OPTIMISATION DE LA CONCEPTION DE CHAUSSÉES PORTUAIRES PAR UNE APPROCHE DE TRAITEMENT PAR STABILISATION ET SOLIDIFICATION :

Cas du réaménagement du secteur Viau au Port de Montréal

Jean-Philippe Boudreault, ing., Directeur de projet Géoenvironnement
Groupe Qualitas inc.
Jean-Claude Mwamba, M.Sc.A, Chargé de projet Géoenvironnement
Groupe Qualitas inc.
Éric Hardy, ing., Directeur Géoenvironnement
Groupe Qualitas
Louis D'Amours, ing., M.Sc.A, Vice-Président
Groupe Qualitas
Serge Kouadio, ing., M.Sc.A, Chargé de projet
SNC-Lavalin
Hugo Brassard, ing.
Administration portuaire de Montréal
Jean-Sébastien Dubé, ing., Ph.D, Professeur agrégé
École de technologie supérieure

Communication préparée pour la séance suivante :

Technologies vertes : innovation en matière de mise en œuvre et d'évaluation

du Congrès de 2014 de l'Association des transports du Canada, à Montréal (Québec)

Résumé

Dans le but d'améliorer la productivité de ses installations maritimes, l'APM a procédé au réaménagement du secteur Viau en un terminal d'entreposage et de manutention de conteneurs. Ce projet d'une valeur de 30,6 M$ comprenait notamment la consolidation des sols par compactage dynamique, la construction d'une chaussée portuaire, des services souterrains d'égouts et d'aqueducs, des bâtiments ainsi que des ouvrages structuraux en lien avec les divers aménagements. Le site ayant été construit sur des remblais hétérogènes dont les propriétés physiques ne répondaient pas à la nouvelle vocation du site, celles-ci devaient être améliorées afin d'assurer une performance adéquate du nouveau terminal, compte tenu des énormes charges imposées par l'empilement des conteneurs et les équipements de manutention. Par conséquent, il a fallu adopter des épaisseurs de chaussée beaucoup plus grandes que celles existantes au terminal à vrac actuel, ce qui conduisait à la gestion d'importants volumes de sols contaminés. Les scénarios d'aménagement ont montré que la gestion de ces sols contaminés issus des excavations avait un impact sur la viabilité financière du projet. Il a donc fallu recourir à une solution innovatrice et durable en optimisant l'épaisseur de la chaussée portuaire et optant pour la valorisation et la réutilisation sur site des sols contaminés traités par stabilisation et solidification comme matériaux de sous-fondation. Ce procédé a ainsi permis de valoriser de façon sécuritaire et directement sur le site les sols contaminés. De plus, de par son apport structurant, ce procédé a permis l'obtention d'une chaussée optimisée à la fois plus mince, plus résistante et plus durable et des économies considérables.

1. Introduction

Dans le but d'augmenter la capacité d'entreposage des conteneurs au Port de Montréal afin de supporter la demande croissante et de faire face à la concurrence, l'Administration portuaire de Montréal (APM) a procédé à la requalification du secteur d'entreposage de marchandises en vrac situé au secteur Viau en un secteur d'entreposage de conteneurs d'une capacité de 150 000 équivalent vingt pieds (EVP).

L'ensemble de l'aménagement du site, pour un coût global de 30,6 M$, comprenait les travaux suivants :

- la consolidation des sols par compactage dynamique;
- le déplacement de voies ferrées et des aires de stockage de wagons;
- la construction d'infrastructures d'égouts, d'aqueduc et d'électricité ainsi que l'éclairage;
- la valorisation sécuritaire sur le site de sols contaminés suite à un traitement par stabilisation et solidification;
- la conception et la construction de la chaussée portuaire.

L'étude des scénarios d'aménagement a montré que la gestion d'un important volume de sols contaminés issus des excavations avait un impact sur la viabilité financière du projet. Il a donc fallu recourir à une solution innovatrice et durable en optant pour la valorisation et la réutilisation sur site des sols contaminés traités par stabilisation et solidification (S/S) comme matériaux de sous-fondation.

Présentation du site

Le site à l'étude est situé dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, à Montréal et possède une superficie de l'ordre de 90 000 mètres carrés. Il est limité au nord par la rue Notre-Dame Est, entre le boulevard Pie-IX et la rue Viau. Il est bordé au sud par le fleuve Saint-Laurent. Le site est utilisé depuis 1930 comme terminal d'entreposage de vrac solide et de marchandises. Préalablement aux travaux de réaménagement actuels, des études de caractérisation géotechnique et environnementale du site ont été réalisées. On note la présence d'un remblai hétérogène de plus de 15 mètres à l'arrière des murs de couronnement. Sommairement, l'organisation des couches de matériaux rencontrés sur le site se présentait comme suit : 1°) un enrobé bitumineux; 2°) une fondation granulaire constituée de pierre concassée; 3°) un remblai hétérogène constitué d'un mélange de silt, de sable et de gravier en proportions variables; 4°) un sol naturel sous la forme d'un till. Le volet environnemental de l'étude avait permis, en résumé, de conclure à la présence de sols contaminés dont les concentrations en hydrocarbures pétroliers (C_{10} à C_{50}), en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et en métaux étaient généralement inférieures au critère « C » du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Toutefois, l'étude avait aussi identifié la présence de sols contaminés à des concentrations supérieures aux limites applicables pour un site portuaire pour les HAP et les métaux (cuivre et zinc).

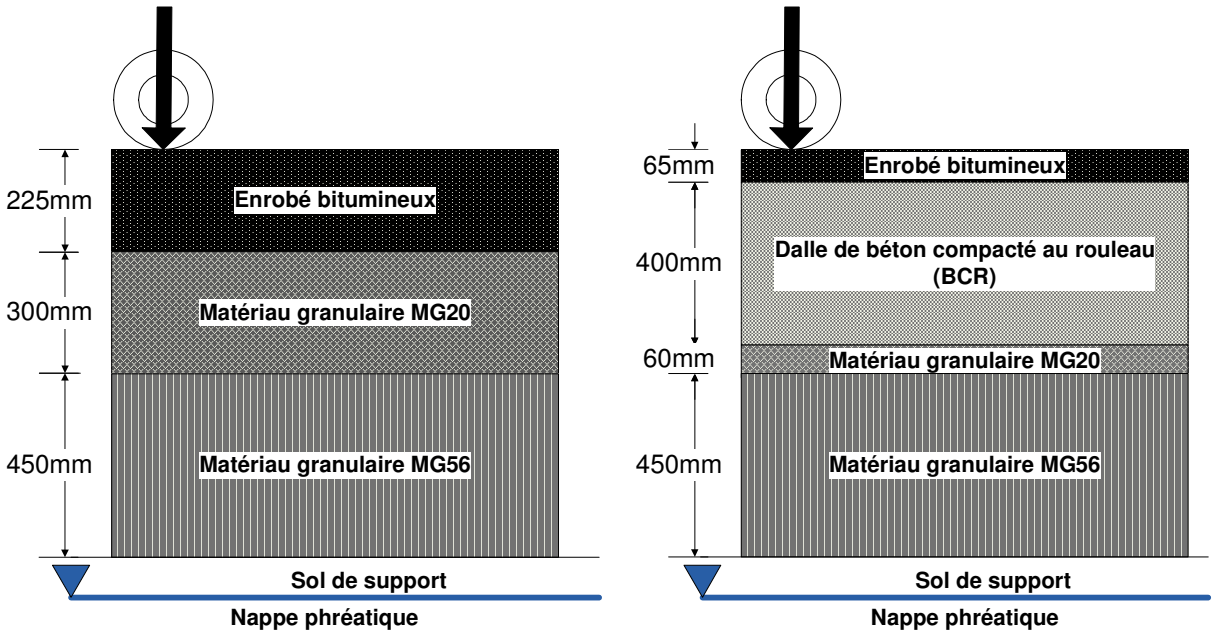
Problématique

Le site ayant été construit sur des remblais hétérogènes dont les propriétés physiques ne répondaient pas à la nouvelle vocation du site, celles-ci devaient être améliorées afin d'assurer une performance adéquate du nouveau terminal, compte tenu des énormes charges imposées par l'empilement des conteneurs et les équipements de manutention. Les charges de trafic envisagées pour la nouvelle chaussée portuaire se présentent comme suit :

- Pont roulant sur pneus : 200 000 passages sur les pistes de roulement sur 20 ans;
- Chargeur frontal : 80 000 passages sur 20 ans;
- Camion-remorque : 3 000 000 passages sur 20 ans.

L'amélioration de la performance de la nouvelle chaussée portuaire suppose l'adoption d'épaisseurs de chaussées beaucoup plus grandes que celles existantes au terminal à vrac. Cependant, la nécessité d'une épaisseur de chaussée plus grande implique la gestion d'un volume plus important de sols contaminés issus des excavations. La figure 1 montre la conception des structures préliminaires de la chaussée portuaire avec une épaisseur totale de 975 millimètres. Compte tenu de cette épaisseur de chaussée, la construction de la nouvelle chaussée impliquait des coûts de réalisation très élevés dus : 1°) à l'excavation des sols; 2°) à l'enfouissement des sols contaminés et 3°) à l'importation d'une quantité considérable de matériaux granulaires.

De plus, une épaisseur de chaussée plus grande amenait une contrainte supplémentaire compte tenu du niveau d'implantation relativement fixe des structures existantes (quais, voies de circulation adjacentes, voies ferrées, etc.).



(a) Structure globale (entreposage et manutention des conteneurs)

(b) Structure spécifique aux pistes de roulement des ponts roulants sur pneus

Figure 1 - Structures préliminaires de la chaussée portuaire : 975 mm d'épaisseur.

2. Optimisation de la chaussée

Dans le but de minimiser les coûts liés à la gestion des sols contaminés provenant des excavations, il a donc été proposé d'améliorer les propriétés physiques du remblai et de valoriser ces sols directement sur le site suite à une réutilisation comme matériaux de sous-fondation après traitement par stabilisation et solidification. Considérant que la structure de la chaussée devait être le plus mince possible, le massif issu de la stabilisation et de la solidification des sols devait répondre à des critères physiques permettant l'amélioration de la capacité portante de la chaussée. La structure de la chaussée a donc été modélisée pour déterminer les contraintes transmises au monolithe S/S. Le tableau 1 donne les résultats de la modélisation des contraintes transmises au monolithe S/S. À partir de ces valeurs de contrainte, les critères physiques auxquels devaient répondre le monolithe S/S ont été fixés.

Tableau 1 - Modélisation des contraintes transmises au monolithe S/S

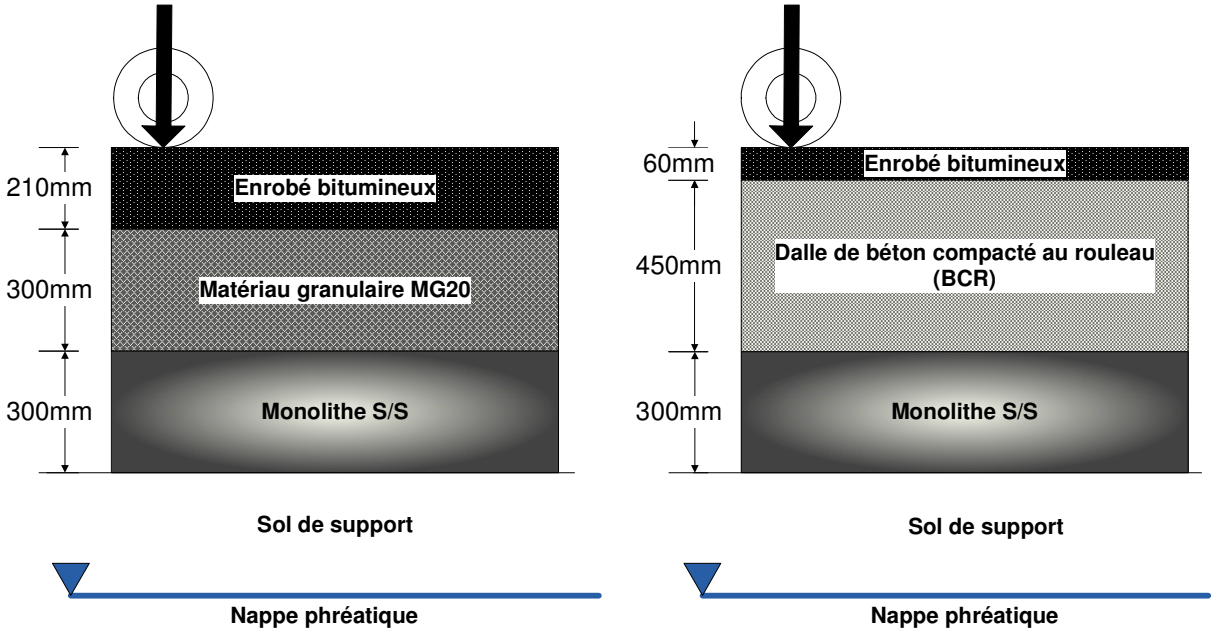
Équipement	Contrainte à la base du monolithe
Pont roulant sur pneus	0,7 MPa
Chargeur frontal	0,9 MPa
Camion-remorque	0,2 MPa

La conception optimisée a permis d'obtenir une nouvelle configuration des structures de la chaussée portuaire avec une épaisseur totale de 810 millimètres, soit une réduction de 165 millimètres par rapport aux structures préliminaires (voir figure 2). Avec l'apport structurant du monolithe S/S, les charges de trafic admissibles ont pu ainsi être augmentées tel que montré dans le tableau 2.

Tableau 2 : Comparaison des structures globales de chaussée

Charge	Nombre de passages admissibles		Augmentation du nombre de passages admissibles
	Conception préliminaire avec 975mm	Conception optimisée avec 810mm	
Grue portique	152000[(1)]	256000[(1)]	68%
Chargeur frontal	200000	322000	61%
Camion-remorque	4194000	4377000	4%

[(1)] Nombre de passages admissibles du pont roulant sur pneus entre les pistes de roulement.



(a) Structure globale (entreposage et manutention des conteneurs)

(b) Structure spécifique aux pistes de roulement des ponts roulants sur pneus

Figure 2 - Structures retenues de la chaussée portuaire : 810 mm d'épaisseur.

Le présent document explique les différents travaux qui ont été réalisés en laboratoire et sur le site. Dans un premier temps, l'étude de traitabilité des sols par S/S est présentée. Cette phase du projet comprenait une étude exhaustive en laboratoire qui avait pour objectif d'évaluer la possibilité de traiter par S/S les sols excavés sur le site ainsi qu'un essai pilote de chantier. Ce dernier avait pour but de vérifier la technique utilisée pour le mélange des intrants, de tester les équipements afin d'anticiper d'éventuels problèmes lors de l'application à grande échelle. Ensuite, les travaux nécessaires à la mise en place du monolithe S/S sont présentés. Enfin, nous soulignons l'apport de la technique appliquée dans l'optique d'une gestion durable des sols contaminés.

3. Étude de traitabilité

Description de la stabilisation et solidification

La stabilisation et la solidification (S/S) d'un sol contaminé est un procédé de traitement qui consiste à mélanger un liant d'inertage (ex. : ciment), de l'eau, des additifs et le matériau contaminé afin d'immobiliser les contaminants et rendre ainsi le matériau sécuritaire d'un point de vue environnemental. Le procédé repose sur deux mécanismes principaux, soit une stabilisation chimique des contaminants présents dans le sol et une encapsulation du sol contaminé stabilisé dans une matrice solide à l'aide, dans le cas présent, d'un mélange à base de ciment. Le premier mécanisme vise globalement à rendre les contaminants insolubles et le second à réduire la possibilité que le sol stabilisé entre en contact avec de l'eau.

Ce procédé, utilisé depuis les années 1950 aux États-Unis, est encore très peu utilisé au Québec et au Canada bien qu'il soit démontré et reconnu dans le traitement sur site et hors site de contaminations inorganiques.

Travaux de laboratoire

Les travaux de laboratoire ont consisté en une étude de traitabilité des sols contaminés par le procédé de stabilisation et solidification. Cette étude avait pour objectif d'étudier la faisabilité du traitement par S/S des sols contaminés qui devaient être excavés dans le cadre des travaux de réaménagement du secteur Viau au Port de Montréal. Deux échantillons composites représentatifs des sols rencontrés dans le premier mètre du site ont été prélevés au droit de dix stations d'échantillonnage. D'ordre général, lors de cet échantillonnage réalisé en décembre 2012 (avant les travaux de compactage dynamique), une couche de pierre concassée a été retrouvée sur une épaisseur moyenne de 0,3 mètre sous le pavage existant. Par la suite, une couche de remblai a été rencontrée. L'échantillonnage s'est limité à un mètre de profondeur sous le pavage en raison des objectifs du réaménagement qui avaient été initialement établis. Un troisième échantillon composite a été formé à partir d'un mélange de 30 % de la pierre concassée et de 70 % du remblai.

Le procédé de S/S retenu est celui qui consiste à mélanger les sols contaminés et un liant hydraulique, en l'occurrence du ciment Portland. Les formules sont constituées d'un mélange de pierre concassée, de remblai et de ciment dans diverses proportions. Trois types de ciment Portland ont été utilisés dans l'élaboration des formules. Des adjuvants (entraîneur d'air et réducteur d'eau) ont été ajoutés à certaines formules de mélange. Les éprouvettes ont été réalisées par compactage au marteau à percussion dans des moules cylindriques en PVC (de 150 x 300 mm et de 100 x 200 mm) et des moules prismatiques de 100 x 100 x 400 mm.

Un programme de contrôle de la performance du traitement a été mis au point (voir tableau 3). Il permet d'évaluer le comportement de la matrice solidifiée en fonction de divers agresseurs environnementaux (notamment la température et l'eau d'infiltration), ce qui permet de prédire son comportement global au fil des années.

Tableau 3 - Programme des essais physiques et chimiques

Essais physiques	Essais chimiques
- Résistance à la compression. - Résistance à la flexion. - Altération physique (cycles gel/dégel). - Conductivité hydraulique. - Compacité relative. - Masse volumique et teneur en eau. - Absorption et densité des particules. - Analyses granulométriques.	- Concentrations extractibles totales. - Lixiviation statique (TCLP milieu acide acétique, SPLP pluies acides, à l'eau). - Lixiviation dynamique (diffusivité). - Solubilité des contaminants. - Capacité de neutralisation de l'acidité. - Analyses minéralogiques.

Les éprouvettes confectionnées devaient répondre à un certain nombre de critères de performance. Ceux-ci ont été fixés à la suite d'une analyse structurale de la chaussée à partir des charges de trafic prévues. Sur le plan chimique, les critères de performance ont été établis suivant les lignes directrices formulées par le MDDELCC. Le tableau 4 résume les critères de performance retenus spécifiquement pour ce projet.

Tableau 4 - Critères de performance

TEST	CRITÈRE DU PROJET
TESTS PHYSIQUES	
Résistance à la flexion (à 28 jours)	> 1,8 MPa
Résistance à la compression (à 28 jours)	> 3,5 MPa
Conductivité hydraulique	< 10-7 cm/s
Altération physique	< 10 % perte de matériel à 21 cycles (gel/dégel)
TESTS CHIMIQUES	
Lixiviation SPLP	< critères de potabilité
Lixiviation à l'eau	< critères de potabilité

Au cours des travaux de laboratoire, l'influence des facteurs suivants a été étudiée :

- Le dosage en ciment.
- Le type de ciment.
- La granulométrie des sols.
- L'humidité des sols.
- L'ajout d'adjuvants (entraîneur d'air et réducteur d'eau).

Un total de vingt-sept formules de mélange a été réalisé. Les essais de compression et de flexion ont été réalisés sur chacune des formules de mélange. Sur la base des premiers résultats en flexion et en compression, des formules de mélange ayant présenté un plus grand potentiel ont été sélectionnées pour fins d'essais exhaustifs. Par la suite, les formules ayant démontré les performances les plus élevées ont été dupliquées afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats du traitement.

Les résultats des analyses granulométriques indiquaient que les échantillons de remblai correspondaient en moyenne à des graviers sableux et silteux avec traces d'argile. Les échantillons de pierre concassée sont associés à des graviers sableux avec traces de silt et d'argile. Les résultats des analyses granulométriques sont résumés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Sommaire des analyses granulométriques

Tamis	Pourcentage passant		
	Matériau 0,0 – 0,3 m de profondeur (pierre concassée)	**Matériau 0,3 – 1,0 m de profondeur (remblai)**	**Matériau 0,0 – 1,0 m de profondeur (mélange)**
56 mm	94 %	98 %	96 %
20 mm	57 %	80 %	71 %
5 mm	35 %	61 %	51 %
0,08 mm	13 %	32 %	25 %
0,002 mm	4,0 %	8,9 %	6,5 %

Les résultats de l'essai de compression ont montré que la moyenne des résistances à la compression obtenues à vingt-huit jours de mûrissement varie de 4,0 à 10,4 MPa. Toutes les formules dépassent le critère de 3,5 MPa de résistance en compression. Les résultats de l'essai de flexion ont montré que la moyenne des résistances à la flexion obtenues à vingt-huit jours de mûrissement varie de 1,4 à 2,3 MPa. Sur les 14 formules sélectionnées, dix dépassent le critère de 1,8 MPa de résistance en flexion. Les essais de conductivité hydrauliques ont été réalisés pour sept formules de mélange. Les résultats de cet essai montrent que les coefficients de perméabilité varient de 4,70E-09 à 3,00E-04 cm/s. Sur les sept échantillons testés, quatre respectent la norme d'un coefficient de perméabilité inférieur à 1,00E-07 cm/s. En conclusion, quatre des formules sélectionnées satisfaisaient à ces 3 critères.

L'altération physique a été évaluée à l'aide des essais de durabilité aux cycles de gel/dégel à sec et avec présence d'une source d'eau. Pour chaque type d'essai, onze formules de mélange ont été testées. Tous les échantillons testés en condition sèche respectaient le critère de moins de 10 % de pertes de matériel à 21 cycles fixé pour le projet. Pour les essais en condition humide, cinq échantillons respectaient ce même critère.

Essai pilote de chantier

L'essai pilote a été réalisé sur une superficie de l'ordre de 3 000 mètres carrés. Des travaux préparatoires ont été réalisés avant le début des travaux. Il s'agissait notamment d'une excavation d'une profondeur d'environ 2 pieds de la surface devant accueillir le monolithe S/S et du compactage de l'infrastructure; du tamisage et conditionnement des matériaux à traiter pour respecter les spécifications granulométriques.

Les résultats des essais obtenus lors de l'étude en laboratoire ont permis de déterminer les formules de mélange qui répondaient aux exigences de performance tant physiques que chimiques. À partir de ces formules, un total de quatre formules de mélange sol-ciment avec ou sans adjuvants a été testé dans le cadre de cet essai pilote.

Le traitement des matériaux a été réalisé par malaxage en continu des composants dans une usine mobile de type pugmill. Les matériaux traités ont été par la suite épandus et compactés. L'épaisseur du monolithe après compactage était fixée à 300 millimètres. Pour assurer la cure humide des matériaux mis en place, ces derniers étaient recouverts d'une toile géotextile gardée humide par un arrosage régulier. Pour chaque formule, un échantillon était prélevé en vue de procéder aux différents essais et analyses prévus au programme de contrôle. À partir de cet échantillon, des éprouvettes ont été confectionnées (cylindres et poutres rectangulaires). D'autres éprouvettes ont été carottées (cylindres) et sciées (poutres) dans le monolithe S/S après vingt-huit jours de mûrissement.

Les éprouvettes confectionnées et carottées ont été soumises au programme d'essais physiques et chimiques présenté précédemment. Le tableau 6 résume les résultats obtenus. Pour les paramètres physiques présentés, la formule 4 présente les performances les plus élevées aussi bien pour les éprouvettes confectionnées que pour les éprouvettes carottées.

Tableau 6 - Sommaire des résultats des essais de l'essai pilote à 28 jours de mûrissement

TEST	Valeur moyenne			
TESTS PHYSIQUES	Formule 01	Formule 02	Formule 03	Formule 04
Résistance à la flexion (MPa)	1,7	1,8	2,3	2,5
Résistance à la compression (MPa)	4,9	7,3	6,2	9,1
Conductivité hydraulique (cm/s)	7,5E-06	3,6E-06	8,2E-06	2,9E-07
Module d'élasticité (GPa)	4,2	6,1	3,6	9,7
Altération due au gel/dégel (à 21 cycles)	< 1 % perte de matériel (humide)			
TESTS CHIMIQUES				
Lixiviation SPLP	< critères de potabilité			
Lixiviation à l'eau	< critères de potabilité			
Diffusivité (indice de lixiviabilité)	> 9			

4. Application à pleine échelle

L'étude de traitabilité en laboratoire ainsi que l'essai pilote ont permis de déterminer la formule de mélange optimale pour le traitement des sols du présent projet. Le traitement des matériaux s'est fait par malaxage en continu des différents intrants de la formule retenue dans une usine de malaxage mobile de type pugmill (voir figure 3). Une quantité d'environ 35 000 tonnes de sols bruts a été traitée, pour un total d'environ 19 000 mètres cubes répartis sur une superficie de l'ordre de 65 000 mètres carrés.

Figure 3 - Vue de l'usine mobile de malaxage.

Un programme de contrôle des matériaux traités avait été mis en place pour s'assurer de la conformité de ces matériaux aux critères de rendement fixés ainsi qu'aux spécifications techniques en rapport avec la structure de chaussée à construire. Pour 500 mètres cubes de sols traités, un échantillon de sols était prélevé pour fins de contrôle. Quarante-quatre échantillonnages de contrôle ont ainsi été réalisés pour l'ensemble du projet.

Pour chaque échantillon de sols traités, des éprouvettes ont été confectionnées (cylindres et poutres rectangulaires). D'autres éprouvettes ont été carottées (cylindres) et sciées (poutres) dans le monolithe S/S après quelques jours de mûrissement (Figure 4).

Figure 4 - Prélèvement d'échantillons dans le monolithe S/S.

Le programme de contrôle des matériaux comprenait les essais physiques et chimiques. Les résultats des essais sont résumés dans le tableau 7. Les valeurs moyennes obtenues respectent les critères fixés pour ce projet.

Tableau 7 : Sommaire des résultats des essais des travaux à pleine échelle

TEST	Valeur moyenne
TESTS PHYSIQUES	
Résistance à la flexion (à 28 jours)	1,8 MPa
Résistance à la compression (à 28 jours)	8,6 MPa
Conductivité hydraulique	2,0 x 10-7 cm/s
Module d'élasticité	5,8 GPa
Altération due au gel/dégel (à 21 cycles)	< 1 % perte de matériel (humide)
TESTS CHIMIQUES	
Lixiviation SPLP	< critères de potabilité
Lixiviation à l'eau	< critères de potabilité
Diffusivité (indice de lixiviabilité)	> 9

5. Intégration du développement durable

D'ordre général, le projet d'aménagement du terminal de conteneurs permettra un plus grand achalandage de marchandises arrivant au Port de Montréal par navire, ce qui aura pour effet de favoriser et d'optimiser le transport maritime. En comparant aux modes routier et ferroviaire pour le transport de marchandises, le mode maritime est le transport pour lequel l'empreinte écologique est la moins néfaste d'un point de vue environnemental en termes d'émission de gaz à effet de serre (GES). Ainsi, le projet de réaménagement du secteur Viau s'inscrit dans un contexte global de minimisation des impacts du transport sur l'environnement.

La gestion d'un important volume de sols contaminés représentait un défi pour ce projet. L'approche adoptée a permis la réduction des impacts du transport routier sur l'environnement. Ce choix d'une gestion sur site de ces sols et leur valorisation comme matériau de sous-fondation pour la chaussée portuaire a permis la réduction des coûts liés à la gestion hors site des sols contaminés. En effet, l'APM a estimé des économies de l'ordre de 2,1 M$ par rapport aux coûts initialement estimés de 5 M$.

Au-delà de cet avantage économique, l'optimisation de l'épaisseur de la chaussée et la valorisation sur site des sols contaminés ont permis la réduction des équipements lourds nécessaires pour les opérations d'excavation ainsi que le camionnage nécessaire pour le transport des sols contaminés à un site d'enfouissement. De plus, l'utilisation de la technique de traitement des sols par S/S a permis de diminuer le transport de nouveaux agrégats de carrières vers le site en raison du remplacement de la sous-fondation granulaire par le monolithe S/S.

Globalement, le nombre total de voyages aller-retour par des camions semi-remorques évités par ces activités a été estimé à 5 200, ce qui équivaut à l'évitement de l'ordre de 400 tonnes d'équivalent CO_2.

6. Conclusion

Le défi présenté par l'aménagement du terminal Viau au Port de Montréal a conduit à la recherche d'une solution originale afin de répondre aux exigences techniques et environnementales ainsi que de faire face aux contraintes budgétaires. Ceci a conduit à l'optimisation de l'épaisseur de la chaussée et à l'utilisation des sols contaminés traités par S/S au niveau de la sous-fondation de la chaussée.

Une étude de traitabilité exhaustive a permis de statuer sur la faisabilité du traitement par S/S de ces sols contaminés. En plus d'une valorisation sécuritaire des sols contaminés directement sur le site, ces matériaux solidifiés ont permis la construction d'une chaussée à la fois plus mince et plus durable, ce qui a permis des économies substantielles tant au niveau de la réutilisation des sols contaminés (au lieu de leur élimination) qu'au niveau de la réduction de l'importation d'agrégats sur le site. Les très fortes charges auxquelles sera soumise la structure de chaussée portuaire ont également contribué à faire de cette réalisation, un projet unique et très novateur. Le procédé de traitement S/S a permis, d'une part, de s'adapter aux particularités des sols rencontrés sur le site (par exemple la granulométrie, l'humidité et la contamination de ces sols) et d'autre part, a permis la fabrication d'un produit (sols solidifiés) répondant aux exigences de résistance mécanique très élevées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ADEME, 2007. Solidification/stabilisation des déchets dangereux – Procédés à base de liants minéraux, État des connaissances – Note de synthèse, Angers, Département Géode – Direction des déchets et sols, 8 p.

2. Fonds d'action québécois pour le développement durable. Calculateur de gaz à effet de serre (GES), [en ligne], http://www.faqdd.qc.ca (page consultée en mai 2014).

3. ST-LAURENT, Serge, BURELLE, Suzanne et OUELLETTE, Hugues, 2011. *Lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, ISBN 978-2-550-62938-2, 40p.

4. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS et collaborateurs, 2006. *Unified facilities guide specifications, solidification/stabilization of contaminated material*, UFGS-02 55 00, 16 pages.

5. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS et collaborateurs, 1995. Engineering and Design, traitability studies for solidication/stabilization of contaminated material, Technical letter N^{o}. 1110-1-158.