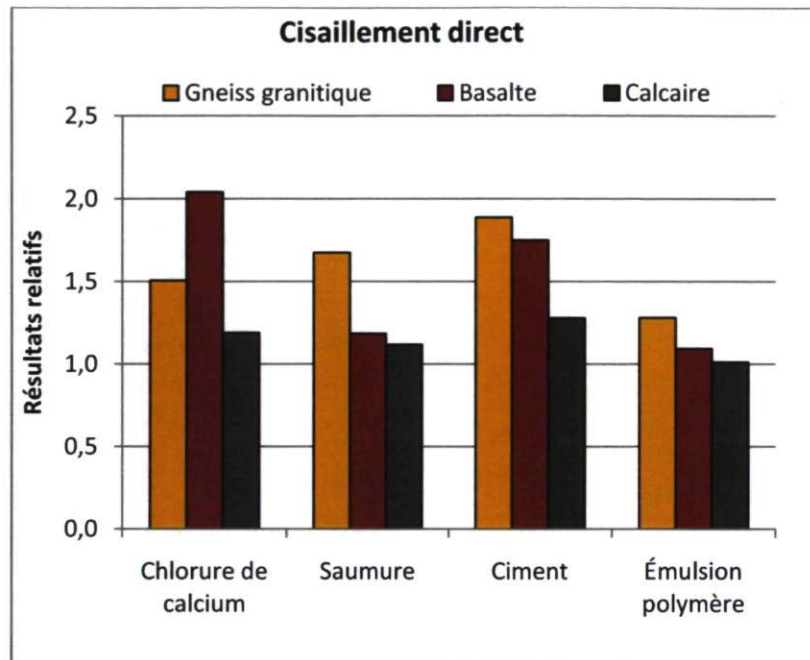


Figure 3.51 : Résultats relatifs pour l'essai du cisaillement direct pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.

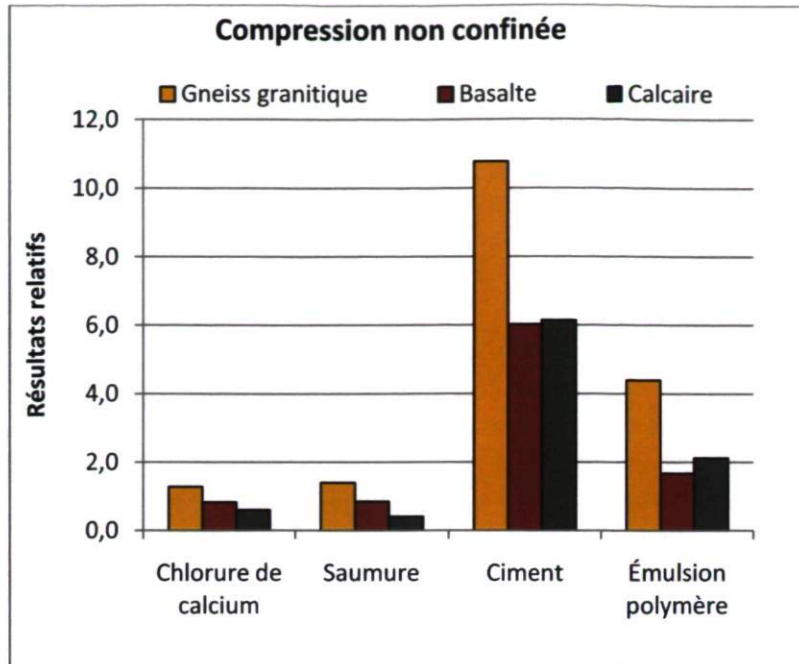


Figure 3.52: Résultats relatifs pour l'essai de la compression non confinée pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.

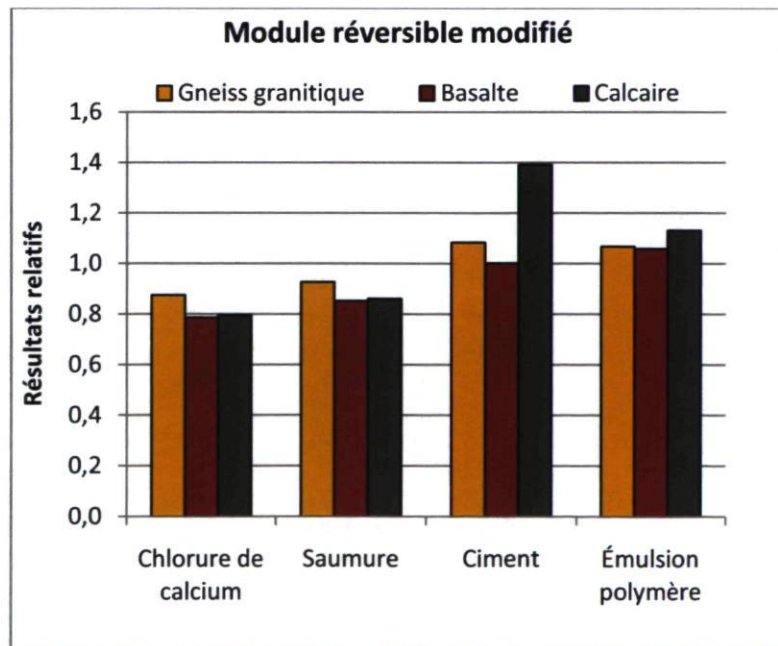


Figure 3.53: Résultats relatifs pour l'essai du module réversible modifié pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.

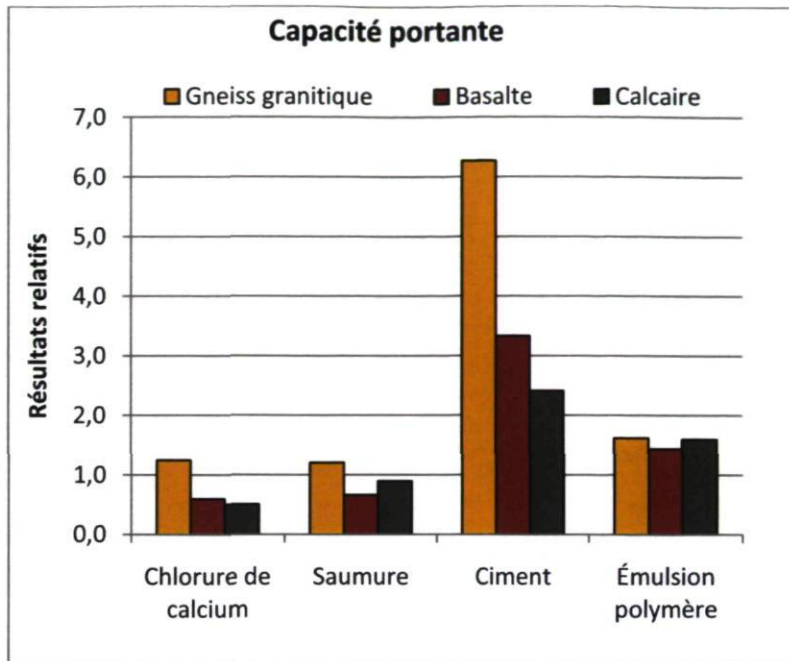


Figure 3.54: Résultats relatifs pour l'essai de la capacité portante à 5 mm d'enfoncement du piston pour une granulométrie d'environ 4% de particules fines.

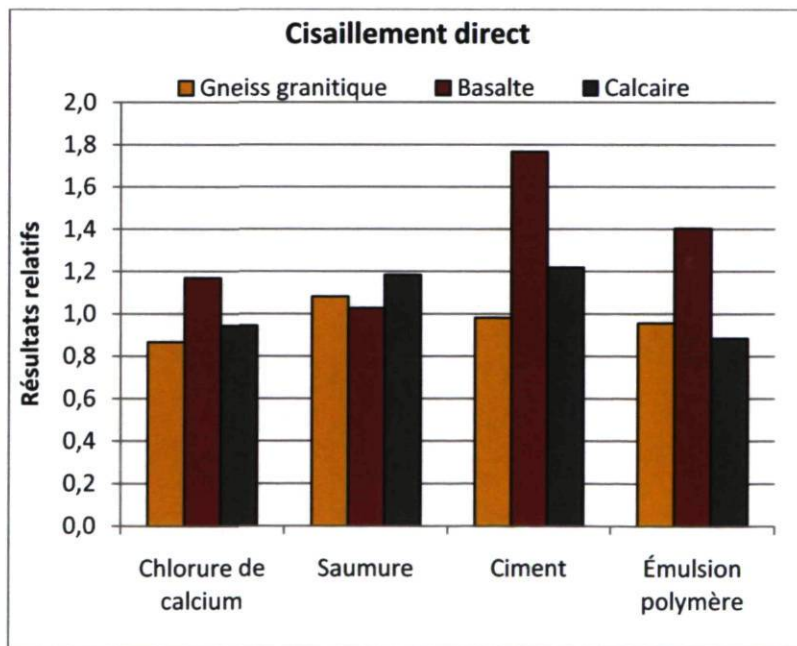


Figure 3.55 : Résultats relatifs pour l'essai du cisaillement direct pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.

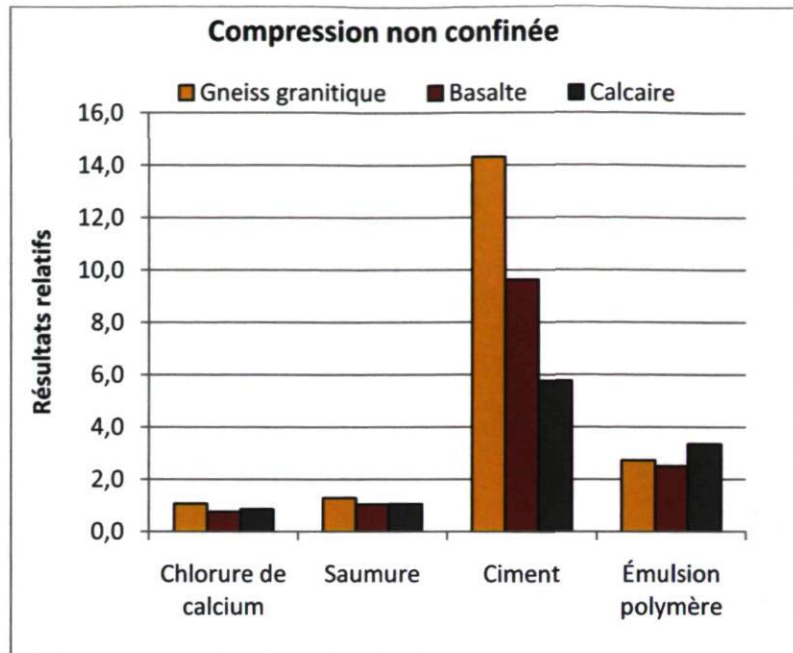


Figure 3.56: Résultats relatifs pour l'essai de la compression non confinée pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.

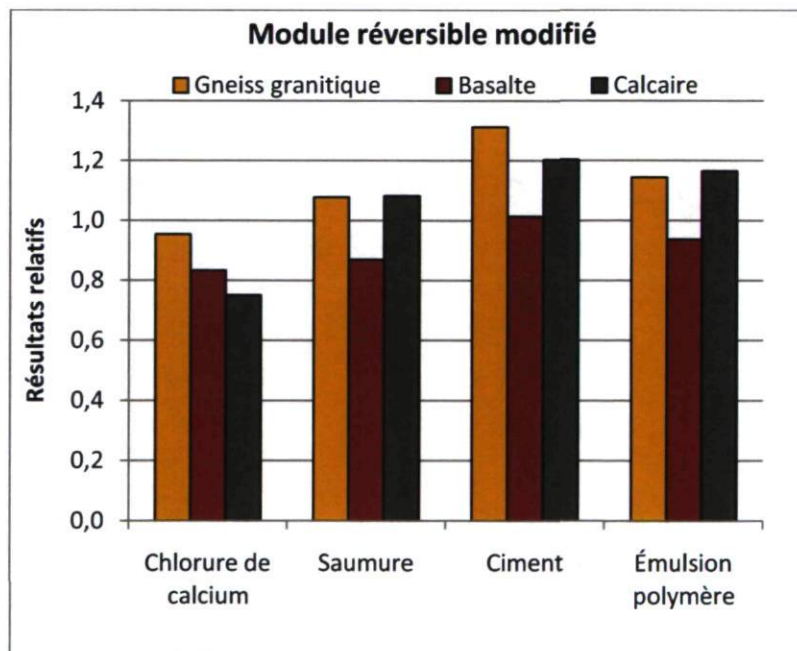


Figure 3.57: Résultats relatifs pour l'essai du module réversible modifié pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.

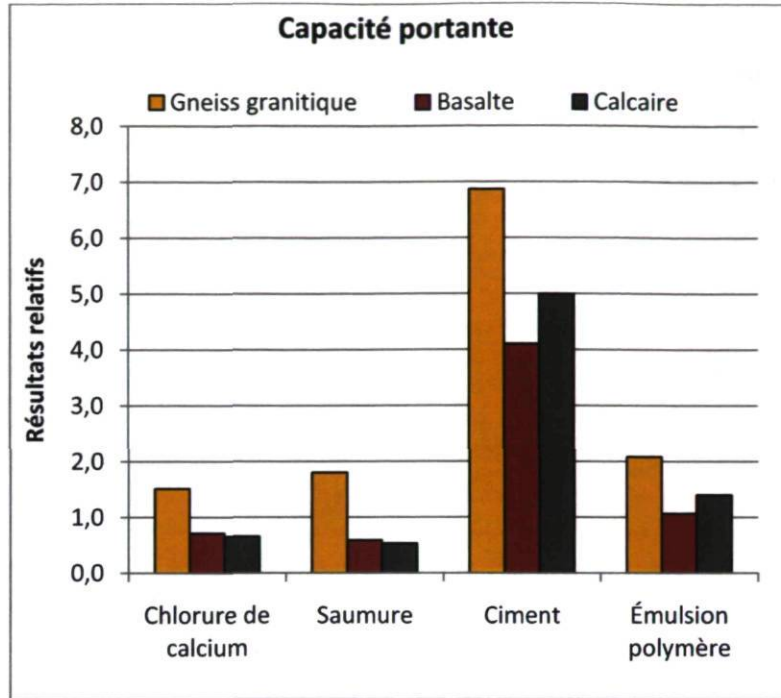


Figure 3.58: Résultats relatifs pour l'essai de la capacité portante à 5 mm d'enfoncement du piston pour une granulométrie d'environ 7% de particules fines.

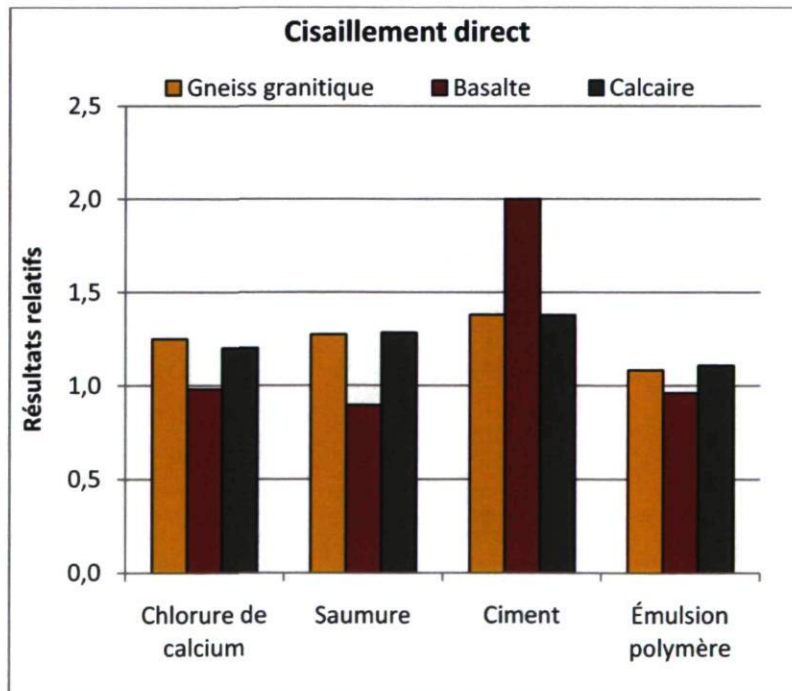


Figure 3.59 : Résultats relatifs pour l'essai du cisaillement direct pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.

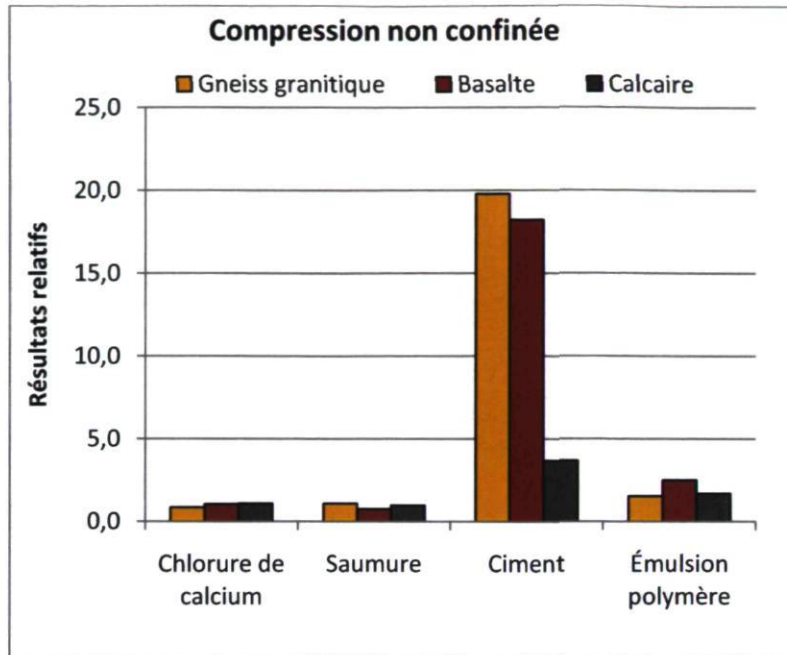


Figure 3.60: Résultats relatifs pour l'essai de la compression non confinée pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.

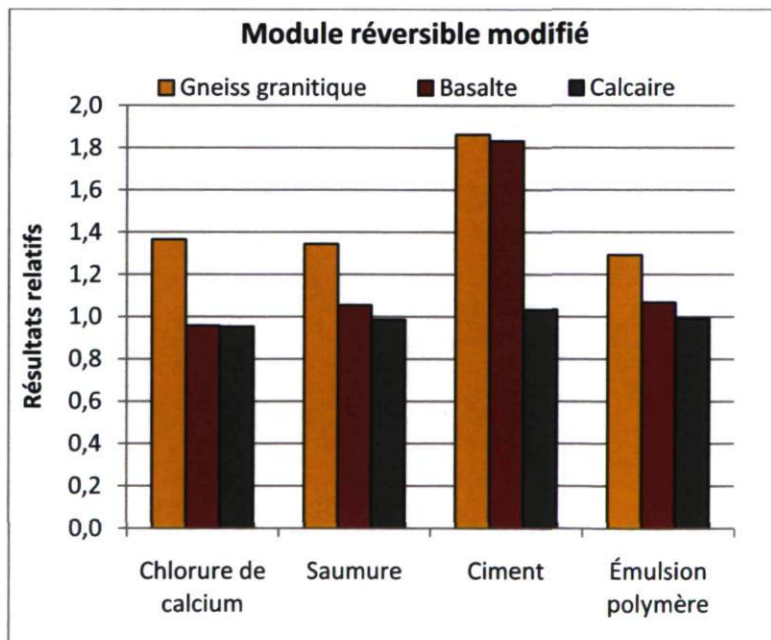


Figure 3.61: Résultats relatifs pour l'essai du module réversible modifié pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.

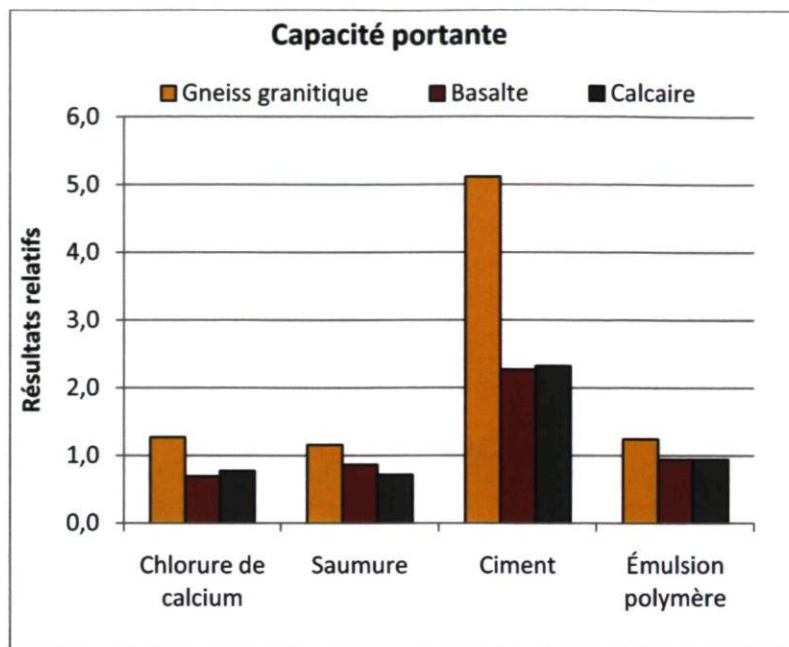


Figure 3.62: Résultats relatifs pour l'essai de la capacité portante à 5 mm d'enfoncement du piston pour une granulométrie d'environ 9% de particules fines.

4. Validation des résultats

4.1 Essais sur le terrain en conditions réelles

Les essais sur le terrain consistent en l'application d'un agent stabilisant sur une section de route d'environ 250 m. Suite à l'application du produit, un suivi est effectué afin de vérifier le comportement de la route et l'évolution de ses défauts (nids-de-poule, ornières et planche à laver).

Les sections sont testées seulement avec des agents stabilisants, car seulement ces derniers ont comme rôle d'améliorer les propriétés mécaniques d'un matériau granulaire, les produits d'abat-poussière n'ayant comme rôle que de réduire la poussière (voir résultats du chapitre 3).

En effet, les essais en laboratoire ont démontré que les agents stabilisants, contrairement aux produits abat-poussière, contribuent à augmenter les propriétés mécaniques des matériaux granulaires. La stabilisation d'une section de route permet donc de vérifier si les propriétés mécaniques des matériaux granulaires en conditions réelles peuvent être améliorées tout comme la stabilisation a contribué à améliorer les propriétés mécaniques des matériaux granulaires en laboratoire.

4.1.1 Réalisation des travaux à Rivière-aux-Rats

La première étape est de choisir quel agent stabilisant (ciment ou émulsion polymère) sera utilisé pour la stabilisation de la section de la route. D'un côté, le ciment est un produit efficace, mais très coûteux et difficilement applicable notamment dû au fait qu'il ne doit pas être exposé à l'humidité avant son application. Son utilisation sur plusieurs kilomètres pour la stabilisation d'une route non revêtue est donc moins réaliste. Pour ces

raisons, l'émulsion polymère s'avère le produit le plus pertinent à utiliser pour la réalisation de la section stabilisée.

La planche stabilisée s'étend sur 250 m. Une planche de référence de 250 m est également réalisée. Il est à noter que ces deux sections sont séparées par une zone tampon de 500 m afin d'éviter toutes contaminations. Il est également important de mentionner qu'avant la réalisation des planches d'essais, la route non revêtue est rechargée à l'aide de gneiss granitique ayant une granulométrie semblable à celui utilisé pour les essais en laboratoire.

Finalement, la construction des planches est réalisée entre les kilomètres 9 et 10 de la route forestière située à Rivière-aux-Rats près de La Tuque. Le trafic lourd est composé de camions transportant le bois (figure 4.1) et représente environ 10% du trafic total. Ces derniers ont une masse variant habituellement entre 100 et 150 tonnes.



Figure 4.1 : Camion transportant le bois sur une route forestière à Rivière-aux-Rats.

4.1.1.1 Caractérisation du matériau granulaire

Afin de bien définir le matériau granulaire utilisé pour la réalisation des planches, une caractérisation complète est effectuée. Les essais de caractérisation réalisés sont les mêmes que ceux décrits à la section 3.2 soient l'analyse granulométrique par tamisage, le Proctor modifié, la capacité portante, l'essai Los Angeles, l'essai micro-Deval, l'essai de densité et d'absorption et la valeur au bleu de méthylène. La figure 4.2 et le tableau 4.1 montrent les résultats obtenus pour la caractérisation du matériau granulaire :

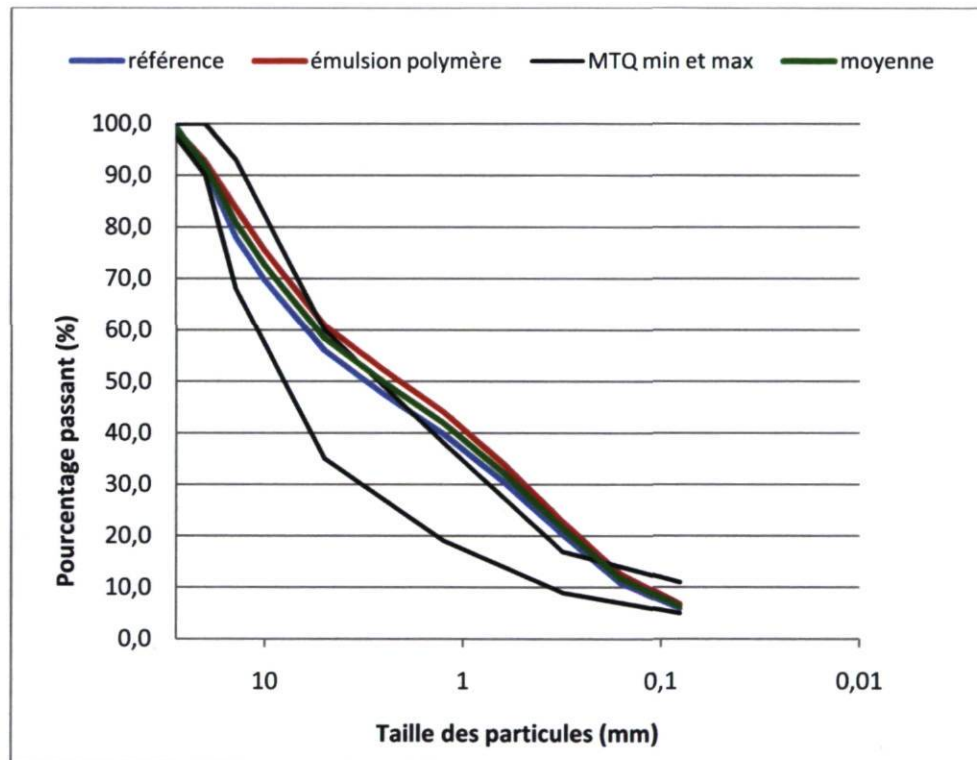


Figure 4.2 : Courbe granulométrique pour la section référence et pour celle stabilisée à l'aide de l'émulsion polymère.

**Tableau 4.1 : Résultats de la caractérisation du matériau granulaire sur les planches d'essai à
Rivière-aux-Rats.**

Essai de caractérisation	Résultats				Exigences MTQ pour MG-20B*
Analyse granulométrique	<u>%particules fines</u> : 6,4%				voir figure 22
Proctor modifié	<u>Proctor (% eau optimal)</u> 4,5%	<u>Masse volumique sèche</u> 2130 kg/m ³			-
Capacité portante	<u>Force à 2,5 mm</u> 16,2 kN	<u>Force à 5 mm</u> 5,7 kN			-
Los Angeles	<u>%abrasion</u> : 48,36%				≤ 50 %
Micro-Deval	<u>Coefficient micro-Deval</u> : 17,2%				≤ 25 %
Densité et absorption (granulats > 5mm)	<u>D_{Brute} (sec)</u> 2,63	<u>D_{Brute} (SSS)</u> 2,67	<u>D_{apparente}</u> 2,72	<u>%absorption</u> 1,17%	-
Densité et absorption (granulats ≤ 5 mm)	<u>D_{Brute} (sec)</u> 2,64	<u>D_{Brute} (SSS)</u> 2,65	<u>D_{apparente}</u> 2,67	<u>%absorption</u> 0,42%	-
Bleu de méthylène	Valeur au bleu : 0,071 cm ³ /g				≤ 0,20

* Selon (Géolab inc., 2002)

Pour effectuer la caractérisation du matériau granulaire présent sur la partie rechargée de la route à Rivière-aux-Rats, un échantillon de la planche de référence et un autre provenant de celle stabilisée sont prélevés. Une analyse granulométrique de chaque échantillon est effectuée. Les résultats sont présentés à la figure 4.2. La minéralogie des deux planches est identique (gneiss granitique) et la granulométrie de ces dernières est très semblable à la granulométrie du gneiss granitique qui a servi à la réalisation du programme expérimental en laboratoire. Les résultats obtenus en laboratoire pour le

gneiss granitique pourront donc être comparés aux performances de la section stabilisée sur le terrain. Pour faciliter l'analyse, les différents essais pour la caractérisation du matériau granulaire sont effectués à une seule reprise à l'aide d'un échantillon comprenant 50% massique de matériau provenant de la planche référence et 50% massique de matériau provenant de la planche stabilisée. La caractérisation a donc été faite à une seule reprise, étant donné la très grande similarité du matériau granulaire de la section référence et de celle stabilisée. Seulement l'analyse granulométrique a été réalisée pour les deux sections. Une moyenne de la granulométrie de ces deux sections est présentée à la figure 4.2.

Le matériau granulaire présent sur les deux planches se trouve majoritairement dans le haut du fuseau granulaire que doit respecter l'échantillon pour être considéré comme un MG-20B par le ministère des Transports du Québec (MTQ). Il est très sablonneux et contient quelques roches de taille supérieure à 28 mm ce qui explique pourquoi la distribution granulométrique pour des particules grossières se trouve dans le bas du fuseau granulaire du MG-20B du MTQ. La quantité importante de sable dans l'échantillon a ensuite pour effet de redresser la courbe en la redirigeant vers la partie supérieure du fuseau granulaire MG-20B. L'essai Proctor a permis d'obtenir une masse volumique sèche maximale de 2130 kg/m³. Ce résultat peu élevé est dû à la quantité importante de sable qui contribue à l'augmentation du pourcentage de vides dans le matériau granulaire. Les résultats des essais Los Angeles, micro-Deval, de densité et d'absorption et d'essai au bleu de méthylène sont semblables à ceux obtenus pour le gneiss granitique utilisé pour les essais de laboratoire. C'est donc un matériau peu résistant aux chocs soudains importants, mais très résistant à l'usure. Finalement, il ne démontre pas de grande capacité d'absorption et contient très peu de particules argileuses. Un aspect différencie le matériau granulaire de Rivière-aux-Rats comparativement au gneiss granitique utilisé en laboratoire. En effet, pour l'essai de la capacité portante, la force nécessaire pour l'enfoncement du piston de 2,5 mm de profondeur est supérieure à celle pour l'enfoncement de 5 mm. La figure 4.3 montre le graphique obtenu pour cet essai:

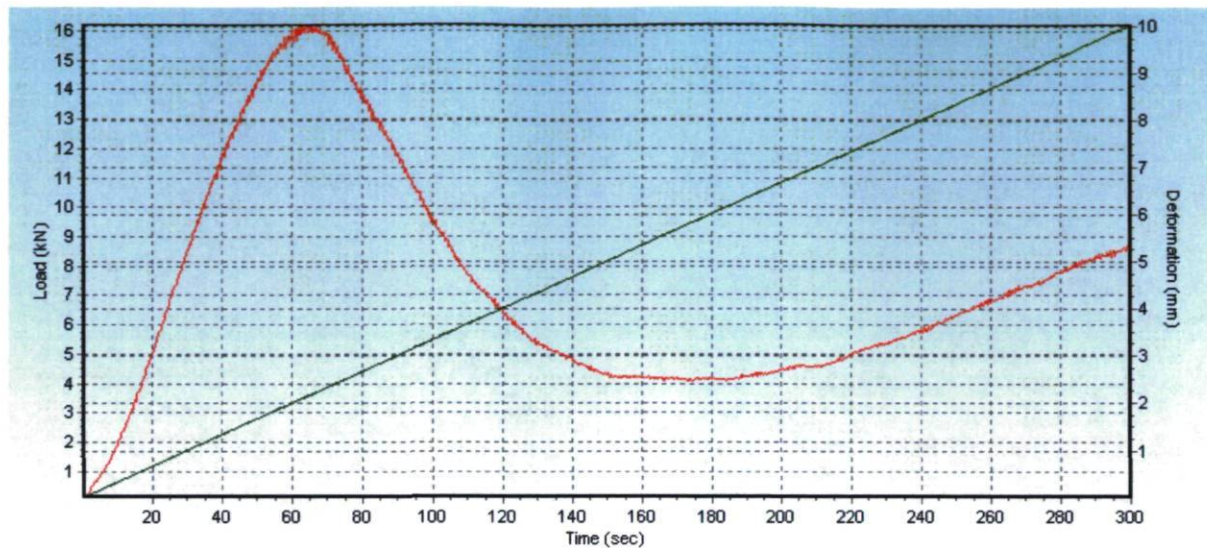


Figure 4.3 : Graphique obtenu pour l'essai de la capacité portante pour le matériau granulaire des planches d'essai à Rivière-aux-Rats.

En analysant la figure 4.3, il est possible de remarquer que la force nécessaire à l'enfoncement du piston augmente jusqu'à 2,5 mm pour ensuite diminuer jusqu'à un enfoncement de 5 mm. Cette courbe ne respecte pas le tracé habituel pour un essai de la capacité portante (voir figure 3.8). Ce résultat est dû au fait que le matériau testé contient une quantité importante de sable et qu'il ne contient presque pas de graviers fins (particules entre 20 mm et 5 mm de diamètre). En effet, pour les essais de la capacité portante réalisés en laboratoire, le gravier fin retient les particules ensemble et empêche le matériel autour du piston de remonter vers la surface lors de l'enfoncement du piston et d'ainsi créer un réarrangement du squelette granulaire. En remontant, le matériau devient lâche ce qui pour effet d'engendrer une diminution de la force qui doit être appliquée au piston afin que ce dernier conserve une vitesse d'enfoncement constante.

Dans le but de vérifier cette hypothèse, un essai CBR (California Bearing Ratio) normalisé est réalisé avec le matériau granulaire des planches d'essais à Rivière-aux-Rats. Cet essai est effectué sur la même presse qui est configurée de la même manière que pour les essais de la capacité portante. La seule différence est le moule utilisé. Ce dernier offre le même confinement sur les surfaces inférieure et latérale, mais il est

également équipé de deux anneaux circulaires de 2,27 kilogrammes chacune qui assurent un confinement sur la surface supérieure. La figure 4.4 montre le moule utilisé.



Figure 4.4 : Moule utilisé pour l'essai du CBR normalisé.

La figure 4.5 montre donc un tracé normal pour un essai de CBR ce qui démontre que le sol qui remonte autour du piston et qui devient plus lâche est réellement responsable du résultat voulant que la force nécessaire à l'enfoncement du piston de 5 mm soit plus faible que celle à 2,5 mm d'enfoncement (voir tableau 4.1).

Ceci prouve donc qu'un sol contenant beaucoup de sable et très peu de gravier est plus apte à se déformer en surface et à devenir lâche lorsqu'il est sollicité et que sa capacité portante diminue rapidement lorsqu'il subit une déformation importante.

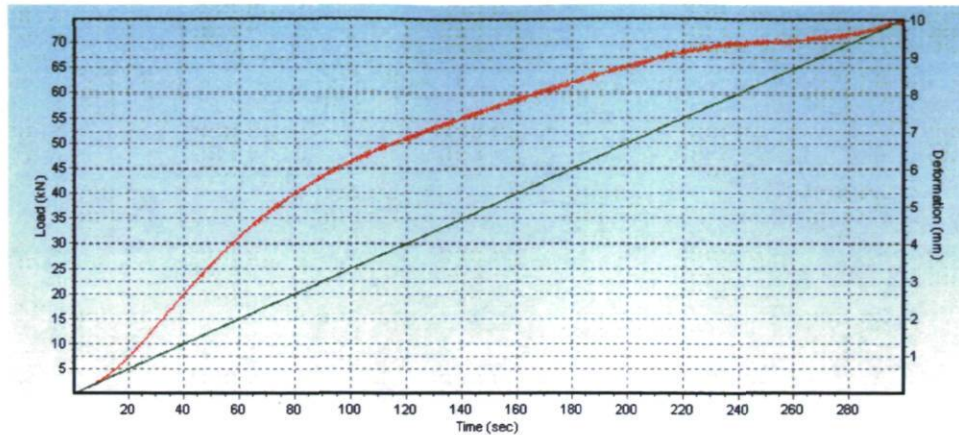


Figure 4.5 : Résultat de la force en fonction du temps pour l'essai du CBR.

4.1.1.2 Réalisation des planches

La planche stabilisée à l'aide de l'émulsion polymère est réalisée en enlevant une couche de matériau granulaire d'environ 5 cm, en appliquant ensuite le produit à un taux de pose de 3,4 l/m², en remettant la couche précédemment enlevée et finalement en réappliquant de l'émulsion polymère sur la surface de la route, toujours à un taux de pose de 3,4 l/m². Les résultats de laboratoire justifient le taux de pose d'émulsion polymère choisi. En effet, un taux de pose de 3,4 l/m² contribue à améliorer davantage les propriétés mécaniques d'un gneiss granitique que les taux de pose inférieurs. Habituellement, comme expliqué à la section 3.3, l'agent stabilisant doit être mélangé avec le sol et stabilise jusqu'à une profondeur de 10 cm. Or, dans ce cas-ci, un taux de pose de 3,4 l/m² est appliqué à 5 cm de profondeur et à la surface ce qui représente 4 fois la concentration normalement recommandée. Cette quantité importante d'agent stabilisant est appliquée à cause des conditions routières difficiles (trafic composé majoritairement de poids lourds et section située dans une dénivellation avec un virage prononcé) et afin de compenser le fait que le sol ne soit pas parfaitement mélangé; un mélange homogène entre le matériau granulaire et l'agent stabilisant en conditions réelles est très difficile, laborieux, coûteux et donc peu réaliste. La figure 4.6 montre l'épandage de l'agent stabilisant après avoir enlevé environ 5 cm de hauteur de matériau granulaire de la partie gauche de la route. Le matériau retiré se retrouve sous la forme d'un andain au milieu du chemin. Après

l'application de l'émulsion polymère à une profondeur de 5 cm, le remblai est remplacé (figure 4.7) et ensuite la couche de surface d'agent stabilisant est appliquée. L'application de l'émulsion polymère sur le côté gauche de la route est alors terminée et les mêmes étapes sont effectuées pour la stabilisation de la partie droite de la route.



Figure 4.6 : Épandage de la couche inférieure (profondeur de 5 cm) de l'agent stabilisant sur la partie gauche de la route.



Figure 4.7 : Niveleuse remplaçant le matériel initialement enlevé afin de permettre l'épandage de la couche inférieure de l'émulsion polymère.

Il est à noter que l'agent stabilisant a été appliqué dans des conditions climatiques pluvieuses. Le pourcentage en eau de la route lors de l'application de l'agent stabilisant était de 6,7% ce qui dépasse la valeur du Proctor modifié qui est de 4,5% (teneur en eau optimale). Cette teneur en eau élevée a entraîné un peu de ruissellement de l'agent stabilisant lors de sa pose et constitue une autre raison pour laquelle l'émulsion polymère a été appliquée à un taux de pose 4 fois plus élevé que celui normalement recommandé.

Suite à l'épandage des produits, un rouleau compacteur est passé à deux reprises sur la planche référence et sur celle stabilisée à l'émulsion polymère. Ceci permet d'avoir une compaction égale des deux planches et rend donc possible la comparaison des résultats entre la section de référence et celle stabilisée. La figure 4.8 montre le rouleau compacteur utilisé pour la compaction. La compaction est recommandée lors des travaux de rechargement afin que le matériau granulaire ajouté à la route soit plus rigide.



Figure 4.8 : Rouleau compacteur servant à la compaction de la planche référence et de celle stabilisée.

4.1.2 Résultats

4.1.2.1 Paramètres visés

Afin d'évaluer les essais en conditions réelles à Rivière-aux-Rats, les essais effectués visent à quantifier les différentes détériorations possibles de la route et à déterminer, à l'aide du déflectomètre à masse tombante, l'évolution de la capacité portante de chacune des sections, soit celle de référence et celle stabilisée.

4.1.2.1.1 Détériorations de la route

Les trois principales détériorations de la route sont, comme mentionné à la section 2.1, l'orniérage, la planche à laver et les nids-de-poule. À l'intérieur d'une section, les

ornières et les planches à laver sont calculées en superficie (m²) et la sévérité de ces défauts est notée sur une échelle allant de faible à élevée selon leurs profondeurs. Pour leurs parts, les nids-de-poule sont calculés en nombre et la sévérité de ces derniers est notée sur une échelle de faible à élevée en fonction de leurs diamètres et de leurs profondeurs. Le tableau 4.2 et le tableau 4.3 définissent la sévérité des différents défauts de la route, soit faible, moyen et élevée (selon Department of the Army, 1995) :

Tableau 4.2 : Échelle de sévérité pour les ornières et les planches à laver.

Défauts	Échelle	Profondeur
Ornières et Planches à laver	Faible	Moins de 2,5 cm
	Moyen	Entre 2,5 et 7,5 cm
	Élevée	Plus de 7,5 cm

Tableau 4.3 : Échelle de sévérité pour les nids-de-poule.

Profondeur maximale	Diamètre moyen			
	moins de 0,3 m	entre 0,3 et 0,6 m	entre 0,6 et 1 m	plus de 1 m
entre 1,5 et 5 cm	faible	faible	moyen	élevée
entre 5 et 10 cm	faible	moyen	élevée	élevée
plus de 10 cm	moyen	élevée	élevée	élevée

La profondeur des défauts est mesurée à l'aide d'une règle à ornière et d'un coin biseauté (figure 4.9). Cet coin est inséré sous la règle à l'endroit où se trouve le défaut. La profondeur du défaut peut ainsi être déterminée.



Figure 4.9 : Règle à ornière et coin biseauté servant à mesurer la profondeur des défauts de la route (il est ici possible de voir la présence d'une ornière).

4.1.2.1.2 Essais de déflectomètre à masse tombante portatif (LWD)

Selon Grenier (2007), le déflectomètre à masse tombante (FWD) est un appareil d'essai non destructif qui reproduit, sous l'impact d'une masse tombante sur un disque en contact avec la surface de la route, la charge correspondant à un demi-essieu d'un camion roulant à environ 80 km/h. Au même moment, cet appareil mesure les déflexions générées en surface. Selon COST (1999, tiré de Grenier (2007)), le FWD sert entre autres à :

1. Effectuer la comparaison relative des chaussées en termes d'indices de déflexions.
2. Déterminer la capacité structurale des chaussées.
3. Calculer par rétrocalcul les modules d'élasticité des différentes couches de matériaux.
4. Déterminer la capacité structurale des chaussées non revêtues.

De plus, le déflectomètre à masse tombante portatif est un autre équipement qui permet de réaliser les essais mentionnés ci-haut. En effet, selon Hildebrand et Baltzer (2003), le LWD peut remplacer le FWD pour les essais mentionnés ci-haut notamment dans le cas des routes non revêtues. De plus, ces derniers affirment que le LWD est particulièrement

utile dans un contexte où l'accès est difficile ou restreint. Ils mentionnent finalement que le LWD est relativement peu coûteux, simple d'utilisation, facile à transporter et qu'il permet d'obtenir des résultats rapidement.

Le déflectomètre à masse tombante portatif permet de reproduire les sollicitations mécaniques imposées à la route par les véhicules et à noter le comportement de la route en termes de déflexions. Cet appareil mesure un bassin de déflexion provoqué par une masse tombante qui impose une onde de choc à la route. Le déflectomètre à masse tombante portatif utilisé pour les essais est présenté à la figure 4.10. Il s'agit d'un déflectomètre PRIMA 100 de la compagnie Carl Bro.



Figure 4.10 : Déflectomètre à masse tombante portatif utilisé pour les essais.

Le déflectomètre à masse tombante portatif est composé d'un système d'application de la charge et de trois géophones. La charge est appliquée à l'aide d'une masse qui tombe sur une plaque circulaire. La contrainte appliquée dépend de la masse elle-même, de sa hauteur de chute et du rayon de la plaque circulaire. L'application de la charge a une

durée d'environ 20 ms. Les géophones servent à mesurer les déflexions et permettent ainsi de mesurer un bassin de déflexions. Les trois géophones sont espacés de 30 cm. L'un de ceux-ci est placé directement sous la plaque circulaire.

La figure 4.11 montre la ligne sous laquelle a lieu 95% de la déflexion (Grenier (2007)). La distribution des contraintes sous la plaque circulaire peut être estimée par une droite ayant un angle de 34° , soit une pente d'environ 2:3. Il s'agit d'une approximation acceptable de la courbe sous laquelle a lieu 95% de la déflexion. À cause de cette distribution des contraintes, les géophones éloignés du point d'application de la charge donnent de l'information sur les couches en profondeurs. D'un autre côté, le géophone situé sous la plaque circulaire donne la déflexion globale de la chaussée. Ceci permet donc d'effectuer une bonne approximation de la qualité structurale globale de la chaussée.

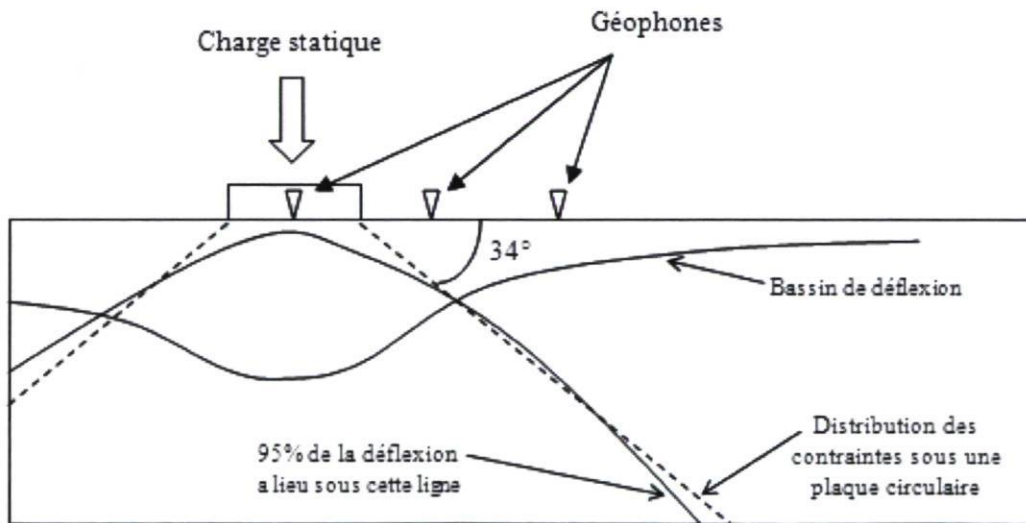


Figure 4.11 : Schéma de la ligne d'influence sous laquelle 95% de la déflexion a lieu.

Les trois contraintes utilisées pour la section référence de et celle stabilisée sont 50, 70 et 100 kPa. Ces trois contraintes sont choisies, car ils s'appliquent bien à une chaussée non revêtue. En effet, l'utilisation d'une masse plus élevée ou d'une plaque circulaire plus petite ne permet pas d'obtenir de bons résultats en raison de l'inégalité de la surface de

roulement d'une route non revêtue comparativement à une route avec un revêtement bitumineux par exemple. Les trois contraintes ont donc été créées en ne modifiant que la hauteur de chute de la masse tombante. Il est à noter qu'une erreur de $\pm 5\%$ est tolérée pour la précision des contraintes. Ce pourcentage d'erreur est choisi, car les essais réalisés dans le cadre de ce projet de maîtrise ont montré que cette légère variation n'a pas d'influence significative sur les résultats.

Pour chaque contrainte, la déflexion est prise à cinq points équidistants sur la largeur de la route, au milieu de la section en question. De plus, pour chacun de ces points équidistants, trois essais sont réalisés pour chaque contrainte afin d'assurer une répétabilité des résultats. Le résultat final est donc, pour chaque contrainte, une moyenne des cinq points équidistants. Les résultats complets pour chaque point équidistant sont présentés en annexe. La figure 4.12 montre un schéma des essais de LWD réalisés pour l'évaluation des deux sections à Rivière-aux-Rats.

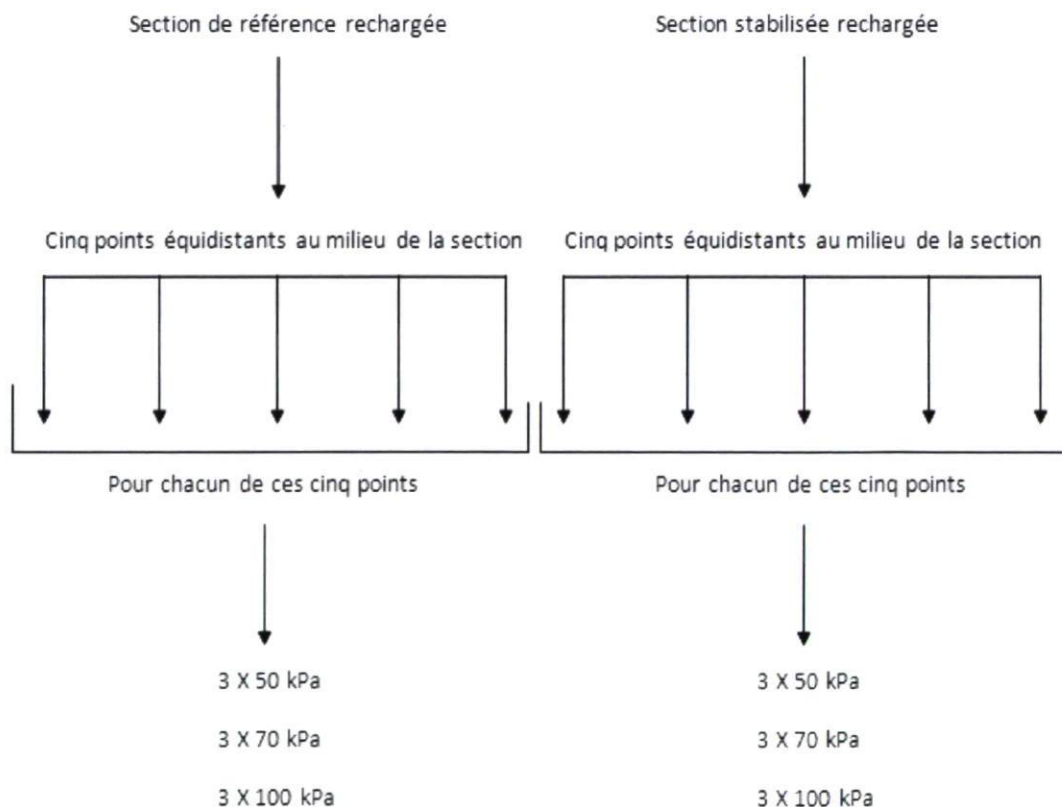


Figure 4.12 : Schéma des essais de LWD effectués à Rivière-aux-Rats.

Par contre, un problème technique est survenu avec le déflectomètre à masse tombante portatif lors des essais du 19 août 2008 (jour 53) de sorte que les bassins de déflexion ont été mesurés sur un seul point pour chacune des sections. Les résultats obtenus étant cohérents et représentatifs de la tendance habituelle, ces derniers ont donc été conservés.

Les bassins de déflexion permettent également le calcul de coefficients montrant la différence de déflexion entre certains géophones. Ces coefficients sont l'indice de courbure de la surface (SCI) et l'indice de dommage de la base (BDI) (Grenier (2007)). Le SCI permet une analyse des 200 premiers millimètres de la chaussée. Pour les routes non revêtues, il est un bon indicateur de la rigidité de la fondation supérieure. Le BDI fournit une bonne estimation de la rigidité du matériau situé entre 200 et 400 millimètres de profondeur. Les équations 22 et 23 présentent respectivement les coefficients SCI et BDI.

$$SCI = D_0 - D_{300} \quad [22]$$

$$BDI = D_{300} - D_{600} \quad [23]$$

Où : D_0 = Déflexion de surface

D_{300} = Déflexion mesurée par le géophone situé à 30 cm de l'impact (centre de la plaque circulaire)

D_{600} = Déflexion mesurée par le géophone situé à 60 cm de l'impact (centre de la plaque circulaire)

4.1.2.2 Présentation des résultats

Le tableau 4.4 présente l'analyse des différents défauts de la route en fonction du temps. Il est à noter que la niveleuse a éliminé les défauts sur la planche témoin et stabilisé avant l'épandage de l'émulsion polymère de sorte que les sections sont considérées parfaites lors de l'application de l'émulsion polymère sur la section stabilisée (jour 0).

Tableau 4.4 : Tableau présentant l'analyse des défauts de la route en fonction du temps pour les planches témoin et stabilisée.

Temps (jours)	Planche évaluée	Type de défauts		
		Ornières	Planches à laver	Nids-de- poule
0	Passage de la niveleuse			
14	Planche témoin	0 m ² -	45 m ² Faible	0 -
	Planche stabilisée	0 m ² -	0 m ² -	0 -
31	Planche témoin	150 m ² Faible	0 m ² -	0 -
	Planche stabilisée	250 m ² Faible	0 m ² -	0 -
39	Planche témoin	0 m ² -	0 m ² -	0 -
	Planche stabilisée	0 m ² -	0 m ² -	0 -
53	Planche témoin	0 m ² -	0 m ² -	0 -
	Planche stabilisée	0 m ² -	0 m ² -	0 -
69	Planche témoin	0 m ² -	0 m ² -	0 -
	Planche stabilisée	0 m ² -	0 m ² -	0 -
83	Planche témoin	0 m ² -	0 m ² -	0 -
	Planche stabilisée	0 m ² -	0 m ² -	0 -
103	Planche témoin	0 m ² -	0 m ² -	0 -
	Planche stabilisée	0 m ² -	0 m ² -	0 -

La présence de défauts sur les deux sections est presque inexistante. Ce résultat est dû au passage hebdomadaire de la niveleuse. En effet, ce passage régulier fréquent permet de conserver une surface de roulement presque toujours parfaite et contribue donc à éliminer les défauts de surface avant même leur apparition. Ce nivelage a été maintenu car l'endroit choisi pour les sections était critique et donc sujet à l'apparition rapide de défauts de la route. L'évaluation de l'efficacité de l'agent stabilisant dans ces conditions est donc impossible ne sachant pas si les résultats obtenus sont dus au passage de la niveleuse, à l'efficacité du produit ou à une combinaison des deux.

Toutefois, le déflectomètre à masse tombante permet d'obtenir des bassins de déflexion, résultats qui permettent de connaître la capacité portante et la rigidité des deux sections rechargées. Les figures 4.13 à 4.19 présentent l'évolution des bassins de déflexion pour la section de référence et pour celle stabilisée aux différentes contraintes, soient 50, 70 et 100 kPa.

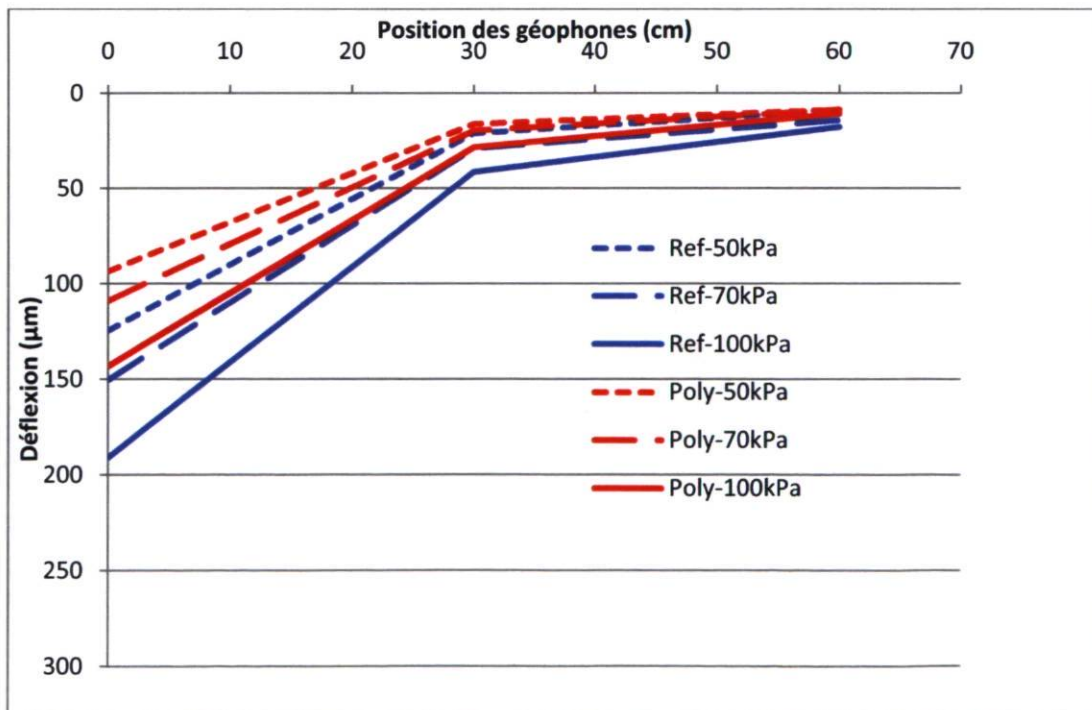


Figure 4.13 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 14 jours.

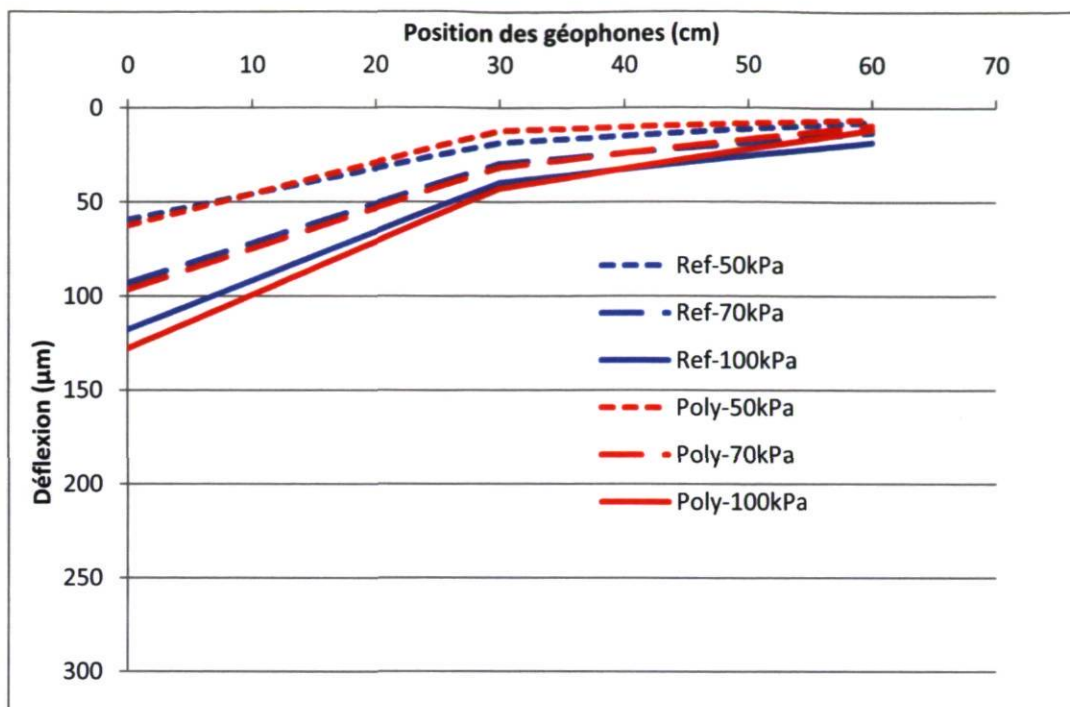


Figure 4.14 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 31 jours.

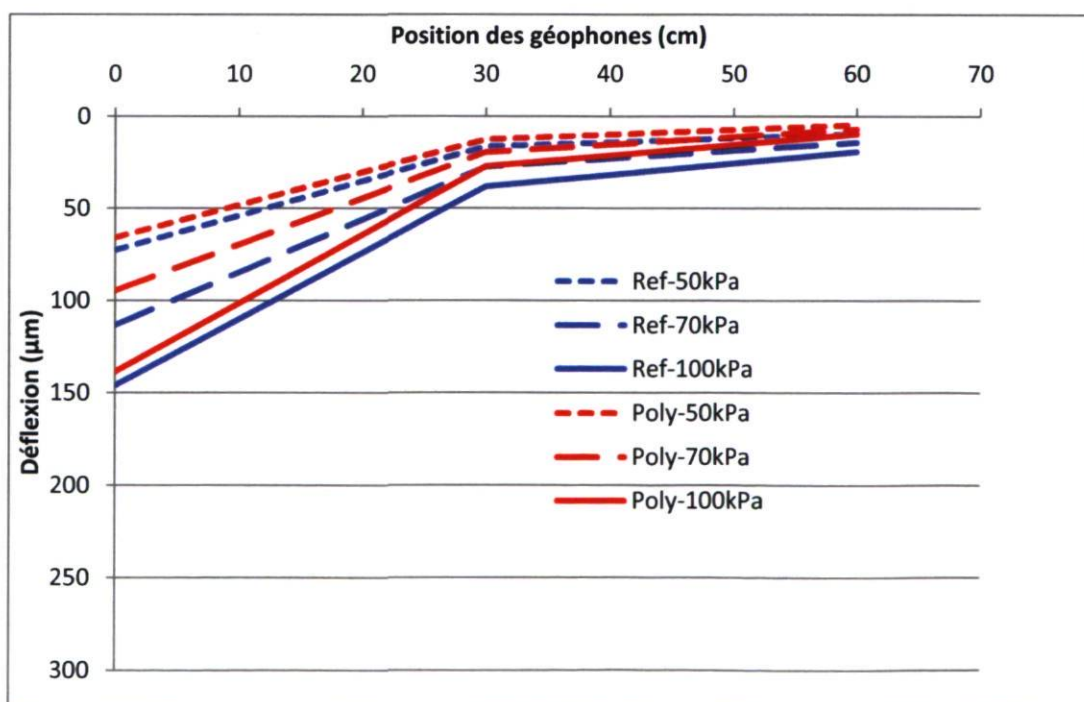


Figure 4.15 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 39 jours.

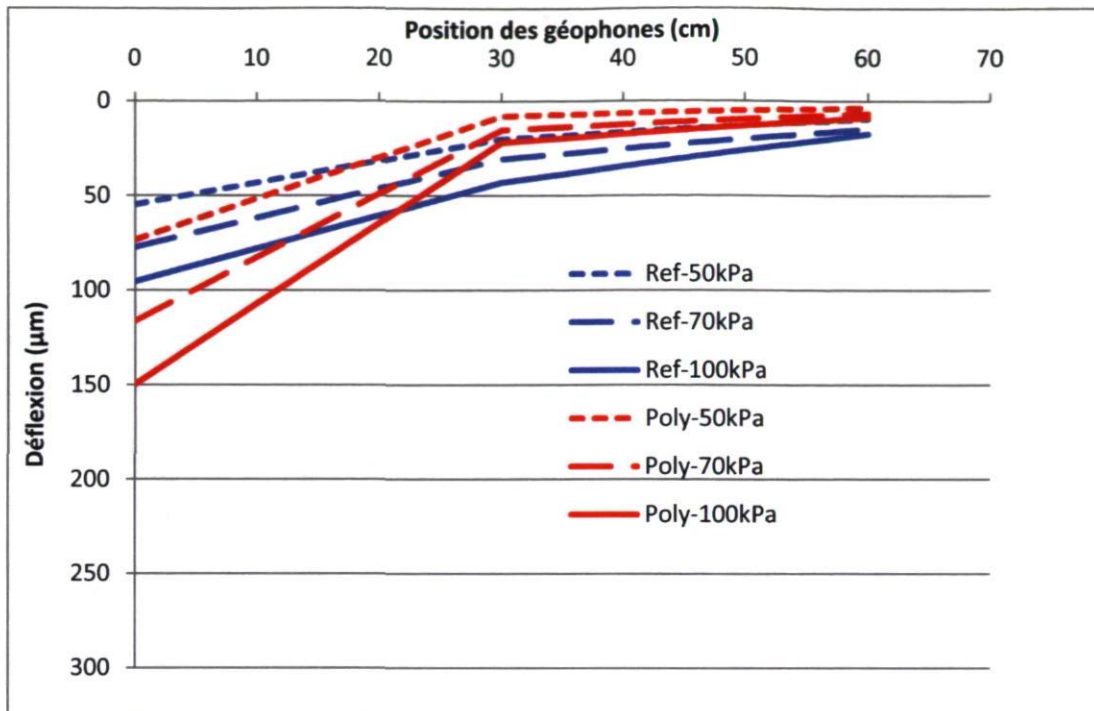


Figure 4.16 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 53 jours.

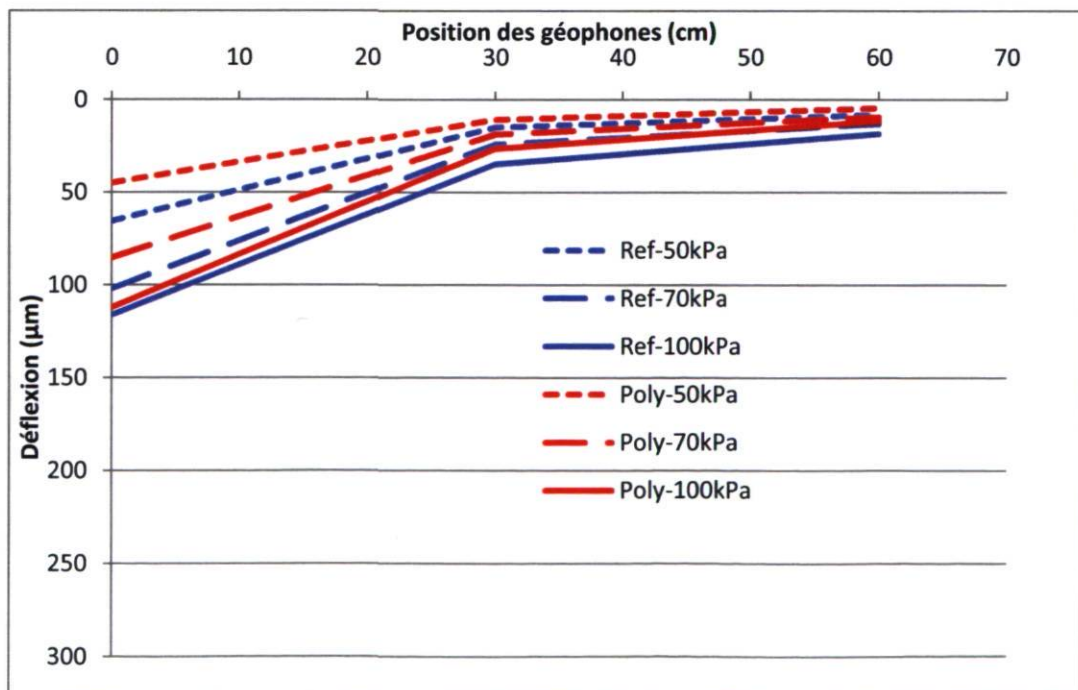


Figure 4.17 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 69 jours.

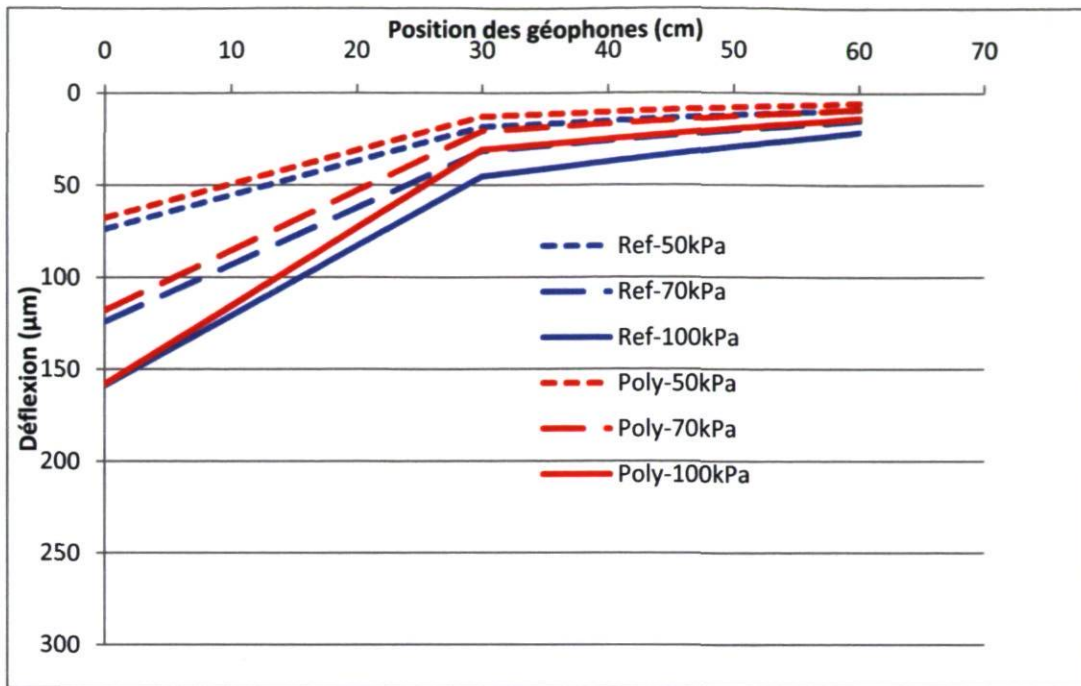


Figure 4.18 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 83 jours.

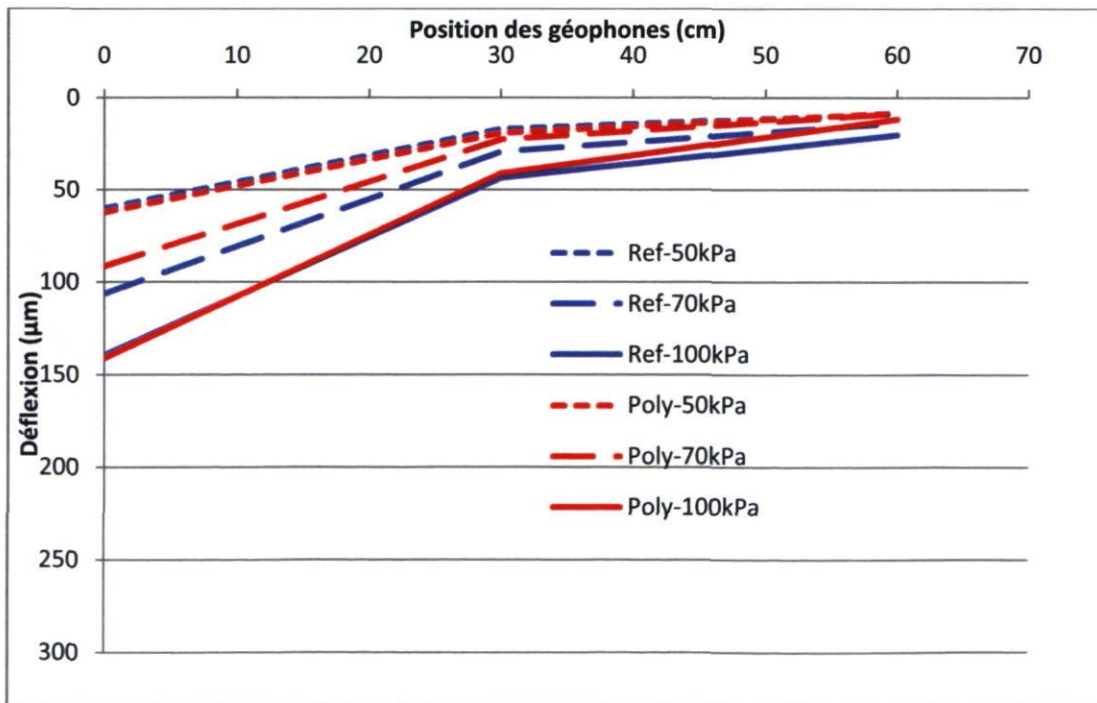


Figure 4.19 : Déflexion en fonction de la position des géophones à différentes contraintes pour la section de référence et celle stabilisée après 103 jours.

L'analyse des résultats permet plusieurs constats. Premièrement, plus la contrainte est élevée, plus les déflexions sont importantes, ce qui est un résultat logique. En effet, plus la hauteur de chute de la masse tombante est élevée, plus l'impact soumis au sol est grand ce qui a donc pour effet d'entraîner des déflexions plus importantes.

Deuxièmement, il est possible de remarquer qu'en général les déflexions sont plus importantes pour la section de référence comparativement à celle stabilisée. La capacité portante d'une chaussée stabilisée à l'émulsion polymère est donc améliorée et cette dernière est par le fait même plus apte à absorber des chocs soudains. Il est important de noter que cette augmentation de la capacité portante est constante pour au moins les 100 premiers jours après l'application du produit stabilisant et qu'elle résiste à un passage fréquent de la niveleuse.

Il est également intéressant de remarquer que même si, dans certains cas, les déflexions à la surface sont plus importantes pour la section stabilisée, comparativement à la section référence, le matériau granulaire stabilisé se déforme moins ce qui permet d'obtenir, à 20 cm de profondeur, des déflexions moins importantes pour la section stabilisée comparativement à la section de référence (voir figure 4.16). En effet, la stabilisation permet une absorption des contraintes soumises à la surface de la route ce qui contribue donc à diminuer les contraintes transmises en profondeur. Grâce à ce résultat, il est donc possible d'affirmer que l'émulsion polymère remplit son rôle de diminution des contraintes transmises en profondeur et qu'il contribue réellement à augmenter la rigidité du matériau granulaire.

La figure 4.13 montre que les déflexions en surface sont beaucoup plus faibles pour la section stabilisée comparativement à la section référence après 14 jours. Toutefois, les figures 4.14 à 4.19 montrent que les déflexions en surface sont généralement équivalentes pour la section stabilisée et celle de référence pour les jours 31 à 103. Ce résultat peut être expliqué par les caractéristiques intrinsèques de l'émulsion polymère. En effet, ce dernier fixe les particules du matériau granulaire à l'aide de longues chaînes de polymères. Toutefois, le passage répété de la niveleuse a pour effet de briser les liens

créés en surface par l'émulsion polymère. Une fois brisés, les liens ne peuvent pas être recréés. Il est donc logique de penser qu'après 14 jours, les liens en surface créés par l'émulsion polymère sont brisés entre autres à cause du passage fréquent de la niveleuse. Le tableau 4.5 présente les différentes valeurs pour les coefficients SCI et BDI.

Tableau 4.5 : Évolution des paramètres SCI et BDI à différentes pressions pour la section de référence et la section stabilisée.

Temps (jours)	Pression (kPa)	Section référence		Section stabilisée	
		<u>SCI</u>	<u>BDI</u>	<u>SCI</u>	<u>BDI</u>
14	<i>50</i>	104	12	77	8
	<i>70</i>	122	15	89	11
	<i>100</i>	150	24	115	18
31	<i>50</i>	41	11	50	6
	<i>70</i>	63	17	65	22
	<i>100</i>	78	21	85	31
39	<i>50</i>	56	7	53	8
	<i>70</i>	86	13	75	12
	<i>100</i>	108	19	112	17
53	<i>50</i>	37	11	65	4
	<i>70</i>	45	16	101	9
	<i>100</i>	52	26	128	13
69	<i>50</i>	51	7	34	6
	<i>70</i>	78	11	67	9
	<i>100</i>	81	16	86	15
83	<i>50</i>	55	9	55	7
	<i>70</i>	93	16	97	12
	<i>100</i>	114	24	127	17
103	<i>50</i>	43	8	43	11
	<i>70</i>	77	16	69	14
	<i>100</i>	96	23	100	29

Il est possible de remarquer que plus la hauteur de chute de la masse tombante est élevée, plus le matériau granulaire des sections se déforme ce qui est logique dû à une contrainte plus importante imposée au sol. De plus, les valeurs des coefficients SCI sont beaucoup plus élevées que celles du coefficient BDI. Ce résultat signifie que les 20 premiers centimètres de chaussée reprennent la majorité de la charge appliquée.

Finalement, la figure 4.20 présente le rapport entre les déflexions à différentes profondeurs de la section référence et de celle stabilisée en fonction du temps. Une moyenne entre les trois contraintes testées est effectuée afin de présenter ces résultats relatifs. Les droites en pointillé sur la figure correspondent aux moyennes des résultats relatifs dans le temps pour les différentes profondeurs.

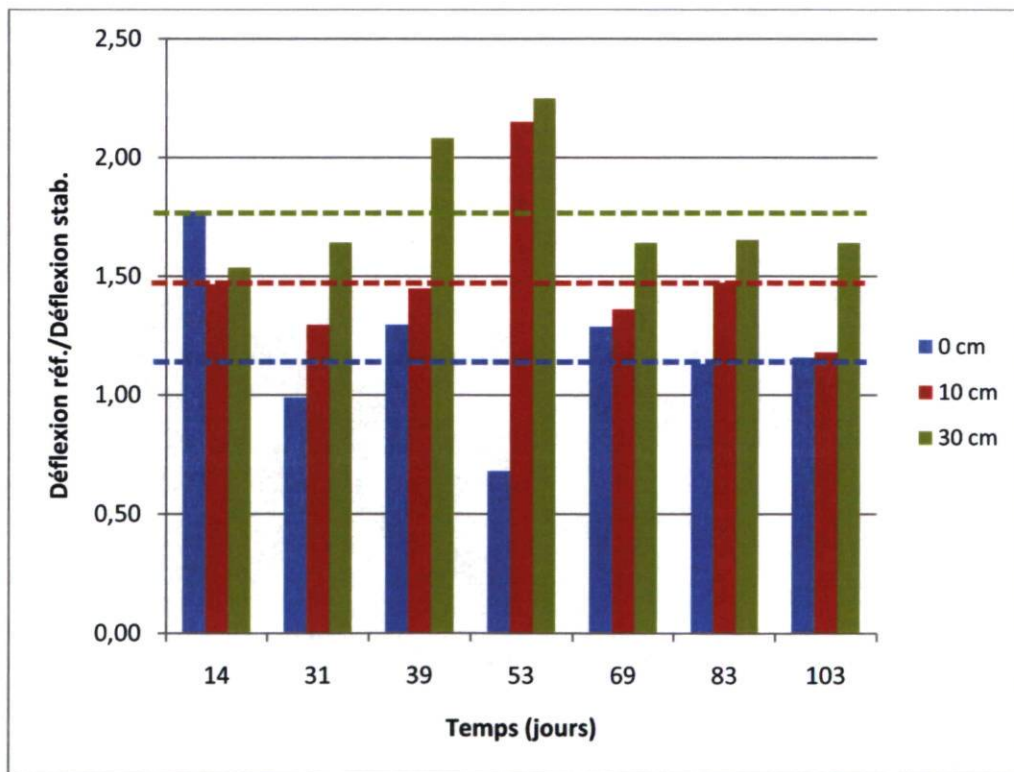


Figure 4.20 : Résultats relatifs des déflexions en fonction du temps à différentes profondeurs.

Il est possible de déduire, en analysant la figure 4.20, que la stabilisation à l'aide de l'émulsion polymère permet de réduire les déformations de la chaussée en profondeur. En

effet, la section stabilisée présente des déflexions 1,8 fois inférieure à celle de la section référence à une profondeur de 30 cm et elle présente tout de même une diminution des déformations de 1,5 fois par rapport à la section référence à 10 cm de profondeur. De plus, comme le montre l'histogramme de la figure 4.20, les résultats sont relativement constants dans le temps ce qui permet d'affirmer que le produit stabilisant demeure efficace durant au moins les 100 premiers jours suivant son application.

5. Conclusions et recommandations

5.1 Performance d'un matériau granulaire traité ou non

Les résultats du programme expérimental réalisé en laboratoire ont montré que la minéralogie et la granulométrie ont un effet important sur la performance d'un matériau granulaire stabilisé ou non.

De plus, il a été possible de conclure qu'en général, aucune amélioration n'est notée lorsqu'un abat-poussière est ajouté à un basalte ou à un calcaire. Toutefois, lorsque l'un des deux abat-poussière est employé avec un gneiss granitique, les propriétés mécaniques de ce dernier sont légèrement améliorées.

De leurs côtés, les agents stabilisants ont montré qu'ils contribuent à améliorer les propriétés mécaniques d'un matériau granulaire. De plus, quoique beaucoup plus dispendieux et complexe à appliquer en conditions réelles, le ciment offre des performances nettement supérieures à l'émulsion polymère.

Les résultats provenant de la réalisation des essais du programme expérimental permettent de formuler un certain nombre de recommandation:

- Comparativement à l'émulsion polymère, le ciment est beaucoup plus complexe à appliquer. Ses performances sont toutefois de beaucoup supérieures. Dans ce contexte, le ciment peut s'avérer très efficace dans le but de stabiliser une petite section de route non revêtue critique qui se détériore plus rapidement, comme par exemple les sections comportant une dénivellation importante, une courbe prononcée, un ponceau ou une zone de freinage ou d'accélération important.
- Malgré des performances plus modestes que le ciment, l'émulsion polymère contribue réellement à améliorer les propriétés mécaniques d'un matériau

granulaire. Son application en conditions réelles étant relativement facile et son coût étant beaucoup moindre que celui du ciment, l'émulsion polymère est recommandée pour la stabilisation en profondeur d'une route non revêtue.

- Pour un pourcentage de particules fines élevé (environ 9%), les agents stabilisants sont en général moins efficaces. Un rechargement de la route non revêtue est alors recommandé avant d'effectuer une stabilisation à l'aide de ciment ou d'émulsion polymère.
- Lors du rechargement ou de la construction d'une route non revêtue, le gneiss granitique doit être favorisé à un basalte ou à un calcaire. En effet, en plus d'avoir d'excellentes propriétés mécaniques lorsqu'il n'est pas traité, les performances d'un gneiss granitique sont presque toujours améliorées lorsqu'il est traité à l'aide d'agents stabilisants ou d'abat-poussière.
- Contrairement aux autres produits à l'étude, l'émulsion polymère performe relativement bien en présence de calcaire. Elle est donc un produit à considérer en présence d'une route non revêtue constituée de calcaire.
- Les résultats du programme expérimental en laboratoire ont montré qu'une cure des agents stabilisants permettait en général d'en améliorer leurs performances. Toutefois, l'essai de cisaillement direct a montré qu'en général la cohésion d'un matériau granulaire n'est pas significativement diminuée ou améliorée immédiatement après l'application du produit. Donc, en contexte réel de stabilisation d'une route non revêtue, la fermeture de la route stabilisée afin de permettre au produit de curer n'est pas essentielle, mais est recommandée dans le but d'optimiser la performance d'un matériau granulaire stabilisé.
- La performance des agents stabilisants varie beaucoup en fonction de la granulométrie d'un matériau granulaire, comparativement à la performance des abat-poussière qui est plutôt constante en fonction de la granulométrie. Il est donc

important de s'assurer d'avoir une granulométrie optimale lors de la stabilisation d'un matériau granulaire. Un matériau granulaire ayant granulométrie plus ou moins optimale peut toutefois être traité à l'aide d'abat-poussière sans compromettre grandement la performance du traitement.

5.2 Validation en conditions réelles

La validation des essais de laboratoire en conditions réelles s'est montrée concluante. Les essais de déflectomètre à masse tombante portatif montrent qu'un sol traité à l'émulsion polymère a une meilleure capacité portante et une meilleure rigidité qu'un sol non traité et qu'il est donc plus apte à diminuer les contraintes transmises. En effet, un matériau granulaire traité à l'aide d'émulsion polymère se déforme moins à une certaine profondeur qu'un matériau granulaire non traité. Les contraintes provenant de la surface sont donc davantage absorbées ce qui se traduit par une diminution des contraintes transmises en profondeur. L'émulsion polymère remplit donc pleinement son rôle de stabilisation.

Cependant, l'évaluation des défauts de la route ne permet pas de statuer sur l'efficacité de l'émulsion polymère à réduire ou éliminer les détériorations de la route. En effet, un passage fréquent de la niveleuse a contribué à éliminer les défauts avant même leur apparition.

Il est également possible d'affirmer que l'émulsion polymère demeure efficace durant au moins les 100 premiers jours suivant son application et que son rendement n'est pas affecté par un passage fréquent de la niveleuse.

Les résultats provenant des essais de validation sur le terrain permettent de formuler un certain nombre de recommandation :

- Suite à un rechargement d'une route non revêtue, une compaction efficace permet de réduire significativement la détérioration de la route.
- Dans un contexte de trafic lourd et de passage fréquent d'une niveleuse, l'émulsion polymère n'est pas adaptée pour un traitement efficace en surface d'une route non revêtue.
- L'émulsion polymère permet d'augmenter la capacité portante d'un matériau granulaire et s'avère donc efficace pour la stabilisation d'une route non revêtue.
- Les sections ont été réalisées et analysées durant l'été 2008 qui fut un été très pluvieux. Il est donc possible d'affirmer que l'émulsion polymère fonctionne bien en présence d'eau et qu'elle est donc recommandée pour une stabilisation en condition humide.

5.3 Conclusion générale

La réalisation du programme expérimental et la validation en contexte réel des résultats du programme expérimental effectués dans le cadre de ce projet de maîtrise a permis de démontrer que la minéralogie et la granulométrie ont une influence sur le comportement d'un matériau granulaire stabilisé ou traité à l'aide d'abat-poussière.

Les conclusions de ce projet de maîtrise participeront très certainement à l'amélioration de la qualité des routes non revêtues. Dans le cadre du projet CARRLo, les conclusions de ce projet permettront également de trouver des solutions adaptées et économiques afin de concevoir, réhabiliter, et entretenir des surfaces de roulement performantes, sécuritaires, durables et confortables.

Finalement, grâce à ce projet de maîtrise, des familles de produit stabilisant et d'abat-poussière peuvent être proposées dans une situation ou un contexte précis en fonction d'objectifs déterminés.

Bibliographie

- American Association for State Highway and Transportation Officials. 2000. *Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. In Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 20th Edition. AASHTO, Washington, D.C.
- American Society for Testing and Materials. 2004. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Standard D3080-04, ASTM, Philadelphia, Pa.
- American Society for Testing and Materials. 2004. *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures*. Standard D5102-04, ASTM, Philadelphia, Pa.
- American Society for Testing and Materials. 2007. *Standard Test Method for California bearing ratio of Laboratory-Compacted Soils*. Standard D1883-07, ASTM, Philadelphia, Pa.
- Bennett, D.M., Gleeson, K., *Performance Evaluation of a Tall Oil Pitch Emulsion for Stabilizing Unpaved Forest Road Surfaces*, Forest Engineering Research Institute of Canada (FERIC), Technical Note TN-220, November 1994.
- Bergeron G., *État des connaissances sur le retraitement en place des chaussées*, Colloque AQTR « retraitement en place des chaussées par technique de pulvérisation et stabilisation à l'émulsion et au bitume moussé », St-Hyacinthe, mai 1992.
- Bilodeau, J-P. 2009. Optimisation de la granulométrie des matériaux granulaires de fondation des chaussées, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
- Bolander, P., Yamada, A., Dimas, S., *Dust selection and application guide*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Technology and Development Program, 9977 1207-SDTDC, 7700-Transportation System, November 1999.
- Bureau de normalisation du Québec. 1982. Granulats – Analyse granulométrique par tamisage. Standard BNQ 2560-040, BNQ, Québec.
- Bureau de normalisation du Québec. 1983. Granulats – Détermination de la densité et de l'absorptivité du gros granulats. Standard BNQ 2560-067, BNQ, Québec.
- Bureau de normalisation du Québec. 1983. Granulats – Détermination de la résistance à l'abrasion à l'aide de l'appareil Los Angeles. Standard BNQ 2560-400, BNQ, Québec.

- Bureau de normalisation du Québec. 1986. Sols – Détermination de la relation teneur en eau – masse volumique – essai proctor modifié. Standard BNQ 2501-255, BNQ, Québec.
- Bureau de normalisation du Québec. 1989. Granulats –Détermination de la densité et de l'absorptivité du granulat fin. Standard BNQ 2560-065, BNQ, Québec.
- Bureau de normalisation du Québec. 1989. Granulats – Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil Micro-Deval. Standard BNQ 2560-070, BNQ, Québec.
- COST 1999, Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation. COST 336, Final Report of the Action, Transportation Research, Union Européenne.
- Department of the Army, TM 5-626, Unsurfaced Road Maintenance Management, 16 January 1995.
- Doré, G. 2009. *Analyse et conception des chaussées*, GCI-65180, Notes de cours, Département de génie civil, Université Laval.
- Foriero, A. 2009. *Mécanique des sols II*, GCI-20489, Notes de cours, Département de génie civil, Université Laval.
- Géolab inc., Résumé des exigences granulométriques et qualitatives des granulats pour foundation, béton de ciment, béton bitumineux et abrasives, Géolab inc., Janvier 2002.
- Grenier, S. 2007. Analyse dynamique du déflectomètre à masse tombante, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
- Henry, K.S., Olsen, J.P., Farrington, S.P., Lens, J., *Improved Performance of Unpaved Roads During Spring Thaw*, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, ERDC/CRREL TR-05-1, University of Vermont, Burlington, February 2005.
- Hildebrand, G., Baltzer, S. 2003. Statisk pladebelastning, faldlod og minifaldlod: Resultater af sammenlignende malinger. Eksternt notat 16, Vejteknisk Institut, Danis Road Institute, Danemark, 63 p.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., traduit par Jean Lafleur, *Introduction à la géotechnique*, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1991, chapitre 2.
- <http://lyc-du-batiment-saint-lambert.scola.ac-paris.fr/>.
- <http://www.geoinvent.fr/>.

- Jones, D., James, D., Vitale, R., *Road Dust Management : State of the Practice*, Road Dust Management Practices and Future Needs Conference, San Antonio, Texas, 2008.
- Leroueil, S. 2004. *Mécanique des sols I*, GCI-20488, Notes de cours, Département de génie civil, Université Laval.
- Mokwa, R., Trimble, N., Cuelho, E., *Experimental assessment of aggregate surfacing materials*, Final Report, FHWA/MT-07-011/8117-30, U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration, Montana State University, Bozeman, July 2007.
- Monlux, S., Mitchell, M., *Chloride Stabilization of Unpaved Road Aggregate Surfacing*, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Transportation Research Record, v 2, n 1989, Low-Volume Roads, 2007, p 50-58.
- Monlux, S., R. Mitchell, M., *Surface Aggregate Stabilization with Chloride Materials*, U.S. Department of Agriculture, Forest service, National Technology and Development Program, 0677 1805-STDTC, 7700-Transportation Management, Washington, December 2006.
- Ministère des Transports du Québec, 2007. Granulats-Détermination de la valeur au bleu de méthylène des sols et des granulats (LC 21-255). Procédure du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec, Québec.
- Ministère des Transports du Québec, 1992, *Étude écotoxicologique de quatre abat-poussières utilisés au Québec*, rapport préparé par le Service de l'environnement du MTQ et Sodexen Inc., en collaboration avec la Direction des substances dangereuses du ministère de l'Environnement, Tome I, janvier 1992.
- Owende, P.M.O, Hartman, A. M., Ward, S. M., Gilchrist, M.D., and O'Mahony. M.J. *Minimizing Distress on Flexible Pavements Using Variable Tire Pressure*, Journal of Transportation Engineering, 2001, p254-262.
- Pelletier, L. (200) *Étude comparative de la performance en laboratoire des matériaux granulaires stabilisés utilisés comme surfaces de roulement pour les chassées non revêtues*, mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 2007.
- Pierre, P., Bilodeau, J.P., Légère, G., and Doré, D. (2007) *A Laboratory Study on the Relative Performance of Treated Granular Materials Used for Unpaved Road*, Canadian Journal of Civil Engineering, Ottawa, Canada.

- Pierre, P., Bilodeau, J.P., Légère, G. (2008) *Laboratory characterization and influence of mineralogy on the performance of treated and untreated granular materials used as surface pavements in unpaved roads*, 7th International Symposium of Unbound Aggregates and Roads, Nottingham, UK, accepté.
- Pierre, P., Pelletier, L., Légère, G., Juneau, S., and Doré, D. (2007) *Comparative laboratory study of shear behaviour of granular materials stabilized with dust reducing products*, CSCE 2007 Annual General Meeting & Conference, Yellowknife, Northwest Territories, Canada.
- Rushing, J.F., Tingle, J.S., *Evaluation of Products and Application Procedures for Mitigating Dust in Temperate Climates*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Transportation Research Record, v 1, n 1989, Low-Volume Roads, 2007, p 305-311.
- Skorseth, K., Selim, A. A. 2000. *Gravel Roads Maintenance and Design Manual*, U.S. Department of Transportation, South Dakota Local Transportation Assistance Program (SD LTAP).
- Surdahl, W, R., Heather Woll, J., Rick Marquez, H., *Stabilization and Dust Control at the Buenos Aires National Wildlife Refuge Arizona*, Federal Highway Administration, HFTS-16.4, Central Federal Lands Highway Division, Transportation Research Record, v 1, n 1989, Low-Volume Roads, 2007, p 312-321.
- Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S.L., Weiss, C.A., Rushing, J.F., *Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives*, technical report, U.S. Army Engineer Research and development center, Transportation Research Record, v 2, n 1989, Low-Volume Roads, 2007, p 59-67.
- Tremblay, M. *Étude de la fréquence des événements météorologiques précurseurs des nids-de-poule : le Québec un cas particulier?*, 2006.
- Visser, A.T., *Procedure for Evaluating Stabilization of Road Materials with Nontraditional Stabilizers*, Department of Civil and Biosystems Engineering, University of Pretoria, Transportation Research Record, v 2, n 1989, Low-Volume Roads, 2007, p 21-26.
- Vitton, J.S., *The Use of Paper Sludge for Dust Stabilization on Mine Haul Roads and Tailing Impoundments*, Michigan Technological University, Road Dust Management Practices and Future Needs Conference, San Antonio, Texas, 2008.

Zilionieva, D., Cygas, D., Aloyzas Juzenas, A., Jurgaitis, A., *Improvement of Functional Designation of Low-Volume Roads by Dust Abatement in Lithuania*, Department of Roads, Vilnius Gediminas Technical University, Transportation Research Record, v 1, n 1989, Low-Volume Roads, 2007, p 293-298.

Annexe A : Données des essais sur le terrain en conditions réelles.

Tableau A-1: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 11 juillet 2008.

<u>11-juil</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	50	100	21	11	79	10
	72	141	31	15	110	15
	104	233	48	20	185	28
Montant gauche	54	282	17	10	265	7
	74	239	25	18	214	7
	98	211	30	18	181	13
Centre	53	80	16	8	64	8
	71	137	27	13	110	14
	98	217	39	16	178	23
Descend gauche	50	75	20	8	55	12
	71	95	30	13	65	17
	98	128	40	18	88	23
Descend droit	48	86	31	7	55	24
	73	141	33	13	108	20
	98	166	49	17	118	32
Moyenne	51	125	21	9	104	12
	72	151	29	14	122	15
	99	191	41	18	150	24

Tableau A-2: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 11 juillet 2008.

<u>11-juil</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	50	160	29	7	131	22
	68	140	20	9	119	11
	93	227	28	10	199	18
Montant gauche	49	43	12	5	32	7
	71	72	19	8	53	11
	94	104	27	10	77	17
Centre	50	174	15	10	159	5
	69	178	19	8	159	11
	96	178	29	10	149	19
Descend gauche	48	43	11	15	32	-3
	71	86	19	10	67	10
	96	110	28	12	82	17
Descend droit	46	47	14	6	33	8
	72	68	21	8	47	13
	100	96	29	11	67	18
Moyenne	49	93	16	8	77	8
	70	109	20	9	89	11
	96	143	28	11	115	18

Tableau A-3: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 28 juillet 2008.

<u>28-juil</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	48	61	23	10	38	13
	70	95	37	16	58	21
	96	120	47	22	73	25
Montant gauche	49	44	21	7	23	14
	72	64	33	13	30	20
	99	85	45	19	40	26
Centre	49	73	17	8	56	9
	73	123	27	13	97	14
	101	156	37	19	120	18
Descend gauche	50	65	15	7	50	8
	72	104	25	12	80	13
	103	129	33	16	96	17
Descend droit	48	55	17	7	37	10
	70	80	27	12	52	15
	99	99	38	18	62	20
Moyenne	49	59	19	8	41	11
	71	93	30	13	63	17
	100	118	40	19	78	21

Tableau A-4: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 28 juillet 2008.

<u>28-juil</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	47	77	13	5	64	9
	71	122	78	10	44	68
	95	162	101	10	61	91
Montant gauche	52	47	14	4	33	9
	74	76	23	7	53	16
	99	100	30	10	70	20
Centre	50	58	10	3	47	7
	72	77	18	5	59	12
	97	101	25	14	76	12
Descend gauche	51	53	12	15	41	-3
	71	88	19	18	69	1
	97	122	28	12	94	16
Descend droit	47	78	12	5	66	7
	74	119	21	7	98	14
	99	155	30	12	125	18
Moyenne	49	62	12	6	50	6
	73	96	32	9	65	22
	97	128	43	12	85	31

Tableau A-5: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 5 août 2008.

05-août 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	51	94	17	9	76	9
	72	156	31	16	124	15
	98	190	44	20	147	23
Montant gauche	50	77	16	10	61	7
	72	116	27	13	89	14
	102	145	38	17	107	21
Centre	48	62	18	9	44	9
	73	94	28	15	66	13
	100	124	39	20	85	19
Descend gauche	47	65	14	13	51	1
	71	97	23	15	74	8
	100	128	32	20	96	12
Descend droit	48	65	16	7	49	9
	70	104	27	13	77	14
	98	143	38	19	105	19
Moyenne	49	73	16	10	56	7
	72	113	27	14	86	13
	99	146	38	19	108	19

Tableau A-6: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 5 août 2008.

05-août 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	52	103	10	4	93	6
	71	137	15	7	122	9
	91	252	22	9	230	13
Montant gauche	48	51	12	4	39	7
	71	91	20	7	71	13
	94	137	29	11	109	18
Centre	48	60	18	5	41	13
	70	88	28	8	61	20
	97	119	39	11	80	28
Descend gauche	47	41	10	4	30	6
	70	46	16	6	30	10
	96	41	22	8	19	14
Descend droit	50	75	11	5	63	6
	71	109	17	7	92	10
	100	143	23	9	120	14
Moyenne	49	66	12	5	53	8
	71	94	19	7	75	12
	96	139	27	10	112	17

Tableau A-7: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 19 août 2008.

<u>19-août</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Montant gauche	49	55	20	9	35	11
	70	77	31	15	47	16
	94	95	43	17	52	26
Centre	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Descend gauche	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Descend droit	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Moyenne	49	55	20	9	35	11
	70	77	31	15	47	16
	94	95	43	17	52	26

Tableau A-8: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 19 août 2008.

<u>19-août</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Montant gauche	47	73	8	4	65	4
	70	116	15	7	101	9
	98	150	22	9	128	13
Centre	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Descend gauche	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Descend droit	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Moyenne	47	73	8	4	65	4
	70	116	15	7	101	9
	98	150	22	9	128	13

Tableau A-9: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 4 septembre 2008.

04-sept 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	46	44	17	9	27	8
	72	75	27	14	47	13
	106	108	40	20	67	20
Montant gauche	54	44	13	8	31	5
	73	76	23	13	53	10
	105	102	32	18	70	14
Centre	46	156	17	8	139	9
	75	202	25	13	177	12
	106	152	36	19	116	17
Descend gauche	51	48	12	7	36	5
	72	81	20	12	61	8
	107	108	29	17	79	12
Descend droit	50	36	17	8	19	8
	71	77	26	13	51	13
	103	113	38	19	75	19
Moyenne	50	66	15	8	51	7
	73	102	24	13	78	11
	105	116	35	18	81	16

Tableau A-10: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 4 septembre 2008.

04-sept 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	47	53	12	6	41	7
	71	94	20	9	74	11
	105	122	29	13	93	16
Montant gauche	50	42	9	4	32	5
	70	75	18	7	57	11
	103	100	26	11	74	15
Centre	50	37	9	4	28	5
	71	102	16	14	87	1
	105	123	22	11	101	11
Descend gauche	48	34	10	4	24	6
	74	61	20	8	41	12
	104	92	26	11	66	15
Descend droit	45	59	13	5	46	8
	71	94	20	8	74	12
	105	124	29	12	95	17
Moyenne	48	45	11	5	34	6
	72	85	19	9	67	9
	104	112	26	11	86	15

Tableau A-11: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 18 septembre 2008.

<u>18-sept</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	47	62	19	10	43	9
	74	109	35	18	74	17
	104	134	46	24	88	22
Montant gauche	47	74	19	10	55	9
	76	119	32	15	87	17
	108	165	47	23	119	24
Centre	50	83	17	9	67	8
	75	121	27	14	94	13
	107	165	42	21	123	21
Descend gauche	45	78	16	8	62	8
	73	155	27	14	127	13
	105	182	40	20	142	20
Descend droit	45	71	21	8	50	13
	72	117	35	13	81	22
	102	148	52	19	96	33
Moyenne	47	74	18	9	55	9
	74	124	31	15	93	16
	106	159	45	21	114	24

Tableau A-12: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 18 septembre 2008.

<u>18-sept</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	45	84	12	5	72	7
	72	142	21	10	121	11
	102	199	32	14	167	18
Montant gauche	46	51	13	5	38	8
	71	97	23	8	74	14
	102	143	33	13	109	20
Centre	51	101	12	6	89	6
	71	162	18	8	144	10
	102	196	27	13	169	14
Descend gauche	47	50	11	5	38	6
	70	84	19	8	65	11
	102	116	29	12	87	17
Descend droit	45	53	16	6	38	10
	73	105	23	10	82	13
	104	137	33	16	104	17
Moyenne	47	68	13	5	55	7
	71	118	21	9	97	12
	103	158	31	14	127	17

Tableau A-13: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section de référence le 8 octobre 2008.

<u>08-oct</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	50	77	18	11	59	7
	72	140	34	15	106	19
	105	143	50	23	93	27
Montant gauche	48	52	16	8	36	8
	72	89	28	13	61	15
	104	123	41	20	82	21
Centre	45	40	15	6	25	9
	74	73	28	12	45	16
	106	102	41	19	61	22
Descend gauche	49	56	17	8	39	9
	73	85	27	13	58	14
	106	119	40	20	79	21
Descend droit	45	75	19	10	56	9
	70	144	30	15	114	15
	102	210	45	21	165	24
Moyenne	47	60	17	9	43	8
	72	106	29	14	77	16
	105	139	44	20	96	23

Tableau A-14: Résultats des déflexions et des coefficients SCI et BDI aux trois différentes contraintes pour la section stabilisée le 8 octobre 2008.

<u>08-oct</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)			SCI	BDI
		0	30	60		
Montant droit	50	68	16	5	52	11
	71	132	22	8	110	14
	100	279	48	11	231	37
Montant gauche	49	44	11	5	33	6
	70	67	17	7	50	10
	102	91	26	10	65	16
Centre	49	106	37	20	69	17
	71	107	28	10	79	17
	103	128	54	11	75	43
Descend gauche	46	42	13	5	29	8
	70	61	20	7	41	13
	101	95	28	12	67	16
Descend droit	49	51	18	6	33	12
	69	89	26	10	63	17
	103	113	49	14	63	35
Moyenne	49	62	19	8	43	11
	70	91	23	8	69	14
	102	141	41	12	100	29

Tableau A-15: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 11 juillet 2008.

<u>11-juil</u> 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)		
		0	30	60
Montant droit	50	0,62	0,72	1,65
	68	1,01	1,51	1,64
	93	1,03	1,73	1,97
	moy.	-	0,89	1,32
Montant gauche	49	6,52	1,46	2,00
	71	3,31	1,30	2,12
	94	2,03	1,11	1,77
	moy.	-	3,95	1,29
Centre	50	0,46	1,09	0,83
	69	0,77	1,42	1,65
	96	1,22	1,34	1,55
	moy.	-	0,82	1,28
Descend gauche	48	1,72	1,76	0,55
	71	1,10	1,56	1,37
	96	1,16	1,42	1,51
	moy.	-	1,33	1,58
Descend droit	46	1,85	2,29	1,22
	72	2,07	1,58	1,65
	100	1,73	1,70	1,55
	moy.	-	1,89	1,86
<i>moy. générale</i>	-	<u>1,77</u>	<u>1,47</u>	<u>1,54</u>

Tableau A-16 : Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 28 juillet 2008.

<u>28-juil</u> 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)		
		0	30	60
Montant droit	47	0,79	1,70	2,14
	71	0,78	0,47	1,66
	95	0,74	0,46	2,10
	moy.	-	0,77	0,88
Montant gauche	52	0,94	1,54	1,54
	74	0,84	1,45	1,95
	99	0,85	1,51	1,87
	moy.	-	0,87	1,50
Centre	50	1,27	1,65	2,56
	72	1,61	1,51	2,38
	97	1,55	1,45	1,37
	moy.	-	1,47	1,53
Descend gauche	51	1,23	1,25	0,48
	71	1,18	1,30	0,65
	97	1,06	1,19	1,33
	moy.	-	1,16	1,25
Descend droit	47	0,70	1,41	1,47
	74	0,67	1,30	1,68
	99	0,64	1,26	1,47
	moy.	-	0,67	1,32
<i>moy. générale</i>	-	<u>0,99</u>	<u>1,30</u>	<u>1,64</u>

Tableau A-17 : Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 5 août 2008.

<u>05-août</u> 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)		
		0	30	60
Montant droit	52	0,91	1,68	2,00
	71	1,14	2,04	2,40
	91	0,75	1,98	2,26
moy.	-	0,93	1,90	2,22
Montant gauche	48	1,52	1,40	2,23
	71	1,27	1,37	1,77
	94	1,06	1,33	1,58
moy.	-	1,28	1,36	1,86
Centre	48	1,04	0,98	1,69
	70	1,07	1,01	1,91
	97	1,04	1,01	1,82
moy.	-	1,05	1,00	1,81
Descend gauche	47	1,60	1,39	3,25
	70	2,09	1,39	2,44
	96	3,12	1,43	2,40
moy.	-	2,27	1,40	2,70
Descend droit	50	0,87	1,44	1,47
	71	0,95	1,61	1,86
	100	1,00	1,67	2,15
moy.	-	0,94	1,57	1,82
<u>moy. générale</u>	-	<u>1,30</u>	<u>1,45</u>	<u>2,08</u>

Tableau A-18: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 19 août 2008.

<u>19-août</u> 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)		
		0	30	60
Montant droit	-	-	-	-
	-	-	-	-
	moy.	-	-	-
Montant gauche	47	0,75	2,50	2,55
	70	0,66	2,00	2,20
	98	0,64	1,95	2,00
moy.	-	0,68	2,15	2,25
Centre	-	-	-	-
	-	-	-	-
	moy.	-	-	-
Descend gauche	-	-	-	-
	-	-	-	-
	moy.	-	-	-
Descend droit	-	-	-	-
	-	-	-	-
	moy.	-	-	-
<u>moy. générale</u>	-	<u>0,68</u>	<u>2,15</u>	<u>2,25</u>

Tableau A-19: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 4 septembre 2008.

<u>04-sept</u> 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)		
		0	30	60
Montant droit	47	0,84	1,42	1,64
	71	0,79	1,39	1,56
	105	0,88	1,39	1,54
moy.		0,84	1,40	1,58
Montant gauche	50	1,06	1,39	1,92
	70	1,02	1,30	1,86
	103	1,02	1,25	1,69
moy.		1,03	1,31	1,82
Centre	50	4,25	1,85	2,18
	71	1,97	1,60	0,91
	105	1,23	1,62	1,78
moy.		2,49	1,69	1,62
Descend gauche	48	1,40	1,20	1,62
	74	1,33	1,00	1,57
	104	1,17	1,12	1,52
moy.		1,30	1,11	1,57
Descend droit	45	0,61	1,32	1,67
	71	0,82	1,28	1,63
	105	0,91	1,30	1,56
moy.		0,78	1,30	1,62
<i>moy. générale</i>		<u>1,29</u>	<u>1,36</u>	<u>1,64</u>

Tableau A-20: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 18 septembre 2008.

<u>18-sept</u> 2008	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)		
		0	30	60
Montant droit	45	0,75	1,61	2,07
	72	0,77	1,65	1,83
	102	0,67	1,43	1,67
moy.	-	0,73	1,56	1,86
Montant gauche	46	1,45	1,46	1,93
	71	1,23	1,43	1,84
	102	1,16	1,40	1,77
moy.	-	1,28	1,43	1,85
Centre	51	0,83	1,35	1,44
	71	0,75	1,49	1,68
	102	0,84	1,54	1,62
moy.	-	0,80	1,46	1,58
Descend gauche	47	1,57	1,41	1,60
	70	1,84	1,44	1,79
	102	1,57	1,39	1,69
moy.	-	1,66	1,41	1,70
Descend droit	45	1,34	1,34	1,33
	73	1,11	1,56	1,33
	104	1,08	1,58	1,19
moy.	-	1,18	1,49	1,29
<i>moy. générale</i>	-	<u>1,13</u>	<u>1,47</u>	<u>1,65</u>

Tableau A-21: Résultats relatifs (déflexion référence/déflexion stabilisée) aux trois différentes contraintes le 8 octobre 2008.

<u>08-oct</u> <u>2008</u>	Contrainte (kPa)	Position géophone (cm)		
		0	30	60
Montant droit	50	1,13	1,12	2,20
	71	1,06	1,55	1,80
	100	0,51	1,05	2,06
	moy.	-	0,90	1,24
Montant gauche	49	1,19	1,45	1,60
	70	1,33	1,62	1,90
	102	1,35	1,56	1,90
	moy.	-	1,29	1,54
Centre	49	0,38	0,41	0,32
	71	0,68	1,00	1,13
	103	0,79	0,77	1,78
	moy.	-	0,62	0,73
Descend gauche	46	1,31	1,28	1,71
	70	1,40	1,35	1,90
	101	1,26	1,44	1,64
	moy.	-	1,32	1,36
Descend droit	49	1,47	1,04	1,63
	69	1,62	1,14	1,55
	103	1,86	0,91	1,48
	moy.	-	1,65	1,03
<i>moy. générale</i>	-	<u>1,16</u>	<u>1,18</u>	<u>1,64</u>

Annexe B : Résultats absolus des différents produits pour chaque essai effectué sur les différentes minéralogies et granulométries

Tableau B-1 : Résultats absolus pour l'essai du cisaillement direct pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Cisaillement direct		
			Force (kN)		
			4,4 % de fines	7,0 % de fines	10,1 % de fines
Témoin	-	-	1,344	1,692	1,269
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	1,888	1,42	1,359
		1,8	2,024	1,465	1,586
		2,3	1,767	1,405	1,42
	Solnat (L/m ²)	1,2	1,828	1,828	1,571
		1,5	2,25	1,405	1,616
		1,8	1,948	1,541	1,495
Ciment	Type GU (%)	1,5	2,16	1,601	1,752
		3,5	2,024	1,661	1,586
		4,5	2,537	1,737	1,525
		6	2,401	1,752	1,601
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	1,722	1,405	1,374
		2,4	1,767	1,616	1,344
		3,4	1,722	1,344	1,269

Tableau B-2 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la compression non confinée pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Compression non confinée		
			Force (kN)		
			4,4 % de fines	7,0 % de fines	10,1 % de fines
Témoin	-	-	2,8	2,5	2,4
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	3,6	2,6	1,8
		1,8	3,2	2,7	2,1
		2,3	2,9	2,0	2,1
	Solnat (L/m ²)	1,2	3,9	2,7	2,6
		1,5	4,0	2,9	2,0
		1,8	3,6	3,3	2,1
Ciment	Type GU (%)	1,5	10,6	9,6	7,7
		3,5	16,7	24,6	15,4
		4,5	27,8	28,5	34,6
		6	30,0	36,0	47,5
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	6,2	2,7	3,7
		2,4	9,3	2,8	2,9
		3,4	12,2	6,8	3,7

Tableau B-3 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai du MR modifié pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			MR Modifié		
			Module réversible (MPa)		
			4,4 % de fines	7,0 % de fines	10,1 % de fines
Témoin	-	-	152,5	136,5	100,1
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	133,3	126,8	124,5
		1,8	127,0	120,9	136,6
		2,3	126,4	130,2	132,1
	Solnat (L/m ²)	1,2	141,3	147,1	134,4
		1,5	138,1	142,1	129,9
		1,8	138,3	141,4	133,9
Ciment	Type GU (%)	1,5	139,5	154,3	144,8
		3,5	165,3	148,6	186,4
		4,5	158,6	164,7	177,9
		6	161,2	179,1	172,9
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	162,7	156,1	129,3
		2,4	164,7	144,1	132,9
		3,4	161,9	124,6	131,6

Tableau B-4 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 2,5 mm d'enfoncement pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Capacité portante (2,5 mm)		
			Force (kN)		
			4,4 % de fines	7,0 % de fines	10,1 % de fines
Témoin	-	-	18,4	15,0	15,1
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	17,5	16,9	14,1
		1,8	15,2	13,9	13,9
		2,3	18,9	15,6	15,1
	Solnat (L/m ²)	1,2	19,0	20,0	14,6
		1,5	16,4	18,9	13,1
		1,8	15,0	18,2	14,4
Ciment	Type GU (%)	1,5	47,2	21,3	27,3
		3,5	64,6	28,0	40,9
		4,5	95,4	33,9	43,7
		6	81,9	91,7	75,3
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	19,4	20,3	14,0
		2,4	18,9	19,9	13,1
		3,4	22,8	22,7	15,3

Tableau B-5 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 5 mm pour les différentes granulométries d'un gneiss granitique traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Capacité portante (5 mm)		
			Force (kN)		
			4,4 % de fines	7,0 % de fines	10,1 % de fines
Témoin	-	-	20,7	16,8	18,9
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	23,4	25,5	21,7
		1,8	20,6	21,1	21,3
		2,3	25,8	23,5	24,0
	Solnat (L/m ²)	1,2	24,9	30,3	21,8
		1,5	22,3	28,8	20,5
		1,8	19,8	28,1	21,9
Ciment	Type GU (%)	1,5	76,4	32,2	46,6
		3,5	98,7	42,6	61,0
		4,5	129,5	48,9	61,8
		6	110,4	115,4	96,5
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	28,4	31,4	20,6
		2,4	27,6	32,0	19,1
		3,4	33,5	35,0	23,4

Tableau B-6 : Résultats absolus pour l'essai du cisaillement direct pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Cisaillement direct		
			Force (kN)		
			4,1 % de fines	6,4 % de fines	8,2 % de fines
Témoin	-	-	1,148	1,163	1,163
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	2,341	1,254	1,142
		1,8	1,193	1,359	1,184
		2,3	1,057	1,118	1,1
	Solnat (L/m ²)	1,2	1,359	1,103	0,952
		1,5	1,223	1,103	1,042
		1,8	1,314	1,193	0,936
Ciment	Type GU (%)	1,5	1,317	1,239	1,057
		3,5	1,39	2,054	1,374
		4,5	1,541	1,948	1,374
		6	2,009	1,782	2,326
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	1,254	1,133	1,072
		2,4	1,314	1,631	1,072
		3,4	1,299	1,193	1,118

Tableau B-7 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la compression non confinée pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			<u>Compression non confinée</u>		
			Force (kN)		
			4,1 % de fines	6,4 % de fines	8,2 % de fines
Témoin	-	-	3,6	2,6	3,1
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	2,7	2,0	3,2
		1,8	3,0	1,9	2,0
		2,3	1,6	1,4	1,6
	Solnat (L/m ²)	1,2	3,1	2,8	2,4
		1,5	2,3	2,7	2,0
		1,8	1,8	1,8	2,0
Ciment	Type GU (%)	1,5	7,3	7,0	11,9
		3,5	14,8	15,6	26,7
		4,5	21,9	22,9	35,0
		6	21,0	25,4	56,6
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	3,6	5,5	3,8
		2,4	4,4	6,3	3,5
		3,4	6,1	6,6	7,8

Tableau B-8 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai du MR modifié pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			<u>MR modifié</u>		
			Module réversible (MPa)		
			4,1 % de fines	6,4 % de fines	8,2 % de fines
Témoin	-	-	162,5	169,7	129,6
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	115,7	141,4	124,0
		1,8	127,6	131,0	112,5
		2,3	130,8	116,1	107,0
	Solnat (L/m ²)	1,2	138,5	128,5	135,1
		1,5	134,3	147,5	136,6
		1,8	135,4	124,7	138,6
Ciment	Type GU (%)	1,5	162,6	155,2	182,6
		3,5	163,5	172,1	218,2
		4,5	166,3	169,6	237,4
		6	170,5	149,9	215,7
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	126,5	159,1	134,7
		2,4	172,0	150,7	138,5
		3,4	126,1	156,2	135,5

Tableau B-9 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 2,5 mm d'enfoncement pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Capacité portante (2,5 mm)		
			Force (kN)		
			4,1 % de fines	6,4 % de fines	8,2 % de fines
Témoïn	-	-	10,7	13,8	13,9
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	6,3	10,2	9,9
		1,8	4,9	9,3	9,7
		2,3	6,5	9,6	9,3
	Solnat (L/m ²)	1,2	6,5	9,2	11,9
		1,5	5,5	7,9	9,5
		1,8	7,5	8,5	9,7
Ciment	Type GU (%)	1,5	18,1	20,0	16,6
		3,5	32,4	39,6	26,4
		4,5	30,6	50,6	40,0
		6	38,5	66,0	40,7
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	15,0	14,2	12,8
		2,4	14,6	15,9	13,1
		3,4	16,6	15,0	11,7

Tableau B-10 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 5 mm pour les différentes granulométries d'un basalte traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Capacité portante (5 mm)		
			Force (kN)		
			4,1 % de fines	6,4 % de fines	8,2 % de fines
Témoïn	-	-	16,7	22,4	23,9
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	10,0	15,9	16,5
		1,8	7,8	14,2	16,2
		2,3	10,7	15,4	16,8
	Solnat (L/m ²)	1,2	9,6	13,2	20,6
		1,5	8,4	12,0	17,8
		1,8	11,0	12,8	17,3
Ciment	Type GU (%)	1,5	25,1	31,7	23,4
		3,5	42,5	59,2	38,6
		4,5	39,6	70,1	55,2
		6	55,7	91,8	54,2
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	24,0	23,8	22,5
		2,4	21,3	25,2	21,7
		3,4	23,4	23,8	19,7

Tableau B-11 : Résultats absolus pour l'essai du cisaillement direct pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			<u>Cisaillement direct</u>		
			Force (kN)		
			3,8 % de fines	6,6 % de fines	8,8 % de fines
Témoin	-	-	1,051	1,314	1,118
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	1,251	1,239	1,254
		1,8	1,169	1,223	1,344
		2,3	1,075	1,133	1,329
	Solnat (L/m ²)	1,2	1,09	1,556	1,314
		1,5	1,175	1,239	1,435
		1,8	1,154	1,344	1,284
Ciment	Type GU (%)	1,5	1,205	1,601	1,344
		3,5	1,251	1,541	1,541
		4,5	0,945	1,48	1,525
		6	1,344	1,45	1,163
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	1,063	1,163	1,239
		2,4	1,078	1,193	1,072
		3,4	1,063	1,103	0,967

Tableau B-12 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la compression non confinée pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			<u>Compression non confinée</u>		
			Force (kN)		
			3,8 % de fines	6,6 % de fines	8,8 % de fines
Témoin	-	-	4,9	4,4	7,5
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	3,0	3,8	7,8
		1,8	1,6	3,3	8,2
		2,3	1,3	3,2	8,2
	Solnat (L/m ²)	1,2	2,0	4,6	7,4
		1,5	1,9	4,5	6,7
		1,8	1,4	4,2	6,3
Ciment	Type GU (%)	1,5	6,1	8,8	9,2
		3,5	16,2	13,1	19,2
		4,5	22,2	15,2	18,8
		6	30,0	25,2	27,8
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	9,0	10,5	11,7
		2,4	10,4	12,8	12,4
		3,4	10,1	14,7	12,8

Tableau B-13 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai du MR modifié pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			MR modifié		
			Module réversible (MPa)		
			3,8 % de fines	6,6 % de fines	8,8 % de fines
Témoin	-	-	178,5	165,0	196,3
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	141,8	123,9	187,0
		1,8	138,9	134,5	182,0
		2,3	139,6	134,2	172,7
	Solnat (L/m ²)	1,2	153,6	178,4	180,0
		1,5	158,8	148,3	193,7
		1,8	142,1	153,7	170,6
Ciment	Type GU (%)	1,5	175,0	173,1	175,6
		3,5	203,5	198,6	169,9
		4,5	228,9	179,4	183,0
		6	248,4	193,4	202,8
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	201,7	192,3	194,6
		2,4	201,5	178,1	183,2
		3,4	205,2	182,8	174,5

Tableau B-14 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 2,5 mm d'enfoncement pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Capacité portante (2,5 mm)		
			Force (kN)		
			3,8 % de fines	6,6 % de fines	8,8 % de fines
Témoin	-	-	10,9	8,9	16,3
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	4,7	5,3	12,7
		1,8	5,0	6,3	12,3
		2,3	4,5	5,5	10,1
	Solnat (L/m ²)	1,2	8,1	5,5	11,9
		1,5	9,4	4,7	10,8
		1,8	5,7	4,0	10,4
Ciment	Type GU (%)	1,5	9,9	14,2	20,1
		3,5	23,9	32,4	31,9
		4,5	23,6	45,3	37,5
		6	25,1	56,6	44,5
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	17,4	13,2	16,8
		2,4	17,9	13,8	14,3
		3,4	16,5	13,1	15,2

Tableau B-15 : Moyenne des résultats absolus pour l'essai de la capacité portante à 5 mm pour les différentes granulométries d'un calcaire traité à l'aide des différents produits et des différents taux de pose à l'étude.

			Capacité portante (5 mm)		
			Force (kN)		
			3,8 % de fines	6,6 % de fines	8,8 % de fines
Témoin	-	-	14,7	13,9	25,6
Produits chimiques hygroscopiques (sels et saumures)	CaCl ₂ (L/m ²)	1,3	7,4	7,4	19,0
		1,8	7,9	9,1	19,8
		2,3	7,4	8,2	15,7
	Solnat (L/m ²)	1,2	11,3	7,3	18,3
		1,5	13,1	6,5	16,7
		1,8	8,5	5,9	16,3
Ciment	Type GU (%)	1,5	15,1	21,5	32,0
		3,5	32,4	44,8	47,6
		4,5	32,4	56,2	51,8
		6	35,5	69,2	59,5
Polymères	Soil Sement (L/m ²)	1,4	23,5	19,4	24,2
		2,4	22,6	19,4	18,9
		3,4	21,6	18,3	21,0