

Étude sur le contrôle de la qualité du remblai sans retrait



MISSION DU CERIU

Mettre en œuvre toute action de transfert de connaissance et de recherche appliquée pouvant favoriser le développement du savoir-faire, des techniques, des normes et des politiques supportant la gestion durable et économique des infrastructures et la compétitivité des entreprises qui œuvrent dans le secteur.

À PROPOS

LE CERIU

Fondé en 1994, le CERIU est un organisme sans but lucratif **né du besoin de réhabiliter les infrastructures municipales de façon performante.**

Aujourd'hui, grâce à son leadership reconnu et à l'expertise variée de ses **140 membres organisationnels** regroupant municipalités, entreprises, ministères, laboratoires et institutions d'enseignement et à son approche unique axée sur le partenariat et la concertation, le CERIU est l'un des seuls organismes à offrir une perspective intégrée de la problématique des infrastructures municipales. Il œuvre en concertation avec ces milieux à changer les mentalités et les habitudes en soutenant l'innovation, la formation, le développement du savoir-faire et le transfert de connaissance pour répondre aux défis que pose la pérennité des infrastructures.

LE CONSEIL PERMANENT DES RÉSEAUX TECHNIQUES URBAINS (RTU) DU CERIU

Né de la mobilisation des acteurs du milieu, le conseil permanent Réseaux techniques urbains (CP RTU) du CERIU encourage les meilleures pratiques de planification de travaux, de coordination des interventions et de construction de réseaux techniques urbains par des activités de sensibilisation, de discussion, de formation, de recherche, de veille, de développement et de transfert dans un cadre de développement durable de l'ensemble des infrastructures municipales.

AVANT-PROPOS

Ce projet est le sujet d'un mémoire de maîtrise de l'étudiant Samuel Pothier, inscrit à l'École de technologie supérieure (ÉTS) sous la supervision des professeurs Claudiane Ouellet-Plamondon et de Michel Vaillancourt. L'ingénieur Éric Lachance-Tremblay a participé à la rédaction du rapport.

Ce projet a permis d'observer les pratiques courantes avec le remblai sans retrait (RSR), ses performances en chantier et en laboratoire. L'intérêt et la collaboration des partenaires et collaborateurs ont permis de présenter un projet de qualité.

Certains collaborateurs ont contribué au projet en supportant le travail de laboratoire et de chantier et d'autres, en facilitant l'accès à leur chantier ou en acceptant de modifier des aspects des remblais, le tout en vue d'améliorer les connaissances sur le RSR.

Le programme d'essais initial a évolué en fonction des besoins identifiés en cours de projet. Des parties ont été ajoutées afin de confirmer des observations et pour faciliter le contrôle et le développement futur des matériaux RSR. Notamment, il convient de mentionner la partie qui porte sur les tranchées expérimentales et l'échantillonnage dans des barils de 200 litres permettant l'essai représentatif de pénétromètre dynamique ainsi que les nombreuses planches d'essais en milieu urbain pour l'étude de la température dans les structures de chaussées en saison hivernale.

REMERCIEMENTS

Le CERIU tient à remercier chaleureusement les membres du comité de travail et les partenaires pour leur dévouement et leurs précieuses contributions.

La réalisation de ce projet a été possible grâce à la collaboration de : la **Commission des services électriques de Montréal, Hydro-Québec** et **Énergir** qui ont aidé l'étudiant pour la recherche et planification des travaux de remblai; les villes de **Montréal** et de **Longueuil** qui ont permis d'enfouir des équipements de mesure dans leurs chaussées; les compagnies **CRT Construction** et **Transelec inc.** qui ont facilité les travaux; la compagnie **Tristan** qui a prêté son terrain pour installer les équipements pour l'étude du gel dans le RSR; les fournisseurs **Demix, Unibéton** et **Béton Mobile du Québec (BMQ)** qui ont fourni les matériaux et finalement **l'ÉTS** dont le personnel et les étudiants ont assisté l'étudiant dans ses travaux. Le CERIU se joint à M. Pothier pour les remercier grandement.

Cette étude a reçu le soutien financier de Mitacs dans le cadre du programme Mitacs Accélération.

L'ÉQUIPE

- Supervision: **le conseil permanent Réseaux techniques urbains (CP RTU)**
- Coordination: **Salamatou Modieli**, ing., M. ing., coordonnatrice de projets, CERIU
- Gérance de projet: **Alain Caissy**, ing., M. Sc., chargé de projet
- Recherche et rédaction: **Samuel Pothier**, étudiant à l'ÉTS avec la participation d'**Éric Lachance-Tremblay**, ing., de **Claudiane Ouellet-Plamondon**, ing., M. Sc. Ph.D. et **Michel Vaillancourt**, ing., Ph. D., professeurs à l'ÉTS
- Supervision universitaire: **Claudiane Ouellet-Plamondon**, ing., M. Sc. Ph. D. et **Michel Vaillancourt**, ing., Ph. D., professeurs à l'ÉTS

MEMBRES DU COMITÉ DE TRAVAIL

- **Mohamed Salah Aboudi**, ing. Énergir
- **France Bernard**, ing. Ville de Montréal
- **Yanick Martin**, ing., M. Sc. A. Hydro-Québec
- **Denis Poirier**, ing., M.G.P. Commission des services électriques de Montréal
- **Saliha Yahmi**, ing., M. ing. Ville de Longueuil

RÉSUMÉ

Le creusage de tranchées est une étape essentielle pour installer et entretenir les services souterrains. Traditionnellement, ces ouvertures sont remblayées avec les matériaux originaux ou avec de la pierre concassée. La compacité dépend de facteurs tels que: la teneur en eau, l'épaisseur des couches, la puissance des compacteurs et l'expérience des opérateurs. Une compacité faible peut entraîner des tassements, compromettre la qualité de l'ouvrage et donc engendrer des inconvénients et des coûts supplémentaires à la société.

Les remblais auto compactant, tels que le remblai sans retrait (RSR), semblent être une solution alternative intéressante, mais qui doit faire l'objet d'un contrôle spécial. Le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU), huit partenaires et trois fournisseurs de matériaux ont collaboré à la présente étude visant à améliorer ce contrôle de la qualité en chantier. Un temps de repos (cure) est requis avant le rétablissement de la circulation automobile pour permettre à l'eau en surplus de se drainer vers le milieu récepteur. Les essais avec le pénétromètre dynamique (DCPT) sur 22 chantiers ont permis d'en savoir plus sur la consolidation du mélange à court terme. De plus, des tranchées expérimentales ont permis de faire varier la teneur en eau du mélange, le type de ciment (GU ou prise rapide) et le dénivelé du terrain. Sur ce site expérimental, des barils de 200 litres, troués, ont aussi été remplis de RSR permettant une analyse supplémentaire. Règle générale, la vitesse de drainage de l'eau influence la capacité portante du mélange à court terme qui augmente avec le temps. Un temps de cure de 3 à 24 heures est recommandé avant l'ouverture des voies. En cas de doute, un essai de DCPT sur toute la profondeur de la tranchée est recommandé. Les simulations soutiennent aussi que les valeurs de module réversible obtenues sont suffisantes pour le passage des véhicules, même après quelques heures.

En laboratoire, l'essai CBR a été adapté afin de permettre une analyse très précise des mélanges. La rigidité mesurée des mélanges est plus élevée qu'en chantier, car le RSR se draine rapidement et est confiné dans un moule. Cet essai permet d'apprécier l'influence des paramètres de formulation.

La profondeur du front de gel hivernal dans la pierre MG20 et dans le RSR a été étudiée sur sept sites urbains. Il n'y a aucune différence significative entre les deux matériaux puisqu'ils sont de composition semblable.

Mots-clés: remblai sans retrait, capacité portante, fondation routière, auto compaction, pénétromètre dynamique (DCPT).

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
2.1. DESCRIPTION ET AVANTAGES DES RSR	3
2.2. COMPOSITION DES MÉLANGES RSR	5
2.3. TENEUR EN EAU	7
2.4. PARAMÈTRES À TENIR EN COMPTE	10
2.4.1. Maniabilité	10
2.4.2. Capacité portante	10
2.4.3. Capacité d'enlèvement	10
2.4.4. Perméabilité	10
2.4.5. Tassements	11
2.4.6. Phénomène de gel dans les tranchées	11
3. OBJECTIFS DU PROJET	15
4. MÉTHODOLOGIE DU PROJET	16
4.1. MÉLANGES ÉTUDIÉS : DEMIX, UNIBETON, BMQ	16
4.2. CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)	18
4.3. BOULE KELLY	21
4.4. PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE PORTATIF	21
4.5. ÉTUDE DU GEL EN CHANTIER	24
5. PHASE EXPÉRIMENTALE EN LABORATOIRE	29
5.1. ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES	29
5.2. MASSE VOLUMIQUE MAXIMALE	29
5.3. EFFET DE LA TECHNIQUE DE MISE EN PLACE EN LABORATOIRE SUR LA COMPACITÉ MESURÉE	30
5.4. RÉSULTATS DES ESSAIS DE CBR	31
5.4.1. Influence du type de mélange RSR	31
5.4.2. Influence des fines du mélange RSR Unibéton en condition drainée	33
6. PHASE EXPÉRIMENTALE EN CHANTIER	37
6.1. RÉSULTATS DES ESSAIS DE BOULE KELLY	38
6.2. RÉSULTATS DES ESSAIS DE PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE PORTATIF (DCPT)	39
6.2.1. Interprétation des résultats d'un essai de DCPT : chantier De la Montagne	39
6.2.2. Influence du temps de cure sur l'indice de pénétration (IP)	41
6.2.3. Influence de la profondeur d'essai DCPT	42
6.2.4. Influence de la profondeur d'essai DCPT et l'eau	44
6.2.5. Influence du milieu récepteur et du type de mélange RSR	46
6.3. ÉTUDE SUR LA PROFONDEUR DU FRONT DE GEL AVEC LES MÉLANGES RSR	51
6.3.1. Chantier de la rue Saint-Patrick (site A)	51
6.3.2. Autres chantiers	53
7. ÉTUDE DES MÉLANGES RSR EN TRANCHÉES EXPÉRIMENTALES ET DANS DES BARILS	56
7.1. PRÉPARATION DES BARILS ÉCHANTILLONS DE 200 LITRES	58
7.2. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	60
7.2.1. Effet du ciment	60
7.2.2. Effet de la profondeur	62
7.2.3. Effet du dénivelé	63

7.3.	COMPARAISON AVEC LES ESSAIS SUR BARILS DE 200 LITRES	64
7.4.	UNIFORMITÉ DES MATÉRIAUX.....	68
8.	SIMULATION DE STRUCTURE DE CHAUSSÉES	70
9.	CONCLUSION	73
10.	RECOMMANDATIONS	75
11.	RÉFÉRENCES.....	77
ANNEXE A:	TRANCHÉES URBAINES REMBLAYÉES AVEC DU RSR	80
ANNEXE B:	PLANS ET PHOTOS DES SITES (B À G) POUR L'ÉTUDE DE LA TEMPÉRATURE.....	85
ANNEXE C:	FEUILLE DE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ	93
ANNEXE D :	DONNÉES TEMPÉRATURE AU SITE A, DEUXIÈME HIVER (NON REPRÉSENTATIF DE L'ENSEMBLE DES RÉSULTATS)	94

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Section de remblai sans retrait dans une tranchée ((ABQ), 2007)	1
Figure 2-1 Variation du M_r en fonction de la teneur en eau (Khoury et Zaman, 2004)	8
Figure 2-2 Courbes caractéristiques de rétentions d'eau moyennes des matériaux granulaires (degré de saturation (%)) versus la succion matricielle (kPa)) (Doucet et Doré, 2004).....	8
Figure 2-3 Résistances à la compression à 90 jours selon le ratio eau/matériaux cimentaires, selon différents ratios de ciment portland/matériaux cimentaires (pc/cm) (Alizadeh, 2019).....	9
Figure 2-4 a) Variation de l'affaissement avec le rapport eau/volume de solides, b) Résistance à la compression avec le volume de pâte (Alizadeh, 2019)	9
Figure 2-5 Profondeurs du gel dans le sable, l'argile silteuse et un matériau autocompactant avec air entraîné. Adaptée de (Farrag, 2011)	11
Figure 2-6 Profondeurs types des conduites d'eau dans des sols cohésifs pour les protéger du gel Tirée de (Baker et Harry, 1998).....	12
Figure 2-7 Profondeurs de gel calculées dans le CLSM Tirée de (Baker et Harry, 1998)	12
Figure 2-8 Tassements différentiels dus au gel près d'une tranchée en CLSM Adapté de (Baker et Harry, 1998)	13
Figure 2-9 Exemples de détérioration d'une chaussée suite à un mauvais remblai de tranchée au Québec (Fourny, 2008)	14
Figure 4-1 Montage de l'essai CBR.....	18
Figure 4-2 Exemple de correction des résultats de l'essai CBR.....	19
Figure 4-3 Différentes configurations du montage CBR utilisées pour réaliser les essais	20
Figure 4-4 Boule Kelly déposée sur un RSR frais.....	21
Figure 4-5 Pénétrromètre dynamique portatif (DCPT).....	23
Figure 4-6 Localisation des sites instrumentés pour l'étude comparative du gel entre le RSR et le MG20.....	25
Figure 4-7 Site A : a) vue en plan, b) sonde thermique avant le remplissage, c) remplissage avec deux bétonnières de RSR (mélange Unibéton).....	25
Figure 4-8 Site A, sonde thermique dans le MG20 compacté à la plaque vibrante	26
Figure 4-9 Site A, rue Saint-Patrick durant l'hiver (sondes sous les trottoirs déneigés, trottoir temporaire 100 mm enrobé bitumineux)	26
Figure 4-10 Boîte de rue pour faire la lecture manuelle durant l'hiver des thermocouples (sites B à G).....	27
Figure 4-11 a) site de la rue Mackay, vue vers le sud, b) emplacement de la tranchée, c) schéma de la tranchée avec le MG20 compacté et le RSR.....	28
Figure 5-1 Courbe granulométrique des trois mélanges de RSR avec les exigences de la norme NQ 2560-114 pour un matériau de type MG-20	29
Figure 5-2 Résultats des essais de Proctor modifié pour les trois mélanges RSR	30
Figure 5-3 Résultats des essais de CBR sur les trois mélanges de RSR étudiés.....	32
Figure 5-4 Résultats des essais de CBR en fonction du temps pour le mélange RSR Unibéton avec 1 % de ciment GU, séries A1, A2 et A3 (W_i = teneur en eau initiale, W_f = teneur en eau finale)	34

Figure 5-5 Résultats des essais de CBR en fonction du temps pour le mélange RSR Unibéton avec 1 % de ciment prise rapide, série C1 (W_i = teneur en eau initiale, W_f = teneur en eau finale)	34
Figure 5-6 Résultats des essais de CBR en fonction du temps pour le mélange RSR Unibéton avec fines de calcaire, séries B1, B2 et B3 (W_i = teneur en eau initiale, W_f = teneur en eau finale)	34
Figure 5-7 Taux de compaction et variation de teneur en eau (eau drainée) durant la cure pour les trois types de fine testés dans le mélange RSR Unibéton	36
Figure 6-1 Résultats des essais de boule Kelly en fonction du temps pour les quatre chantiers, exigences des devis de la CSEM et de la Ville de MTL	38
Figure 6-2 Indices de pénétration en fonction de la profondeur pour le chantier <i>De la Montagne</i> , mesures réalisées à différents intervalles de temps.....	40
Figure 6-3 Indice CBR en fonction de la profondeur pour le chantier <i>De la Montagne</i> , mesures réalisées à différents intervalles de temps.....	40
Figure 6-4 Représentation de l'indice CBR moyen en fonction de l'intervalle de temps de mesure.....	41
Figure 6-5 Indices CBR moyens (sur toute la profondeur) en fonction du temps pour le chantier <i>De la Montagne</i>	41
Figure 6-6 Indice CBR en fonction du temps de cure chantier Saint-Christophe (mélange Demix)	42
Figure 6-7 Module résilient en fonction du temps de cure chantier Saint-Christophe (mélange Demix)	42
Figure 6-8 Indices CBR en fonction du temps de cure pour différentes profondeurs mesurées au pénétromètre, chantier Saint-Christophe (mélange Demix).....	43
Figure 6-9 Configurations des essais DCPT du chantier Saint-Christophe.....	44
Figure 6-10 Indices CBR en fonction du temps de cure pour différentes profondeurs mesurées au pénétromètre, chantier Saint-Christophe, série d'essais A (mélange Demix).....	45
Figure 6-11 Indices CBR en fonction du temps de cure pour différentes profondeurs mesurées au pénétromètre, chantier Saint-Christophe, série d'essais B (mélange Demix).....	45
Figure 6-12 Indice de capacité portante à quatre profondeurs différentes pour les chantiers Saint-Antoine, René-Levesque, Place Desjardins, Saint-Christophe et Visitation (mélange Demix)	47
Figure 6-13 Indice de capacité portante à quatre profondeurs différentes pour les chantiers Saint-Patrick #1 et #2, Laprairie, Des Seigneurs (mélange Unibéton).....	47
Figure 6-14 Indice de capacité portante à quatre profondeurs différentes pour les chantiers Bishop, Murray, Hochelaga, Ropery, Atwater, Place Versailles et Sherbrooke (mélange Unibéton).....	48
Figure 6-15 Effet de précipitations sous forme de pluie sur l'indice CBR, moyenne de 0-600 mm (site Des Seigneurs, mélange Unibéton)	49
Figure 6-16 Effets du type de matériau encaissant dans l'excavation sur l'indice CBR (site Place Desjardins, mélange Demix).....	49
Figure 6-17 Températures à 66 cm sous la surface de la chaussée, chantier Saint-Patrick (site A)	52
Figure 6-18 Températures à 146 cm sous la surface de la chaussée, chantier Saint-Patrick (site A)	52

Figure 6-19 Températures à 206 cm sous la surface de la chaussée, chantier Saint-Patrick (site A)	53
Figure 6-20 Profils de température aux sites des chantiers instrumentés: a) rue Mackay (site B), b) boulevard De Maisonneuve (site C) et avenue De Lorimier (site D)	54
Figure 6-21 Profils de température aux sites des chantiers instrumentés: a) boulevard Saint-Laurent (site E), b) rue Parthenais (site F) et c) boulevard Vauquelin à Longueuil (site G).....	55
Figure 7-1 Remplissage de la tranchée #5 et de ses échantillons (barils)	56
Figure 7-2 Tranchées expérimentales sèches (2 x 17 mètres).....	57
Figure 7-3 Vue en plan et vue de profil des tranchées expérimentales	58
Figure 7-4 Préparation des barils normalisés avec : (a) neuf trous diamètre 19 mm, (b) géotextile Texdrain 80H placé au fond, et c) remplissage du baril à la bétonnière	59
Figure 7-5 (a) Troisième et dernier essai de pénétromètre sur le baril #1, (b) remplissage du trou laissé par le pénétromètre avec un coulis prise rapide en vue de l'essai suivant	59
Figure 7-6 Données de pénétromètre de l'essai #522 et indice CBR moyen des différentes couches.....	60
Figure 7-7 Module résilient (MPa) des tranchées expérimentales sections 1 à 6 (S#1 à S#6) profondeur: 0 à 200 mm, mélange BMQ.....	62
Figure 7-8 Dénivelé des sections de tranchées expérimentales, drainage de l'eau	63
Figure 7-9 Évolution de la rigidité de la tranchée #5 (partie nord versus la partie sud); le dénivelé influence la quantité d'eau et le phénomène d'autocompaction de la section nord en est diminué.....	64
Figure 7-10 Évolution de la rigidité d'un RSR (BMQ) 1 % ciment GU en tranchées et dans des barils pour les profondeurs 0-200 mm, 200-400 mm et 400-600 mm (section #5) ...	66
Figure 7-11 Évolution de la rigidité d'un RSR (BMQ) 1 % ciment <i>RapidSet</i> en tranchées et dans des barils pour les profondeurs 0-200 mm, 200-400 mm et 400-600 mm (section #6).....	67
Figure 7-12 RSR des sections #1 et #2 retenu par des planches de coffrage et des blocs de béton	68
Figure 7-13 Surface du RSR après décoffrage (a) section #1 ciment GU (b) section #3 ciment GU(c) section #4 matériaux granulaires originaux recompressés....	69
Figure 8-1 Abaque de l'évolution du CBR dans les couches RSR.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Avantages des CLSM (ACI Committee 229, 2013; Pujadas et al., 2015)	4
Tableau 2-2 Compositions des CLSM et RSR (ACI Committee 229, 1994; Association Béton Québec (ABQ), 2014; Martin, 2001)	6
Tableau 4-1 Formule des mélanges à l'étude	17
Tableau 4-2 Valeurs de CBR (eq. 4-1) et de module résilient (Mr) (eq. 4-2) en fonction de l'indice de pénétration (IP)	24
Tableau 5-1 Valeur de compacité mesurée pour les différentes conditions d'essai (mélange Unibéton, moule drainé)	31
Tableau 5-2 Valeurs moyennes des CBR (%) pour les trois mélanges RSR en fonction du temps et de la condition d'essai	32
Tableau 5-3 Caractéristiques des mélanges RSR lors des essais de CBR	33
Tableau 5-4 Caractéristiques des droites de régression linéaire des résultats de CBR dans le temps pour les différents types de fines	35
Tableau 5-5 Teneurs en eau initiale et finale des mélanges RSR avec différents types de fines	36
Tableau 6-1 Emplacement des chantiers pour les essais de DCPT et matériau testé	39
Tableau 6-2 Résumé des indices CBR des essais DCPT en chantier	50
Tableau 6-3 Résumé des indices CBR des essais DCPT en chantier convertis en modules résilients	50
Tableau 7-1 Détails des sections de tranchées expérimentales réalisées	57
Tableau 7-2 Rigidités à 24 h des premiers 200 mm de matériau en tranchée mesurée à l'aide du DCPT	61
Tableau 7-3 Valeurs des modules résilients (MPa) pour les différentes couches des six sections	63
Tableau 8-1 Indices CBR des couches de remblai	71

1. INTRODUCTION

Le remblai sans retrait (RSR) est un matériau auto-compactant à très faible résistance utilisé pour remplir les excavations nécessaires à l'installation des conduites d'aqueduc, d'égout, de gaz et câbles de toutes sortes. (Figure 1-1) (Association Béton Québec (ABQ), 2007; Martin, 2001). Il est utilisé par les municipalités afin de remplir les excavations de manière aussi efficace que les matériaux granulaires conventionnels, mais plus rapidement surtout lorsque le compactage mécanique est impossible ou dans des endroits difficiles d'accès. Le RSR contient 1 % de ciment, de l'eau et des granulats à béton, gros et fins. La résistance visée se situe entre 0,4 et 1,0 MPa après 28 jours. La main-d'œuvre requise et le temps nécessaire sont aussi moindres que les matériaux conventionnels (Alizadeh et al., 2014). Au début des années 2000, les économies escomptées à la Ville de Montréal étaient supérieures à 20 % par rapport à l'utilisation du 0-20 mm (Martin, 2001). De nos jours, il est surtout utilisé pour les petites et moyennes tranchées. Les avantages principaux seraient que la circulation routière peut être rétablie rapidement et la sécurité des travailleurs est améliorée par la facilité de mise en place. Son utilisation permettrait aussi d'allonger la durée de vie des services publics. Cependant, en hiver le RSR peut présenter des problèmes de consolidation causés par le gel de l'eau en surplus qui peut être atténué par l'ajout de pierre nette au fond de la tranchée. Le RSR peut aussi être utilisé comme enrobage de conduites et canalisations enfouies là où il est difficile de compacter sous une conduite existante.

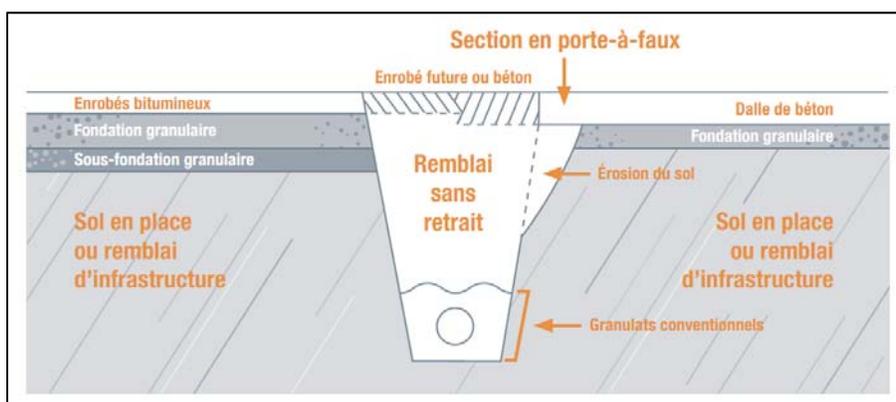


Figure 1-1 Section de remblai sans retrait dans une tranchée ((ABQ), 2007)

Le contrôle de la qualité des matériaux de remblai, leur mise en œuvre et leur cure (dans le cas du RSR) pourrait avoir des impacts majeurs sur le comportement de la réparation de la tranchée qui est soumise à des cycles de chargement et de gel-dégel. Dans cette optique, le pénétromètre dynamique semble être une approche des plus prometteuses pour caractériser le RSR précisément la rigidité du RSR une fois en place, comparativement à la boule Kelly qui mesure la consolidation en surface et à très court terme. Dans certains cas, des problèmes de capacité portante à court terme ainsi que des gonflements ou affaissements ont été observés sur divers chantiers. L'hétérogénéité de la mise en œuvre du matériau et du milieu récepteur pourrait entraîner des comportements différentiels causés par des déformations due au gel. Ces observations ont été transmises au CERIU qui a proposé une étude plus approfondie sur le contrôle de la qualité du RSR. Les organisations qui ont collaboré à cette étude sont la Commission des services électriques de Montréal, Énergir, Hydro-Québec et la Ville de Montréal.

Ce rapport comprend dix chapitres :

- 1) Une brève introduction présente le RSR (ce chapitre).
- 2) Le chapitre 2 présente l'état des connaissances sur le RSR.
- 3) Les objectifs sont expliqués au chapitre 3.
- 4) La méthodologie est détaillée au chapitre 4.
- 5) Le chapitre 5 montre l'étude du RSR au laboratoire.
- 6) Le chapitre 6 explique le comportement du RSR dans les premières 48 heures après la mise en œuvre et les mesures de température collectées dans les chaussées en saison hivernale.
- 7) Le chapitre 7 présente les résultats d'une étude du comportement du RSR dans des tranchées expérimentales et des barils de 200 litres.
- 8) Le chapitre 8 présente les résultats des simulations de structures de chaussées.
- 9) Le chapitre 9 présente les conclusions de l'étude.
- 10) Les recommandations sont présentées au chapitre 10.

L'ANNEXE A présente une étude de cas de l'installation du RSR sur une tranchée urbaine.

L'ANNEXE B montre l'emplacement des thermocouples installés pour la mesure de la température de la structure de chaussée pendant la saison hivernale.

L'ANNEXE C présente une feuille de contrôle de la qualité.

L'ANNEXE D présente les températures non représentatives de la deuxième saison au site A.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1. DESCRIPTION ET AVANTAGES DES RSR

Les matériaux de **RSR** sont des matériaux de remblai alternatifs à la pierre compactée et aux sols compactés. Les matériaux RSR sont considérés comme étant autocompactant. Pour cette raison, la maniabilité du mélange doit être suffisante pour que le mélange se place facilement et remplisse adéquatement les vides de la tranchée avec peu d'intervention manuelle, sans créer de la ségrégation. Les matériaux de remblai autocompactant peuvent être séparés en deux principales catégories : les matériaux essorables et les matériaux non-essorables.

Les bétons conventionnels et les bétons autoplaçants font partie de la catégorie des matériaux non-essorables. La quantité d'eau dans le mélange n'est pas en excès et l'eau contenue dans le mélange doit y rester pour effectuer l'hydratation du ciment. Ainsi, lorsque l'on commande du béton, la quantité livrée au chantier correspond à celle une fois mise en place (retrait négligeable d'un point de vue de l'ensemble de l'ouvrage).

Les RSR utilisés au Québec font partie de la famille des matériaux essorables (Martin, 2001). La quantité d'eau dans un mélange essorable est supérieure au volume des vides au mélange dans son état lâche. L'eau en excès fluidifie le mélange durant la livraison et l'installation, mais dès la mise en place du matériau, l'eau se draine vers le milieu récepteur. La capacité portante du RSR augmente en fonction de la baisse de la teneur en eau dans le matériau. Le pourcentage de particules passant le tamis 80 µm doit être limité à 4 % selon l' ABQ (2007), 3% selon Martin (2001), en incluant le ciment pour que le mélange se draine bien (ABQ), 2007).

Aux États-Unis, au Canada anglais et dans plusieurs pays, le remblai autocompactant est connu sous le nom *Controlled Low-Strength Materials* (CLSM). Ces matériaux non essorables ressemblent aux RSR essorables en ce qui a trait aux avantages et à la mise en œuvre, bien que les mélanges soient différents en termes de composition et granulométrie. Les références présentées au Tableau 2-1 portent sur le CLSM, cette abréviation est ainsi gardée dans le tableau.

Tableau 2-1 Avantages des CLSM (ACI Committee 229, 2013; Pujadas et al., 2015)

Disponible partout	Les producteurs utilisent des matériaux locaux et des bétonnières pour livrer au chantier facilement.
Facile à placer	Le CLSM peut être placé avec une chute, un convoyeur, une pompe à béton ou un godet. Généralement, le CLSM est autoplaçant et nécessite peu ou pas de compaction mécanique ce qui augmente la productivité des chantiers en réduisant la main-d'œuvre nécessaire.
Versatile	La maniabilité et la résistance en compression du mélange peuvent être ajustées en fonction des besoins au chantier. Plus de ciment ou de cendres volantes font augmenter la résistance en compression. Le temps de prise peut être ajusté avec des adjuvants à béton. Des agents moussants permettent de réduire la masse volumique pour faire des remblais légers ou isolants.
Rigide et durable	La capacité portante des mélanges est plus élevée que celle des sols compactés ou des remblais granulaires. Le CLSM est moins perméable et plus résistant à l'érosion. Une résistance en compression jusqu'à 8,3 MPa peut être obtenue à 28 jours pour des remblais structuraux.
Permet de rétablir rapidement la circulation	Le temps de réparation est minimal, car plusieurs mélanges de CLSM permettent de supporter les charges dues au trafic après quelques heures. Le CLSM se consolide par lui-même et ne nécessite pas de contrôle de la masse volumique sur chaque couche comme un remblai granulaire.
Tassement faible	Le CLSM se place par lui-même, ne forme pas de vides et ne se tasse pas durant l'application de charges. Moins de fissures et de tassements sont observés dans un enrobé bitumineux posé sur du CLSM que sur du sol ou remblai granulaire mal compacté.
Réduit les coûts d'excavation	Les tranchées sont plus étroites, car aucun équipement de compaction ne doit être utilisé.
Améliore la sécurité des travailleurs	Le placement du CLSM se fait sans qu'un travailleur ne soit obligé de descendre dans la tranchée ou entrer dans des espaces clos.
Construction toute saison	Le CLSM peut déplacer de l'eau ou de la neige dans une tranchée ce qui minimise les coûts et le temps de pompage. Comme pour un béton livré à la bétonnière, en hiver les matériaux peuvent être chauffés pour livrer un matériau avec une température acceptable.
Facilement réexcavable	Une résistance en compression entre 0,3 et 0,7 MPa est suffisante pour la plupart des utilisations et peut être réexcavée avec des outils conventionnels. Une résistance de 0,3 MPa permet une réexcavation manuelle.

Réduit l'équipement nécessaire	Généralement, le CLSM est livré par un producteur de béton avec une bétonnière. Il est placé par gravité avec un ouvrier seulement sans machinerie supplémentaire.
Facilite le déroulement des chantiers	Ne nécessite pas d'espace et de phase d'entreposage des matériaux.
Bénéfique pour l'environnement	Le CLSM permet de revaloriser les cendres volantes et autres déchets industriels. La quantité de diesel nécessaire au placement du CLSM est plus faible qu'un remblai placé et compacté par couche.

2.2. COMPOSITION DES MELANGES RSR

Les mélanges RSR sont généralement composés de granulats, de sable, de ciment et d'eau. Le Tableau 2-2 montre la composition des RSR selon l'ABQ, quelques fournisseurs du Québec et ensuite les mélanges américains selon *American Concrete Institute (ACI)*. La quantité d'eau dans un mélange RSR doit être suffisante pour que le matériau soit fluide pour la mise en œuvre. Cette quantité d'eau est exprimée sous forme de ratio Eau/Ciment (E/C). Comme l'utilisation de liants alternatifs est fréquente aux États-Unis, le ratio Eau/Liant (E/L) est aussi présenté. Or, comme la quantité de ciment est très faible et qu'il peut être substitué par d'autres produits, il est plus pratique d'exprimer la quantité d'eau avec un ratio volumique Eau/Solides (E/S). Le ciment, les granulats et les sous-produits industriels sont considérés comme les matériaux solides. La maniabilité du mélange varie de façon importante en fonction du ratio E/S. Les ratios E/C, E/L et E/S ont d'abord été calculés sur des bases massiques, ensuite sur des bases volumiques. Pour être compétitif aux remblais compactés traditionnels, le coût des RSR se doit d'être bas. L'utilisation de matériaux neufs n'est pas primordiale afin d'obtenir une maniabilité et une résistance en compression acceptable.

Tableau 2-2 Compositions des CLSM et RSR (ACI Committee 229, 1994; Association Béton Québec (ABQ), 2014; Martin, 2001)

		Formulation typique des RSR (ABQ)	RSR Demix, CRH 2016	RSR Unibéton 2016	RSR BMQ 2016	Formulation typique des CLSM (ACI)	Flo-Fill mix from Lonnie Gray, Old Castle, CRH (non pompable)	Flo-Fill mix from Lonnie Gray, Old Castle, CRH (pompable)	CLSM mix pour remplir des culées de pont
Matériau	Densité								
Pierre 10 mm	2,59						237 kg	237 kg	
Pierre 5-20 mm	2,75	1050-1200 kg	1180 kg	1040 kg	1040 kg				
Sable	2,65	850-995 kg	853 kg	992 kg	940 kg	1650 kg	1289 kg	1222 kg	1516 kg
Ciment type GU	3,15	25 kg	25 kg	25 kg	25 kg	30 kg	24 kg	24 kg	45 kg
Cendres volantes	2,5					180 kg	148 kg	208 kg	258 kg
Eau	1,00	210-230 kg	200 kg	220 kg	210 kg	270 kg	188 kg	188 kg	303 kg
Air	-	1 %	4 %	1 %	1 %	Variable	15 %	15 %	Var.
Rapport massique E/C	-	8,4-9,2	8,0	8,8	8,4	9,0	7,8	7,8	6,7
Rapport massique E/L	-	8,4-9,2	8,0	8,8	8,4	1,3	1,1	0,8	1,0
Rapport massique E/S		0,10-0,11	0,10	0,11	0,10	0,15	0,11	0,11	0,17
Rapport vol. E/C	-	26-29	25,2	27,7	26,5	28,4	24,7	24,7	21,2
Rapport vol. E/L	-	26-29	25,2	27,7	26,5	3,3	2,8	2,1	2,6
Rapport vol. E/S		0,28-0,30	0,26	0,29	0,28	0,38	0,29	0,29	0,44
Rapport vol. pâte		0,23-0,24	0,22	0,23	0,23	0,36	0,31	0,34	0,42
Dosage en eau (%) Vw/Vv *100		95	83	96	95	Variable	56	56	Variable

Les mélanges du RSR produits et utilisés au Québec sont différents de ceux utilisés aux États-Unis. Les *Controlled Low-Strength Materials* (CLSM) américains ne contiennent pas de gravier, mais plutôt plus de sable. Ils peuvent contenir des cendres volantes, dans une proportion de 6 à 8,7 fois la quantité de ciment (Tableau 2-2), ce qui réduit le rapport eau/liant des mélanges. Il est fréquent d'incorporer des sous-produits industriels pour éviter leur enfouissement (Siddique et Noumowe, 2008). En ce qui concerne le sable dans les CLSM au Canada et aux États-Unis, celui-ci peut être remplacé par une panoplie de matériaux tels que des scories, du caoutchouc, du verre concassé ou du concassé de béton recyclé (Ling, Kaliyavaradhan et Poon, 2018). La tendance des mélanges américains est de baser la fluidité sur le volume de pâte, le ratio eau/matériau cimentaire et le ratio ciment portland/matériaux cimentaires (Alizadeh, 2019).

Étant donné la faible teneur en ciment, le coût des granulats est le paramètre le plus important d'un point de vue coût du mélange CLSM. Contrairement aux matériaux de type sol-ciment, les RSR n'utilisent pas de sols naturels comme matière première. Les fournisseurs de CLSM utilisent des matériaux disponibles localement, tels que des granulats à béton, du verre concassé, des sables de fonderie, des résidus fins de concassage ou autres. L'introduction de verre concassé dans des mélanges de CLSM a permis de produire des mélanges avec de bonnes propriétés à l'état frais et à l'état durci. La résistance en compression augmente en fonction de la portion de granulats remplacée par du verre concassé. Ceci est probablement causé par l'angularité importante des particules de verre (Gemperline et Durham, 2012; Ohlheiser, 1998b). Le gain de résistance en compression des mélanges RSR avec verre concassé est semblable aux mélanges qui contiennent les mêmes proportions de scories d'acier.

Le département des transports du Colorado (CDOT) permet de remplacer en partie ou en totalité les granulats des mélanges RSR utilisés pour remblayer les culées de pont et les tranchées urbaines. Pour ce faire, le verre doit être pulvérisé en particules de 12 mm et moins et doit respecter la granulométrie prescrite par les devis. Le seuil maximal d'impuretés est généralement fixé à 10 %. La maniabilité des mélanges CLSM avec verre concassé est supérieure ou égale au mélange de référence avec des granulats à béton (Ohlheiser, 1998a). La quantité d'air du mélange CLSM augmente avec l'ajout de verre. Par exemple, un mélange de référence qui contient du sable, du ciment et des cendres volantes contient 0,1 % d'air, alors que les mélanges contenant 25 % et 75% de verre contiennent 6 % et 5,5 % d'air respectivement (Gemperline et Durham, 2012). Un agent entraîneur d'air peut être ajouté pour contrôler la fluidité (Ling, Kaliyavaradhan et Poon, 2018).

2.3. TENEUR EN EAU

La teneur en eau d'un matériau de type RSR a une influence significative sur sa résistance et son comportement mécanique. Une forte saturation et une faible perméabilité augmentent les pressions interstitielles et font diminuer la rigidité des matériaux granulaires (Suarez, 2010). Un échantillon avec une teneur en eau de +4 % (selon optimum Proctor) et ensuite séché pour atteindre -4 % verra son module augmenter considérablement (de 400 %) (Khoury et Zaman, 2004). À l'inverse, un échantillon compacté avec un déficit de -4 % par rapport à l'optimum Proctor, et ensuite saturé verra son module diminuer (-60 % du M_r). La Figure 2-1 présente ces résultats de module M_r en fonction de la teneur en eau.

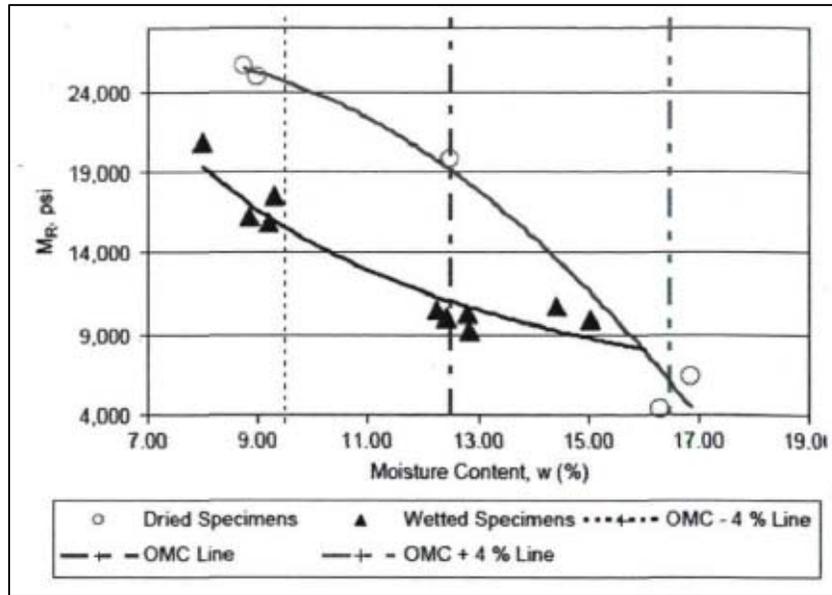


Figure 2-1 Variation du M_r en fonction de la teneur en eau (Khoury et Zaman, 2004)

La succion matricielle est un phénomène qui dépend de la saturation du matériau granulaire. De l'eau qui ruisselle sur un sol sec va s'infiltrer plus facilement que sur un sol humide ou saturé. Ce phénomène d'aspiration est le résultat de forces d'attraction entre les molécules d'eau elles-mêmes, et de forces d'attraction entre les molécules d'eau et les surfaces des granules (phénomène d'adsorption). La Figure 2-2 présente une courbe caractéristique de la rétention d'eau dans les matériaux granulaires. Plus le degré de saturation augmente, moins la succion matricielle est élevée.

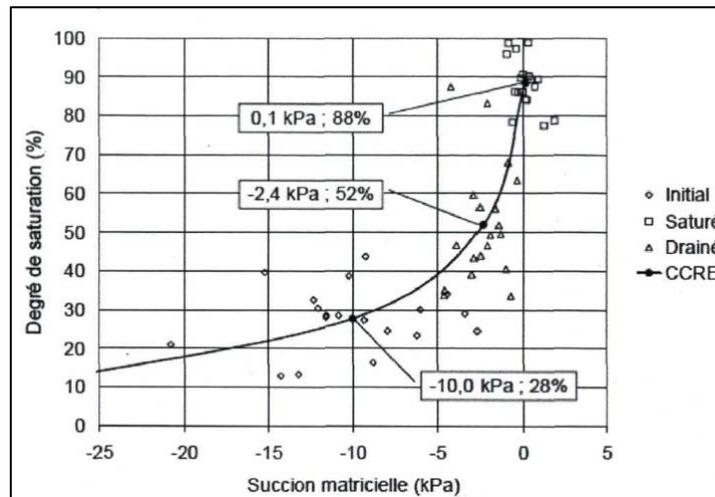


Figure 2-2 Courbes caractéristiques de rétentions d'eau moyennes des matériaux granulaires (degré de saturation (%) versus la succion matricielle (kPa)) (Doucet et Doré, 2004)

La définition américaine des CLSM fait état d'une plus grande proportion de pâte que les RSR du Québec. La Figure 2-3 montre que la résistance à la compression a été mesurée pour des rapports

eau/liant variant entre 0,6 et 1,2 et des rapports ciment portland/liant variant de 0 à 0,2 (Alizadeh, 2019). Une résistance près de 1 MPa est atteinte avec un rapport eau/liant de 1 et un rapport ciment portland/liant de 0,15. Les mélanges québécois ont un rapport eau/liant de 8 à 9,4 et utilisent seulement le ciment portland. Il devient donc important de comparer les mélanges québécois et américains sur la base du ratio eau/solide. Le rapport eau/solide volumétrique des mélanges du Québec est de 0,26-0,30 (Tableau 2-2), ce qui est dans la limite inférieure de l'étude de l'affaissement selon le E/S volumétrique (Figure 2.4 a)(Alizadeh, 2019). Les CLSM suggérés par l'ACI sont à 0,38 et le fournisseur américain se situe plus près de 0,29. Le ratio de pâte des RSR est aussi plus faible que les mélanges américains. À la figure 2-4, la résistance diminue avec le ratio volumétrique de pâte. Comme les mélanges québécois ont une résistance de près de 1 MPa, les granulats contribuent à la résistance des RSR.

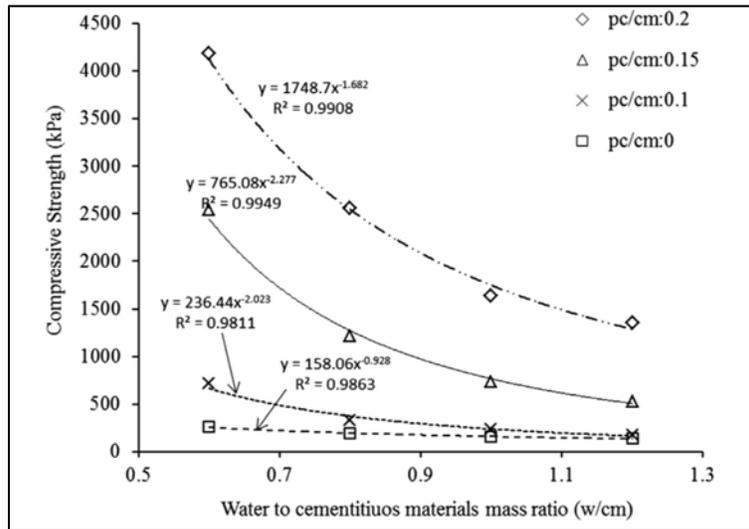


Figure 2-3 Résistances à la compression à 90 jours selon le ratio eau/matériaux cimentaires, selon différents ratios de ciment portland/matériaux cimentaires (pc/cm) (Alizadeh, 2019)

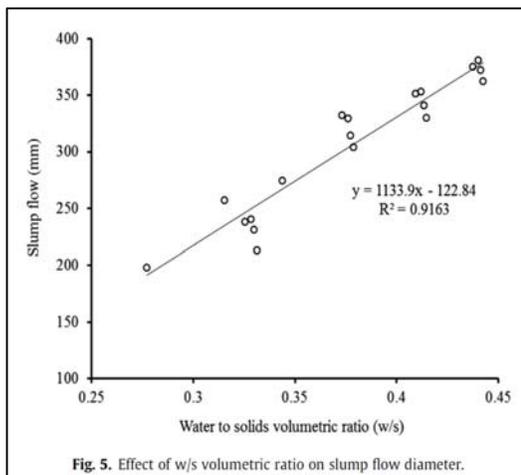


Fig. 5. Effect of w/s volumetric ratio on slump flow diameter.

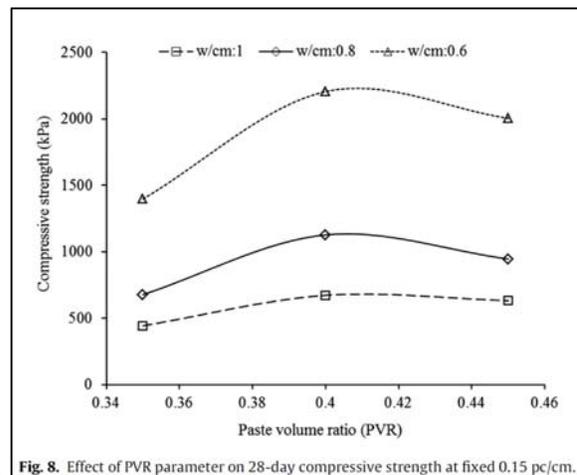


Fig. 8. Effect of PVR parameter on 28-day compressive strength at fixed 0.15 pc/cm.

a)

b)

Figure 2-4 a) Variation de l'affaissement avec le rapport eau/volume de solides, b) Résistance à la compression avec le volume de pâte (Alizadeh, 2019)

2.4. PARAMÈTRES À TENIR EN COMPTE

2.4.1. Maniabilité

Un des paramètres importants à tenir compte lors de l'utilisation d'un RSR est sa capacité à combler les vides sous des sections de chaussée, et donc sa maniabilité. Au préalable de la livraison au chantier, le producteur peut procéder à divers ajustements de la recette pour modifier la maniabilité. Une fois rendue au chantier, la teneur en eau peut être augmentée au besoin.

2.4.2. Capacité portante

La granulométrie du RSR et sa teneur en eau initiale permettent d'obtenir assez rapidement une compacité de l'ordre de 95 % du Proctor modifié. Or, les conditions de drainage du milieu récepteur doivent permettre à l'eau de se drainer adéquatement. Un surdosage en eau augmente le délai d'évacuation d'eau. Or, des mesures en chantier ont montré des indices de portance CBR après quelques jours similaires aux fondations granulaires, et ce, peu importe la quantité d'eau rajoutée au chantier (Association Béton Québec (ABQ), 2014; Lupien, Gagne et Martin, 2002)).

2.4.3. Capacité d'enlèvement

Il est important d'être capable d'excaver facilement le remblai lors de futurs travaux pour éviter les pertes de temps et les surcoûts. Une résistance à la compression inférieure à 0,7 MPa permet d'excaver manuellement un RSR. Une formule est proposée par l'ACI pour estimer la facilité d'enlèvement du matériau :

$$RE = \frac{W^{1,5} * 0,619 * C^{0,5}}{10^6} \quad (2-1)$$

Dans cette équation, W représente la masse volumique sèche (kg/m^3), et C la résistance à la compression à 28 jours (kPa) (ACI Committee 229, 2013). Si le RE est inférieur à 1,0, le RSR est considéré excavable. Par exemple, des remblais RSR avec 2 MPa de résistance en compression mis en place dans une tranchée étroite sont excavables à l'aide de pelle mécanique (ACI Committee 229, 2013; Blanco et al., 2014). Les remblais qui contiennent des granulats de plus de 5 mm peuvent être difficiles à excaver, même si la résistance en compression ne dépasse pas 1 MPa (ACI Committee 229, 2013; National Ready Mix Concrete Association (NRMCA), 2000).

2.4.4. Perméabilité

La perméabilité du RSR est similaire à celle de la pierre concassée ($1,1$ à $1,6 * 10^{-4}$ cm/sec) (Association Béton Québec (ABQ), 2014). La perméabilité est influencée par la quantité de fines passant $80\mu\text{m}$ (Martin, 2001). Une quantité de fines inférieure à 4 % est recommandée pour que le RSR se consolide bien (Association Béton Québec (ABQ), 2007).

2.4.5. Tassements

Les remblais autocompactants génèrent moins de tassements dus aux charges (Farrag, 2011). L'utilisation de gros granulats contribue à faire diminuer ces déformations (Du, 2001).

2.4.6. Phénomène de gel dans les tranchées

Plusieurs municipalités canadiennes ont rapporté des bornes d'incendie et des conduites d'eau gelées et elles pointent du doigt le RSR. La vitesse d'avancement du gel dans une tranchée est directement proportionnelle à la conductivité thermique du matériau (Baker et Harry, 1998). Selon l'Association Béton Québec (ABQ), la pénétration du gel dans le RSR est similaire à celle de la pierre concassée MG-20 (Association Béton Québec (ABQ), 2007).

Les températures minimales observées dans une tranchée d'enfouissement de service sont montrées à la Figure 2-5. Le gel pénètre moins profondément dans un matériau autocompactant avec air entraîné que dans les sols naturels compactés. L'air entraîné diminue la profondeur du gel, alors que la teneur en eau et en cendres volantes l'augmente (Farrag, 2011). L'air entraîné donne un pouvoir isolant au remblai.

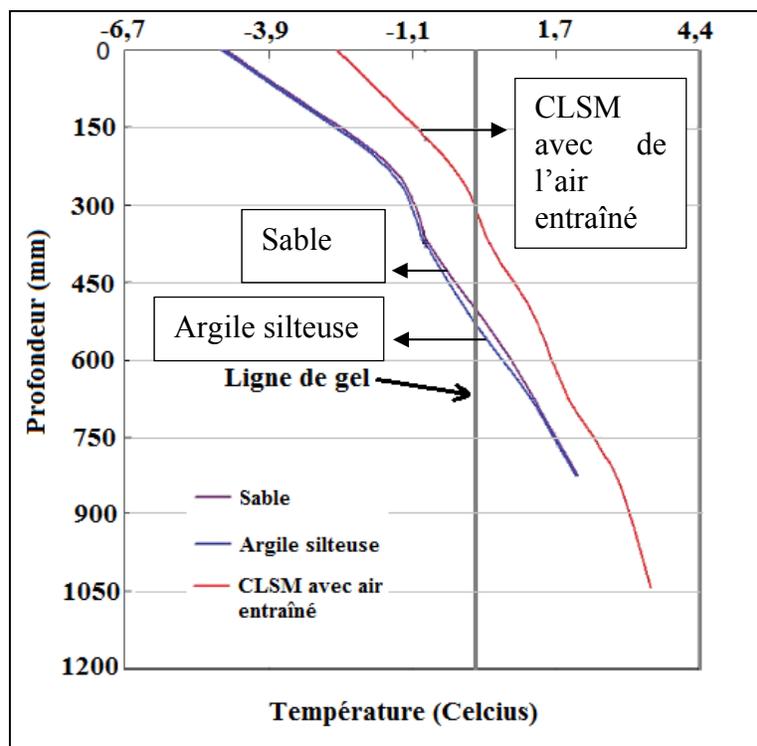


Figure 2-5 Profondeurs du gel dans le sable, l'argile silteuse et un matériau autocompactant avec air entraîné. Adaptée de (Farrag, 2011)

La profondeur des conduites d'eau est choisie en fonction du cas de gel extrême anticipé dans le sol naturel et ne tient pas compte de la conductivité thermique des remblais. La Figure 2-6 présente les profondeurs minimales d'installation de conduite d'eau potable dans différentes régions du Canada. Pour simuler l'effet des matériaux de remblai sur la profondeur de gel, le

Conseil National de Recherche du Canada (CNRC) a réalisé des simulations par éléments finis. Différents sols naturels ont été étudiés (Baker et Harry, 1998). La conclusion de l'étude montre que l'utilisation de CLSM sur la pleine profondeur d'une tranchée ferait passer le gel de 2,7 à 3,8 m pour la ville de Calgary. La Figure 2-7 présente la profondeur du gel d'une tranchée complètement remplie en CLSM suivant les simulations réalisées par le CNRC.

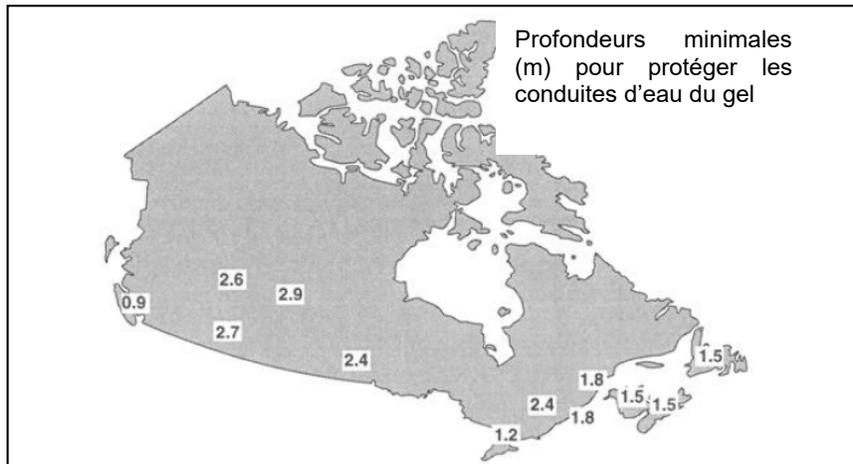


Figure 2-6 Profondeurs types des conduites d'eau dans des sols cohésifs pour les protéger du gel Tirée de (Baker et Harry, 1998)

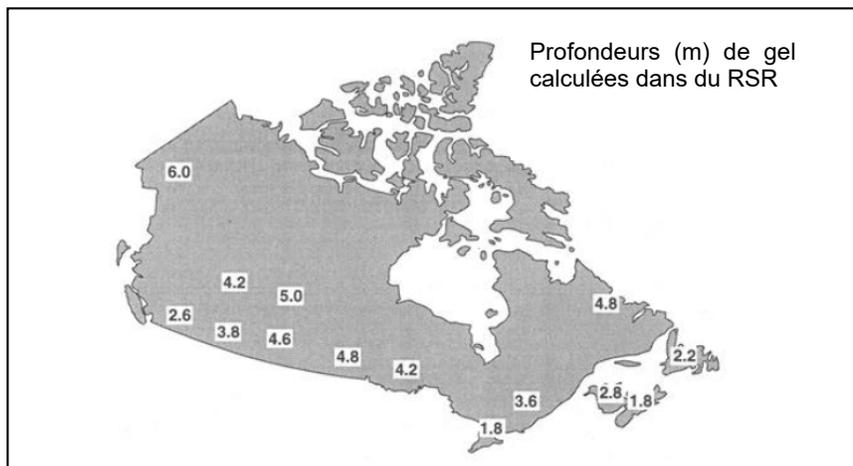


Figure 2-7 Profondeurs de gel calculées dans le CLSM Tirée de (Baker et Harry, 1998)

Des tassements différentiels peuvent se produire lorsque le sol d'infrastructure est un sol gélif. Durant la période de dégel, les bosses provoquées par le tassement disparaissent. Par contre, la répétition des mouvements dus aux tassements différentiels fait en sorte d'engendrer la fatigue des enrobés bitumineux, ce qui mène éventuellement à l'apparition de fissures longitudinales. La Figure 2-8 présente les tassements différentiels qui peuvent être observés dans une tranchée faite dans un sol gélif puis remplie avec un CLSM ayant une conductivité thermique élevée.

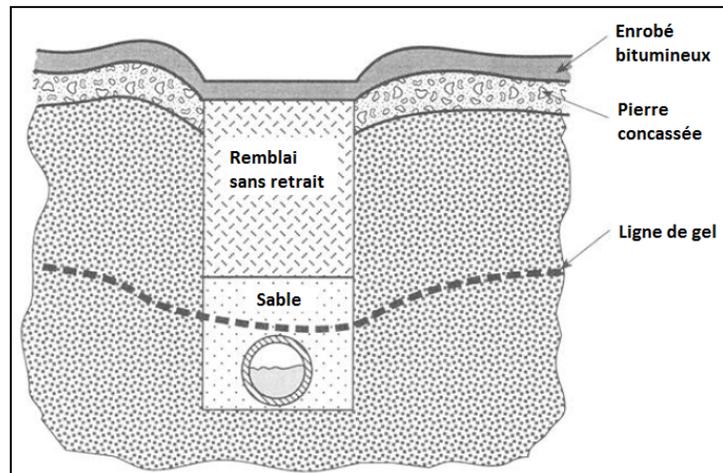


Figure 2-8 Tassements différentiels dus au gel près d'une tranchée en CLSM
Adapté de (Baker et Harry, 1998)

Les températures froides peuvent affecter la qualité tant des matériaux de remblai traditionnels (pierre) que les remblais autocompactants. La teneur en eau lors du compactage doit s'approcher de l'optimum Proctor pour que les particules se placent les unes par rapport aux autres et que le remblai atteigne une compacité élevée. Les matériaux de remblai autocompactant utilisés au Québec sont essorables et ils doivent pouvoir se drainer facilement pour bien se consolider.

Hydro-Québec a déjà demandé de fabriquer le RSR avec de l'eau chaude en hiver. Ce dernier peut aussi demander de préchauffer la tranchée pour faciliter l'écoulement de l'eau. Les parois d'une tranchée ouverte longtemps peuvent être complètement gelées et ces précautions sont nécessaires (Martin, 2001). À la ville de Montréal, aucune direction n'est donnée pour l'utilisation par temps froid du RSR dans leur devis. Par contre à la ville de Québec, il est exigé d'utiliser du RSR l'hiver. Il est demandé par les municipalités que les enrobés bitumineux installés l'hiver soient remplacés la saison suivante pour assurer la durabilité de la réparation, mais les remblais ne sont pas soumis à cette règle. Des tassements peuvent avoir lieu avec les cycles de gel/dégel si la teneur en eau finale du mélange RSR est trop élevée (Fourny, 2008). Par exemple, la Figure 2-9 présente des défauts majeurs de l'enrobé dus à des éléments défavorables qui ont mené à une mauvaise performance des matériaux.



Figure 2-9 Exemples de détérioration d'une chaussée suite à un mauvais remblai de tranchée au Québec (Fourny, 2008)

3. OBJECTIFS DU PROJET

Tel que discuté à l'introduction, certains doutes existent sur les pratiques de mise en œuvre des RSR au chantier. Ce projet de recherche vise à répondre aux interrogations qui persistent quant à l'utilisation du RSR, notamment en ce qui concerne la qualité de mise en œuvre, mais également sur la pénétration du gel dans ce matériau. L'objectif est de mettre au point des techniques de contrôle de la qualité du RSR en chantier. Plus particulièrement, d'évaluer le temps requis pour le durcissement du RSR avant la réouverture des voies au trafic après la construction, et d'évaluer la qualité de la mise en œuvre par la mesure de la variation de la capacité portante à l'intérieur du RSR en fonction de la profondeur.

Le programme d'essai de ce projet comprend deux volets : laboratoire et chantier. L'impact de la composition du milieu récepteur, de la température de pose et de cure, de la formulation, de la qualité du mélange et des pratiques au chantier a été analysé pour valider les critères de qualité de mise en œuvre et établir le moment idéal pour rétablir la circulation automobile. L'objectif principal du projet a été divisé en cinq sous objectifs :

1. Réalisation d'une étude en laboratoire sur les mélanges RSR;
2. Réalisation d'une étude en chantier (observation des pratiques, tests sur tranchées existantes, instrumentation d'une tranchée, effet du gel);
3. Réalisation d'une étude dans les tranchées expérimentales pour valider les essais en chantier et pour tester l'effet du ciment à prise rapide vs le ciment d'usage général (GU);
4. Simulation de la durabilité des structures de chaussées, selon un logiciel couramment utilisé au Québec ;
5. Réalisation d'abaques permettant de guider les utilisateurs de mélanges RSR sur le temps de durcissement avant la réouverture au trafic et d'une fiche de contrôle de la qualité pour les chantiers (voir l'ANNEXE C).

Il est important de noter que le rapport porte avant tout sur les méthodes en chantier pour évaluer la capacité portante sur RSR. Certains paramètres de formulation ont été testés, comme les petites différences de formulation qui peuvent exister entre les fournisseurs au Québec.

4. MÉTHODOLOGIE DU PROJET

Le RSR est initialement formulé par la procédure recommandée dans le devis de la Ville de Montréal et les travaux de Martin (2001), soit : une teneur en liant de 25 kg/m³; une quantité de fines inférieure à 3 %; un dosage volumique en eau correspondant à 100 % de saturation (incluant la porosité du granulat); aucun agent entraîneur d'air; l'optimisation du mélange de pierre et sable avec une granulométrie optimale (Martin, 2001; Ville de Montréal, 2008).

La réalisation de ce projet s'est faite selon deux volets : 1) volet expérimental en laboratoire, et 2) volet expérimental en chantier. Trois mélanges de RSR utilisés par l'industrie ont été étudiés. Les essais en laboratoire avaient pour objectif de caractériser les propriétés des mélanges RSR. L'essai CBR (*California Bearing Ratio*) a été adapté pour permettre l'autocompaction par drainage de l'eau en excès. En ce qui concerne la phase expérimentale en chantier, des essais ont été réalisés sur les matériaux en place afin d'évaluer la rigidité des matériaux en fonction du temps. Les essais qui ont été réalisés sont : 1) essai de la boule Kelly, et 2) essai de pénétration dynamique avec pénétromètre portatif à masse tombante. Le contrôle de la qualité du RSR inclut des tests du temps de stabilisation à court terme en fonction du temps de drainage qui seront réalisés de façon visuelle et avec le pénétromètre dynamique.

Le comportement au gel a été mesuré avec des thermocouples *in situ* sur sept sites, six à Montréal et un à Longueuil, comparativement entre le RSR et la pierre concassée MG20. Une tranchée instrumentée a été réalisée pour mesurer l'influence de certains éléments du mélange sur quelques propriétés mécaniques telles que la capacité portante et la rigidité.

Les simulations avec le logiciel Chaussées 2 servent à vérifier si les résistances obtenues permettent le passage des véhicules après les travaux de réparation.

4.1. MÉLANGES ÉTUDIÉS : DEMIX, UNIBETON, BMQ

Les travaux de chantier ont été réalisés avec des RSR produits par trois fournisseurs québécois : Unibéton, Demix et Béton Mobile du Québec. Les essais en laboratoire ont été réalisés sur des mélanges fabriqués en laboratoire utilisant les mêmes formulations avec des matériaux provenant de ces fournisseurs. Le mélange Unibéton est plus sableux que les mélanges Demix et BMQ avec 41 % de sable contre 38 % pour les deux autres. Il possède un pourcentage d'air aussi plus élevé. Le Tableau 4-1 présente les proportions des mélanges RSR étudiés en laboratoire.

Tableau 4-1 Formule des mélanges à l'étude

Unibéton	Formule
Pierre 5-14mm	532 kg
Pierre 14-20mm	238 kg
Pierre 2.5-10mm	415 kg
Sable Arsenault	992 kg
Ciment	25 kg
Eau	220 kg
	<hr/>
	2422 kg
Volume	1 m ³

Demix	Formule
Pierre 20mm	590 kg
Pierre 14mm	590 kg
Sable Pro-Mix 1-2.0	298 kg
Sable Pro-Mix 2-2.0	298 kg
Sable Manufacture	257 kg
Ciment	25 kg
Eau	200 kg
	<hr/>
	2258 kg
Volume	1 m ³

BMQ	Recette
Pierre 5-14mm	1040 kg
Sable Arsenault	940 kg
Ciment	25 kg
Eau	210 kg
	<hr/>
	2215 kg
Volume	1 m ³

4.2. CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

L'essai du *California Bearing Ratio* (CBR) est un essai de laboratoire visant à faire le lien entre la capacité portante des matériaux de fondation et les résultats de pénétration obtenus en chantier au moyen d'un pénétromètre. Il s'agit d'un essai très répandu en Amérique du Nord pour caractériser la capacité portante des différentes couches d'une chaussée.

Le principe de l'essai CBR (ASTM D1883-16) consiste à enfoncer dans l'échantillon un piston d'acier de 49,63 mm de diamètre et de mesurer la force nécessaire à l'enfoncement du piston (ASTM International, 2016). Le piston s'enfonce selon un taux d'enfoncement constant (1,27 mm/min) jusqu'à une profondeur de 13 mm.

La préparation de l'échantillon se fait de la même façon que pour l'essai Proctor modifié (voir section 5.2). L'échantillon à tester est compacté à la teneur en eau optimale établie suite à l'essai Proctor. La valeur du CBR s'obtient en comparant la force nécessaire à l'enfoncement du piston pour 2,5 mm et 5,1 mm du matériau testé versus les valeurs de force pour un matériau de référence. Le montage utilisé dans le cadre de ce projet est illustré à la Figure 4-1. De plus, un exemple des résultats d'essais est présenté à la Figure 4-2. Dans ce cas-ci, les résultats bruts de l'essai ont dû être corrigés. Selon l'ASTM D1883-16, lorsque la courbe force-enfoncement est concave au début de l'essai, les résultats doivent être corrigés pour s'affranchir des effets causés par les irrégularités de surface de l'échantillon (ASTM International, 2016).



Figure 4-1 Montage de l'essai CBR

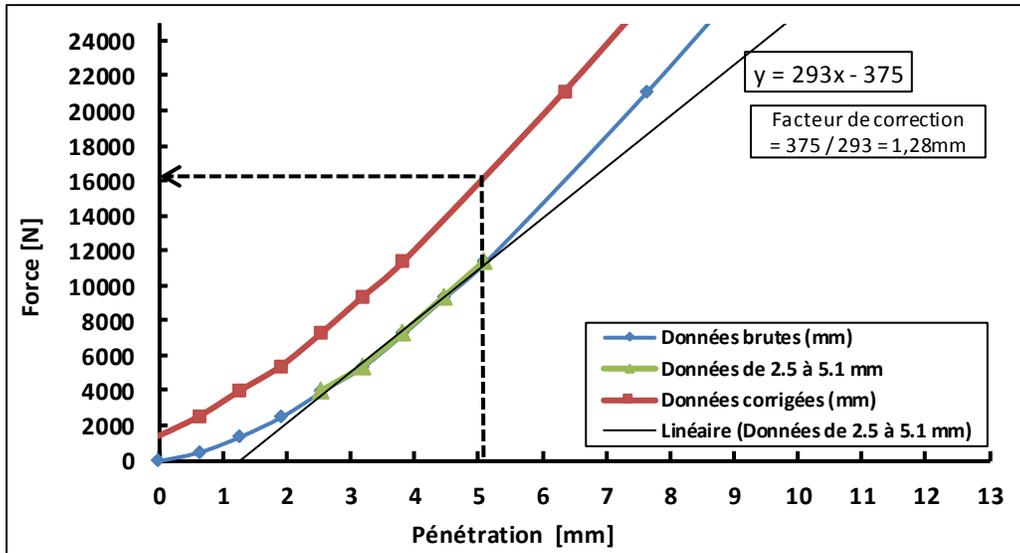


Figure 4-2 Exemple de correction des résultats de l'essai CBR

Pour la réalisation des essais de CBR en laboratoire, l'essai a été adapté au RSR, car sa mise en place est différente des sols compactés mécaniquement et l'eau qui y est contenue doit pouvoir être évacuée. Ainsi, des essais CBR ont été faits selon deux conditions : 1) drainée, et 2) non-drainée. Pour permettre à l'eau contenue dans le RSR de se drainer, l'espaceur en acier utilisé pour la préparation des échantillons dans la méthode d'essai conventionnelle a été remplacé par une couche de sable humide (teneur en eau connue) compacté. Il a été ainsi possible de calculer la perte d'eau du mélange RSR lors de la compaction. Pour l'application de la charge sur l'échantillon, des disques de confinement ont été utilisés pour les deux configurations. La modification de l'essai est présentée sous forme graphique à la Figure 4-3.

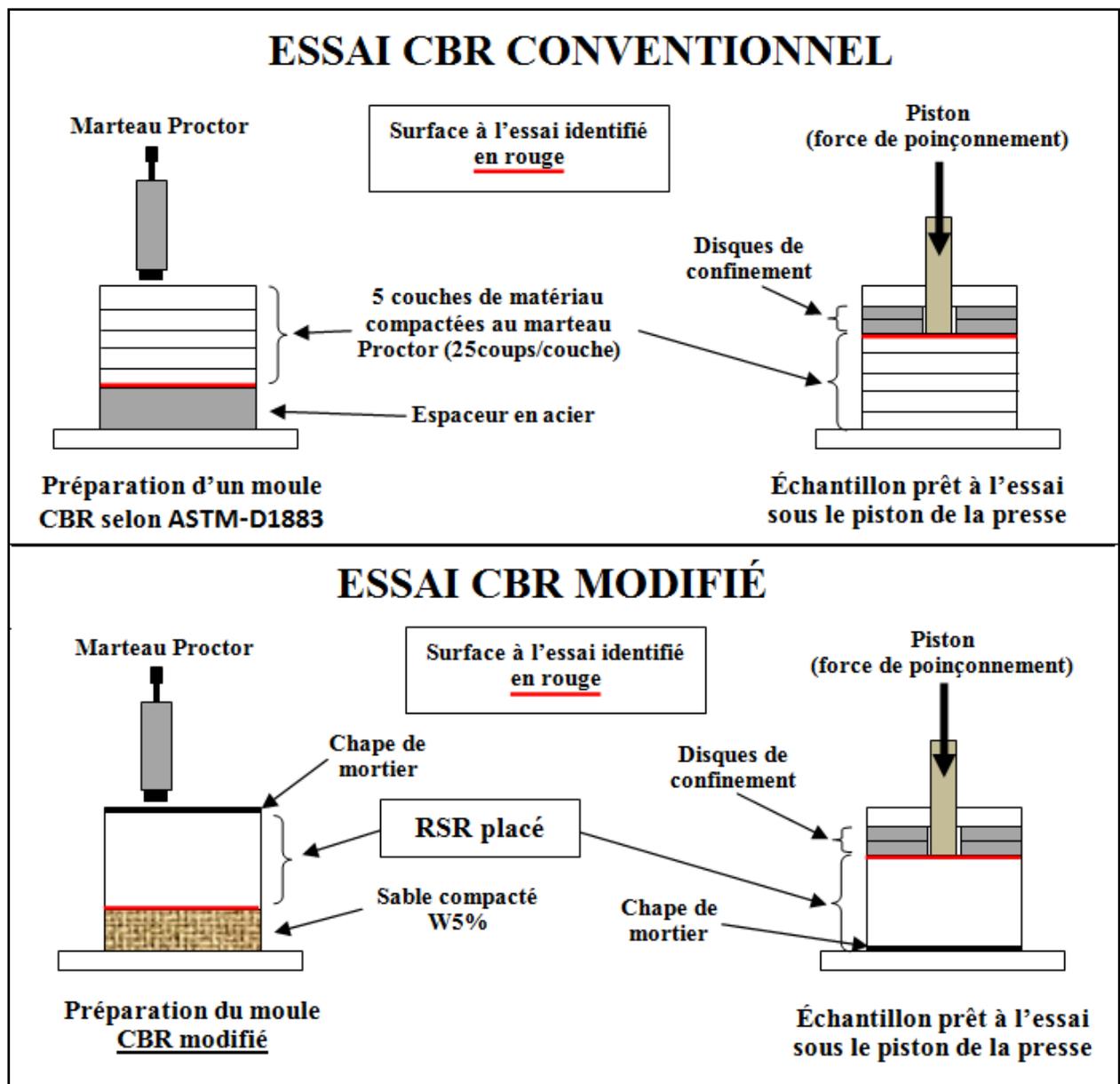


Figure 4-3 Différentes configurations du montage CBR utilisées pour réaliser les essais

Dans un premier temps, les moules ont été fabriqués en plaçant le RSR par tâtonnement (procédure A). Après quelques essais, six différentes méthodes ont été essayées avec des vibrations et des coups de marteau Proctor, dans le but d'augmenter la précision de l'essai. C'est finalement la méthode 10 coups de marteau Proctor sur la dernière couche qui a été retenue (procédure B).

4.3. BOULE KELLY

L'essai de boule Kelly est simple à réaliser et permet d'évaluer la capacité d'un matériau à faible portance (tel que le RSR à l'état frais) de supporter une charge. Le principe de l'essai selon la norme ASTM D6024 consiste à laisser tomber d'une hauteur donnée (90 mm) à cinq répétitions une demi-sphère d'une masse entre 14 et 15 kg (Figure 4-4) (ASTM International, 2015). L'empreinte laissée par la demi-sphère est ensuite mesurée et comparée à une valeur de référence. La capacité du remblai en surface à supporter des charges est alors estimée. Au Québec, la procédure d'essai consiste à déposer la boule Kelly sur le remblai (sans chute) et de mesurer l'enfoncement.



Figure 4-4 Boule Kelly déposée sur un RSR frais

Les critères d'acceptation varient en fonction du devis prescrit. Par exemple, le devis de la Commission des services électriques de Montréal (CSEM) indique que l'enfoncement de la boule Kelly doit être inférieur à 25 mm après 5 minutes. Le devis de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2008) quant à lui, indique que la valeur d'enfoncement doit être inférieure à 25 mm après 15 min. Dans les deux cas, il ne doit pas y avoir d'enfoncement après 30 minutes. Le temps pour la stabilité peut aussi être vérifié plus simplement par le surveillant de chantier en enfonçant sa botte dans la surface du RSR.

4.4. PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE PORTATIF

Le pénétromètre dynamique portatif est un outil qui permet de mesurer la rigidité d'un sol en fonction de la profondeur (Figure 4-5). Le principe de l'essai ASTM D695/D6951M-18 *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications* (ASTM International, 2018) consiste à mesurer l'enfoncement d'une tige munie d'une pointe d'acier conique à l'une de ses extrémités. La norme est connue par l'abréviation DCPT. L'enfoncement de la tige se fait par le biais d'un marteau de 8 kg ou 4,6 kg, en fonction de la composition du sol en place. Le taux de pénétration de la tige permet d'estimer la valeur du *California Bearing Ratio* (CBR) du sol en place. Le Tableau 4-2 tiré de la norme ASTM D 6951

donne les valeurs de CBR en fonction de l'indice de pénétration (IP), qui représente l'enfoncement de la tige en mm par coup de marteau. La relation entre la valeur d'IP et la valeur de CBR est la suivante (ASTM International, 2009) :

$$CBR (\%) = \frac{292}{IP^{1,12}} \quad (4-1)$$

Une fois l'essai complété et la valeur de CBR calculé, il est possible d'obtenir par corrélation une valeur de module résilient (M_r) du sol en place. D'après Chen (Chen, Hossain et Latorella, 1999), le MR se calcule à partir de la valeur de l'IP par la relation suivante :

$$Mr (MPa) = 338 * IP^{-0,39} \quad (4-2)$$

À noter que les différentes mesures doivent être espacées d'un minimum de 300 mm afin d'éviter l'interférence et une attention particulière doit être portée aux conduits souterrains pour éviter les bris. L'essai devrait être réalisé sur toute la profondeur de la tranchée.

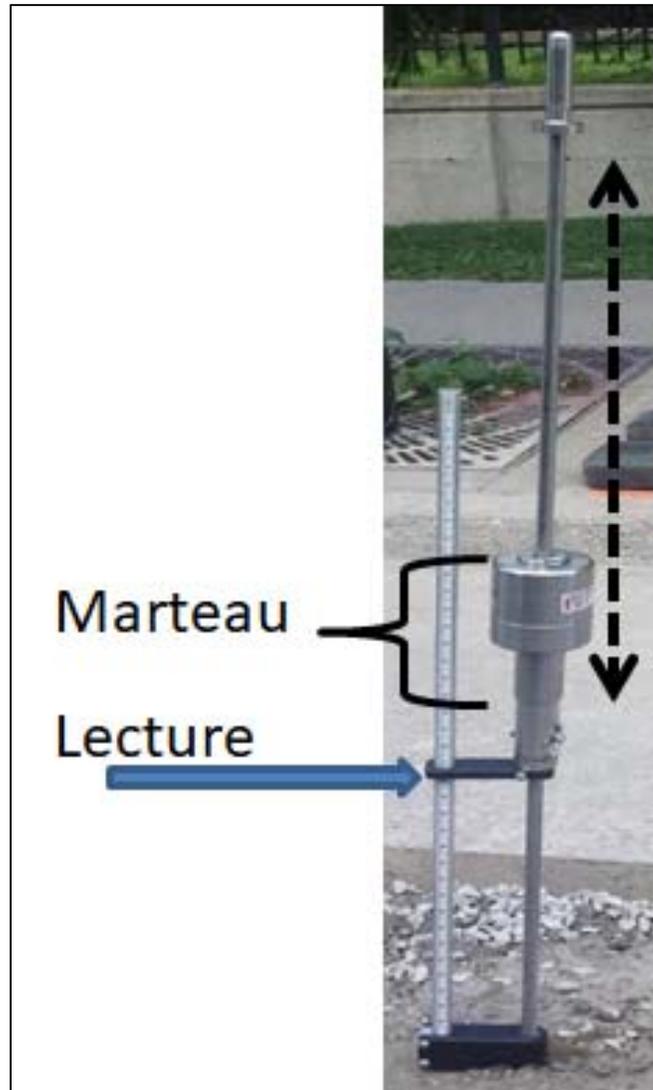


Figure 4-5 Pénétrromètre dynamique portatif (DCPT)

Tableau 4-2 Valeurs de CBR (eq. 4-1) et de module résilient (M_r) (eq. 4-2) en fonction de l'indice de pénétration (IP)

IP (mm/coup)	CBR (%)	M_r (MPa)
97-101	1,7	56
88-91	1,9	59
78-80	2,2	61
69-71	2,5	64
59-60	3,0	68
49-50	3,7	74
40	4,7	80
30-34	6	85
20-21	10	103
10-11	20	133
9	25	143
8	30	150
7	35	158
6	40	168
5	50	180
4	60	197
3	80	220
<3	100	>220

4.5. ÉTUDE DU GEL EN CHANTIER

La température, et donc, la profondeur du gel, dans le RSR a été mesurée et suivie sur sept différents sites instrumentés (Figure 4-6). Tous les sites avaient un remblai témoin en pierre compactée. Deux sondes thermiques artisanales composées de huit thermistances et d'un module d'acquisition ont permis d'enregistrer la température à chaque heure. La calibration des sondes a été réalisée dans un bassin à température contrôlée dans un laboratoire de l'ÉTS. Les dimensions du bassin utilisé sont de 2 mètres de longueur pour une section de 200 mm par 200 mm. La calibration a débuté avec de l'eau à 20 °C et graduellement la température était abaissée jusqu'à 0 °C. L'intervalle d'acquisition était de 5 secondes. Le bruit enregistré par la sonde a été corrigé en faisant une moyenne sur 15 points. La température de l'eau a été mesurée avec un thermomètre de référence précise à 0,05 °C. Les Figure 4-7 à Figure 4-10 montrent les détails d'installation, l'emplacement des divers dispositifs sur le site A et la boîte de rue utilisée pour faire la lecture manuelle des thermocouples sur les sites B à G.

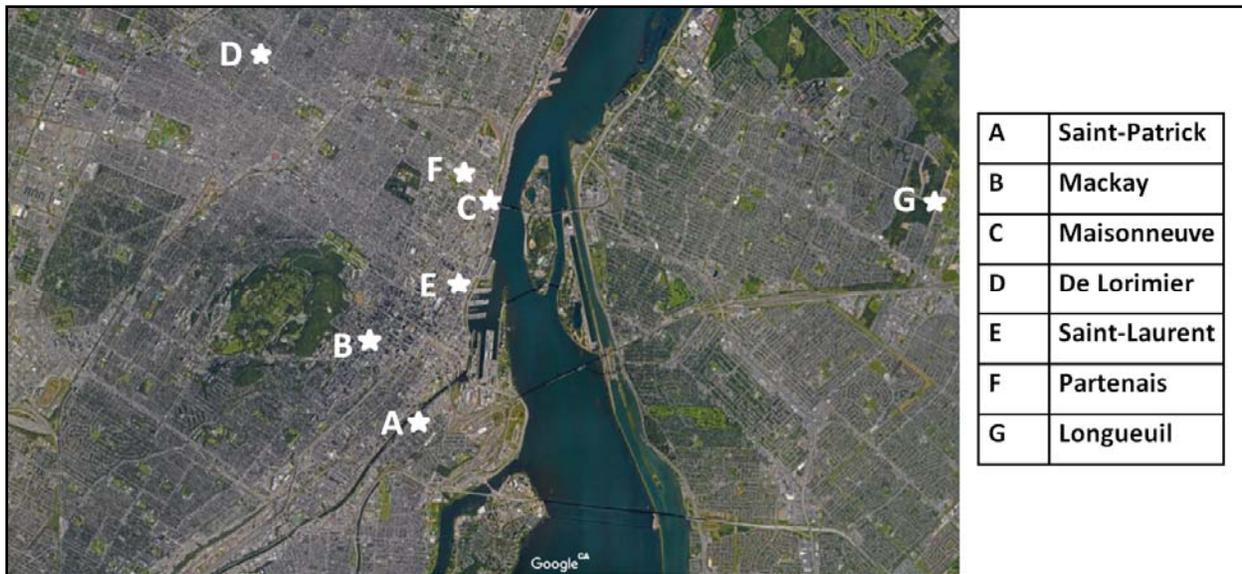


Figure 4-6 Localisation des sites instrumentés pour l'étude comparative du gel entre le RSR et le MG20

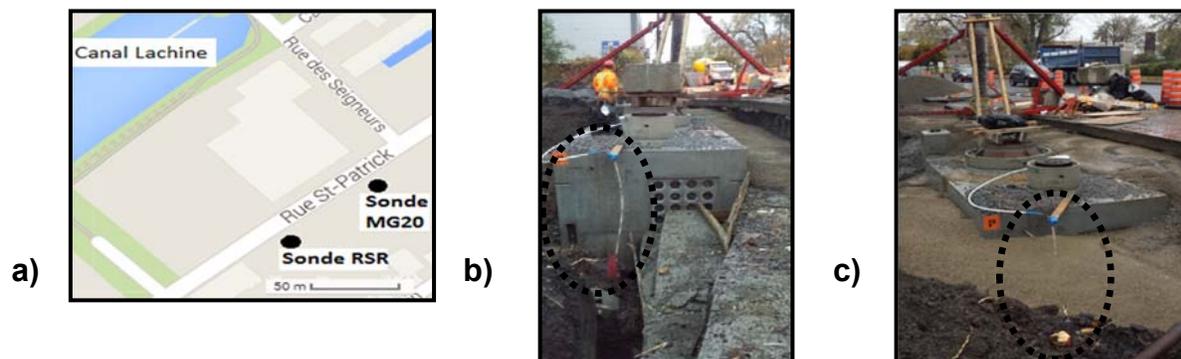


Figure 4-7 Site A : a) vue en plan, b) sonde thermique avant le remplissage, c) remplissage avec deux bétonnières de RSR (mélange Unibéton)

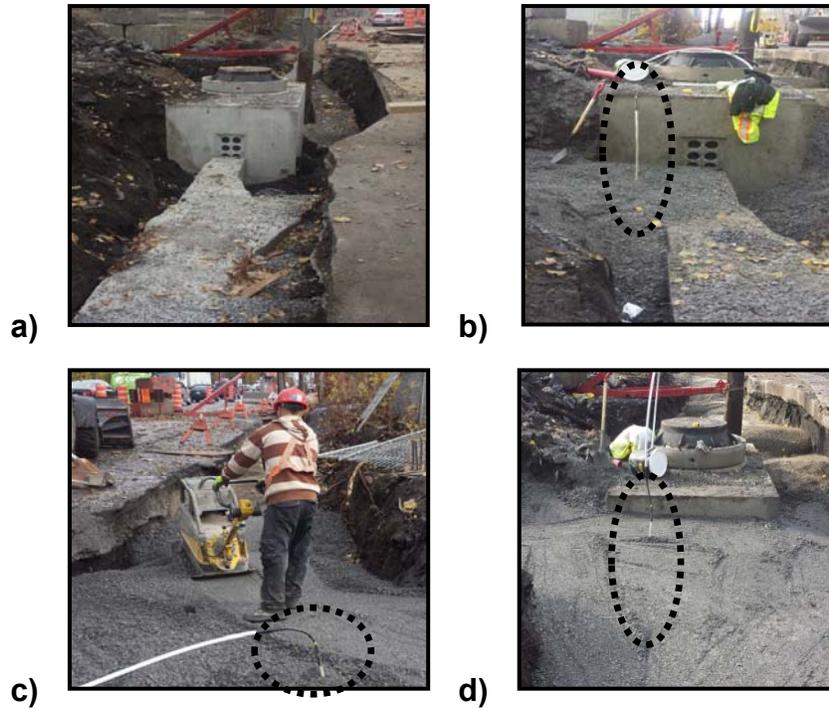


Figure 4-8 Site A, sonde thermique dans le MG20 compacté à la plaque vibrante

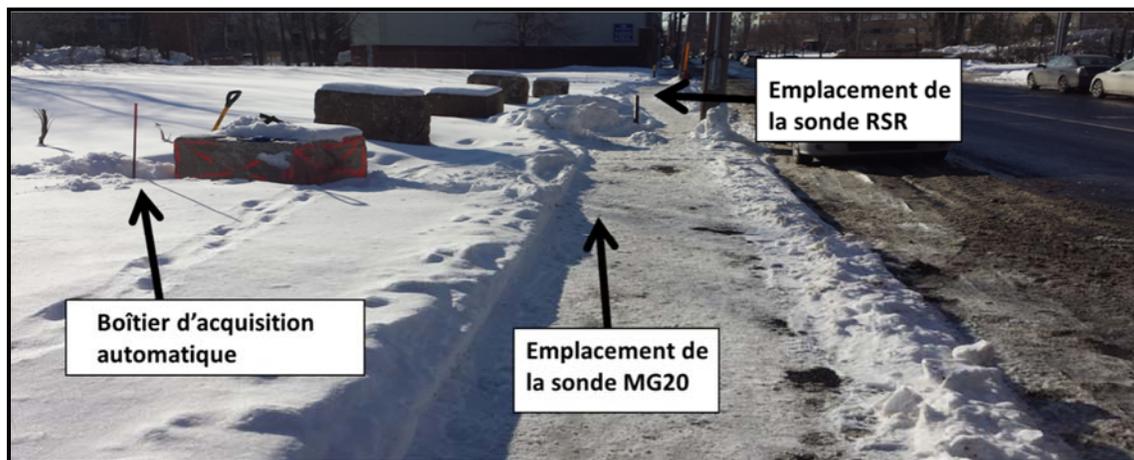


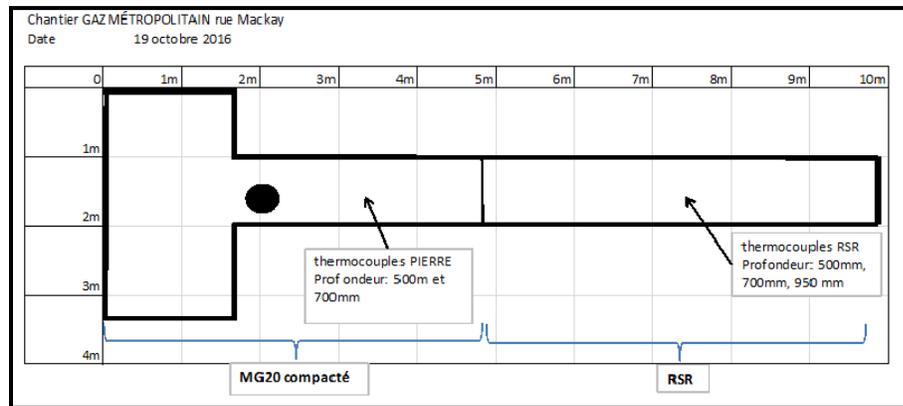
Figure 4-9 Site A, rue Saint-Patrick durant l'hiver (sondes sous les trottoirs déneigés, trottoir temporaire 100 mm enrobé bitumineux)



Figure 4-10 Boîte du rue pour faire la lecture manuelle durant l'hiver des thermocouples (sites B à G)

Le remblai en pierre utilisé était de type MG-20 et a été compacté avec la plaque vibrante à 92-95 %. L'exemple du site de la rue Mackay d'un chantier d'Énergir (appelé à ce moment Gaz Métro) est montré à la Figure 4-11.





c)

Figure 4-11 a) site de la rue Mackay, vue vers le sud, b) emplacement de la tranchée, c) schéma de la tranchée avec le MG20 compacté et le RSR

5. PHASE EXPÉRIMENTALE EN LABORATOIRE

5.1. ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

Tel que mentionné à la section 0, la granulométrie d'un mélange RSR a une influence importante sur son comportement et ses propriétés. Ainsi, une analyse granulométrique des trois mélanges RSR (Demix, Unibéton, BMQ) a été effectuée. Les résultats sont présentés à la Figure 5-1 sur laquelle sont également présentées, à titre comparatif, les exigences du fuseau granulométrique du MG-20 (Bureau de Normalisation du Québec, 2014).

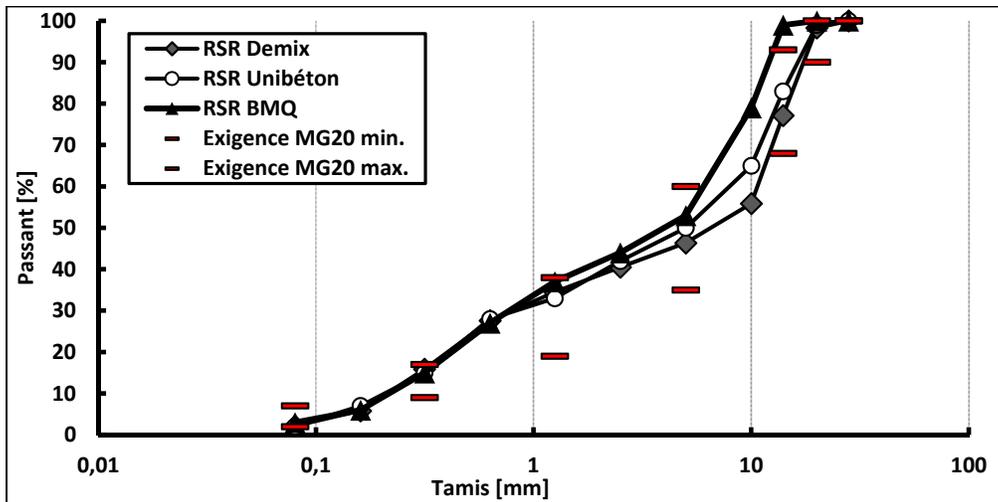


Figure 5-1 Courbe granulométrique des trois mélanges de RSR avec les exigences de la norme NQ 2560-114 pour un matériau de type MG-20

5.2. MASSE VOLUMIQUE MAXIMALE

La masse volumique maximale est une caractéristique essentielle pour la réalisation de travaux de génie civil puisqu'elle permet de fixer une valeur de référence pour un matériau. Ainsi, la masse volumique obtenue en laboratoire ou en chantier est comparée à la valeur de référence et permet de calculer la compacité du matériau en place. À titre indicatif, la valeur de compacité ciblée pour un remblai est de 90 % à 95 % de la masse volumique de référence.

La détermination de la masse volumique maximale en laboratoire nécessite la réalisation de l'essai de compactage Proctor modifié. L'essai consiste à compacter des échantillons d'un même matériau à des teneurs en eau différentes. Pour chaque teneur en eau, un moule Proctor normalisé est rempli en cinq couches, chacune compactée à l'aide du marteau Proctor modifié (25 coups par couche). La masse volumique sèche du matériau est calculée, et ce, pour chaque teneur en eau. La relation teneur en eau vs masse volumique sèche est ensuite tracée, le sommet de la courbe correspondant à la masse volumique maximale sèche et la teneur en eau optimale. À noter que pour les matériaux de type RSR, la détermination de la masse volumique sèche optimale est plus difficile à établir étant donné la présence de ciment dans le matériau. Les résultats des essais Proctor modifiés pour les trois mélanges sont présentés à la Figure 5-2. Il n'a pas été possible de déterminer la masse volumique maximale sèche pour le mélange Demix. Pour les mélanges Unibéton et BMQ, les valeurs de masse volumique maximale sèche sont respectivement de 2,200 kg/m³ et de 2,180 kg/m³. La teneur en eau optimale pour ces deux mélanges est d'environ 5 %.

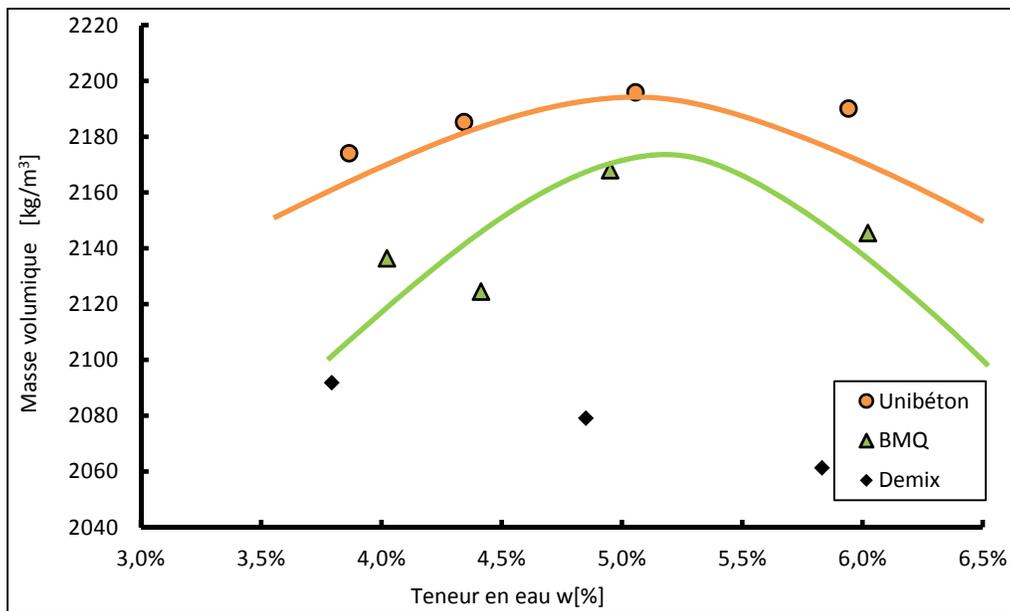


Figure 5-2 Résultats des essais de Proctor modifié pour les trois mélanges RSR

5.3. EFFET DE LA TECHNIQUE DE MISE EN PLACE EN LABORATOIRE SUR LA COMPACTÉ MESURÉE

Dans l'optique d'obtenir la compacité la plus élevée possible en laboratoire, l'effet de la technique de mise en place sur la compacité a été étudié: 1) vibration 2, 4 ou 6 secondes, 2) 5, 10 ou 15 coups de marteau Proctor modifié. Afin d'être représentatif des conditions de mise en place en chantier, le montage d'essai CBR a été modifié afin de permettre le drainage de l'échantillon durant la compaction. La teneur en eau finale du mélange RSR (W_f) est gouvernée par le drainage durant la cure. Cette teneur en eau (entre 7,9 % et 8,3 %) est significativement plus élevée que la teneur en eau optimale obtenue selon l'essai Proctor modifié (5 %).

Les valeurs de compacité calculée selon une masse volumique maximale sèche de 2196 kg/m³ pour les différentes conditions d'essais du mélange Unibéton sont présentées au Tableau 5-1. L'étendue des compacités mesurées est faible, les valeurs varient entre 93,7 % et 94,9 %. La compacité la plus élevée par vibration a été pour la durée de 4 secondes (94,9 %) tandis que la compacité la plus élevée par compactage Proctor a été pour 10 coups (94,8 %). La méthode de mise en œuvre par compactage Proctor 10 coups a été retenue pour la suite du projet pour sa simplicité.

**Tableau 5-1 Valeur de compacité mesurée pour les différentes conditions d'essai
(mélange Unibéton, moule drainé)**

Mise en place	W%	ρ_d (kg/m ³)	ρ_{dmax} Proctor (kg/m ³)	Compacité (%)	W _f (%)
Vibré 2 secondes	8,0	2062	2196	93,9	8,0
Vibré 4 secondes	8,2	2083		94,9	8,2
Vibré 6 secondes	7,9	2064		94,0	7,9
5 coups Proctor	8,3	2060		93,7	8,3
10 coups Proctor	8,0	2081		94,8	8,0
15 coups Proctor	8,2	2059		93,8	8,2

5.4. RÉSULTATS DES ESSAIS DE CBR

Pour la réalisation des essais de CBR en laboratoire, l'essai a été adapté au RSR pour permettre à l'eau contenue dans le CBR de se drainer tel que mentionné à la section 0.

5.4.1. Influence du type de mélange RSR

L'influence du type de mélange RSR sur la valeur CBR a aussi été étudiée. Les trois mélanges RSR qui ont été observés sont: 1) Unibéton, 2) Demix, et 3) BMQ. À titre de rappel, la formulation des mélanges a été présentée à la section 4. Pour les trois mélanges, les fines étaient composées de 1 % de ciment GU plus celles contenues dans les granulats (3 à 4 % au total). Les essais CBR ont été réalisés en début de cure (entre 2 et 5 heures), en milieu de cure (entre 7 et 10 heures) et à plus long terme (entre 24 à 48 heures). Également, des essais de CBR ont été réalisés sur des échantillons en condition drainée et non drainée. En moyenne, la teneur en eau des mélanges au moment de l'essai était de 8,1 % ± 0,5 % (Unibéton), 7,8 % ± 0,4 % (Demix) et 9,0 ± 0,4 % (BMQ). Les résultats des essais CBR # 21 à 61 sont présentés à la Figure 5-3. De façon générale, les valeurs de CBR pour les essais en condition drainée sont supérieures aux valeurs de CBR pour les essais en condition non drainée.

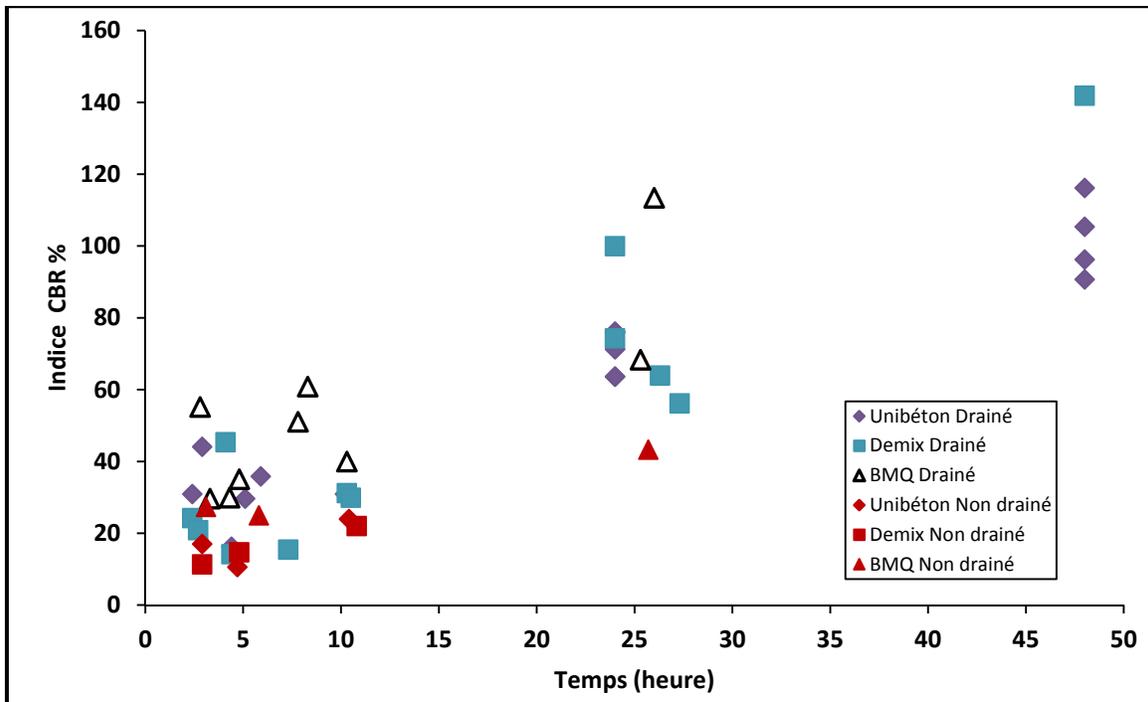


Figure 5-3 Résultats des essais de CBR sur les trois mélanges de RSR étudiés

Les valeurs moyennes de CBR, calculées avec l'équation 4-1, pour les trois mélanges de RSR en fonction du temps et de la condition d'essai ont été reproduites au Tableau 5-2. On remarque que le mélange BMQ est celui qui présente les valeurs de CBR les plus élevées, et ce, dans tous les cas. On constate également que les valeurs de CBR en condition drainée sont nettement supérieures aux valeurs de CBR en condition non drainée. Cela montre clairement la contribution du drainage du mélange RSR sur le gain en CBR. Ainsi, ces observations peuvent être corrélées avec les conditions du milieu récepteur du RSR en chantier. Plus le milieu est perméable, plus le gain en CBR est favorisé.

Tableau 5-2 Valeurs moyennes des CBR (%) pour les trois mélanges RSR en fonction du temps et de la condition d'essai

Périodes	CBR (%) Drainé			CBR (%) Non drainé	
	< 10 hres	24 hres	48 hres	< 10 hres	24 hres
Unibéton	31	44	104	14	--
Demix	26	74	142*	13	--
BMQ	43	91	--	26	43

*Une seule valeur pour cette condition

La nature même des mélanges ainsi que leur teneur en eau initiale peuvent en partie expliquer ces écarts. Le Tableau 5-3 présente les caractéristiques des mélanges suite à la mise en place dans les moules CBR. On y présente la teneur en eau (w%), la masse volumique sèche (ρ_d kg/m³), le rapport sable sur pierre (S/P), le rapport eau sur granulat (E/G) et le rapport-ciment sur granulats (C/G). La mise en place d'un mélange plus fin, plus fluide, et avec une teneur en ciment

élevé va être facilitée. De plus, la prise du mélange sera plus rapide. Le mélange BMQ présente des valeurs de teneur en eau, de rapport S/P, de rapport E/G et C/G plus élevés que les autres mélanges. Ceci peut expliquer le fait que le mélange BMQ ait des valeurs de CBR plus élevées que les autres mélanges. Par la suite, lorsque l'eau se draine de l'échantillon et que la cure avance, l'écart entre les valeurs des CBR s'amenuise.

Tableau 5-3 Caractéristiques des mélanges RSR lors des essais de CBR

Mélange	w % ciblé	ρ_d (kg/m ³)	S/P %	E/(G) %	C/(G) %
Unibéton	8,1	2076	83,7	10,1	1,1
Demix	7,8	2081	72,3	9,8	1,2
BMQ	9,0	2058	90,4	10,6	1,3

5.4.2. Influence des fines du mélange RSR Unibéton en condition drainée

Les analyses granulométriques ont révélé une teneur initiale en fines (passant 80 μ m) de 2 à 3 %. Ainsi, l'influence du type de fines ajoutées dans le mélange RSR sur la valeur de CBR a été étudiée en laboratoire en condition drainée. Pour ce faire, trois différents types de fines ajoutées ont été étudiés : 1) ciment GU (*general use*), 2) ciment prise rapide (*rapid set*), et 3) fines calcaire. Dans les trois cas, l'ajout était de 1 % (massique). Les essais CBR #69 à #124 ont été réalisés à différents intervalles de temps pour suivre l'évolution du CBR en fonction du type de fines sur le squelette granulaire du mélange de RSR Unibéton.

Les Figure 5-4 à Figure 5-6 présentent les résultats de CBR en fonction du temps pour les mélanges RSR avec les trois différents types de fines. Les teneurs en eau initiale (W_i) et finale (W_f) y sont également présentées. La teneur en eau initiale n'est pas l'eau ajoutée initialement au mélange, mais plutôt l'eau dans le RSR au moment de la mise en place, calculée avec le différentiel de teneur en eau dans le sable de drainage. Une partie de l'eau ajoutée initialement au mélange se voit perdue par évaporation durant les 30 minutes de malaxage, et ce, même si des précautions avaient été prises. De plus, la teneur en eau peut varier légèrement d'un moule à l'autre. Avec le détail des données, on constate que la teneur en eau diminue rapidement dans les premières heures.

On constate que dans tous les cas, les valeurs de CBR augmentent avec le temps. La Figure 5-4 illustre les résultats de trois séries d'essais (A1, A2, A3) pour le ciment GU. Pour chaque série d'essais, huit échantillons ont été testés. La différence entre les séries d'essais d'un même type de mélange est la teneur en eau initiale, soit : 1) $W_i=9,4\pm 0,6$ % (série A1), 2) $W_i=10,2\pm 0,9$ % (série A2), et 3) $W_i=10,8\pm 0,4$ % (série A3). Dans ce cas-ci (essai laboratoire dans des petits moules avec drainage vers du sable humide compacté), l'eau s'évacue rapidement ce qui ne ralentit pas l'augmentation du CBR, ce sont alors des **conditions idéales** de laboratoire. La faible amplitude des barres d'erreurs témoigne de la répétabilité et fiabilité de cet essai.

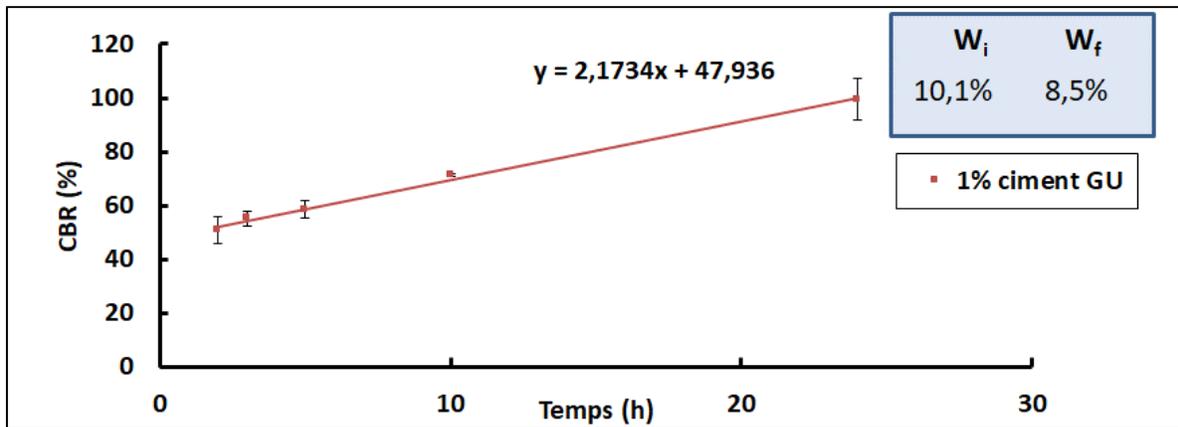


Figure 5-4 Résultats des essais de CBR en fonction du temps pour le mélange RSR Unibéton avec 1 % de ciment GU, séries A1, A2 et A3 (W_i = teneur en eau initiale, W_f = teneur en eau finale)

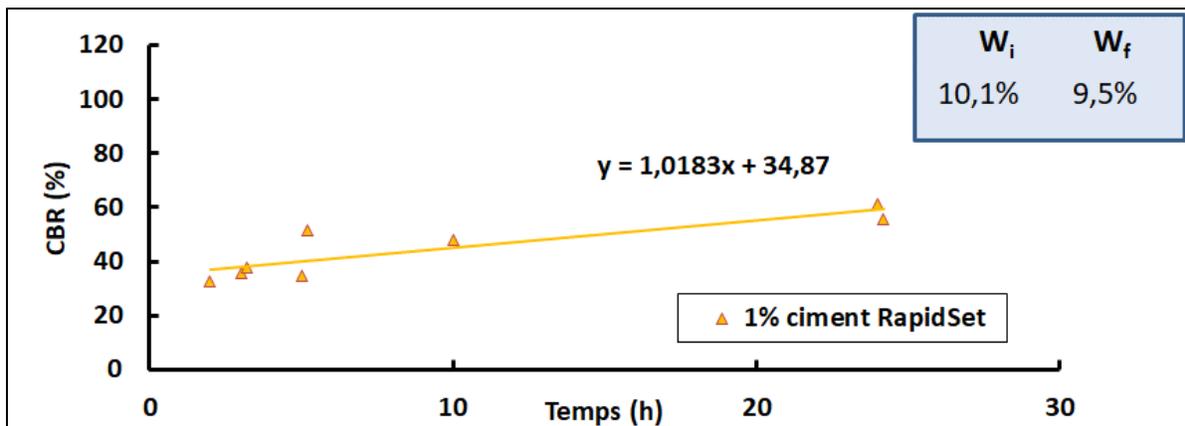


Figure 5-5 Résultats des essais de CBR en fonction du temps pour le mélange RSR Unibéton avec 1 % de ciment prise rapide, série C1 (W_i = teneur en eau initiale, W_f = teneur en eau finale)

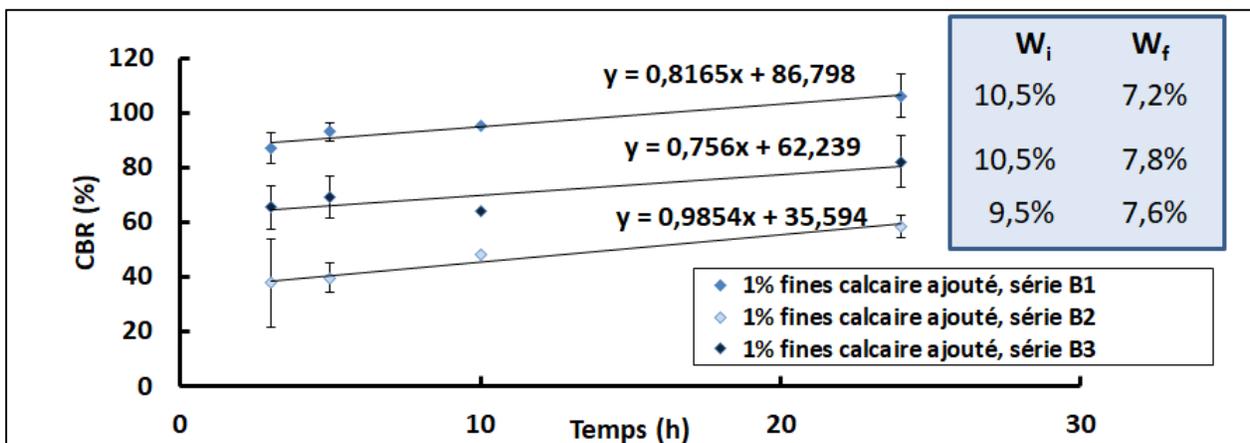


Figure 5-6 Résultats des essais de CBR en fonction du temps pour le mélange RSR Unibéton avec fines de calcaire, séries B1, B2 et B3 (W_i = teneur en eau initiale, W_f = teneur en eau finale)

Pour comparer l'augmentation de la valeur du CBR en fonction du type de fines, les pentes des droites de régression linéaire ont été reproduites dans le Tableau 5-4. S'y retrouvent également les valeurs d'ordonnées à l'origine pour les droites de régression linéaire, ce qui donne une indication sur la valeur initiale du CBR. Les valeurs ont été arrondies au dixième pour fins de présentation et d'analyse. À l'exception du ciment GU, les valeurs des pentes de régression linéaire sont similaires. Cela signifie que l'augmentation du CBR en fonction du temps est comparable pour les mélanges RSR avec ciment à prise rapide et RSR avec fines de calcaire. Dans le cas du RSR avec ciment GU, la valeur de la pente est plus élevée que pour les deux autres types de fines, ce qui veut dire que l'augmentation du CBR pour le mélange RSR avec ciment GU est plus rapide. Concernant les valeurs d'ordonnées à l'origine, on remarque des valeurs différentes pour les trois types de fines testés. La valeur la plus élevée est pour le mélange RSR avec fines de calcaire B1 ce qui indique que c'est ce mélange RSR qui a la valeur de CBR initiale la plus élevée.

Les séries B1, B2 et B3 illustrées à la Figure 5-6 se consolident à la même vitesse (pente équivalente), mais avec des ordonnées à l'origine différentes. Pourtant, le seul changement entre ces séries est la teneur en eau initiale W_i . Celle-ci a donc un impact important sur la valeur CBR pour un mélange RSR avec fines de calcaire. À titre comparatif, les trois séries A1, A2 et A3 avec ciment GU ont des valeurs de CBR similaires. Ainsi, le ciment GU semble jouer un rôle important pour l'homogénéité et la répétabilité de performance des mélanges.

Tableau 5-4 Caractéristiques des droites de régression linéaire des résultats de CBR dans le temps pour les différents types de fines

Type de fines	Régression linéaire	
	Pente	Ordonnée à l'origine
Ciment GU	2,2	47,9
Ciment à prise rapide	1,0	34,5
Fines de calcaire B1	0,8	86,8
Fines de calcaire B2	0,8	62,2
Fines de calcaire B3	1,0	35,6

Les valeurs de teneur en eau initiale et finale des mélanges de même que la variation de teneur en eau sont représentées au Tableau 5-5. Il est à noter que les valeurs les plus élevées de variation de teneur en eau sont associées aux mélanges RSR avec fines de calcaire. Les variations de teneurs en eau pour les mélanges RSR avec ciment sont plus faibles, ce qui porte à croire que les fines de type-ciment (GU et prise rapide) ont une capacité de rétention d'eau supérieure aux fines de calcaire. La Figure 5-7 illustre cette variation de teneur en eau (eau drainée) qui est plus importante pour les mélanges avec fines de calcaire.

Tableau 5-5 Teneurs en eau initiale et finale des mélanges RSR avec différents types de fines

Type de fines	Teneur en eau (%)		
	Initiale (W_i)	Finale (W_f)	Variation
Ciment GU (A1)	9,4	8,1	-1,3
Ciment GU (A2)	10,2	8,6	-1,6
Ciment GU (A3)	10,8	8,8	-2,0
Ciment à prise rapide (C1)	10,1	9,5	-0,6
Fines de calcaire (B1)	10,5	7,2	-3,3
Fines de calcaire (B2)	10,5	7,8	-2,7
Fines de calcaire (B3)	9,5	7,6	-1,9

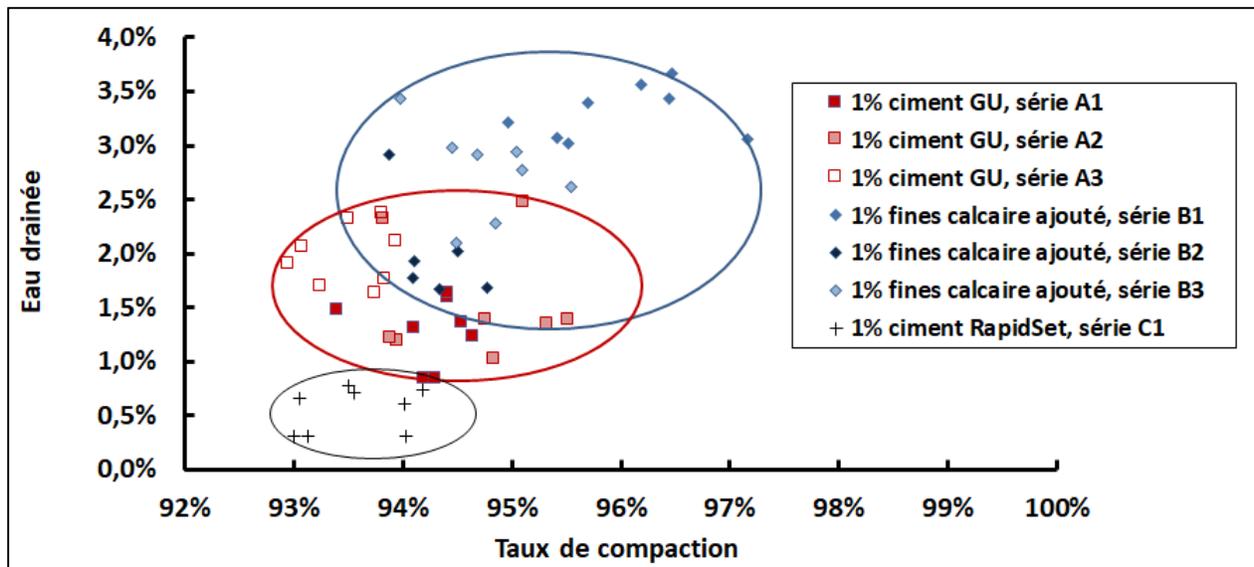


Figure 5-7 Taux de compactation et variation de teneur en eau (eau drainée) durant la cure pour les trois types de fine testés dans le mélange RSR Unibéton

6. PHASE EXPÉRIMENTALE EN CHANTIER

La phase expérimentale en chantier de ce projet a permis de récolter une quantité importante de données sur 23 sites. L'objectif de cette phase était d'observer les pratiques en chantier, de mesurer la rigidité des remblais et de mettre au point une méthodologie de contrôle de la qualité du RSR en chantier.

Dans cette optique, les travaux en chantier ont porté sur:

- L'utilisation de la boule Kelly comme moyen actuel de contrôle de la qualité;
- L'utilisation du pénétromètre comme outil de contrôle de la capacité portante en fonction du temps;
- L'étude de la profondeur de pénétration du front de gel.

Suite à l'analyse des résultats, des recommandations quant à l'utilisation du pénétromètre ont été formulées par rapport à sa capacité à déterminer de façon sécuritaire et rapide le moment d'ouverture de la voie de circulation.

Le temps requis pour le durcissement du RSR avant la réouverture des voies au trafic après la construction peut être estimé à l'aide d'une simulation avec le logiciel Chaussée 2 et des mesures de la variation en fonction du temps de la capacité portante à l'intérieur du RSR.

L'ANNEXE A présente une étude de cas pour l'installation du RSR au centre-ville de Montréal pour l'enfouissement d'une ligne électrique de haute tension de 315 kV.

L'ANNEXE B montre les plans et les photos des sites B à G pour l'étude de la variation de la température dans la structure de la chaussée.

Une fiche de contrôle de la qualité en chantier est proposée à l'ANNEXE C.

L'ANNEXE D rapporte les données de variation de la température au site A, le deuxième hiver.

6.1. RÉSULTATS DES ESSAIS DE BOULE KELLY

Des essais de contrôle des RSR avec la boule Kelly ont été réalisés sur quatre chantiers. Les résultats sont présentés à la Figure 6-1 où l'on retrouve également les exigences des devis de la CSEM et de la Ville de Montréal, respectivement représentés par les zones colorées en rouge et noir (CSEM); Ville de Montréal, 2008). On remarque qu'aucune courbe d'enfoncement en fonction du temps pour les mélanges RSR des quatre chantiers ne se retrouve dans la zone rouge, ce qui signifie qu'aucun des mélanges ne respecte les exigences du devis de la CSEM. En ce qui concerne les exigences du devis de la ville de MTL, les résultats des chantiers 1 et 2 respectent ces exigences puisque les courbes de résultats se retrouvent dans la zone noire.

Il est important de mentionner que cette manière d'apprécier la capacité portante d'un mélange RSR en chantier est sujette à des variations causées par la compétence de l'opérateur et à la précision de la mesure de la profondeur de l'enfoncement. De plus, les exigences des différents devis sont subjectives et varient de façon importante. Finalement, l'essai de boule Kelly est un essai qui permet d'apprécier la capacité portante d'un mélange RSR seulement en surface, et donc ne donne aucune indication sur ce qui se passe en profondeur.

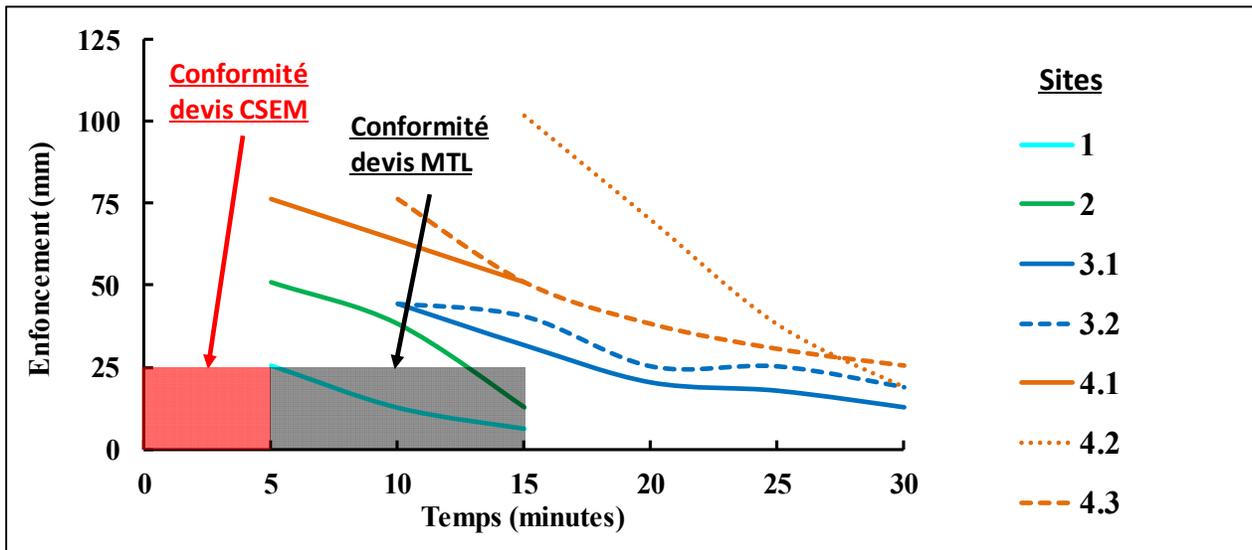


Figure 6-1 Résultats des essais de boule Kelly en fonction du temps pour les quatre chantiers, exigences des devis de la CSEM et de la Ville de Montréal

6.2. RÉSULTATS DES ESSAIS DE PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE PORTATIF (DCPT)

Des essais de pénétromètre ont été réalisés sur un total de 23 sites (plus de 400 essais). L'emplacement des différents chantiers ainsi que le type de matériau testé sont présentés au Tableau 6-1. Un résumé des résultats et des observations seront présentés dans les sections suivantes.

Tableau 6-1 Emplacement des chantiers pour les essais de DCPT et matériau testé

No. de chantier	Emplacement	Mélange RSR
1	Jarry	Unibéton
2	Saint-Patrick #1	Unibéton
3	De la Montagne	Demix
4	Saint-Patrick #2	Unibéton
5	Saint-Antoine	Demix
6	René-Levesque	Demix
7	Place Desjardins	Demix
8	Laprairie	Unibéton
9	Saint-Patrick #3	Unibéton
10	Saint-Christophe	Demix
11	Des Seigneurs	Unibéton
12	Visitation	Demix
13	Bishop	Unibéton
14	Murray	Unibéton
15	Bourget	Demix
16	Rose de Lima	Demix
17	Hochelaga	Unibéton
18	Ropery	Unibéton
19	De Maisonneuve	MG20
20	Atwater	Unibéton
21	Place Versailles	Unibéton
22	Sherbrooke	Unibéton
23	Tranchées expérimentales	BMQ

6.2.1. Interprétation des résultats d'un essai de DCPT : chantier *De la Montagne*

Il est possible de tracer les résultats de l'indice de pénétration mesuré en fonction de la profondeur de l'essai. Sur le site *De la Montagne*, des essais de pénétration ont été réalisés à différents intervalles de temps. Sur la Figure 6-2, l'abscisse représente l'indice de pénétration mesurée et l'ordonnée représente la profondeur de la mesure. Sur cette figure, on remarque l'effet de la rigidification (durcissement) du RSR qui se traduit par un indice de pénétration plus faible (moins d'enfoncement par coup). L'effet de la rigidification est le plus marqué par rapport aux mesures effectuées après 22 heures. Par la suite, l'effet de la rigidification s'amenuise.

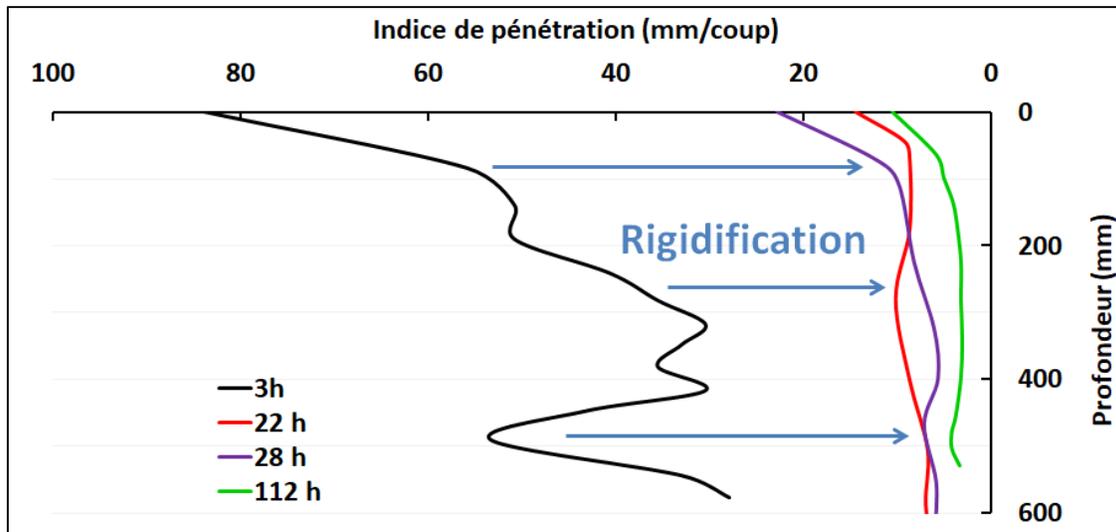


Figure 6-2 Indices de pénétration en fonction de la profondeur pour le chantier *De la Montagne*, mesures réalisées à différents intervalles de temps

La conversion des valeurs d'IP en indice CBR peut se faire avec l'équation (4-1). Par la suite on peut tracer le graphique des valeurs de CBR en fonction de la profondeur, ce qui permet d'avoir une meilleure interprétation des résultats et de faire une corrélation entre les résultats de chantier et ceux de laboratoire. La Figure 6-3 illustre l'indice CBR en fonction de la profondeur pour le chantier *De la Montagne*, et ce, à différents intervalles de temps. Une augmentation de la valeur de CBR correspond à une augmentation de la rigidité du RSR. Les résultats sont ensuite traités en termes de CBR moyen, pour un essai sur toute la profondeur, et exprimés en fonction du temps, tel que l'illustre la Figure 6-4. L'évolution du CBR en fonction du temps peut ensuite être tracée. (Figure 6-5).

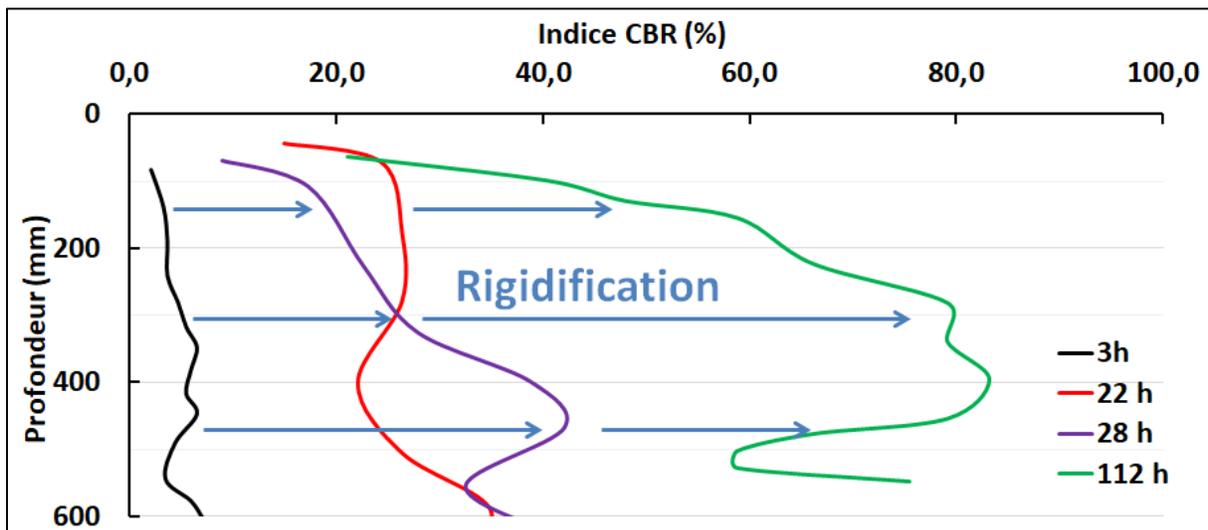


Figure 6-3 Indice CBR en fonction de la profondeur pour le chantier *De la Montagne*, mesures réalisées à différents intervalles de temps

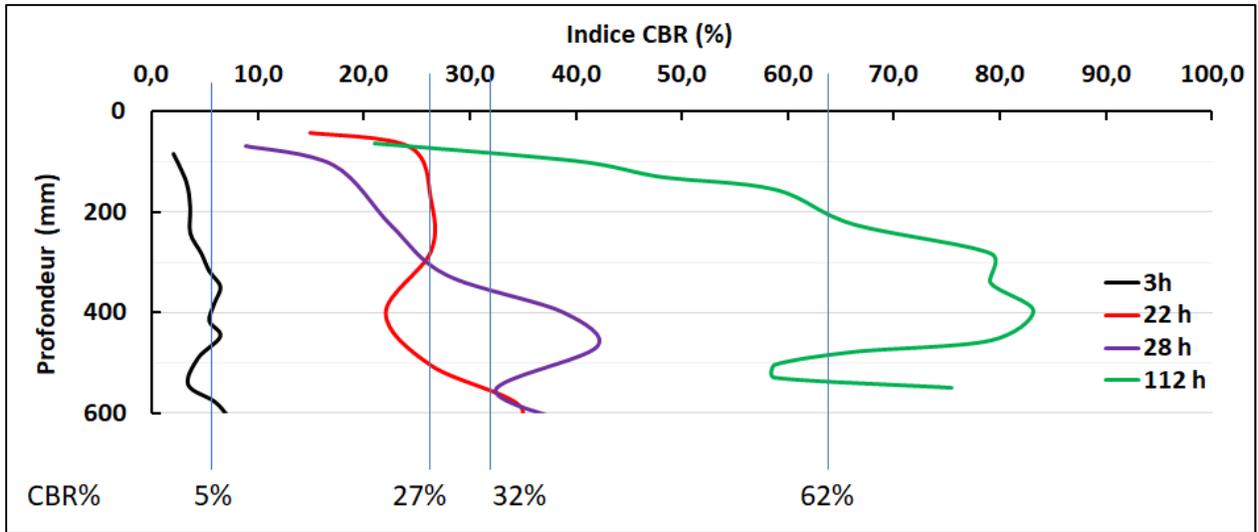


Figure 6-4 Représentation de l'indice CBR moyen en fonction de l'intervalle de temps de mesure

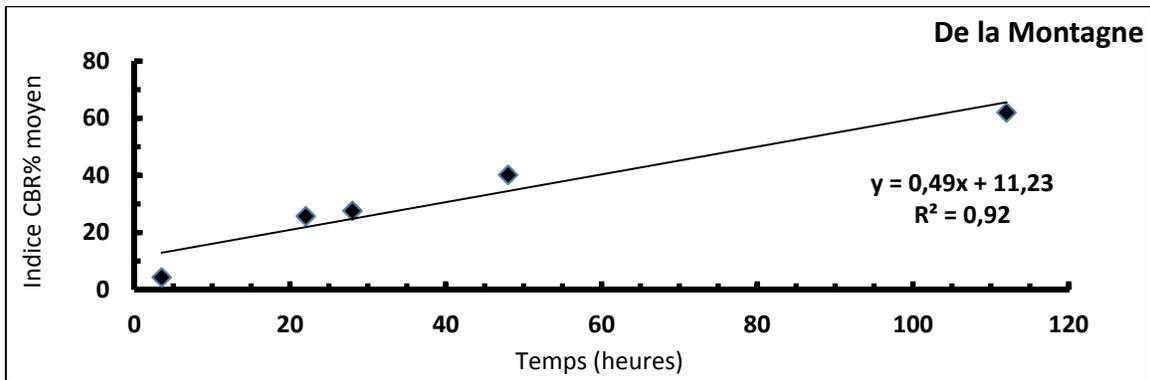


Figure 6-5 Indices CBR moyens (sur toute la profondeur) en fonction du temps pour le chantier *De la Montagne*

6.2.2. Influence du temps de cure sur l'indice de pénétration (IP)

Tel qu'observé lors de la phase expérimentale en laboratoire, le temps de cure est un facteur majeur dans la consolidation et la rigidification des mélanges RSR. La Figure 6-6 présente les indices CBR moyens d'une seule couche de 600 mm des séries A et B du chantier Saint-Christophe (mélange RSR Demix).

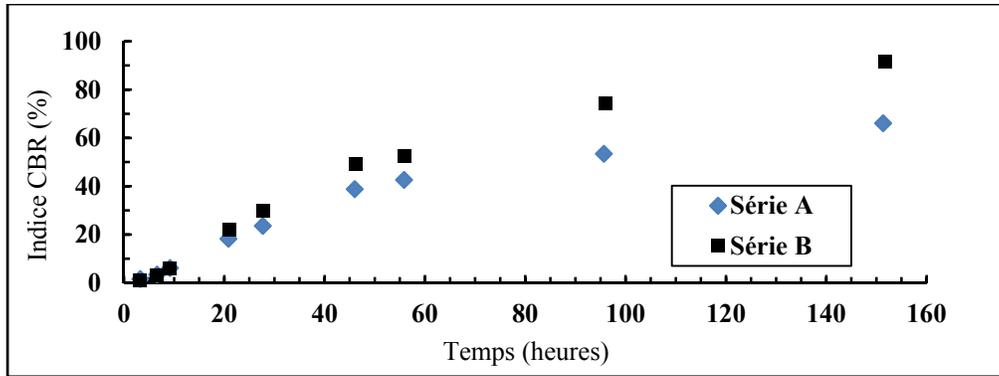


Figure 6-6 Indice CBR en fonction du temps de cure chantier Saint-Christophe (mélange Demix)

La Figure 6-7 montre les mêmes résultats exprimés en module résilient (M_r) calculés avec la formule (4-2). Contrairement à la figure précédente qui est plutôt linéaire de 0 à 48 heures, celle-ci augmente rapidement dans les premières 48 heures et ralentit ensuite. Cette présentation permet de voir que le remblai a une résistance d'environ 50 MPa après 3 heures de cure. Sur la figure précédente, il était difficile de voir cette information, car un module de 50 MPa équivaut à un CBR de 1 à 2 %.

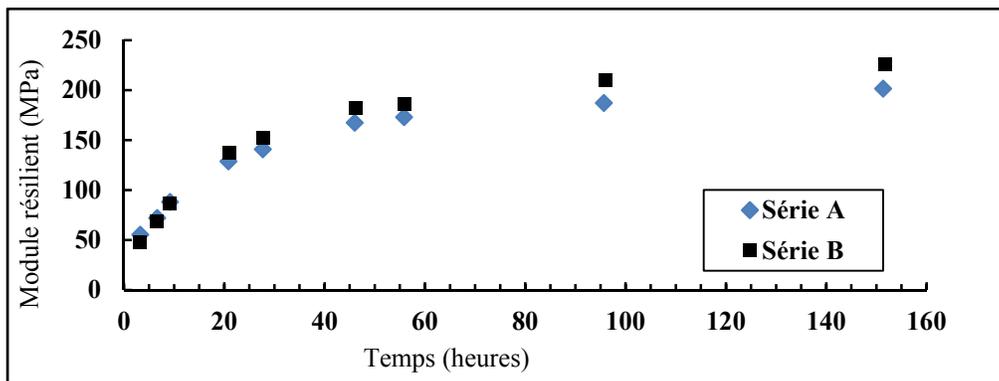


Figure 6-7 Module résilient en fonction du temps de cure chantier Saint-Christophe (mélange Demix)

6.2.3. Influence de la profondeur d'essai DCPT

Les figures suivantes sont exprimées en indice CBR afin d'alléger l'analyse. Les résultats de module résilient moyens de tous les essais sont présentés plus loin au Tableau 6-3. Les figures suivantes ont été construites avec des moyennes sur 200 mm pour chacun des essais DCPT réalisés, plutôt qu'une moyenne sur 600 mm. La figure 6.8 présente les mêmes mesures (chantier Saint-Christophe) sans faire la distinction entre série A et série B. Les résultats sont exprimés en indice CBR de façon séparée pour les profondeurs de 200 mm, 400 mm et 600 mm. Des droites de régression linéaire ont été tracées pour chacune des profondeurs afin de vérifier la corrélation entre l'augmentation du CBR par rapport au temps. Il y a une forte corrélation pour les profondeurs de 200 mm et 400 mm, les facteurs R^2 étant de 0,96 et 0,89 respectivement. Pour la profondeur de 600 mm, la corrélation s'avère moins bonne ($R^2 = 0,78$).

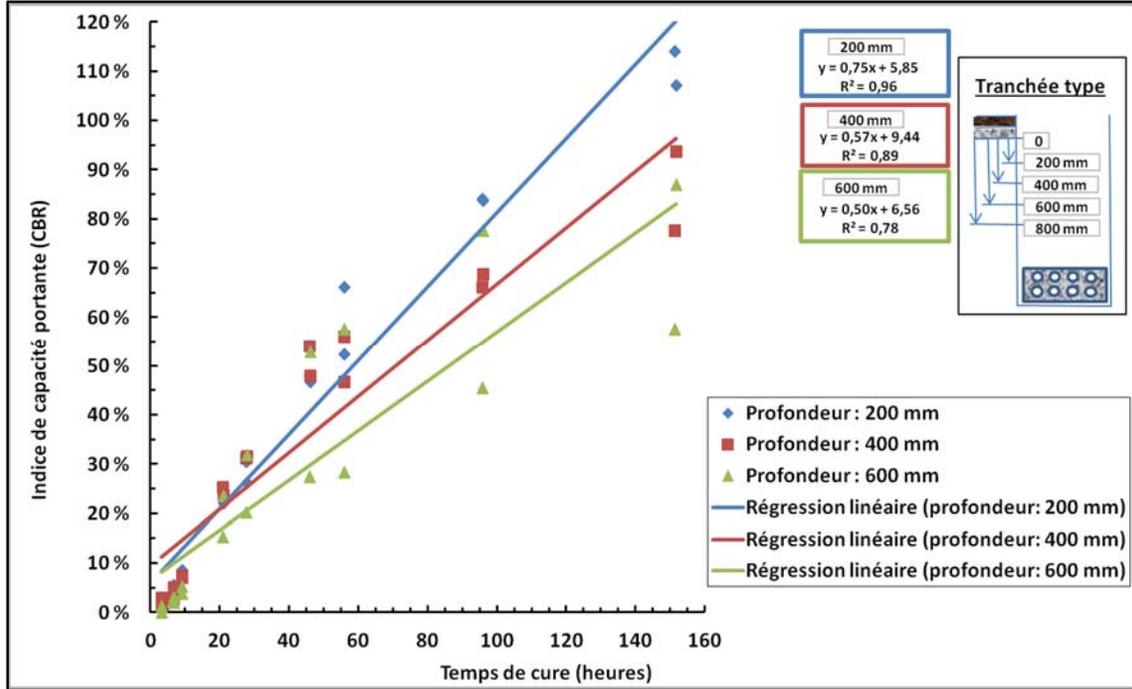


Figure 6-8 Indices CBR en fonction du temps de cure pour différentes profondeurs mesurées au pénétromètre, chantier Saint-Christophe (mélange Demix)

6.2.4. Influence de la profondeur d'essai DCPT et l'eau

Afin d'expliquer la corrélation moins bonne en profondeur, la configuration de la série A et de la série B est montrée à la Figure 6-9. La série A représente les essais qui ont été faits dans la tranchée vis-à-vis la zone où s'écoule l'eau comparativement à la série B. Les Figure 6-10 et Figure 6-11 présentent les résultats des deux séries d'essais pour ce chantier de façon séparée. Pour la série d'essais A (Figure 6-10), il est à noter que les résultats de CBR diminuent en fonction de la profondeur. Pour la série d'essais B (Figure 6-11), les résultats de CBR sont très similaires, et ce, pour les trois différentes profondeurs. Un rapport de caractérisation des sols à cet endroit faisait état de sable fin, brun, sec et humide.

Le fait que les résultats de la série A diminuent avec la profondeur peut s'expliquer par le fait que l'écoulement de l'eau se faisait vers la section A. Ainsi, ce surplus d'eau tarde à se drainer et diminue la rigidité de cette section de tranchée. À noter que dans tous les cas, les facteurs de corrélation R^2 sont très bons (0,92 en moyenne), même à la profondeur de 600 mm, ce qui indique une corrélation forte entre l'augmentation du CBR en fonction du temps.

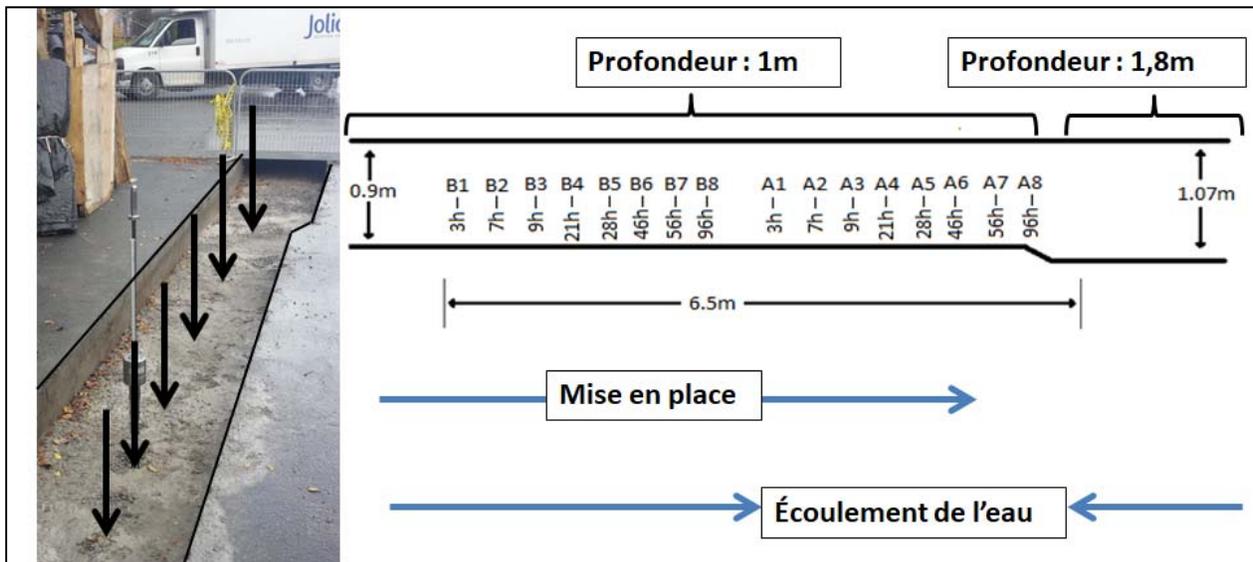


Figure 6-9 Configurations des essais DCPT du chantier Saint-Christophe

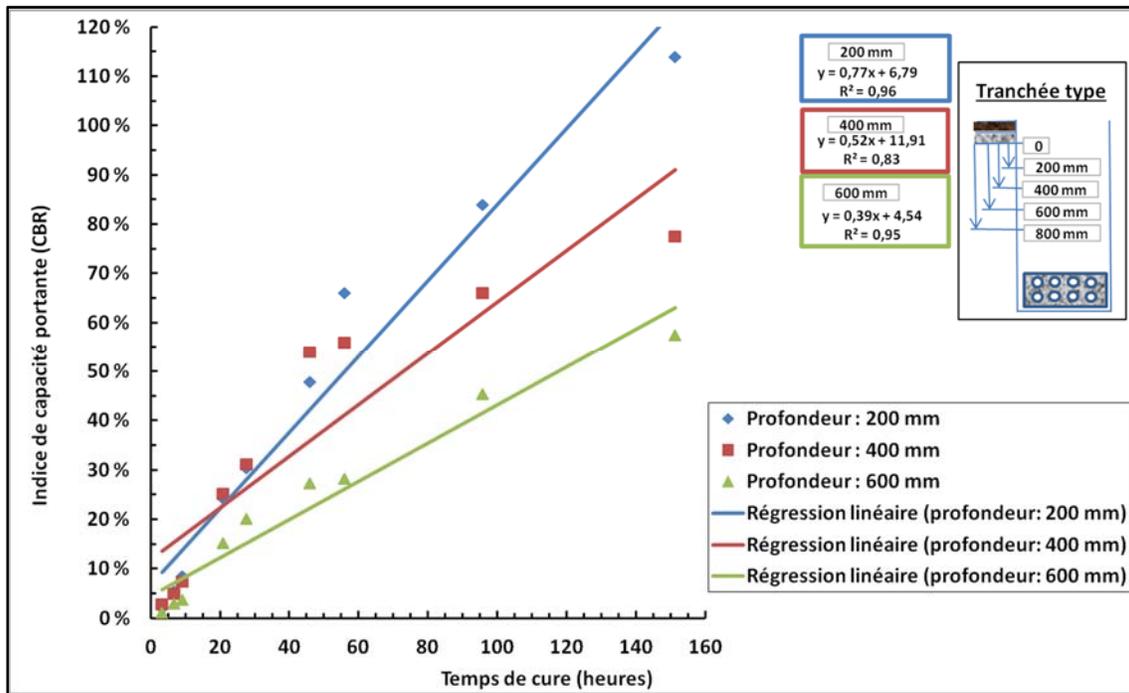


Figure 6-10 Indices CBR en fonction du temps de cure pour différentes profondeurs mesurées au pénétromètre, chantier Saint-Christophe, série d'essais A (mélange Demix)

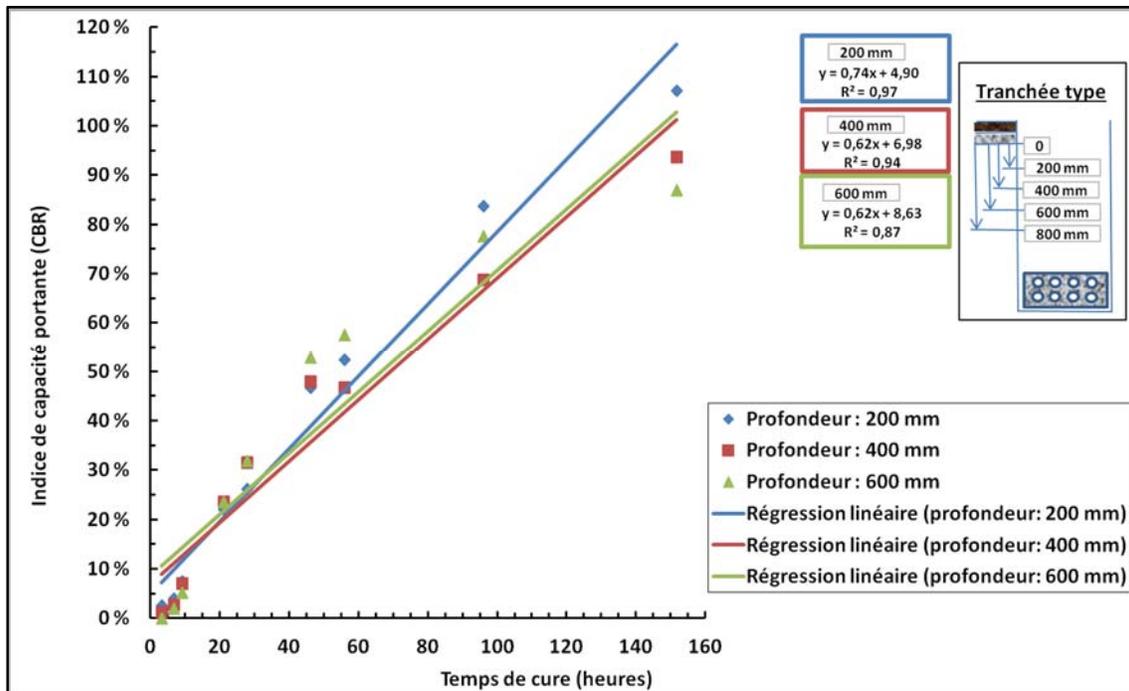


Figure 6-11 Indices CBR en fonction du temps de cure pour différentes profondeurs mesurées au pénétromètre, chantier Saint-Christophe, série d'essais B (mélange Demix)

On peut très bien constater l'effet de la présence d'eau de drainage pour la série d'essais A. L'effet (différence de capacité portante exprimée par l'indice CBR) est visible, mais il n'est pas possible de conclure qu'à long terme il y aura une très grande différence. Les tendances montrent des CBR de 60 % versus 100 % qui se traduisent par des modules résilients de 200 MPa versus 230 MPa. Cette différence pourrait être due seulement par la différence de teneur en eau, sans que la masse volumique des matériaux ne soit changée. Les performances des matériaux une fois la teneur en eau uniformisée devrait être égale.

De façon générale, il y a une forte corrélation qui existe entre l'augmentation de l'indice CBR mesurée en fonction du temps pour les mélanges RSR en chantier lorsque les conditions de drainage sont les mêmes.

6.2.5. Influence du milieu récepteur et du type de mélange RSR

Afin d'apprécier tous les essais réalisés, des figures ont été tracées en regroupant des essais de plusieurs chantiers avec un même mélange. Puisque les résultats proviennent de divers chantiers, on peut conclure que les milieux récepteurs sont différents d'un chantier à l'autre.

La dispersion des résultats montre l'effet du milieu récepteur (caractéristiques et conditions de l'excavation au chantier), de la formulation du RSR et de la variabilité selon la période de livraison.

Les Figures 6-12, 6-13 et 6-14 présentent les résultats d'essais CBR pour les chantiers réalisés avec le mélange Demix et Unibéton respectivement. Dans les trois cas, les valeurs d'indice CBR varient de façon importante en fonction d'un temps de cure donné. De plus, les facteurs de corrélation R^2 indiquent une corrélation de moyenne (0,70) à passable (0,50) entre l'augmentation du CBR en fonction du temps de cure. À titre de rappel, les facteurs de corrélation observés lorsque l'on considère un seul chantier (Figure 6-8, Figure 6-10 et Figure 6-11) indiquent une corrélation forte. Lorsque les résultats de plusieurs chantiers sont mis en commun, la corrélation obtenue est moins bonne. Cela traduit donc un effet marqué du milieu récepteur sur le développement du CBR en fonction du temps. La perméabilité du milieu récepteur de même que sa teneur en eau sont des facteurs qui influencent la vitesse de drainage et le phénomène d'autocompaction. À titre indicatif, voici deux exemples de conditions favorables et défavorables :

- Condition **favorable**: tranchée étroite (< 900 mm) à travers une structure de chaussée en remblai de pierre plutôt sèche;
- Condition **défavorable**: tranchée large et profonde à travers une structure de chaussée humide avec précipitations de pluie récente.

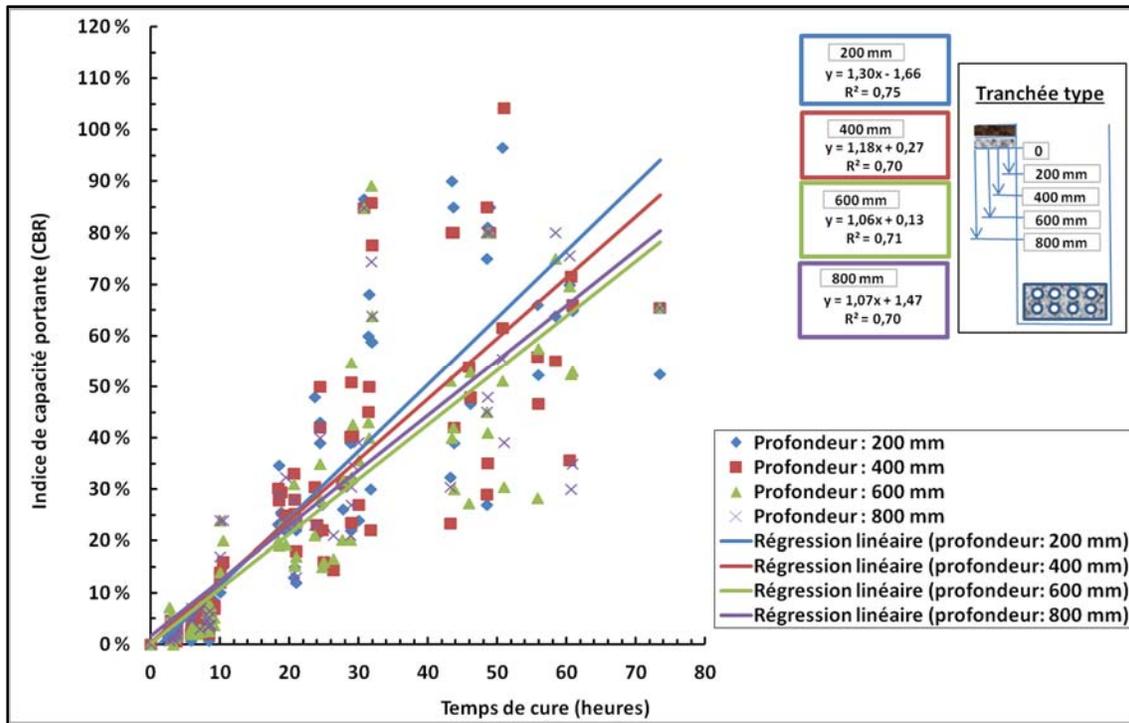


Figure 6-12 Indice de capacité portante à quatre profondeurs différentes pour les chantiers Saint-Antoine, René-Levesque, Place Desjardins, Saint-Christophe et Visitation (mélange Demix)

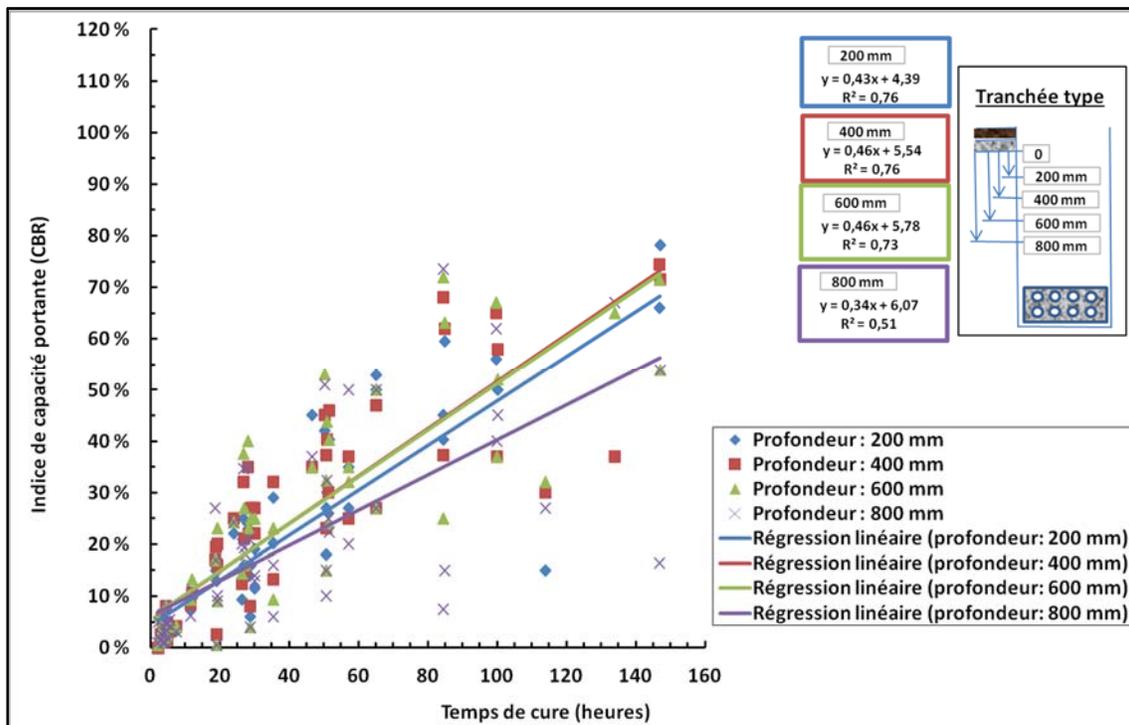


Figure 6-13 Indice de capacité portante à quatre profondeurs différentes pour les chantiers Saint-Patrick #1 et #2, Laprairie, Des Seigneurs (mélange Unibéton)

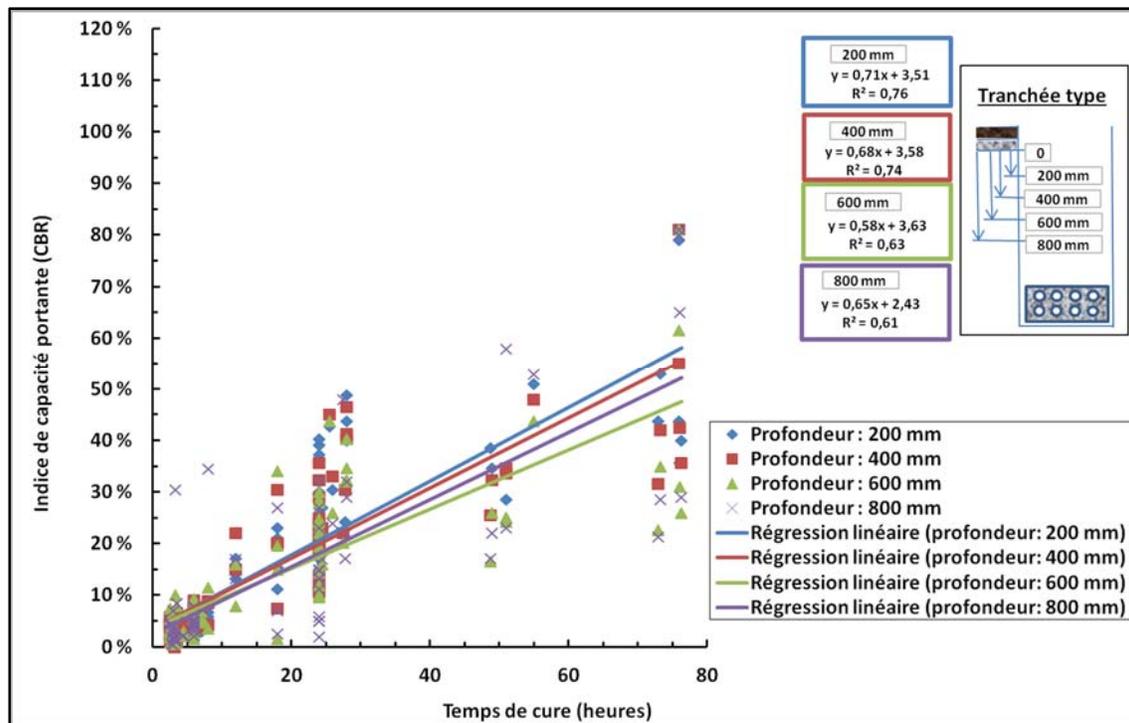


Figure 6-14 Indice de capacité portante à quatre profondeurs différentes pour les chantiers Bishop, Murray, Hochelaga, Ropery, Atwater, Place Versailles et Sherbrooke (mélange Unibéton)

Pour qu'un mélange RSR durcisse de façon idéale, l'eau qui y est contenue doit pouvoir s'évacuer d'où l'importance des conditions de drainage de l'endroit de mise en place. De plus, les précipitations sous forme de pluie et le ruissellement de l'eau de pluie peuvent affecter la performance du RSR (effet de lessivage, augmentation de la teneur en eau du mélange) tout comme l'eau qui s'infiltré par des ouvertures dans n'importe quelle tranchée.

Ainsi, la Figure 6-15 illustre l'effet de précipitations sous la forme de pluie sur l'indice CBR. La pluie, et donc un apport supplémentaire en eau, engendre une diminution de l'indice CBR. Par la suite, lorsque l'eau se draine, l'indice CBR continue d'augmenter. On peut ainsi croire que l'effet d'une pluie sur le durcissement d'un mélange RSR allonge le temps nécessaire à la cure du mélange. Mais, aucune des données analysées n'indiquent que la performance serait affectée de façon négative.

La température ambiante est aussi un facteur important qui ralentit le drainage de l'eau dans le mélange RSR. Si les parois de l'excavation sont gelées, la perméabilité de celle-ci est très faible ce qui ne favorise pas le drainage de l'eau contenue dans le RSR. Toutefois, un coussin de pierre nette peut améliorer le drainage.

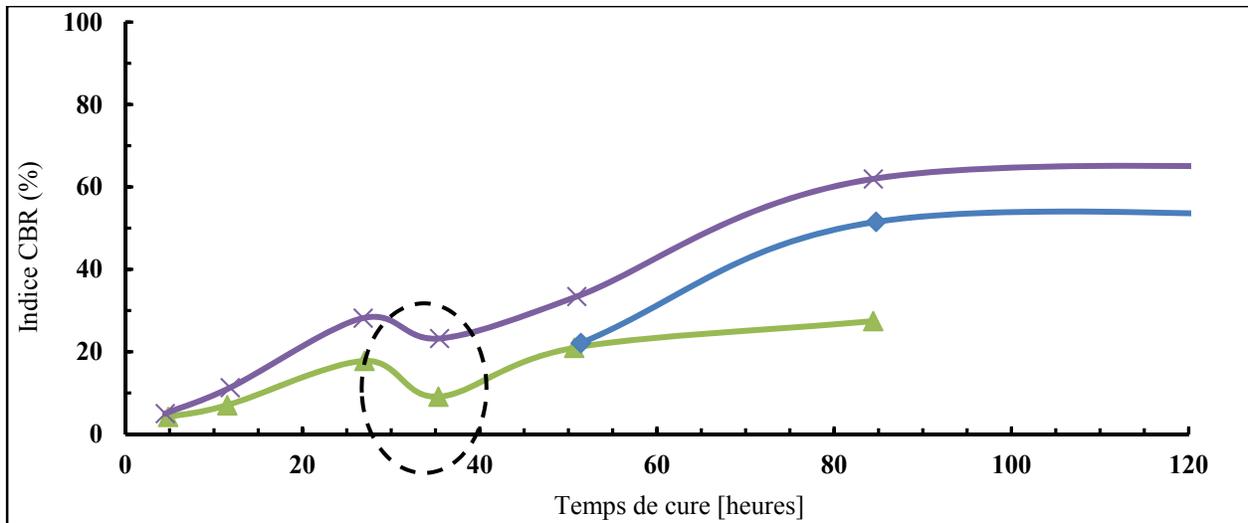


Figure 6-15 Effet de précipitations sous forme de pluie sur l'indice CBR, moyenne de 0-600 mm (site Des Seigneurs, mélange Unibéton)

Pour mettre en relief l'impact du type de matériau de la tranchée d'excavation, et donc de la perméabilité du milieu récepteur, les indices CBR en fonction du temps pour le chantier Place-Desjardins et le mélange Demix à trois endroits différents ont été tracés sur la Figure 6-16. Les matériaux de la paroi Nord étaient de type drainant (MG20) tandis que la paroi Sud était constituée de matériaux silteux argileux, et donc avec une perméabilité faible. Une différence importante a été observée sur l'indice CBR en fonction du temps pour les divers milieux récepteurs. Cette différence (CBR 20 % versus CBR 80 %) au même temps se traduit par un module résilient de 140 MPa versus 215 MPa. Il est donc important de tenir compte du milieu récepteur en place afin d'estimer un temps de cure.

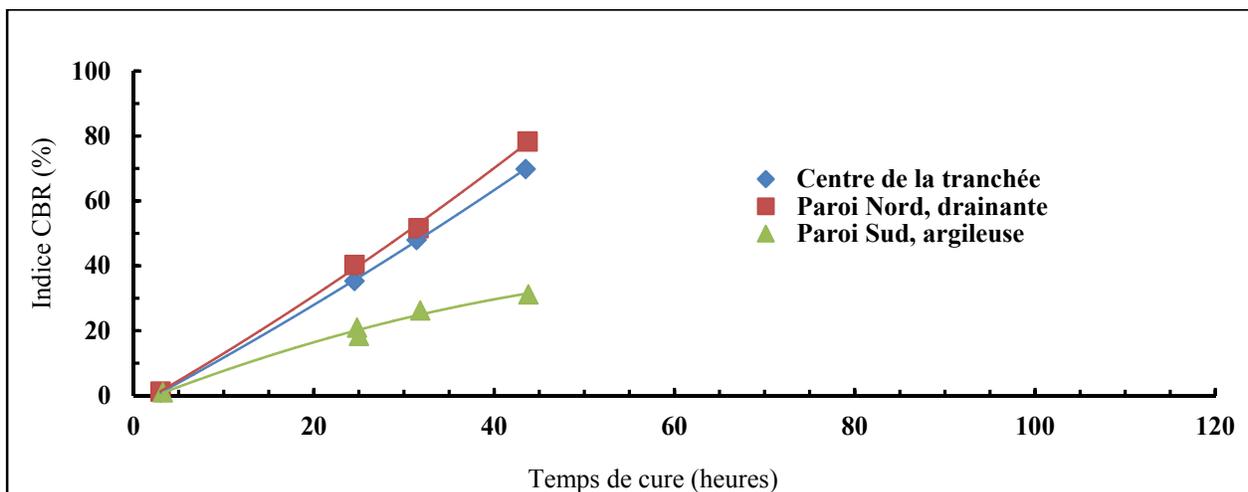


Figure 6-16 Effets du type de matériau encaissant dans l'excavation sur l'indice CBR (site Place Desjardins, mélange Demix)

Les Tableaux 6-2 et 6-3 résument plus de 100 essais de DCPT exprimés sous la forme d'indice CBR et de module résilient respectivement. On remarque que les deux matériaux (Demix et Unibéton) ont obtenu des performances minimales, moyennes et maximales presque identiques.

Tableau 6-2 Résumé des indices CBR des essais DCPT en chantier

Mélange	Minimum	Moyenne	Maximum	Nombre d'essais
Demix				
3 h	1,0	2,7 ±1,3	7,1	27
24 h	14,9	32,7 ±12,7	82,0	27
Unibéton				
3 h	1,0	3,8 ±1,8	10,0	46
24 h	12,6	26,4 ±7,9	48,8	38

Tableau 6-3 Résumé des indices CBR des essais DCPT en chantier convertis en modules résilients

Mélange	Minimum	Moyenne	Maximum	Nombre d'essais
Demix				
3 h	47	66 ± 10	92	27
24 h	120	158 ± 20	217	27
Unibéton				
3 h	47	75 ± 12	104	46
24 h	113	146 ± 15	181	38

6.3. ÉTUDE SUR LA PROFONDEUR DU FRONT DE GEL AVEC LES MÉLANGES RSR

Tel que mentionné précédemment, il est de croyance populaire que l'utilisation de mélange RSR augmente le risque de gel des conduites. Ainsi, des tranchées sur sept différents sites ont été instrumentées. Tous les sites avaient un remblai témoin en pierre compactée pour comparer la pénétration du front de gel des tranchées remblayées avec mélanges RSR avec les tranchées remblayées avec remblai en pierre compactée (Figure 4-6). Dans un premier temps, la discussion portera sur le chantier de la rue Saint-Patrick où l'acquisition de données s'est faite de façon automatisée lors de l'hiver 2015-2016. Elle portera ensuite, sur les autres chantiers où l'obtention de données s'est faite quant à elle, de manière ponctuelle et manuelle.

6.3.1. Chantier de la rue Saint-Patrick (site A)

Le premier chantier instrumenté était celui de la rue Saint-Patrick (site A). L'enregistrement des données de températures dans le sol était prévu pour une période initiale de deux hivers consécutifs. Malheureusement, un bris d'équipement est survenu après le premier hiver, ce qui a limité la quantité de données obtenue. L'acquisition de données de température s'est faite de façon automatisée du 19 novembre 2015 au 18 mars 2016 aux profondeurs suivantes sous la surface de chaussée: 1) 66 cm, 2) 146 cm et 3) 206 cm. Suite au bris, les appareils ont été réparés, mais l'analyse des données a révélé de nombreuses anomalies. Même s'il n'y avait pas eu de bris, les données du premier hiver avaient l'avantage de n'avoir aucun transit électrique (chaleur et interférences électromagnétiques) dans les conduits du massif de béton enfouis et dans le puits d'accès.

La Figure 6-17 présente les températures à 66 cm sous la surface de la chaussée. La ligne pointillée grise représente la température moyenne extérieure qui est à la baisse à mesure que l'hiver progresse. Les unités secondaires (ligne verticale gris pâle) pour les valeurs en abscisses sont de 15 jours. Les valeurs de température moyenne pour le MG-20 et le RSR sont représentées par les lignes pleines grises et noires, respectivement. On remarque que pour la première période de 15 jours, les températures moyennes pour le MG-20 sont légèrement supérieures aux températures moyennes pour le RSR, avec un écart maximal de 1,5 °C. Cet écart correspond à la température de pose des matériaux au début du mois de janvier et s'amenuise au fur et à mesure que l'hiver progresse.

Une région en début de graphique est identifiée avec un cercle pointillé qui correspond à la chaleur de pose (23 novembre) d'un enrobé bitumineux utilisé comme trottoir temporaire sur cette section de rue. Cette chaleur de surface uniforme a causé une hausse des températures dans les deux matériaux, légèrement supérieure ($\approx 1,5^{\circ}\text{C}$) dans le MG20. Les températures moyennes pour les deux types de matériaux sont ensuite similaires.

Pour les mesures de températures réalisées aux profondeurs de 146 cm (Figure 6-18) et 206 cm (Figure 6-19), on observe également l'écart entre les valeurs moyennes de températures du MG-20 et du RSR lié à la température de pose des matériaux. Or, pour ces deux profondeurs, l'écart maximal entre les valeurs moyennes de températures pour le MG-20 et le RSR est de l'ordre de 1 °C. Par la suite, après la période initiale de 15 jours, l'écart entre les valeurs moyennes de température s'amenuise et les températures sont alors similaires pour les deux types de matériaux. Selon les données obtenues sur le site de Saint-Patrick (site A), une conclusion se dégage à l'effet que la profondeur du front de gel sur une tranchée remblayée

avec RSR est similaire à une tranchée remblayée avec du remblai granulaire conventionnel de type MG-20.

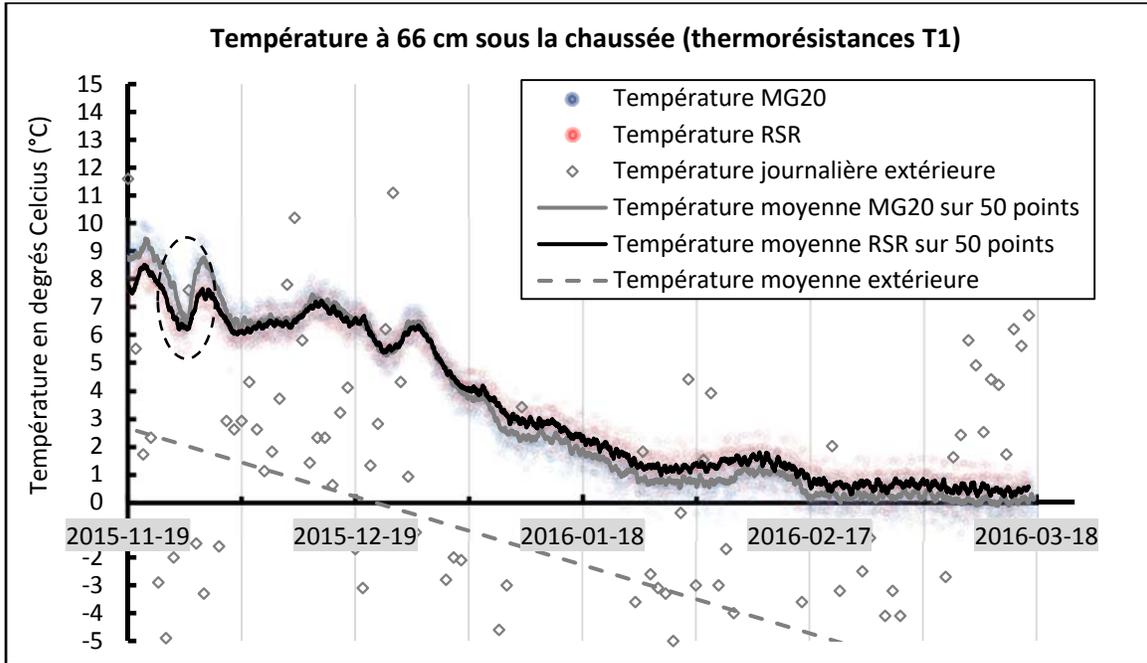


Figure 6-17 Températures à 66 cm sous la surface de la chaussée, chantier Saint-Patrick (site A)

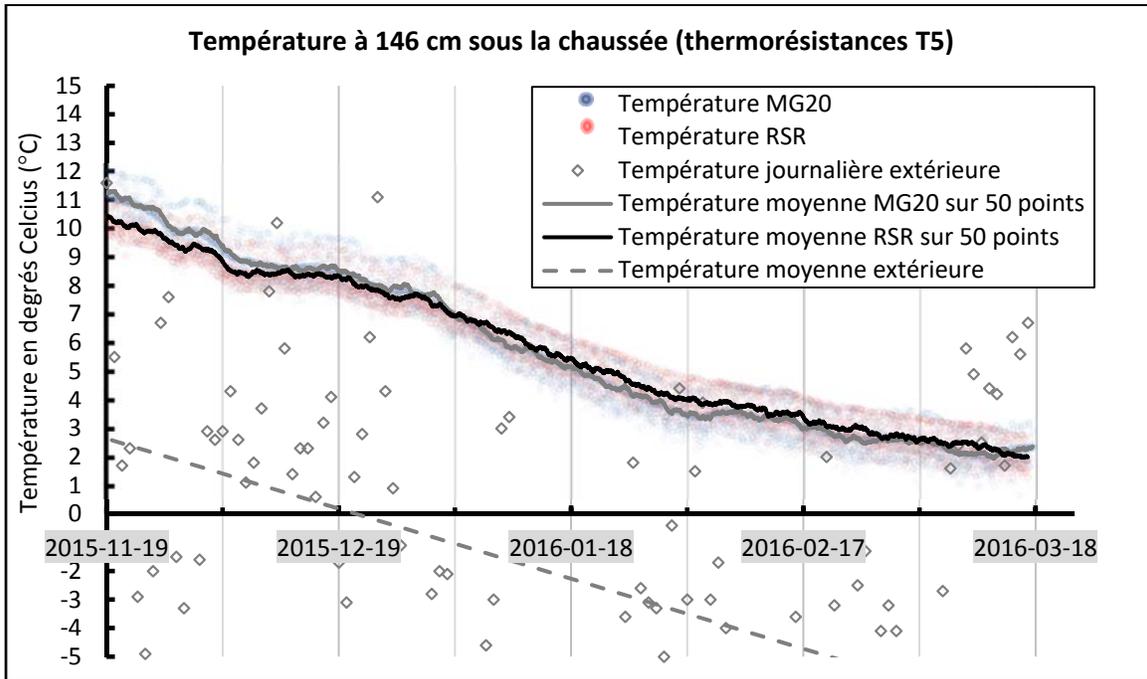


Figure 6-18 Températures à 146 cm sous la surface de la chaussée, chantier Saint-Patrick (site A)

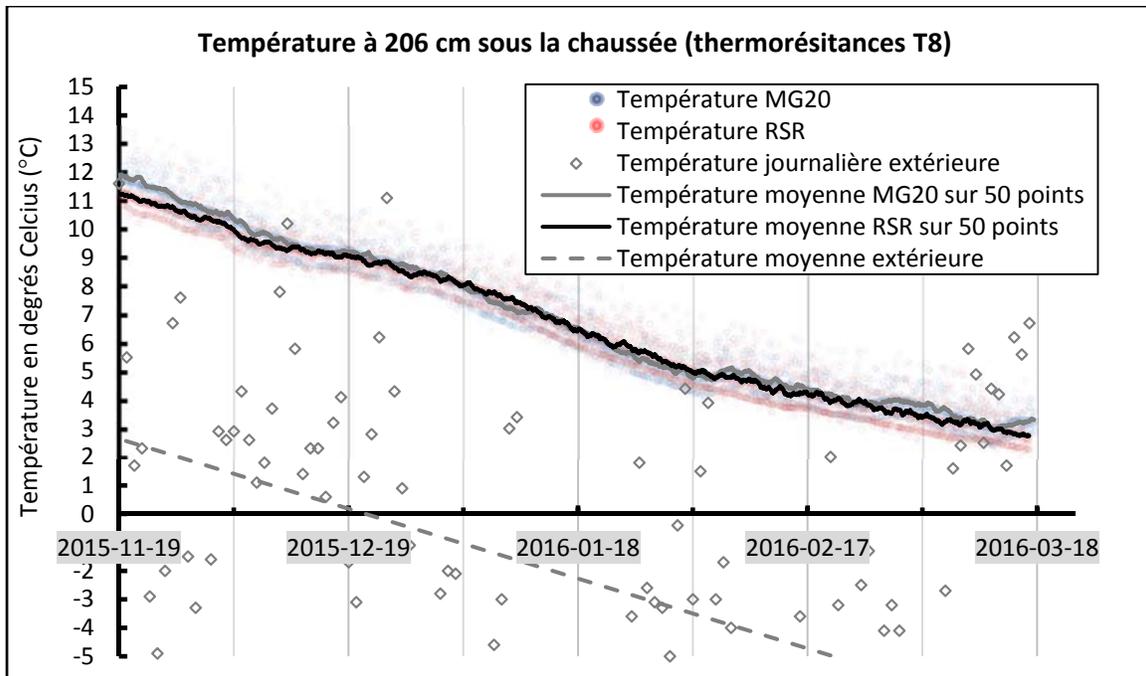


Figure 6-19 Températures à 206 cm sous la surface de la chaussée, chantier Saint-Patrick (site A)

6.3.2. Autres chantiers

À l'hiver 2016-2017, les valeurs de température des tranchées des six autres sites (B à G) ont été relevées de manière ponctuelle et manuelle chaque semaine. Elles ont été relevées à des profondeurs variant entre 500 mm et 1300 mm, dépendamment du site. Les résultats globaux des six sites (Figure 6-20 et Figure 6-21) permettent d'observer de faibles écarts entre les valeurs de températures mesurées pour les tranchées remblayées avec RSR et les tranchées remblayées avec MG-20. Dans certains cas, malgré le fait que les écarts RSR vs MG-20 soient faibles, la température la plus froide s'observe dans les tranchées avec MG-20 (site B, site G et site F : Figure 6-20 a), Figure 6-21 b) et Figure 6-21 c) respectivement). Dans d'autres cas, l'écart RSR vs MG-20 est minime puisque les courbes de températures mesurées RSR et MG-20 se superposent les unes sur les autres (site C, site D et site E : Figure 6-20 b), Figure 6-20 c) et Figure 6-21 a) respectivement).

On peut alors tirer les mêmes conclusions qu'à la section précédente, soit que la profondeur du front de gel sur une tranchée remblayée avec RSR est similaire à une tranchée remblayée avec du remblai granulaire conventionnel de type MG-20. Dans ce cas-ci, cette affirmation est appuyée par une quantité importante de données expérimentales.

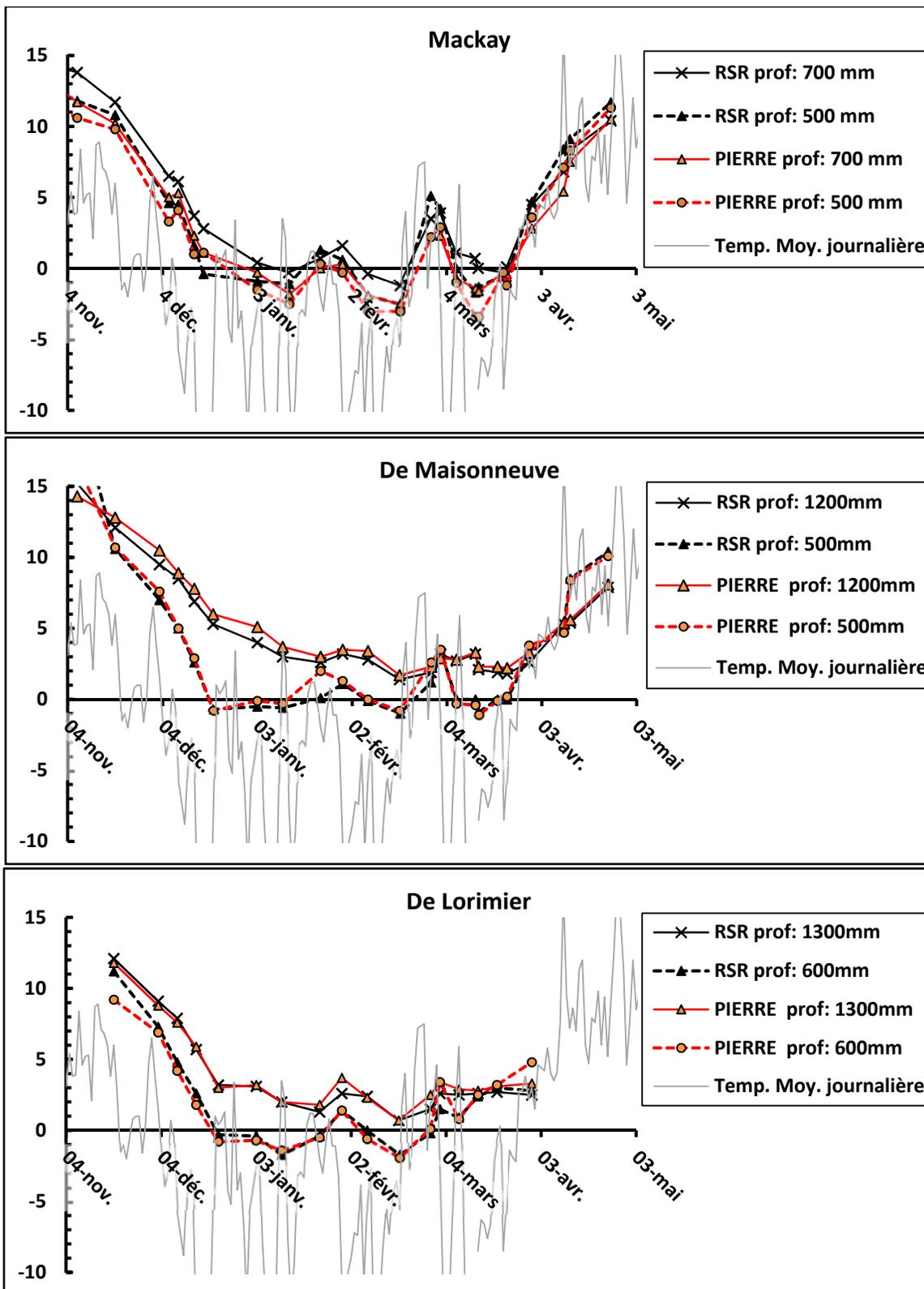


Figure 6-20 Profils de température aux sites des chantiers instrumentés: a) rue Mackay (site B), b) boulevard De Maisonneuve (site C) et avenue De Lorimier (site D)

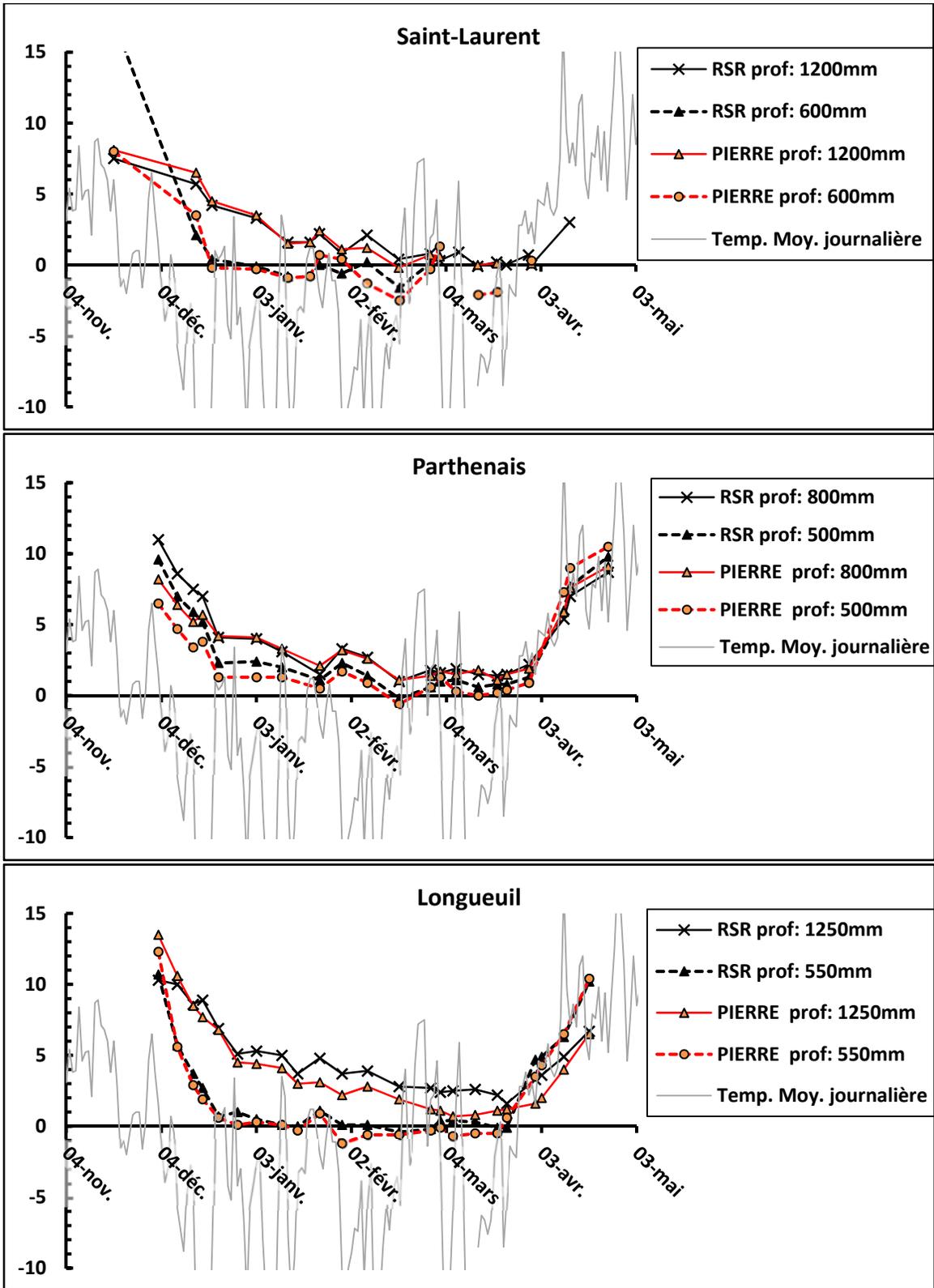


Figure 6-21 Profils de température aux sites des chantiers instrumentés: a) boulevard Saint-Laurent (site E), b) rue Parthenais (site F) et c) boulevard Vauquelin à Longueuil (site G)

7. ÉTUDE DES MÉLANGES RSR EN TRANCHÉES EXPÉRIMENTALES ET DANS DES BARILS

La problématique soulevée par plusieurs recherches dans la littérature est que le comportement du RSR diffère lorsque les performances sont comparées en laboratoire versus en chantier. Historiquement, des essais de caractérisation des granulats et de résistance à la compression à 28 jours du mélange RSR (en compression non confinée) sont réalisés. Or, contrairement à l'essai de compression en laboratoire (non confiné), le RSR mis en place en chantier se retrouve confiné dans le sol.

Des tranchées expérimentales en chantier (deux au total) ont été réalisées afin d'étudier la capacité portante d'un RSR dans une tranchée sèche, sans services publics et sans nappe phréatique (conditions idéales). Les sections suivantes (total de six sections) ont été réalisées : trois sections avec le mélange original, une section variante sans ciment, une section variante avec le ciment à prise rapide *RapidSet DOT* et une dernière section témoin remblayée couche par couche en compactant le sol de déblai. Le détail des six sections est présenté au Tableau 7-1. Pour les deux dernières sections, quatre barils de 200 litres (percés au fond) pour chaque section ont été remplis en même temps que la tranchée. L'objectif derrière l'idée de remplir des barils avec le RSR était de représenter les conditions de laboratoire, mais avec le même mélange que celui mis en place dans les tranchées (Figure 7-1). Ainsi, les performances des RSR en barils (conditions « laboratoire ») et des RSR en tranchée (conditions « chantier ») ont été comparées et analysées.



Figure 7-1 Remplissage de la tranchée #5 et de ses échantillons (barils)

Les échantillons en barils sont jugés très représentatifs par rapport aux caractéristiques des RSR en tranchée sèche. Ce format d'échantillon (baril de 200 litres) a été caractérisé en laboratoire avec un pénétromètre dynamique portatif. Cette caractérisation en laboratoire pourrait s'avérer une solution intéressante pour vérifier le comportement optimal d'un matériau autocompactant (RSR) avant sa mise en place en tranchée.

Tableau 7-1 Détails des sections de tranchées expérimentales réalisées

Section	Matériau	Teneur en eau initiale (%W_i)	Barils
#1	1 % ciment GU	12 %	-
#2	Sans ciment	12 %	-
#3	1 % ciment GU	10 %	-
#4	MG20 re-compacté	5 %	-
#5	1 % ciment GU	10 %	4
#6	1 % ciment <i>RapidSet</i>	10 %	4

La Figure 7-2 montre une photo en perspective des deux tranchées sèches et la Figure 7-3 montre une vue en plan et en profil des tranchées à l'étude. Les deux tranchées font 17 mètres de long chacune et chaque section mesure 1,5 m de large par 5 m de long par 1 m de profondeur.



Figure 7-2 Tranchées expérimentales sèches (2 x 17 mètres)

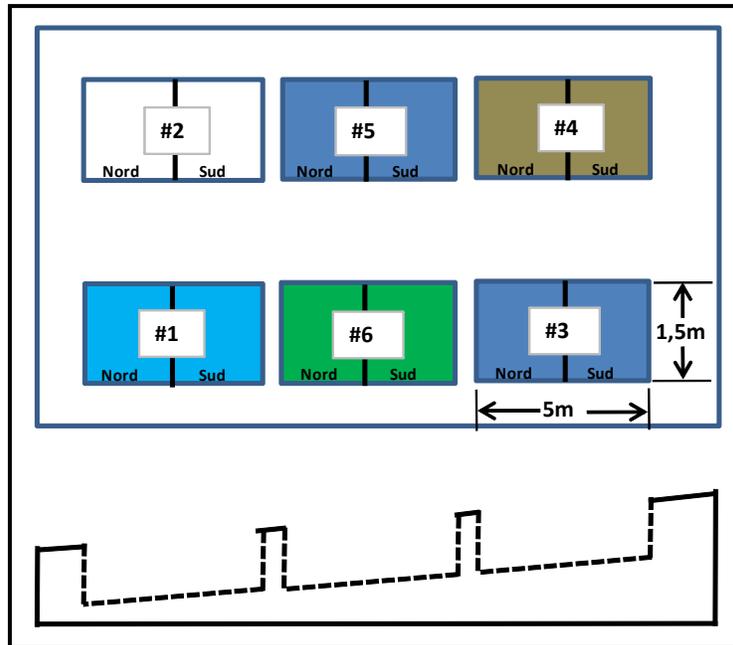


Figure 7-3 Vue en plan et vue de profil des tranchées expérimentales

7.1. PRÉPARATION DES BARILS ÉCHANTILLONS DE 200 LITRES

La Figure 7-4 montre la préparation des barils: 1) perçage de neuf trous de 19 mm de diamètre, 2) mise en place d'un géotextile de polypropylène Texdrain 80H (Texel) placé au fond du baril pour assurer un drainage uniforme et efficace, et 3) remplissage du baril avec RSR à la bétonnière. Chaque baril était testé trois fois à différents intervalles de temps. Après chaque essai de pénétromètre, le trou causé par l'essai était rempli avec un coulis cimentaire à prise rapide, fait à partir de ciment à prise rapide et de sable (50/50) (Figure 7-5).

Cette technique visait à minimiser l'interférence (effondrement du trou) lors de l'essai de pénétration suivant. Ces essais sont espacés d'environ 200 mm, ce qui est inférieur au minimum prescrit par la norme ASTM D6951 (300 mm minimum) (ASTM International, 2009).

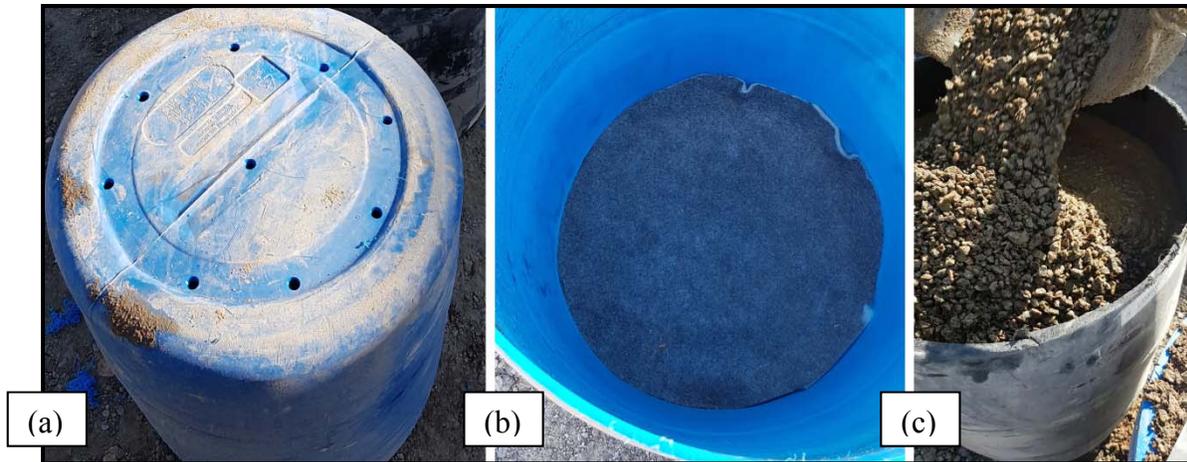


Figure 7-4 Préparation des barils normalisés avec : (a) neuf trous diamètre 19 mm, (b) géotextile Texdrain 80H placé au fond, et c) remplissage du baril à la bétonnière



Figure 7-5 (a) Troisième et dernier essai de pénétromètre sur le baril #1, (b) remplissage du trou laissé par le pénétromètre avec un coulis prise rapide en vue de l'essai suivant

L'enfoncement et le nombre de coups de chaque essai étaient entrés manuellement dans une feuille Excel (Figure 7-6) pour ensuite calculer l'indice CBR avec l'équation (4-1). Trois couches étaient considérées : 0 à 200 mm, 200 à 400 mm et 400 à 600 mm. Les moyennes d'indices CBR pour chaque couche de 200 mm étaient ensuite utilisées pour suivre l'évolution de la rigidité de chacune des couches de 200 mm.

522								
BMQ tranchée expérimentale #6 nord 1% ciment RapidSet	Test:	3,7	h					
	Coulée:	2017-10-03	11h30					
	Test:	2017-10-03	15h15					
Nb. De coups	Pénétration cumulative (pouce)	Type de marteau	IP (mm / coup)	Péné. Cumul. (mm)	CBR	Couche	CBR moyen	
0	1,6	2		0		#1 0 à 200mm	33	
10	4,2	2	13,2	66	16			
10	5,5	2	6,6	99	36			
20	7,9	2	6,1	160	39			
20	10,3	2	6,1	221	39			
20	12,6	2	5,8	279	41	#2 200 à 400mm	43	
20	14,7	2	5,3	333	45			
20	16,9	2	5,6	389	43			
20	19,2	2	5,8	447	41			
20	21,3	2	5,3	500	45	#3 400 à 600mm	42	
20	23,4	2	5,3	554	45			
20	26,1	2	6,9	622	34			
20	29,4	2	8,4	706	27			
16	36,1	2	21,3	876	10			

Figure 7-6 Données de pénétromètre de l'essai #522 et indice CBR moyen des différentes couches

7.2. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

7.2.1. Effet du ciment

Les résultats présentés au Tableau 7-2 montrent que l'effet du ciment sur l'indice CBR (équation 4-1) et par le fait même sur le module résilient (équation 4-2) est notable. À court terme (3 heures), le module résilient pour la section sans ciment est de 56 MPa, comparativement à des valeurs de 90, 85 et 58 MPa pour les sections avec ciment GU. On remarque aussi que la teneur en eau initiale du mélange avec ciment GU est un paramètre important du point de vue du durcissement à court terme. La section 5 avec ciment GU est celle avec la teneur en eau la plus basse et le module résilient le plus bas des sections avec ciment, soit 9 % et 58 MPa, respectivement. En comparaison, les valeurs de module résilient à court terme des deux autres sections avec ciment GU, donnent des valeurs de module résilient beaucoup plus élevées, soit 85 et 90 MPa pour des teneurs en eau de l'ordre de 11 % et 12 %. Concernant le ciment *Rapidset* (prise rapide), son effet est notable sur le durcissement à court terme puisque la valeur de module résilient la plus élevée a été obtenue sur cette section. On constate que 1% de ciment a un impact important sur le CBR.

Concernant les résultats à 24 heures, l'écart entre les valeurs de module résilient pour les sections avec ciment GU et la section sans ciment est encore élevé. De plus, la valeur de module résilient pour la section 5 (ciment GU et teneur en eau 9 %) est encore la valeur la plus faible des trois sections avec ciment GU. Ainsi, on peut conclure que la teneur en eau initiale des mélanges RSR avec ciment GU est un paramètre important d'un point de vue durcissement du mélange. La différence de teneur en eau observée pour la section 5 s'explique par les raisons suivantes : lors des travaux de mise en place du RSR dans la section #5, la température extérieure était chaude et le mélange était trop sec, l'opérateur de la bétonnière mobile a augmenté le débit d'eau au maximum pour tenter de compenser, mais la bétonnière a manqué d'eau ce qui a causé une

interruption dans la mise en place le temps de recharger. Le processus de consolidation et la compaction finale ont été affectés.

Pour le mélange avec ciment *Rapidset*, la différence entre les valeurs de module résilient à 24 heures vs 3 heures est faible, ce qui indique que l'effet du ciment à prise rapide sur le durcissement est plutôt significatif à court terme. En revanche, la valeur de module résilient à 24 heures pour le mélange avec ciment à prise rapide est la plus élevée de toutes les sections. Dans une optique d'ouverture très rapide au trafic ou de viser une valeur de module résilient élevé, l'utilisation d'un ciment à prise rapide semble être bénéfique.

Tableau 7-2 Rigidités à 24 h des premiers 200 mm de matériau en tranchée mesurée à l'aide du DCPT

Section	Matériau	Teneur en eau initiale (%W _i)	Indice CBR (%)		Module résilient (MPa)	
			~3h	~24h	~3h	~24h
#1	1 % ciment GU	12 %	6,4	20	90	130
#2	Sans ciment	12 %	1,7	3	56	68
#3	1% ciment GU	11 %	5,9	34	85	160
#4	MG20 re-compacté	5 %	18	18	125	125
#5	1 % ciment GU	9 %	1,9	12	58	110
#6	1 % ciment <i>RapidSet</i>	11 %	31	38	155	165

À moyen terme (après 24 heures), les valeurs de module résilient après 24 heures des sections 1, 3 et 6 sont relativement similaires (Figure 7-7). L'écart initialement observé à court terme entre les valeurs de module résilient pour le mélange avec ciment prise rapide (section 6) et les mélanges avec ciment GU des sections 1 et 3 est réduit. Or, les valeurs de module résilient à moyen terme pour la section 5 (ciment GU avec teneur en eau de 9 %) sont considérablement inférieures aux valeurs des sections #1 et #3 (ciment GU avec teneur en eau 12 % et 11 % respectivement).

Cela confirme non seulement que l'effet de la teneur en eau du mélange RSR est un paramètre important au niveau du module résilient à court terme (Tableau 7 2), mais également sur les valeurs de module résilient à moyen terme (Figure 7 7).

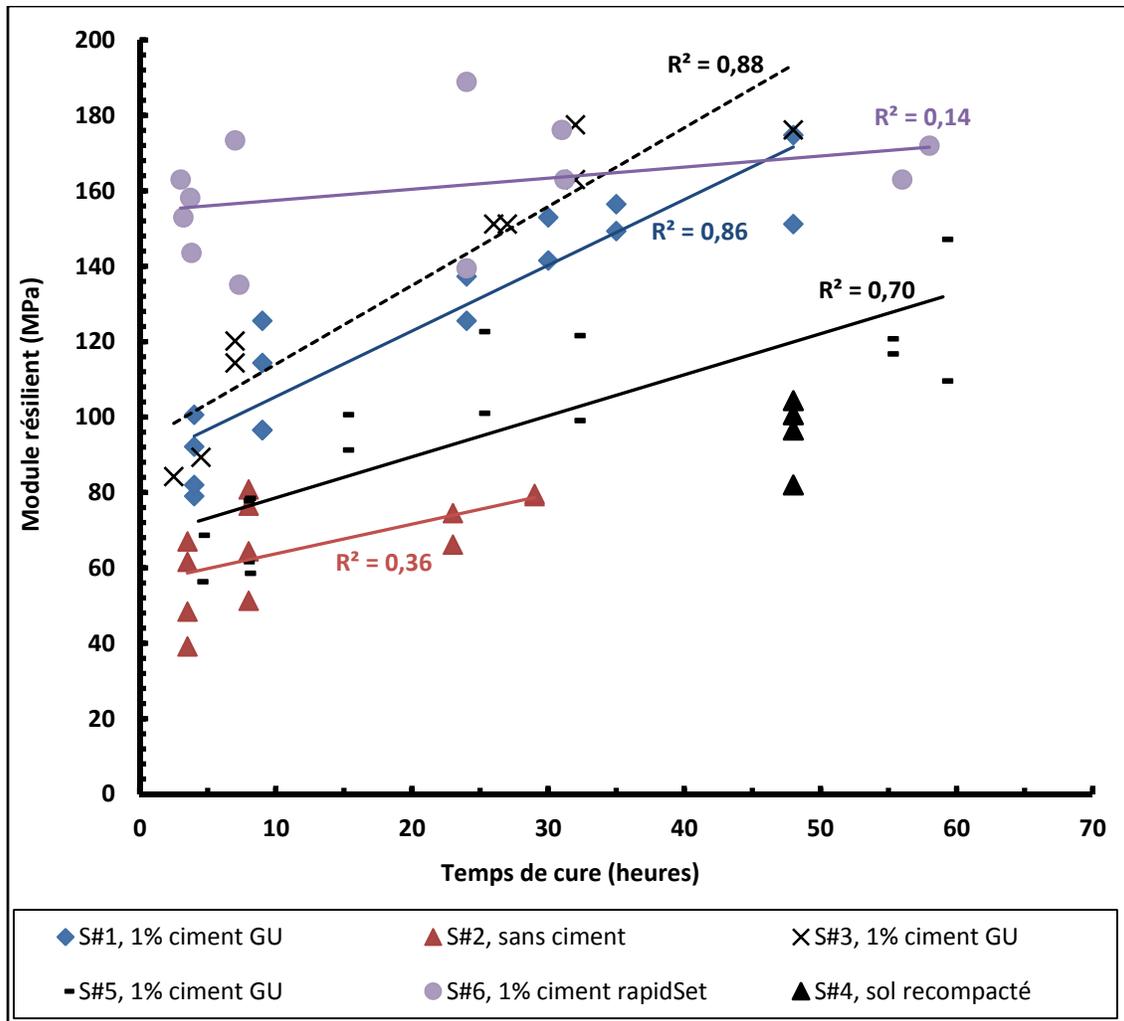


Figure 7-7 Module résilient (MPa) des tranchées expérimentales sections 1 à 6 (S#1 à S#6) profondeurs: 0 à 200 mm, mélange BMQ

7.2.2. Effet de la profondeur

La majorité du drainage se fait du haut vers le bas. Ainsi, l'eau de la couche supérieure s'ajoute au surplus d'eau de la couche inférieure. L'indice des vides du mélange décroît plus rapidement en surface qu'en profondeur. Lorsque la prise initiale du ciment s'initie, le mélange ne se compacte pas davantage. Le volume des vides est fixé, et ce, pour la durée de l'ouvrage. Des tassements pourraient en résulter si les conditions de drainage étaient très défavorables.

En comparant les résultats des essais réalisés en surface après 3 heures (premiers 200 mm) avec les résultats des couches sous-jacentes (200-400 mm et 400-600 mm) (Tableau 7-3), on constate que l'écart des sections 1, 2 et 3 augmente avec la profondeur de la couche concernée. Les valeurs de module résilient après 3 heures pour la couche 400-600 mm des sections 1 et 3 sont inférieures aux valeurs des couches supérieures. Pour la section 6, les valeurs des différentes couches sont jugées similaires.

Pour les valeurs de module résilient après 24 heures, la tendance observée est similaire. Pour les sections avec ciment GU (1, 2 et 3), les valeurs de module résilient de la couche 400-600 mm sont toutes inférieures aux valeurs des couches supérieures. Pour la section 6, les valeurs des différentes couches sont jugées similaires. Pour les RSR avec ciment GU, le module résilient diminue avec l'augmentation de la profondeur.

Tableau 7-3 Valeurs des modules résilients (MPa) pour les différentes couches des six sections

Section	Matériau	Module résilient (MPa)					
		0-200 mm		200-400 mm		400-600 mm	
		~3h	~24h	~3h	~24h	~3h	~24h
#1	1 % ciment GU	90	130	76	128	66	109
#2	Sans ciment	56	68	47	64	42	52
#3	1 % ciment GU	85	160	84	122	75	108
#4	MG20 re-compacté	125	125	-	-	-	-
#5	1 % ciment GU	58	110	54	93	-	86
#6	1 % ciment <i>RapidSet</i>	155	165	166	173	160	171

7.2.3. Effet du dénivelé

Due à la configuration du site où les tranchées expérimentales ont été réalisées, des différences entre les valeurs des CBR pour les essais réalisés sur les sections au nord vs les sections au sud du site ont été observées. Le sens d'écoulement de l'eau (drainage) était du sud vers le nord (Figure 7-8).

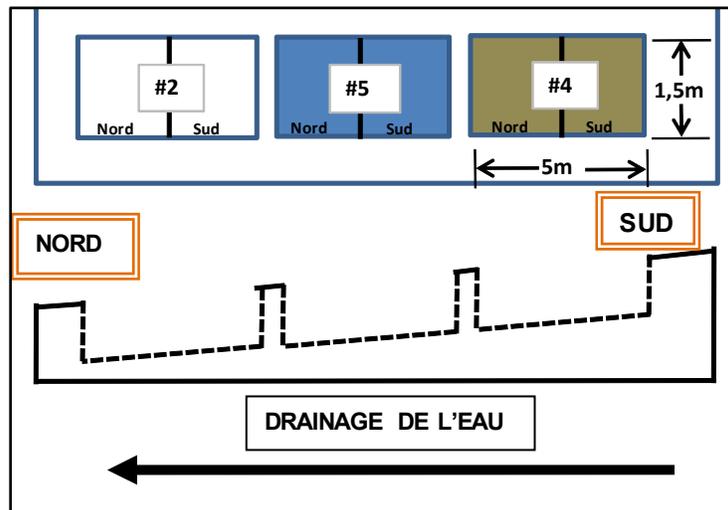


Figure 7-8 Dénivelé des sections de tranchées expérimentales, drainage de l'eau

Lors de la mise en œuvre du RSR, de l'eau s'accumulait dans la section nord de chaque section. L'hypothèse est donc que le mélange RSR de portion nord de chaque section était plus humide

que la portion sud. Pour vérifier cette hypothèse, les valeurs d'indice CBR pour la section 5 (1 % de ciment GU) ont été tracées à la Figure 7-9 pour les profondeurs 0-200 mm et 200-400 mm. Elles ont été calculées pour la portion nord et la portion sud de la section 5.

Les résultats présentés à la Figure 7-9 montrent une tendance qui permet de confirmer notre hypothèse les valeurs d'indice CBR pour la portion sud de la section 5 sont plus élevées que les valeurs d'indice CBR pour la portion nord (accumulation de l'eau). Cette tendance est généralisée sur toute l'épaisseur du RSR puisque l'on observe des différences à la fois pour les essais réalisés à 0-200 mm et pour les essais réalisés à 200-400 mm

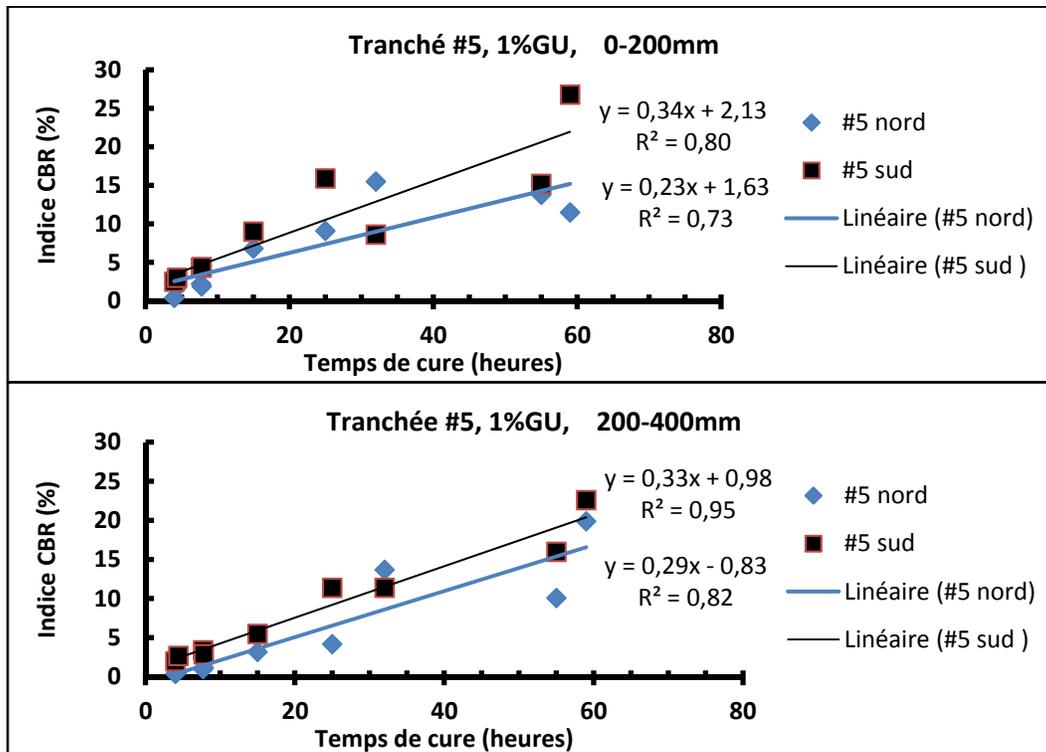


Figure 7-9 Évolution de la rigidité de la tranchée #5 (partie nord versus la partie sud); le dénivelé influence la quantité d'eau et le phénomène d'autocompaction de la section nord en est diminué

7.3. COMPARAISON AVEC LES ESSAIS SUR BARILS DE 200 LITRES

Afin de vérifier la représentativité des mesures d'indice CBR réalisées sur des barils de 200 litres, les résultats d'indice CBR obtenus sur les barils et les tranchées expérimentales ont été comparés. À la Figure 7-10, les indices CBR mesurés en barils et en tranchées pour la section 5 (ciment GU) sont présentés. Les indices CBR ont été séparés en trois sections : 0-200 mm, 200-400 mm et 400-600 mm. Les marqueurs bleus représentent les mesures réalisées en tranchées, tandis que les marqueurs rouges représentent les mesures réalisées en barils. Il convient de noter que dans les premières heures suivant la mise en place (4 et 8 heures), les valeurs d'indice CBR obtenues en barils et dans les tranchées expérimentales sont très similaires, et ce, peu importe la profondeur considérée. Pour la période 8-50 heures, les mesures d'indice CBR n'ont pas été faites en simultanément sur les barils et les tranchées, il est donc difficile de comparer les valeurs les unes aux autres.

En revanche, on remarque que dans les deux cas les valeurs d'indice CBR augmentent avec le temps. Aux alentours de 54 heures, les valeurs d'indice CBR en barils sont plus élevées que les valeurs mesurées en tranchées, et ce, peu importe la profondeur. Cependant, ces différences semblent être plutôt ponctuelles et causées par une erreur de mesure. En effet, si l'on regarde les valeurs d'indice CBR aux alentours de 58 heures, les résultats en barils vs en tranchées sont très similaires. On peut ainsi conclure que dans le cas du mélange RSR avec ciment GU, les résultats d'indice CBR en barils vs en tranchées sont très similaires. Dans ce cas, la méthode d'analyse en barils de 200 litres est prometteuse et peut être envisagée pour caractériser et développer les mélanges RSR en laboratoire.

Pour compléter la comparaison des essais réalisés en barils vs en tranchées, les indices CBR pour la section 6 (ciment prise rapide *Rapidset*) ont été tracés à la Figure 7-11. Les marqueurs bleus représentent les mesures réalisées en tranchées, tandis que les marqueurs rouges représentent les mesures réalisées en barils. Les différences remarquées sont surtout à court terme (inférieur à 10 heures). Les résultats en barils sont inférieurs aux résultats en tranchées, et ce, pour toutes les profondeurs. La différence est toutefois minime: indice CBR dans les barils de 22 % versus 32 % qui se traduit par un module 137 MPa versus 156 MPa en tranchées.

Par contre, aux alentours de 60 heures, l'écart entre les résultats s'amenuise et ces derniers s'avèrent similaires. Dans le cas des mélanges RSR avec ciment à prise rapide, il semble que la méthode d'analyse en barils de 200 litres puisse être envisagée, mais en tenant compte du fait que les essais à court terme donnent des valeurs légèrement plus faibles en barils que les essais réalisés en tranchées. Ceci pourrait être dû à la rigidité importante du RSR par rapport à celle du baril lui-même.

Dans tous les cas, ces résultats présentent des remblais qui ont une rigidité équivalente, ou supérieure, après 24 heures, à celle d'un matériau granulaire compacté mécaniquement.

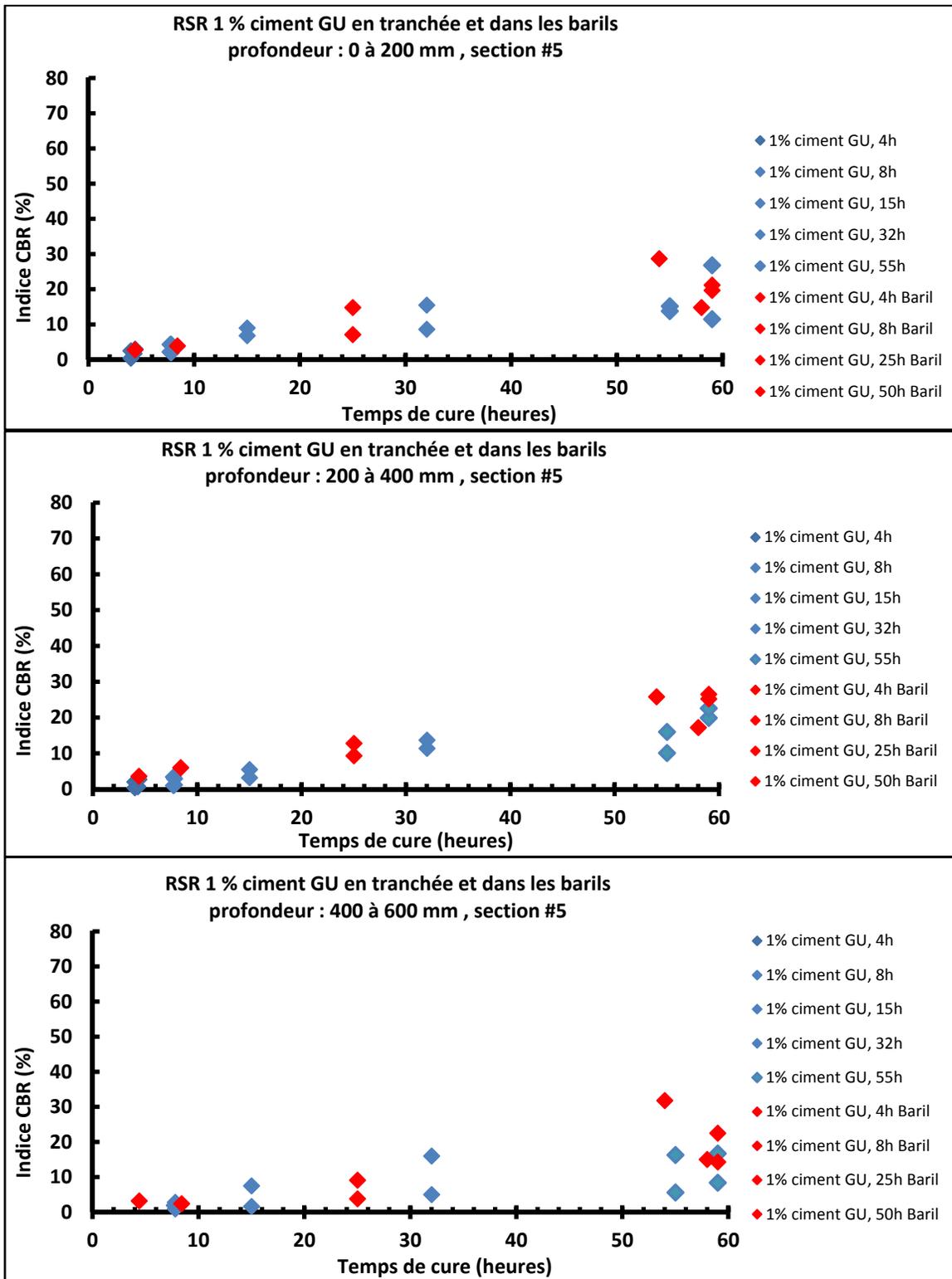


Figure 7-10 Évolution de la rigidité d'un RSR (BMQ) 1 % ciment GU en tranchées et dans des barils pour les profondeurs 0-200 mm, 200-400 mm et 400-600 mm (section #5)

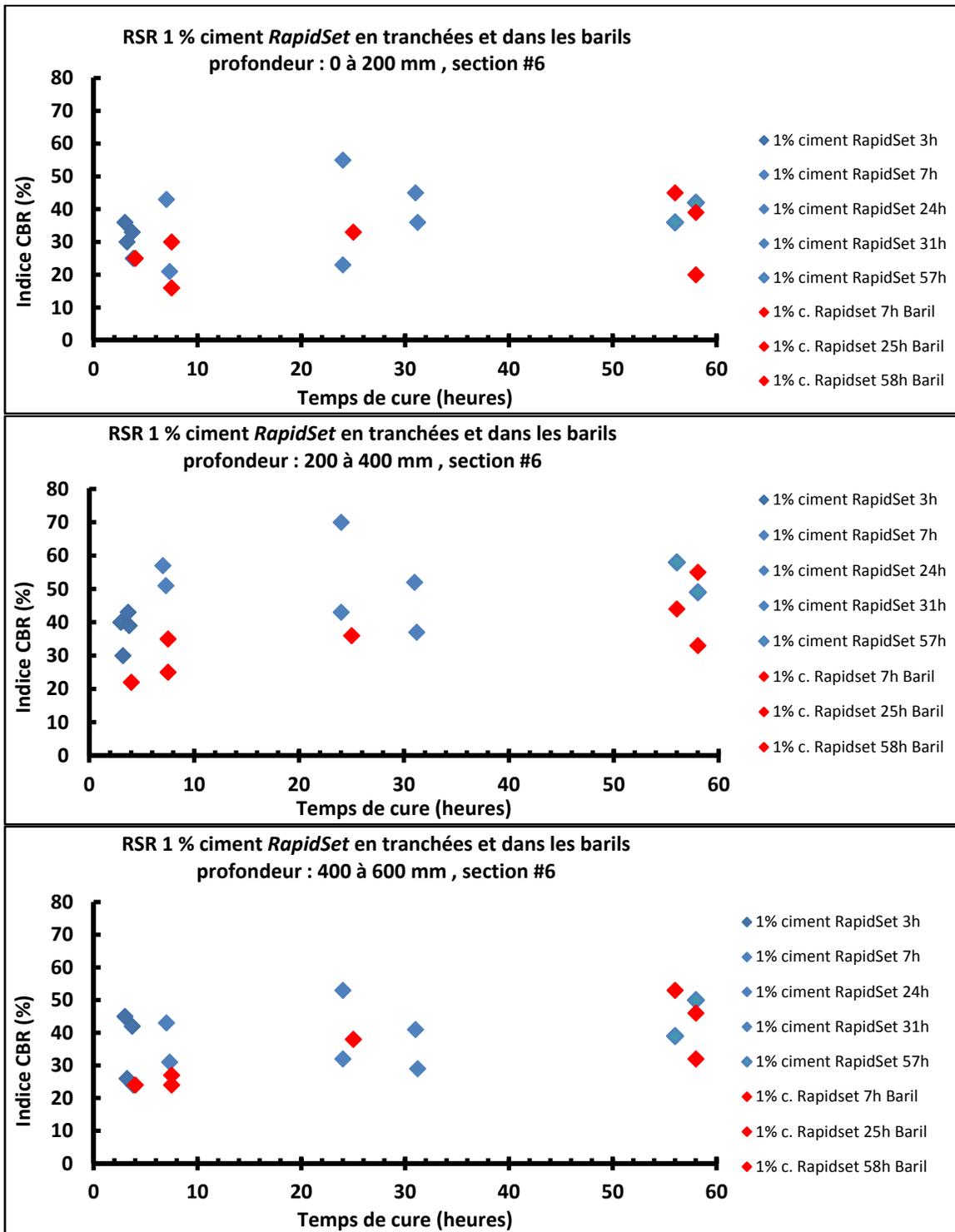


Figure 7-11 Évolution de la rigidité d'un RSR (BMQ) 1 % ciment *RapidSet* en tranchées et dans des barils pour les profondeurs 0-200 mm, 200-400 mm et 400-600 mm (section #6)

7.4. UNIFORMITE DES MATERIAUX

La configuration de la planche d'essais a nécessité la mise en place de coffrages pour retenir le remblai dans sa section respective (Figure 7-12). Deux semaines plus tard, après décoffrage, le RSR des sections #5 et #6 a été mis en place. Le retrait des coffrages a permis d'observer la surface du matériau et la ségrégation (Figure 7-13). Cette ségrégation semble être de surface seulement et causée par le drainage de l'eau à l'interface bois-RSR.



Figure 7-12 RSR des sections #1 et #2 retenu par des planches de coffrage et des blocs de béton



Figure 7-13 Surface du RSR après décoffrage (a) section #1 ciment GU (b) section #3 ciment GU (c) section #4 matériaux granulaires originaux recompactés

8. SIMULATION DE STRUCTURE DE CHAUSSÉES

Des simulations de structures de chaussée souple avec RSR ont été réalisées avec le logiciel **Chaussée 2** selon plusieurs scénarios de conception de manière à évaluer la rigidité minimale requise en fonction de la profondeur pour l'ouverture de la chaussée à la circulation. Étant donné la multitude de possibilités, la chaussée rigide est exclue d'emblée, car la fondation granulaire est beaucoup plus sollicitée pour une chaussée souple que pour une chaussée rigide.

Les variables de conception à l'origine des scénarios dans les simulations sont la durée de vie en ECAS et l'épaisseur (H) de la couche d'enrobé bitumineux (EB). Les hypothèses de simulation utilisées sont les suivantes:

- Module moyen de l'enrobé bitumineux entre 15 ° et 20 °C: 3010 MPa;
- ECAS en millions pour différents types de routes: 0.01, 0.1, 1 et 10;
- Structure de la chaussée:
 - o Épaisseur d'enrobé pour différents types de route: 70 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm, 175 mm et 200 mm;
 - o 800 mm de RSR
 - Divisé en quatre couches de 200 mm chacune;
 - o Sol d'infrastructure argileux avec Mr de 47 MPa.

Le débit journalier moyen annuel (DJMA) a été fixé supérieur à 1000 dans le logiciel Chaussée 2 pour les simulations. Les modules résilients obtenus dans les couches de RSR ont été, pour les besoins de chantier, traduits en indice CBR. Le tableau 8-1 présente les indices CBR pour les différentes variantes.

Tableau 8-1 Indices CBR des couches de remblai

Couches	Profondeur Z (mm)	ECAS (millions)	Module EB (MPa)	H EB = 70 mm	H EB = 100 mm	H EB = 125 mm	H EB = 150 mm	H EB = 175 mm	H EB = 200 mm
				CBR	CBR	CBR	CBR	CBR	CBR
RSR1	0	0,01	3010	6,43	3,49	0,52	0,43	0,14	0,11
	a	0,1		20	7,54	6	5,69	0,67	0,62
		1		88,42	26,42	11,06	5,69	2,42	1,69
		10		388,59	112,23	46,54	23,36	11,97	6,86
RSR2	200	0,01		3,06	2,65	0,52	0,43	0,14	0,11
	a	0,1		4,6	4,4	3,76	1,62	0,67	0,62
		1		4,8	4,79	4,79	4,5	2,42	1,69
		10		16,02	11,71	10,8	9,67	7,42	5,9
RSR3	400	0,01		2,19	1,9	0,52	0,43	0,14	0,11
	a	0,1		4,22	4,12	3,67	1,11	0,67	0,62
		1		4,5	4,5	4,5	4,31	2,42	1,69
		10		9,67	7,09	6,43	5,8	5,8	5,08
RSR4	600	0,01		2,19	1,23	0,52	0,43	0,14	0,11
	a	0,1		2,65	1,97	1,29	1,11	0,67	0,62
		1		4,3	4,3	4,22	3,49	2,42	1,69
		10		7,76	4,98	4,98	4,98	4,98	4,98

La Figure 8-1 montre l'évolution des indices CBR en fonction des ECAS dans les couches de RSR dans la chaussée pour les différents scénarios de simulation. La Figure 8-1 obtenue par des simulations fonctionne comme un abaque. Elle permet de déterminer, selon les options de durée de vie et l'épaisseur de la couche d'enrobé de la chaussée projetée, les valeurs minimales de CBR pour les différentes couches de RSR dans la chaussée. Par exemple, pour une durée de vie de 10 000 ECAS avec une couche d'enrobé de 70 mm d'épaisseur, on obtient pour les quatre couches RSR1, RSR2, RSR3 et RSR4 des indices CBR de 6,4 %, 3,1 %, 2,2 % et 2,2 % respectivement.

Les essais de laboratoire et de chantier ont pu établir les performances des RSR après quelques heures de cure. Après 3 heures de cure, les RSR au chantier ont obtenu des indices CBR de 1 % à 10 % (Tableau 6-2) qui se traduisent en module résilient de 50 à 100 MPa. Pour une durée de vie de 10 000 ECAS, les performances obtenues en laboratoire et au chantier permettent selon les simulations de rétablir la circulation.

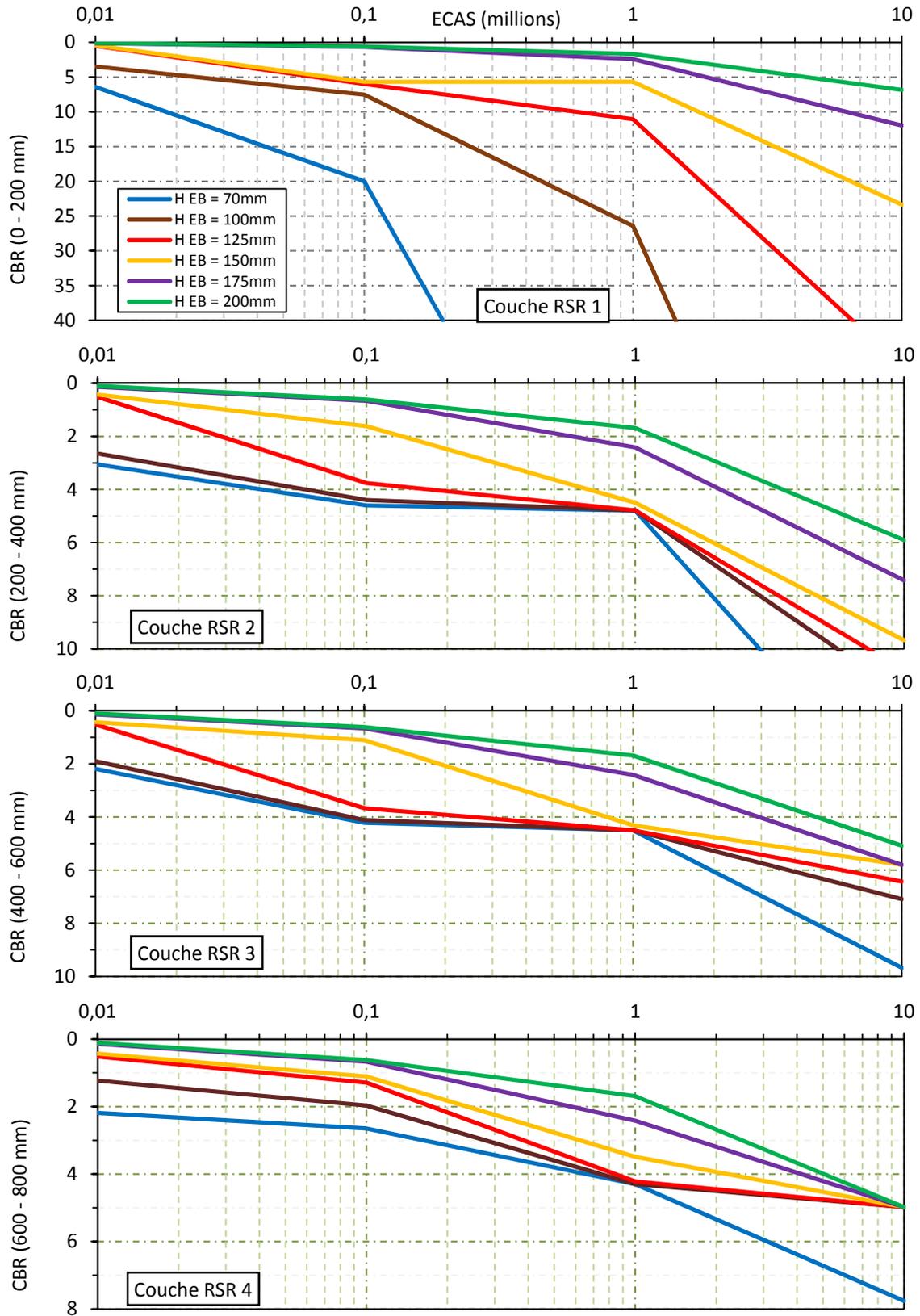


Figure 8-1 Abaque de l'évolution du CBR dans les couches RSR

9. CONCLUSION

Cette étude sur le contrôle de la qualité du RSR comprend une étude des matériaux au laboratoire, de la mise en œuvre et des performances en chantier, des matériaux dans une tranchée expérimentale et en barils, ainsi qu'une simulation des chaussées selon la circulation. Les conclusions sont résumées par phase de l'étude.

Observations générales

Les pratiques et performances en chantier observées sont très bonnes en général. Le RSR se comporte aussi bien qu'une pierre compactée traditionnelle. Les matériaux RSR étudiés dans ce rapport se sont consolidés suffisamment pour rétablir une circulation modérée pour les chaussées à faible trafic après trois heures de cure. Après 24 heures de cure, le remblai a des performances égales ou supérieures à un matériau MG20 compacté à 90-95 % du Proctor modifié. Évidemment pour les chaussées rigides ou mixtes, c'est la cure de la dalle qui gouverne, mais cette dernière pourrait être mise en place sur le RSR après trois heures.

Étude des matériaux de RSR en laboratoire

- Les mélanges de RSR en provenance des fournisseurs du Québec se comparent entre eux en termes de composition (% ciment et granulométrie), en comparaison avec ceux des États-Unis et des autres régions;
- Les conditions de laboratoire sont optimales, car la distance de l'eau en surplus vers le milieu récepteur est très courte;
- L'étude en laboratoire a permis de vérifier la précision de l'essai CBR et de l'améliorer pour faire diminuer la variabilité; la corrélation est presque parfaite;
- Avec l'essai CBR modifié, les mélanges avec 1 % de ciment GU ont une même performance d'un essai à l'autre;
- Le passant 80 μm influence le comportement des RSR (drainage de l'eau, capacité portante).

Étude de la mise en œuvre et des performances en chantier du RSR

- La qualité de la prise de données est excellente avec le pénétromètre dynamique;
- Le comportement des mêmes mélanges était plus variable en chantier qu'en laboratoire;
- Pour un même matériau, la capacité portante varie légèrement en fonction du milieu récepteur;
- Les mesures de température dans les tranchées durant un hiver ne montrent pas de différence de température entre le RSR et le granulat MG20 donc il n'y a pas d'incidence sur le gel à l'utilisation d'un RSR plutôt qu'un 0-20 mm;
- L'utilisation de la boule Kelly est limitée et représente un résultat en surface;
- La teneur en eau et le drainage de la tranchée ont une grande influence sur le temps de cure et la capacité portante du RSR;
- Le CBR augmente avec la profondeur sauf dans les milieux avec un moins bon drainage;
- Les mélanges utilisés ont tous bien performé au chantier;
- Cette étude tient compte seulement de la première semaine de cure. Il n'a pas été possible de faire le suivi à long terme, car les routes ont été rouvertes à la circulation;
- L'ANNEXE C montre un exemple de feuille de contrôle de la qualité qui pourrait être utilisé en chantier.

Étude des matériaux de RSR dans une tranchée expérimentale et en barils

- Les trois répétitions avec 1 % de ciment GU montrent une variabilité du module selon les sections d'essais de 30 % à 3 h et de 50 % à 24 h. Ce qui montre que même dans les conditions de tranchée expérimentale, le comportement est plus variable qu'en laboratoire;
- Cette partie de l'étude a été réalisée avec une bétonnière mobile, ce qui cause plus de variabilité dans la teneur en eau et en affecte les résultats;
- L'impact de retirer le ciment du mélange de RSR montre que la résistance du mélange dans le temps est moins importante et plus variable;
- Lorsque le ciment GU a été remplacé par un ciment à prise rapide, la rigidité à 3 h est équivalente à la résistance d'un ciment GU à 48 h. Pour une ouverture rapide de la chaussée à la circulation, le ciment à prise rapide devrait être favorisé.

Simulation du RSR dans les chaussées et abaques

- Les simulations montrent des cas avec 100 et 130 mm d'enrobés directement sur le RSR, ce qui s'installe le plus rapidement. En réalité, une dalle de béton est souvent installée dans le centre-ville de Montréal, parce que la capacité portante des sols d'infrastructure n'est pas suffisante pour le fort trafic. Ainsi, les chaussées sont souvent ouvertes quelques jours plus tard pour laisser le temps au béton de prendre. Dans les autres municipalités, ce n'est pas le cas.
- Les valeurs du M_r obtenues par simulation sont suffisantes pour le passage des véhicules, même après quelques heures.
- Une ébauche de feuille de contrôle de qualité est placée en annexe.

10. RECOMMANDATIONS

Les essais réalisés dans le cadre de cette étude ont montré l'efficacité de l'utilisation du pénétromètre dynamique (DCPT, *Dynamic Cone Penetration Test*) pour l'évaluation de la performance du RSR. Pour cette raison, l'utilisation de cet essai de façon systématique au moment du début des travaux est recommandée afin d'établir les caractéristiques du site, si les conditions de chantier et du site changent et si la formule de mélange est modifiée en cours de route. Pour des raisons économiques et pratiques, il peut être contraignant d'utiliser systématiquement l'essai de DCPT. Néanmoins, dans des cas plus critiques, le DCPT devrait être utilisé.

Si des conditions défavorables sont observées (pluie, remblai très important, tranchée profonde ou très large, sols plus ou moins drainants, températures froides, etc.) et que l'essai de boule Kelly montre une stabilisation plus longue qu'à l'habitude, un ou plusieurs essais de DCPT sont recommandés pour s'assurer de la consolidation du remblai.

À notre connaissance, il n'existe aucune norme officielle sur la mise en place de RSR à des températures extérieures inférieures à 5 °C. Certaines municipalités exigent l'utilisation du RSR en hiver. Comme pour les bétons de ciment, une température minimale de livraison qui varie selon les conditions environnementales (température, humidité relative, vent) peut être exigée. La tranchée peut être chauffée pour la faire dégeler ou un coussin de pierre nette peut être installé dans le fond de la tranchée. Dans ces cas, des essais de DCPT sont souhaitables afin de valider la qualité de la mise en œuvre.

Recommandations sur la formulation

L'industrie pourrait viser à établir une formulation de référence de RSR pour faciliter la production et le contrôle de la qualité.

Une variabilité dans la teneur en eau des RSR fabriqués avec une bétonnière mobile a été observée. Des mesures devraient être mise en place afin de mieux contrôler cet élément important de la fabrication.

Étant donné que l'impact de la température de l'eau sur la prise du RSR par temps froid n'a pas été étudié dans le cadre de ce projet, il n'est pas possible de faire une recommandation sur le contrôle de la température à l'arrivée. La température de l'eau n'est pas contrôlée dans les bétonnières.

Recommandations sur le temps pour ouvrir la route après la mise en place du RSR

Selon les mesures en chantier et les simulations effectuées, trois heures peuvent être suffisantes pour ouvrir la route à la circulation automobile après l'installation du RSR pour des chaussées à faible trafic. Toutefois, selon les conditions du site, du trafic et les épaisseurs d'enrobés envisagés, l'ouverture va dépendre de la valeur de CBR minimum, telle que présentée à la Figure 8.1 du rapport. De manière à confirmer les conditions minimales, le DCPT devrait être utilisé pour mesurer la résistance réelle du remblai.

Recommandations générales

Une analyse détaillée des coûts globaux des travaux est suggérée, puisque les dernières analyses datent des années 1990s.

La tendance américaine est de concevoir des matériaux autocompactants avec une plus grande proportion de pâte et des ajouts entraîneurs d'air. Il serait pertinent de tester si ces mélanges résistent mieux aux essais de gel et de dégel et s'ils peuvent supporter les charges routières plus grandes, surtout dans les premières heures. Comme les cendres volantes ne sont pas très disponibles, des matériaux locaux comme la poudre de verre et le filler calcaire pourraient être testés. Lorsque des matériaux recyclés sont utilisés dans les tranchées, il devient alors nécessaire d'étudier les risques environnementaux et les processus de disposition.

Les mélanges utilisés ont tous bien performé au chantier. Compte tenu de la forte teneur en granulats fins et en eau, il faut être vigilant si des changements au mélange sont effectués. Pour le développement de nouveaux mélanges, le contrôle de la qualité des matériaux de remblai devrait se faire sous une presse CBR avec les modifications présentées dans ce rapport. Aussi, le pénétromètre dynamique à masse tombante (DCPT) est l'outil par excellence pour contrôler la performance au chantier. En amont, la recherche et développement peut se faire avec le DCPT et des barils de 200 litres chez le producteur pour s'assurer de la performance avant la mise en place de nouveaux matériaux. Ces essais permettent d'apprécier quelle capacité portante va avoir le RSR dans les conditions optimales.

11. RÉFÉRENCES

- ACI Committee 229. 1994. *Controlled Low Strength Materials (CLSM)*. Detroit, Michigan, USA: American Concrete Institute.
- ACI Committee 229. 2013. *Report on Controlled Low-Strength Materials*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 22 p.
- Alizadeh, V., S. Helwany, A. Ghorbanpoor et M. Oliva. 2014. « *Rapid-Construction Technique for Bridge Abutments Using Controlled Low-Strength Materials* ». *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 28, n° 1, p. 149-156.
- Alizadeh, Vahid. 2019. « *New approach for proportioning of controlled low strength materials* ». *Construction and Building Materials*, vol. 201, p. 871-878.
- Association Béton Québec (ABQ). 2007. *No 18 Le remblai sans retrait*. Montréal, Québec: Association béton Québec (ABQ),, 8 p.
- Association Béton Québec (ABQ). 2014. *Le remblai sans retrait*. Boucherville, Québec, Canada: Association Béton Québec.
- ASTM International. 2009. *ASTM D6951/D6951M – 09 Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications*. West Conshohocken, PA, USA: Annual Book of ASTM Standards, ASTM International
- ASTM International. 2015. *ASTM D6024/D6024M – 15 Standard Test Method for Ball Drop on Controlled Low Strength Material (CLSM) to Determine Suitability for Load Application*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- ASTM International. 2016. *ASTM D1883-16 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- ASTM International. 2018. *ASTM D6951 / D6951M-18, Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- Baker, T , et W Harry. 1998. « *Frost penetration in flowable fill used in pipe trench backfill* ». In *The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill)*, sous la dir. de Howard, A. , et J. Hitch. Vol. STP1331-EB, p. 275-282. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- Blanco, A., P. Pujadas, S. H. P. Cavalaro et A. Aguado. 2014. « *Methodology for the design of controlled low-strength materials. Application to the backfill of narrow trenches* ». *Construction and Building Materials*, vol. 72, p. 23-30.
- Bureau de Normalisation du Québec. 2014. *Norme BNQ 2560-114 Travaux civil - Granulats*. Québec, Québec Bureau de normalisation du Québec 69 p.

- Chen, Jianzhou, Mustaque Hossain et Todd M Latorella. 1999. « Use of falling weight *deflectometer and dynamic cone penetrometer in pavement evaluation* ». *Transportation Research Record*, vol. 1655, n° 1, p. 145-151.
- Commission des services électriques de Montréal (CSEM). *Devis de la Commission des services électriques de Montréal (CSEM)*.
- Doucet, F, et G Doré. 2004. « Module réversible et coefficient de poisson réversible des matériaux granulaires C-LTPP ». In *Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical and 5th Joint IAHCNC and CGS Groundwater Specialty Conferences CD-Rom, Québec, Que.*
- Du, Lianxiang. 2001. « Laboratory investigations of Controlled Low-Strength Material ». The University of Texas at Austin, 255 p.
- Farrag, Khalid. 2011. « Controlled low-strength material used around buried pipelines ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 2251, p. 157-164.
- Fourny, Julien. 2008. « Mise au point de matériaux de remblai réexcavables ». *La revue Scientifique des Instituts Supérieurs Industriels Libres Francophones Belges*, vol. 22, p. 1-19.
- Gemperline, Claire S., et Stephan Durham. 2012. « Beneficial Use of Recycled Materials in Controlled Low Strength Materials ». In *ICPTT 2012 : Better Pipeline Infrastructure for a Better Life*. p. 1305-1316. ASCE. <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412619.133> >.
- Khoury, Naji N., et Musharraf M. Zaman. 2004. « Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation, and Soil Suction for Subgrade Soils ». *Transportation Research Record*, vol. 1874, n° 1, p. 99-107.
- Ling, Tung-Chai, Senthil Kumar Kaliyavaradhan et Chi Sun Poon. 2018. « Global perspective on application of controlled low-strength material (CLSM) for trench backfilling – An overview ». *Construction and Building Materials*, vol. 158, p. 535-548.
- Lupien, C., R. Gagne et Y. Martin. 2002. « Formulation optimale du remblai sans retrait ». In *2e conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil*. p. 10.
- Martin, Yanick. 2001. « Remblai sans retrait: optimisation de la formulation et conditions d'utilisation ». Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 228 p.
- National Ready Mix Concrete Association (NRMCA). 2000. *Flowable fill materials*. Coll. « Concrete in practice (CIP) ». Silver Spring, Md, USA: National Ready Mix Concrete Association (NRMCA).
- Ohlheiser, T. 1998a. « Utilization of Recycled Glass as Aggregate in Controlled Low-Strength Material (CLSM) ». In *The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill)*, STP1331-EB, sous la dir. de Howard, A. and Hitch, J., p. 60-64. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

- Ohlheiser, T. R. 1998b. *Utilization of Recycled Glass as Aggregate in Controlled Low-Strength Material (CLSM)*
The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill). West Conshohocken, PA: ASTM International, 60-64 p.
- Pujadas, P., A. Blanco, S. Cavalaro et A. Aguado. 2015. « *Performance-Based Procedure for the Definition of Controlled Low-Strength Mixtures* ». *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, n° 11, p. 06015003.
- Siddique, Rafat, et Albert Noumowe. 2008. « *Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete* ». *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, n° 1–2, p. 27-35.
- Suarez, Claudia Andrea Mellizo. 2010. « *Estimation du module réversible des matériaux granulaires de chaussées* ». Québec, Canada, Université Laval, 111 p.
- Ville de Montréal. 2008. *Devis technique normalisé 6VM-30 : Remblai sans retrait*,. p.5 p.

ANNEXE A: TRANCHÉES URBAINES REMBLAYÉES AVEC DU RSR

L'amélioration du réseau de lignes de transport d'électricité est une réalité d'aujourd'hui pour répondre aux besoins de croissance énergétique et de stabilité du réseau. En milieu urbain fortement densifié, la construction de lignes aériennes est impossible. Les conduits enfouis dans des massifs en béton sont alors la solution la plus adéquate pour ce type de projet.

Le projet à l'étude est la construction de deux lignes électriques d'environ 7 km de longueur chacune à une profondeur de 1,5 m sous la chaussée du centre-ville de Montréal (voir les tracés à la Figure A1). Les deux circuits alimentent, à une tension de 315 kV le poste de transport d'énergie d'Hydro-Québec De Lorimier à partir du poste Viger.

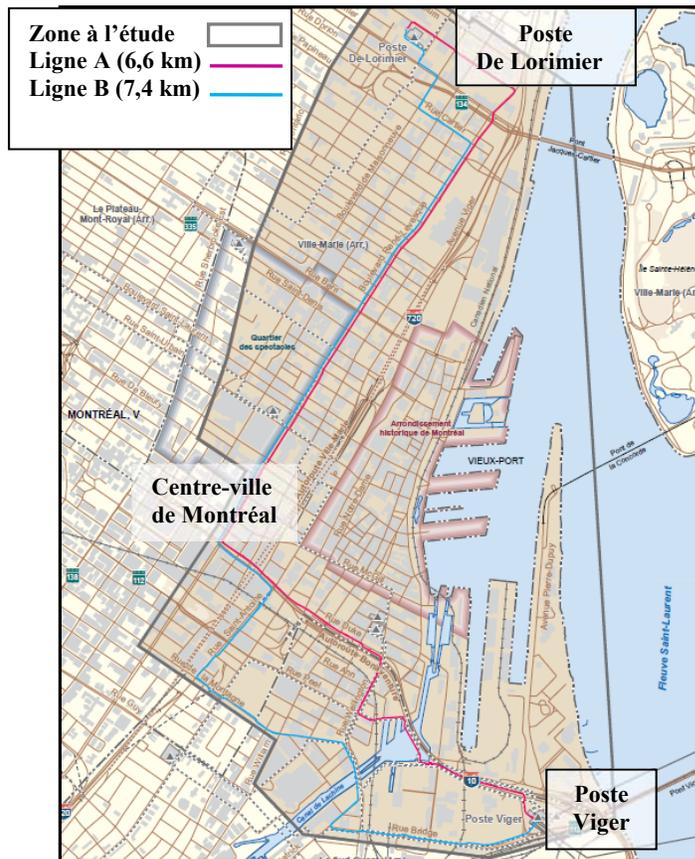


Figure A1: Zone à l'étude au centre-ville de Montréal, Ligne A et Ligne B

L'utilisation de RSR (béton maigre, béton remblai, sol-ciment, CLSM, etc.) permet de faire des ouvrages rapides et économiques^{1,2}. Les travaux de remblaiement sont faits rapidement et la sécurité des travailleurs est améliorée. Les 14 km de lignes électriques ont été construits par un seul et même entrepreneur sur une période d'environ 50 semaines (300 m par semaine en moyenne).

Le RSR s'autocompacte et développe sa résistance ultime sans aucune compaction mécanique. Sa granulométrie ressemble à celle de la pierre traditionnellement compactée (MG20, 0-20 mm). La Figure A2 présente le fuseau granulométrique du mélange de RSR utilisé. La courbe se situe à l'intérieur du fuseau spécifié par la norme NQ-2560-114 (BNQ 2002) utilisée par le Ministère des Transports du Québec (MTQ) pour les granulats 0-20 mm utilisés dans les ouvrages de génie civil.

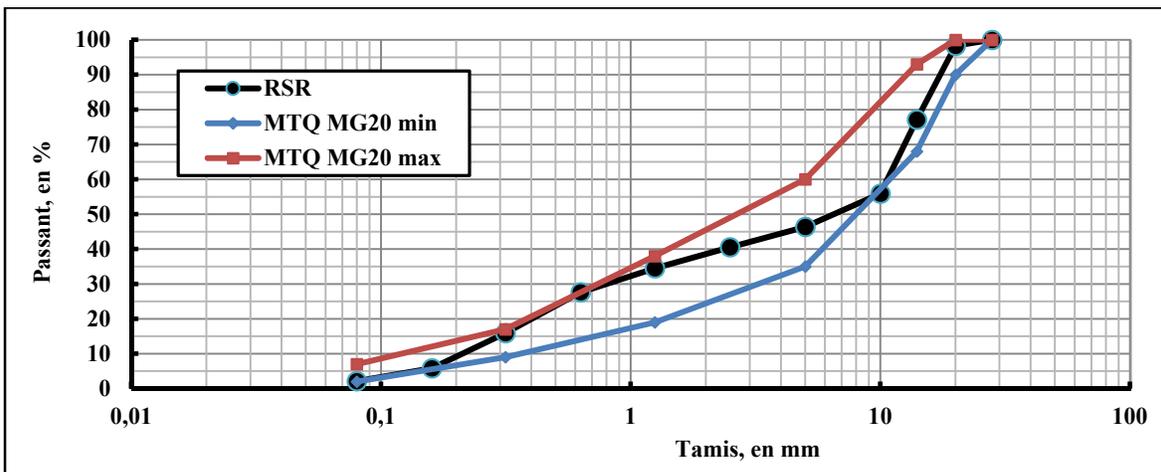


Figure A2 : Granulométrie du mélange de RSR utilisé et fuseau MTQ pour pierre 0-20 mm

Le RSR est fabriqué en usine avec de la pierre et du sable à béton et livré à la bétonnière. Le mélange universellement utilisé contient 1 % de ciment et 10-11 % d'eau (% massiques). Son utilisation permet de réaliser les excavations pour les puits d'accès en béton préfabriqué plus étroits (Figure A3), car le matériau s'autoplace dans les endroits difficiles d'accès. Les tranchées peuvent être étroites et profondes (Figure A4). Le lendemain du bétonnage des massifs de conduits enfouis, les étançonnements sont complètement enlevés et la tranchée est simplement remplie de RSR. Aucune compaction mécanique n'est nécessaire et les travailleurs sont en sécurité dans la rue.

L'utilisation de RSR permet de réduire l'emprise des travaux sur la chaussée diminuant par le fait même l'impact des travaux sur la circulation. De plus, aucune pile de matériau n'est nécessaire, car le RSR est livré et déchargé directement et à haute vitesse dans les tranchées. Les travaux sont beaucoup moins bruyants comparativement au compactage de matériaux granulaires. Les travaux localisés aux intersections majeures ont donc pu être réalisés la nuit.

¹ Smith, A. (1991), *Controlled Low-Strength Material*, Concrete Construction, May, p. 6.

² Zhang, Z. and Tao, M. (2007), *Flowable Fill as Geotechnical Material in Highway Cross-Drain Trenches*, Geotechnical Testing Journal, No. 1.

Certaines plaques d'acier qui servent à recouvrir les ouvertures peuvent être laissées en place lors du remblaiement avec RSR, car le matériau coule et s'autoplace. Les entraves à la circulation automobile sont ainsi grandement diminuées.

Le rythme de remblaiement peut atteindre 7 m³ par 10 minutes par camion avec un seul travailleur et sans effort (Figures A3, A4 et A5). Le risque pour la santé des travailleurs est diminué, car aucun travail de compactage ne se fait en tranchée et le nombre de manipulations est diminué.³



Figure A3 : Remblaiement d'un puits d'accès préfabriqué inséré dans une ouverture étroite

Le contrôle de la qualité de matériau de type RSR se fait traditionnellement en prenant des cylindres d'échantillons pour vérifier sa résistance à la compression non confinée. Selon la littérature, un mélange qui contient 50 % de pierre 5-20 mm doit avoir une résistance à la compression à 28 jours d'un MPa ou moins afin d'être réexcavable facilement à la pelle mécanique. Pour un mélange qui contient moins de pierre, la résistance doit être de 2 MPa maximum. Depuis 1996, l'Association Béton Québec recommande un dosage maximal de ciment de 25kg/m³ pour que le mélange ne devienne pas trop rigide⁴.

Le bon dosage en pierre et en eau permet d'obtenir un matériau abordable, autoplaçant et homogène s'il est déversé à grande vitesse. La vitesse de drainage du RSR dans le sol de la tranchée doit pouvoir permettre qu'un travailleur puisse marcher sur le remblai après maximum 20 minutes. Le pourcentage de vide restant dans le mélange lors de la prise du ciment influence

³ ACI Committee 229 (2013), *Controlled low-strength materials*, ACI 229R-13, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

⁴ Association Béton Québec (2007), *Le remblai sans retrait*, Techno-béton bulletin technique, No.18.

la capacité portante finale du mélange. Plus les vides sont grands, plus le mélange a le potentiel d'absorber de l'eau ce qui peut entraîner des tassements différentiels dus aux charges et au gel-dégel⁵.



Figure A4: Tranchées étroites (950 mm) type des 14 km de lignes

Le projet *Contrôle de la qualité du remblai sans retrait*⁶ mesure la rigidité réelle du remblai avec un pénétromètre dynamique (Figure A5) à différents intervalles de temps. Généralement, moins le remblai se draine rapidement, moins grande sera sa capacité portante ultime.



**Figure A5: Essai au pénétromètre dynamique 180 minutes après la coulée.
Temps pour couler: 30 minutes**

⁵ Martin, Y. (2001), Remblai sans retrait : optimisation de la formulation et conditions d'utilisation, Université de Sherbrooke, p. 215.

⁶ Pothier, S. (2018), Contrôle de la qualité du remblai sans retrait, École de technologie supérieure.

La Figure A6 montre les pénétrogrammes construits à l'aide des essais de pénétromètre dynamique réalisés sur la rue Saint-Christophe dans le cadre du projet. La donnée brute (l'indice de pénétration) a été convertie en indice de capacité portante CBR avec la relation fournie par la norme⁷. Il est possible de bien apprécier l'évolution du CBR sur l'épaisseur de la tranchée dans le temps. Les rigidités de deux tranchées en pierre compactée 0-20 mm (95 % et 99 % de la masse volumique optimale Proctor modifié P.M.) ont été ajoutées à la figure pour comparer la capacité du RSR et de la pierre compactée. Le pourcentage de vides a été pris avec un nucléodensimètre par un technicien de chantier d'un laboratoire privé.

La capacité portante d'un même mélange de RSR peut varier, mais à 48 heures sa capacité portante est généralement du même ordre de grandeur que celle de la pierre compactée MG20 à 95 % P.M. Après 46 h de cure, le RSR développe un CBR de 45 à 50 soit environ 330 KPa de capacité portante à l'ultime⁸ alors que la pierre compactée à 5 % de vides développe 280 KPa. À 3, 6 et 9 h, le RSR développe entre 60 et 100 KPa.

Les autres sections de tranchées testées sur ce projet ont eu des performances et capacités portantes similaires. La chaussée était généralement de type mixte (dalle de béton armé + pavage). La dalle de béton était coulée de 2 à 4 jours après le remblaiement en RSR.

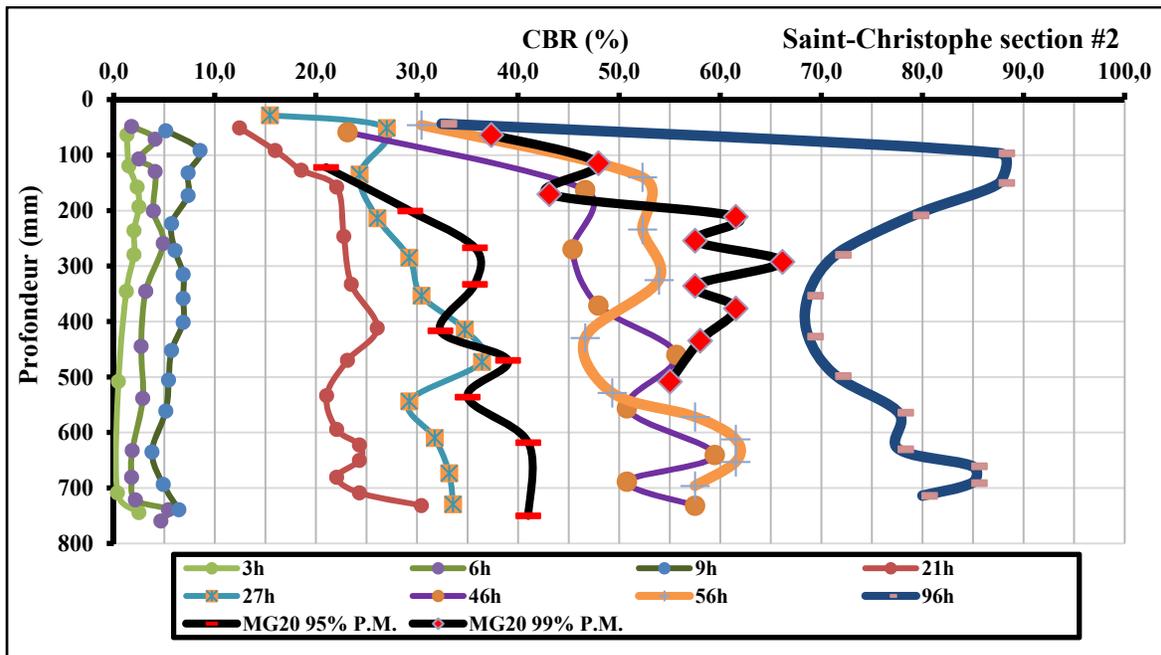


Figure A6: Résultats de pénétromètre convertis en indice de capacité portante CBR

⁷ ASTM D 6951-03 *Standard Test Method of Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*.

⁸ Formule fournie par le fabricant du pénétromètre : adaptée de Portland Concrete Association (1955), *Design of Concrete Airport Pavement*, Portland Cement Association, P8.

ANNEXE B : PLANS ET PHOTOS DES SITES (B À G) POUR L'ÉTUDE DE LA TEMPÉRATURE

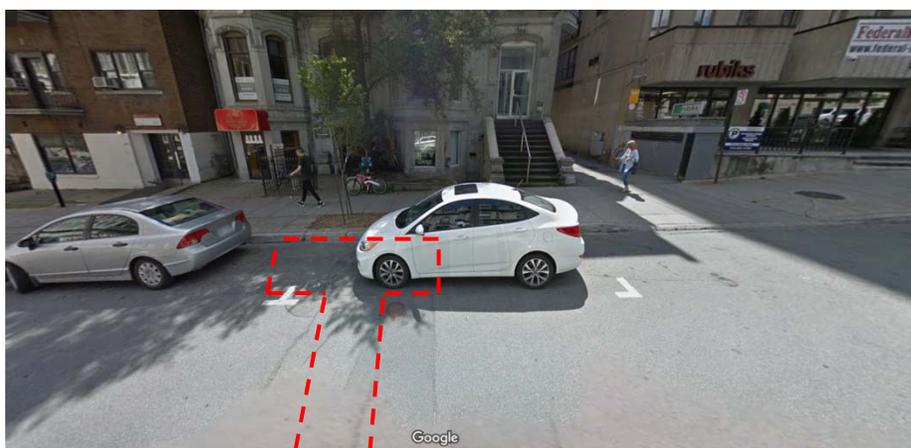
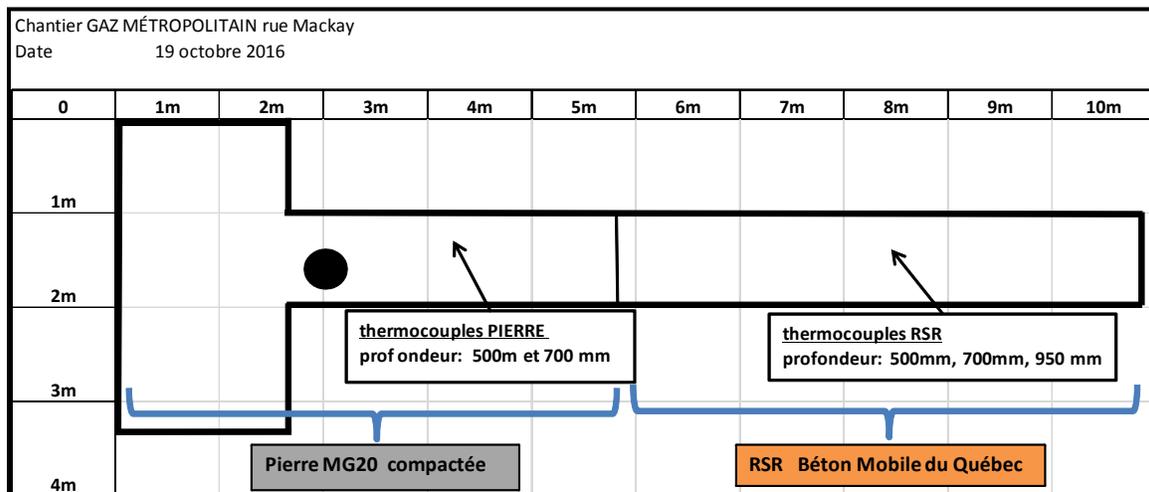


Figure B1 : 2090 rue Mackay (site B), schéma de la tranchée (haut),
photo du site (bas)

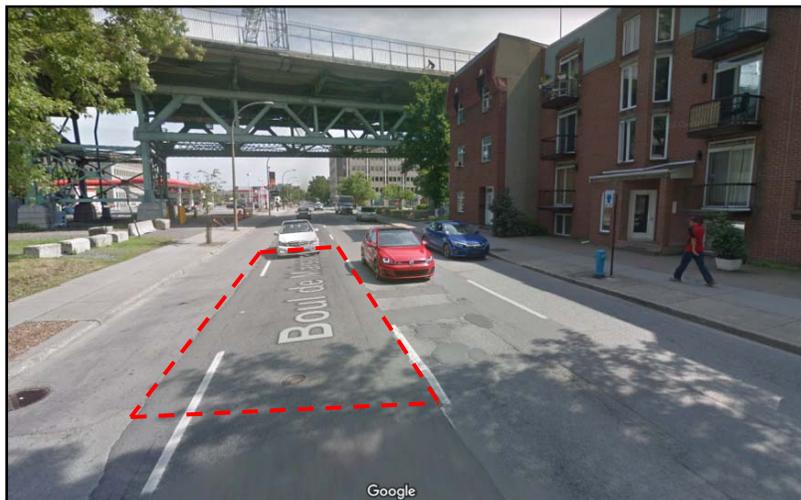
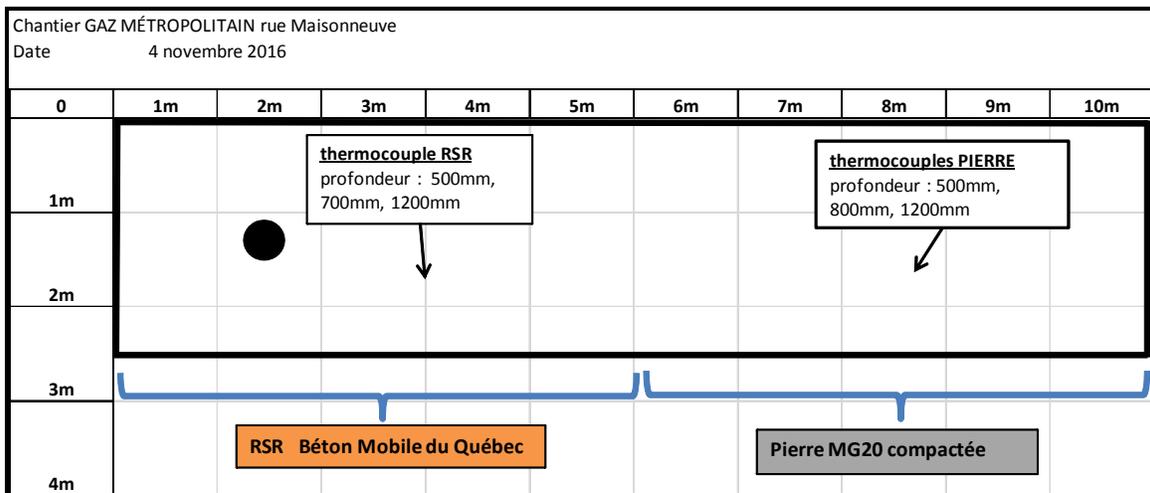


Figure B2: 1980 boulevard De Maisonneuve Est (site C), schéma de la tranchée (haut), photo du site (bas)

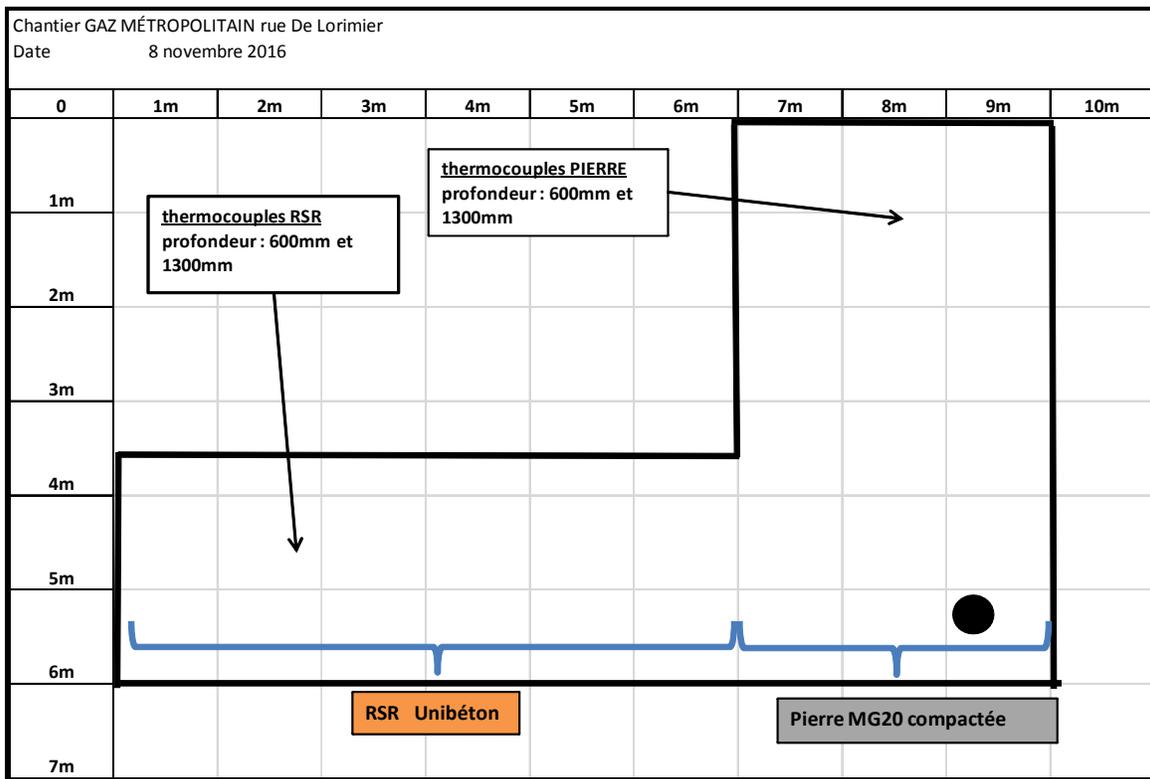


Figure B3 : 7137 rue De Lorimier (site D), schéma de la tranchée (haut),
photo du site (bas)

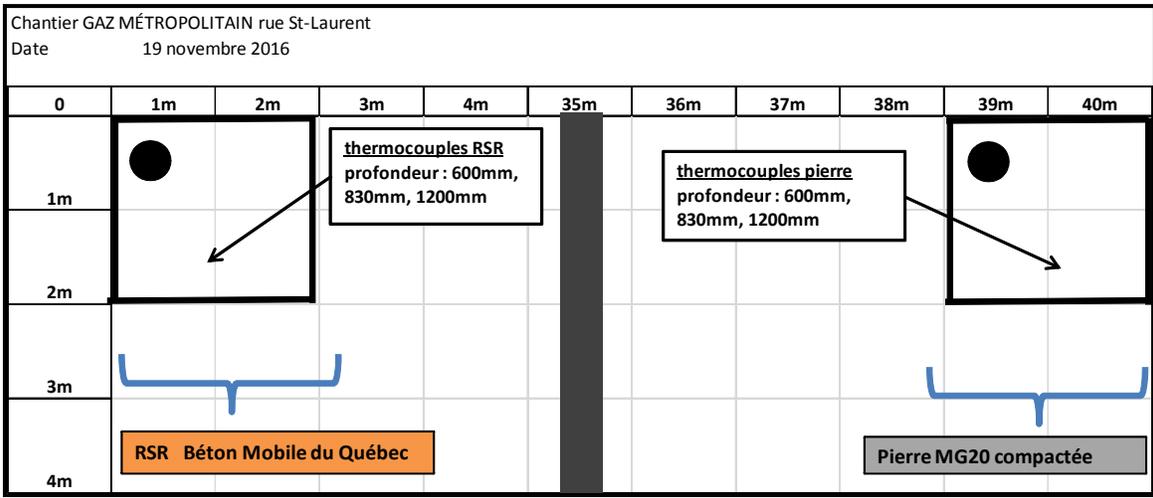


Figure B4: 998 boulevard Saint-Laurent (site E), schéma de la tranchée (haut), photo du site (milieu), photo des installations (bas)



Figure B5 : Installation dans une chaussée qui comporte une dalle de béton, 998 boulevard Saint-Laurent (site E)

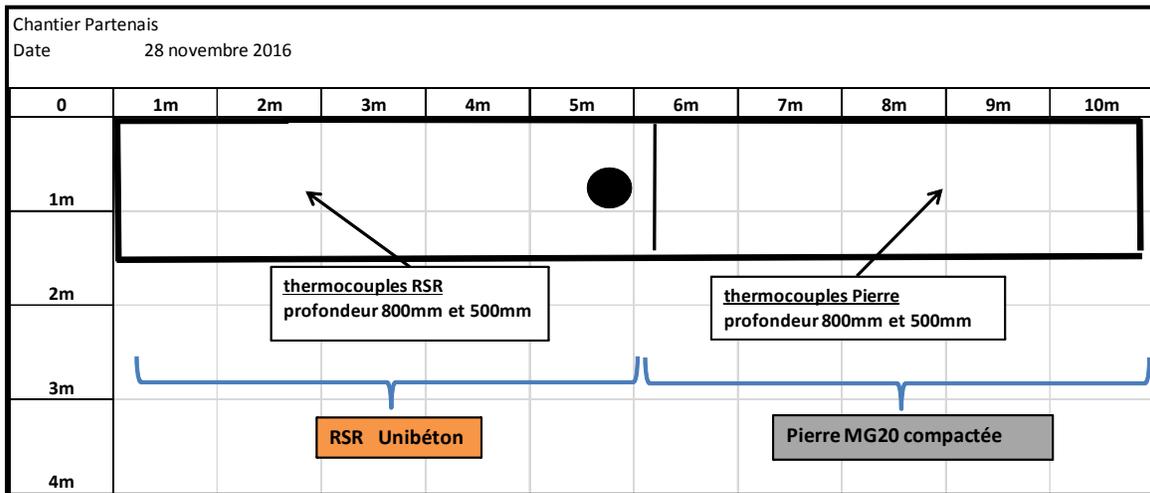


Figure B6 : 1878 rue Parthenais (site F), schéma de la tranchée (haut), photo du site (bas)

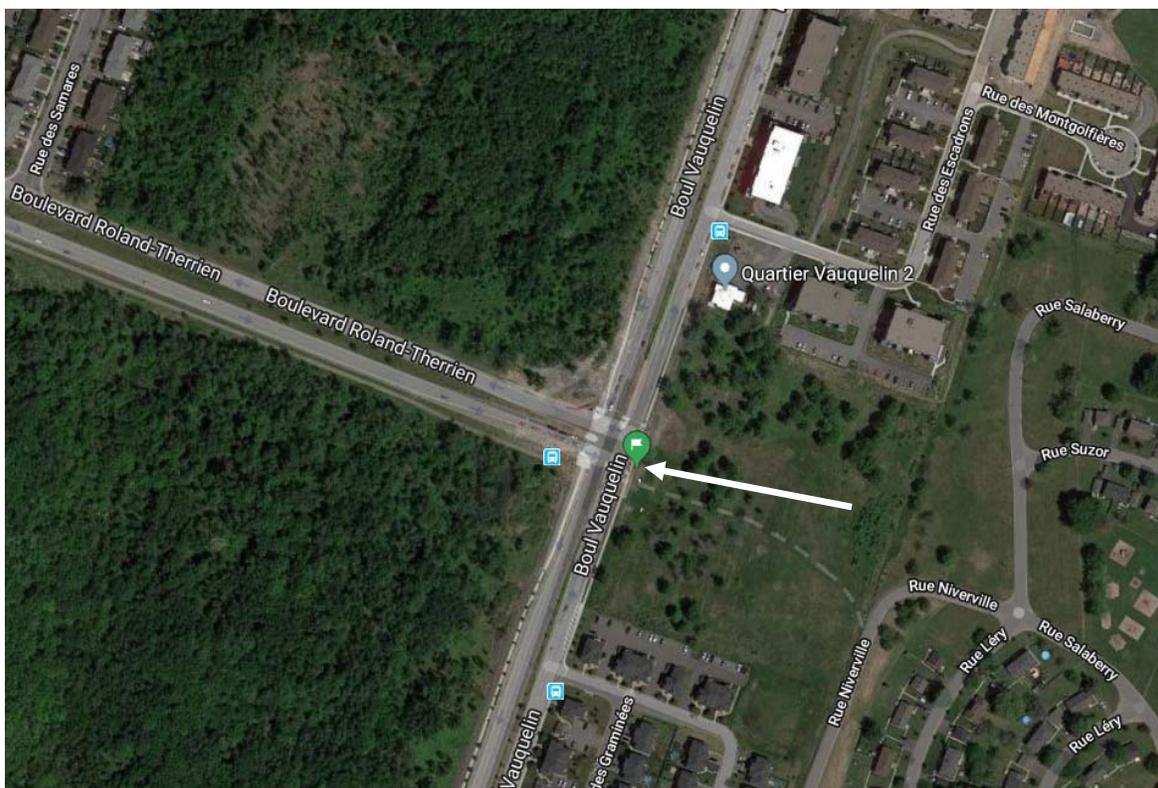
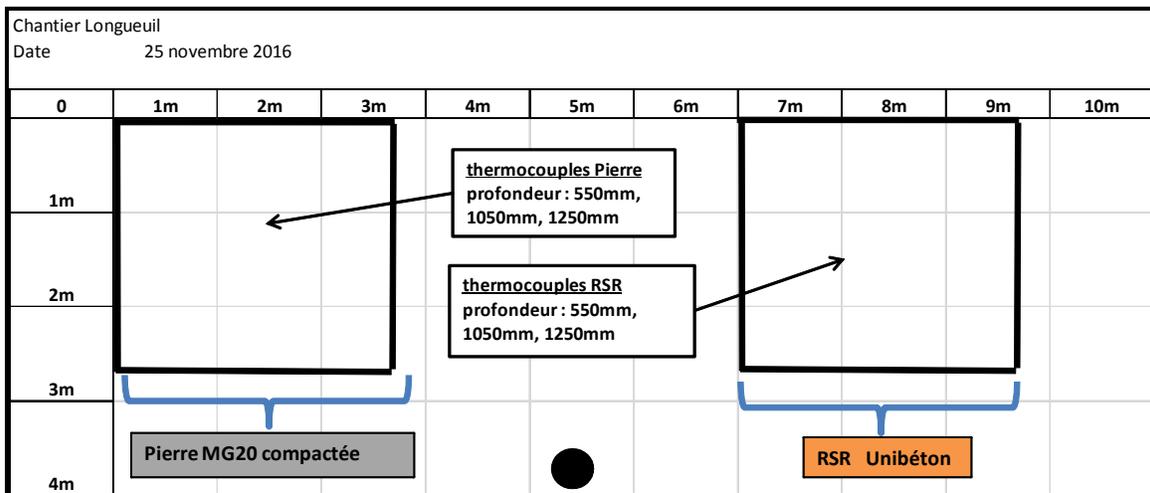


Figure B7 : boulevard Vauquelin / boulevard Roland-Therrien à Longueuil (site G), schéma de la tranchée (haut), carte du site (bas)

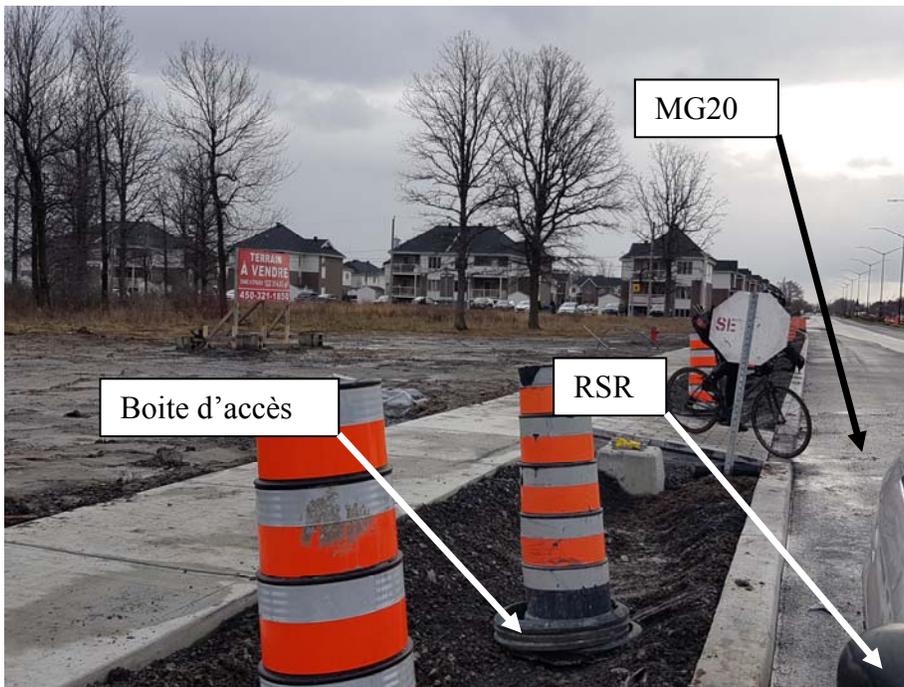


Figure B8 : Installation des tranchées au boulevard Vauquelin / boulevard Roland-Therrien à Longueuil (site G)

ANNEXE C : FEUILLE DE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

FICHE DE CONTRÔLE QUALITÉ DU REMBLAI SANS RETRAIT (RSR)

Date de remblai :	Heure de début :
Client :	
Adresse du site :	
Fournisseur de matériaux :	
Température extérieure :	
Matériaux encaissants dans la tranchée :	
Pluie dans les derniers jours ou présence d'eau en tranchée ?	

Sur le schéma, tracer les rues, trottoirs, puits d'accès, tranchées, conduits enfouis, bétonnière pendant remblayage, emplacement des essais, conditions défavorables, etc.

Schéma du site :	
Prendre en note l'heure de début et fin de chaque camion (particulièrement la couche supérieure)	

	Minutes					
	5	10	15	20	25	30
Boule Kelly (enfoncement mm)						

Temps pour stabilisation enfoncement ≤ 5 mm Boule Kelly ou trace de soulier	
---	--

Température du RSR	
Masse volumique	
Nucléodensimètre (temps, résultats)	
Échantillons	
Essai pénétromètre (DCPT)	Notes
	Nom du surveillant Signature

ANNEXE D : DONNÉES TEMPÉRATURE AU SITE A, DEUXIÈME HIVER (NON REPRÉSENTATIF DE L'ENSEMBLE DES RÉSULTATS)

La température observée durant cette saison hivernale est à l'avantage du RSR, sur le site de la rue Saint-Patrick. Par contre, ces données ne sont pas représentatives parce que:

- le module d'acquisition a dû être remplacé et qu'il était impossible de le calibrer;
- il y avait du transit électrique dans les conduits enfouis, contrairement au premier hiver;
- une des sondes a été installée à côté d'un puits d'accès électrique et l'autre de télécommunication qui ne dégage vraisemblablement pas la même chaleur.

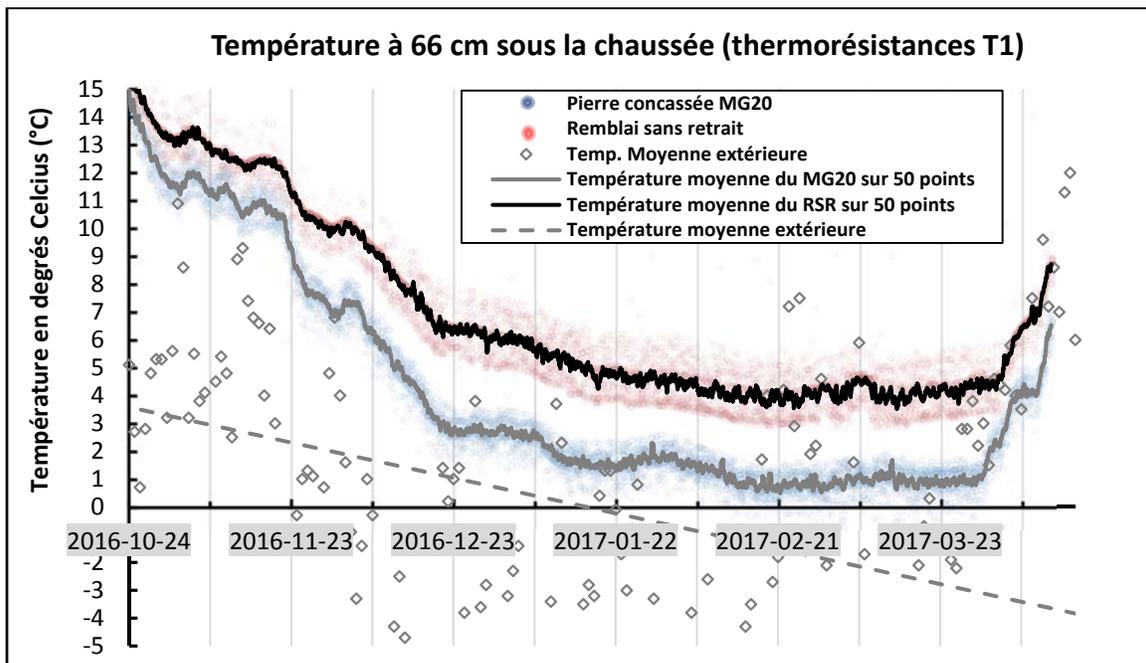


Figure D1 : Température à 66 cm sous la chaussée (thermorésistance T1) au site A

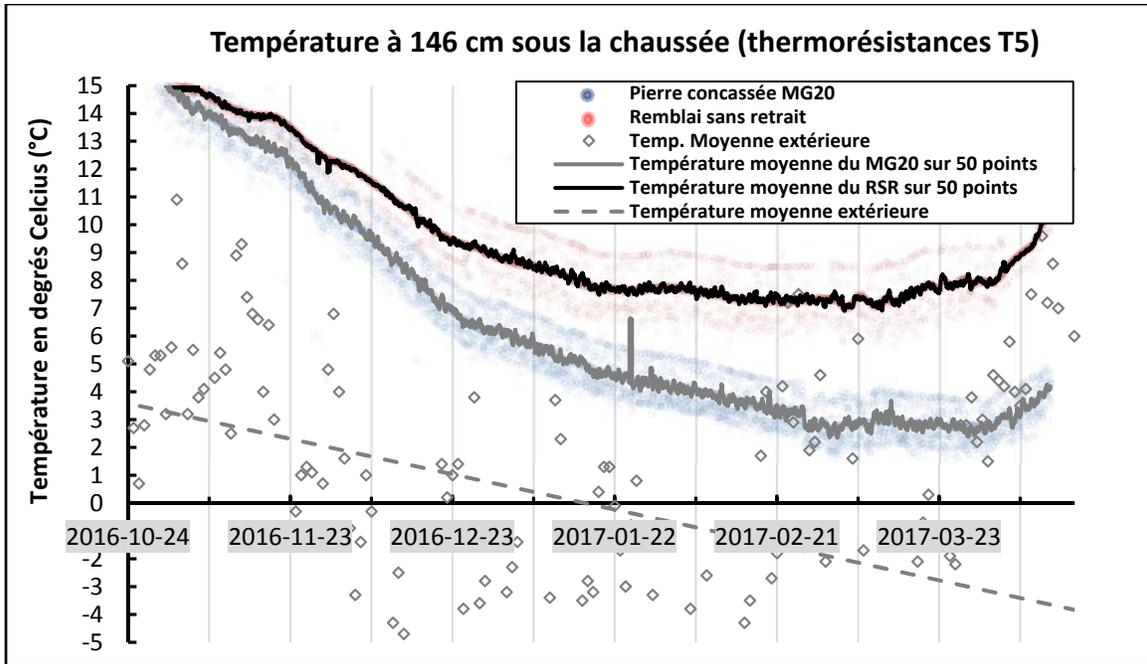


Figure D2 : Température à 146 cm sous la chaussée (thermorésistance T1) au site A

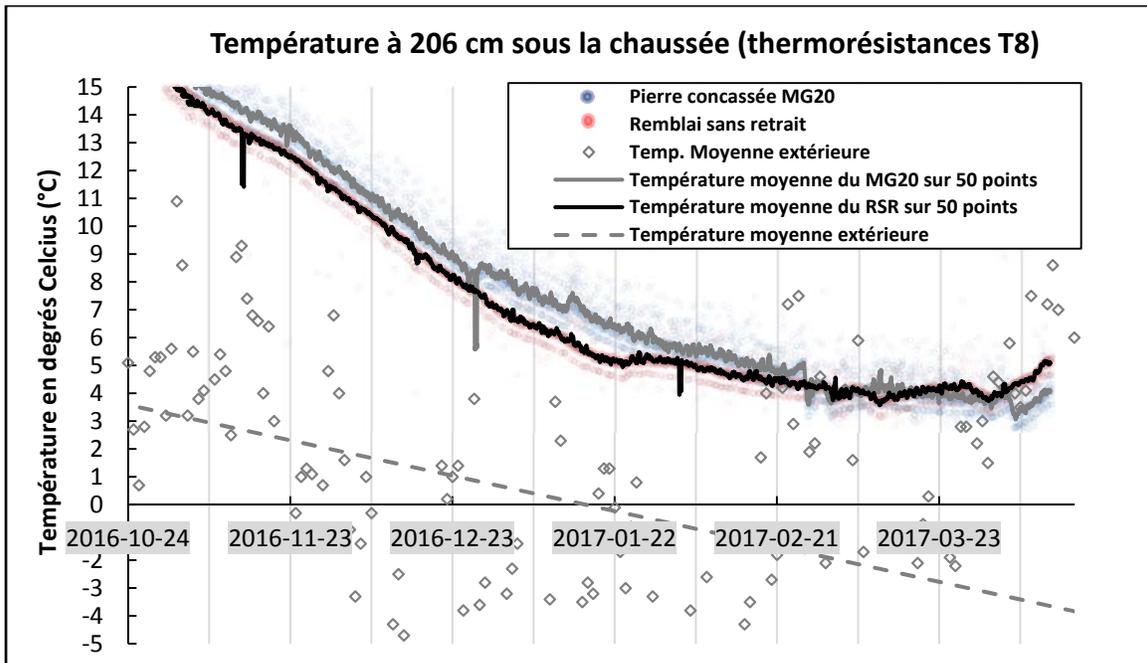


Figure D3 : Température à 206 cm sous la chaussée (thermorésistance T1) au site A



La reproduction de ce document par quelque procédé que ce soit et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation du CERIU.

ISBN 978-2-9817200-5-4

Tous droits réservés.

© **CERIU**, mai 2020



Centre d'expertise
et de recherche
en infrastructures
urbaines

1255, boul. Robert-Bourassa, bur. 800
Montréal (Québec) H3B 3W3
Canada

514 848-9885

info@ceriu.qc.ca
www.ceriu.qc.ca