



Le génie pour l'industrie

**STRATÉGIE DE VALORISATION
DES SOLS ET SÉDIMENTS
CONTAMINÉS SUIVANT LE
TRAITEMENT PAR
STABILISATION ET
SOLIDIFICATION**

**SECTEUR BEAUPORT
PORT DE QUÉBEC (QUÉBEC)**

**ADMINISTRATION PORTUAIRE
DE QUÉBEC**



Le génie pour l'industrie

ÉTUDE MANDATÉE PAR
ADMINISTRATION PORTUAIRE DE QUÉBEC

**STRATÉGIE DE VALORISATION DES SOLS ET SÉDIMENTS
CONTAMINÉS SUIVANT LE TRAITEMENT
PAR STABILISATION ET SOLIDIFICATION**

SECTEUR BEAUPORT, PORT DE QUÉBEC (QUÉBEC)

22 DÉCEMBRE 2015

JEAN-PHILIPPE BOUDREAULT, ING.
Directeur des projets spéciaux
Numéro de membre de l'OIQ : 135495
PANGEOS INC.

JEAN-SÉBASTIEN DUBÉ, ING.
Professeur agrégé
Numéro de membre de l'OIQ : 126490
ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

N/RÉF. : 105-EX

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Mise en contexte.....	1
1.2	Mandat et objectif.....	1
1.3	Structure du rapport	3
2	TRAITEMENT PAR STABILISATION ET SOLIDIFICATION	4
2.1	Principes généraux du traitement par S/S	4
2.2	Utilisation du traitement par S/S dans la réhabilitation des sites contaminés.....	5
2.3	Exemples de projets réalisés.....	6
2.3.1	Dans le monde.....	6
2.3.2	Au Canada	7
2.3.3	Au Québec.....	7
2.4	Cadre d'application du traitement par S/S au Québec	8
3	DESCRIPTION SOMMAIRE DES MATÉRIAUX À TRAITER.....	9
3.1	Description sommaire des sols contaminés.....	9
3.1.1	Étude de caractérisation et de traitabilité des sols du site d'ASL.....	9
3.1.2	Étude de caractérisation de piles de sols au secteur Beauport.....	10
3.2	Description sommaire des sédiments contaminés	11
3.2.1	Sédiments du secteur des ducs-d'Albe projetés.....	11
3.2.2	Sédiments du secteur du nouveau quai projeté	14
3.3	Échantillonnage des sédiments contaminés avec drague à benne preneuse	17
4	STRATÉGIE GLOBALE DE VALORISATION DES SOLS ET SÉDIMENTS CONTAMINÉS .	19
4.1	Présentation globale du site	19
4.2	Stratégie globale de valorisation.....	19
4.2.1	Concept global de la structure de chaussée portuaire envisagée	20
4.2.2	Concept global du traitement par S/S.....	22
4.3	Évaluation de l'efficacité d'un traitement par S/S	23
4.3.1	Tests physiques	23
4.3.2	Tests chimiques	24

5	TRAITEMENT PAR S/S DES SOLS CONTAMINÉS	27
5.1	Études réalisées jusqu'à maintenant	27
5.1.1	Étude de traitabilité par S/S en laboratoire des sols contaminés du site d'ASL	27
5.1.2	Essai pilote du traitement par S/S des sols du site d'ASL	28
5.2	Études en cours de réalisation	29
5.2.1	Suivi de l'essai pilote du traitement par S/S des sols du site d'ASL	29
5.2.2	Étude de traitabilité par S/S des autres sols contaminés	30
6	TRAITEMENT PAR S/S DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS	31
6.1	Études réalisées jusqu'à maintenant	31
6.1.1	Essai pilote d'assèchement sur site	31
6.1.2	Évaluation de la siccité des sédiments suite à leur assèchement	33
6.1.3	Évaluation de la qualité de l'eau exfiltrée lors du procédé d'assèchement	33
6.1.4	Étude de traitabilité en laboratoire – Option A	35
6.2	Études en cours de réalisation	36
6.2.1	Étude d'assèchement en laboratoire	36
6.2.2	Étude de traitabilité en laboratoire – Option B	37
7	CONCLUSIONS	38
8	PORTÉE ET LIMITATIONS	40
9	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	41

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'Administration portuaire de Québec (APQ) désire procéder à la construction de nouvelles infrastructures portuaires afin de répondre aux besoins grandissants en termes de quais d'amarrage, d'activités de transbordement et de manutention et d'aires d'entreposage. À cet effet, la construction d'un nouveau quai au secteur Beauport du Port de Québec est envisagée pour les fins d'agrandissement. Le concept initial prévoyait également la construction de ducs-d'Albe pour le transbordement de vrac liquide. Ceux-ci ont toutefois été écartés du scénario actuel envisagé.

La construction des nouvelles infrastructures portuaires nécessitera notamment le dragage d'un volume considérable de sédiments. Ces sédiments s'avèrent être contaminés par endroits en raison notamment d'activités antérieures ayant eu lieu dans les environs durant les dernières décennies. Une recherche de solutions alternatives en ce qui concerne la gestion optimale de ces sédiments contaminés a donc été menée par l'APQ.

Par ailleurs, au fil des années, le Port de Québec a été aux prises avec des sols contaminés, ce qui a mené à l'entreposage temporaire, en piles, de certains de ces sols au secteur Beauport. Dans le contexte du projet d'agrandissement, le Port de Québec s'est donc intéressé à des voies alternatives et viables de traitement de ces sols contaminés.

À cet effet, le traitement par stabilisation et solidification (S/S), à la fois des sédiments contaminés et des sols contaminés, a été proposé comme solution de traitement permettant la réutilisation et la valorisation de ces sédiments et de ces sols en tant que matériau de remblaiement structural à l'arrière du nouveau quai.

1.2 Mandat et objectif

L'APQ a donc mandaté conjointement la firme Pangeos inc. (PANGEOS) et l'École de technologie supérieure (ÉTS) afin de définir une stratégie potentielle de valorisation,

suivant leur traitement par S/S, des sols et des sédiments contaminés devant être gérés dans le cadre du projet d'agrandissement au secteur Beauport.

L'objectif du présent rapport est donc de présenter un sommaire du traitement par S/S, de la stratégie de valorisation proposée ainsi que des études s'y rapportant, à la fois déjà réalisées ou en cours de réalisation.

Les rapports suivants ont été consultés afin de dresser le portrait environnemental sommaire des matériaux à traiter et le sommaire des résultats obtenus lors des études déjà réalisées :

Sols contaminés

- Résumé de l'étude de traitabilité en laboratoire – Phase 1 : Traitement par S/S des sols contaminés du site d'Arrimage du Saint-Laurent (ASL) (Groupe Qualitas inc., 2012);
- Étude pilote sur site : Traitement par S/S des sols contaminés du site d'Arrimage du Saint-Laurent (ASL) (École de technologie supérieure, 2015);

Sédiments contaminés

- Études préparatoires – Rapport final de l'étude environnementale (Groupe Qualitas inc., 2013);
- Études préparatoires – Rapports de forage de l'étude géotechnique (Groupe Qualitas inc., 2012);
- Échantillonnage de sédiments en vue de la réalisation de tests d'assèchement (Groupe Qualitas inc., 2013);
- Caractérisation environnementale complémentaire des sédiments – Secteur Beauport du Port de Québec (PANGEOS, 2015);

Ce rapport sommaire est également basé sur les résultats obtenus au sein d'études réalisées pour lesquelles les rapports finaux sont en cours de rédaction.

1.3 Structure du rapport

Le présent rapport est divisé en cinq principales sections. En premier lieu, une introduction au traitement par S/S est présentée afin de dresser un sommaire global de ce procédé de traitement et de quelques projets réalisés ayant eu recours à ce traitement. Par la suite, un sommaire du portrait environnemental des matériaux contaminés (sols et sédiments) devant être gérés lors du projet d'agrandissement portuaire est présenté. La stratégie de valorisation des matériaux contaminés est ensuite présentée en proposant notamment un concept préliminaire de structure portuaire de chaussée qui permettrait l'intégration des différents matériaux traités par S/S. Puis, les deux chapitres suivants portent sur les études déjà réalisées ou en cours de réalisation spécifiquement pour le traitement par S/S des sols contaminés et des sédiments contaminés. Finalement, une conclusion sommaire relative à cette stratégie de valorisation est présentée.

2 TRAITEMENT PAR STABILISATION ET SOLIDIFICATION

2.1 Principes généraux du traitement par S/S

Le procédé de traitement par stabilisation et solidification (S/S) fait référence à deux mécanismes principaux : 1) une stabilisation chimique des contaminants présents dans le matériau à traiter et 2) une encapsulation physique du matériau traité au sein d'une matrice monolithique. Ce traitement vise ainsi à réduire la solubilité des contaminants et à les confiner dans un massif très peu perméable afin de limiter leur contact potentiel avec l'eau.

Ce procédé de traitement offre ainsi une double protection contre une dissolution des contaminants dans l'eau souterraine. L'intérêt de ce procédé est de pouvoir traiter des matériaux contaminés directement sur le site et de les mettre en place par un procédé similaire à celui utilisé pour le béton compacté au rouleau (BCR), ce qui devient une alternative raisonnable à l'excavation et à l'enfouissement hors site.

Du point de vue du développement durable, le traitement par S/S présente plusieurs avantages par rapport à une gestion conventionnelle des matériaux contaminés, notamment : 1) l'évitement de l'envoi de matériaux contaminés dans des sites d'enfouissement, 2) la minimisation de l'importation de matériaux propres (par exemple un matériau granulaire), 3) l'évitement de l'émission de gaz à effet de serre en ce qui concerne le transport lié à la fois à l'envoi des matériaux contaminés vers des sites d'enfouissement et à l'importation d'un nouveau matériau granulaire, 4) la réduction de l'émission de matières particulaires dans l'environnement en raison de la minimisation du transport de ces matériaux. Ce traitement est d'ailleurs reconnu par le système de standardisation *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED).

Afin de pouvoir utiliser ce procédé dans un contexte de réhabilitation donné, il est nécessaire de démontrer que le produit fini possède les propriétés mécaniques requises et que les contaminants soient réellement immobilisés au sein de la matrice solide.

Une étude exhaustive de traitabilité est donc requise afin de démontrer la performance du traitement et de confirmer la possibilité de traiter par S/S les matériaux visés. Cette étude de traitabilité doit, dans un premier temps, être réalisée en laboratoire afin d'obtenir différentes formules possibles de mélange et de déterminer leurs propriétés physico-chimiques. Dans un deuxième temps, cette étude de traitabilité se poursuit par la réalisation d'un essai pilote directement sur le site afin d'évaluer la performance du traitement à une échelle intermédiaire entre le laboratoire et le traitement pleine échelle. Lorsque les objectifs de performance physico-chimique des matériaux traités sont atteints, il est alors possible de débiter la réhabilitation pleine échelle de ces matériaux contaminés.

2.2 Utilisation du traitement par S/S dans la réhabilitation des sites contaminés

De manière générale, le traitement par S/S au ciment implique le mélange de matériaux contaminés, de liants hydrauliques, d'eau et d'additifs afin de constituer le matériau traité. Ce traitement est appliqué pour le traitement de déchets depuis les années 1950 (Wilk, 2007). Depuis, l'applicabilité de cette technologie a été démontrée pour divers types de matrices : sols, sédiments, boues.

Selon les rapports *Superfund Remedy Report* (USEPA, 2010; 2013), 285 projets *Superfund* de traitement par S/S ont été répertoriés aux États-Unis de 1982 à 2011, soit environ 22 % de l'ensemble des projets impliquant un traitement. Ce procédé de traitement a d'ailleurs été identifié par l'agence américaine de l'environnement (USEPA) comme étant la meilleure technologie démontrée disponible pour le traitement de plus de 50 types de matières résiduelles (USEPA, 2009).

Le traitement par S/S peut être réalisé en mode *in situ* ou *ex situ*. Dans le mode *in situ*, aucune excavation des matériaux contaminés n'est réalisée. Les liants hydrauliques et les additifs sont directement injectés dans le matériau en place à l'aide par exemple de tarières à injection. Dans le mode *ex situ*, le traitement peut être réalisé sur site ou hors site. Le mode « *ex situ* sur site » fait référence à l'excavation des matériaux contaminés, au traitement de ceux-ci sur le terrain d'origine et à leur remise en place sur ce même

terrain. Pour sa part, le mode « *ex situ* hors site » fait référence à un traitement des matériaux contaminés sur un terrain autre que celui d'origine (par exemple, le traitement avant l'enfouissement).

2.3 Exemples de projets réalisés

2.3.1 Dans le monde

À notre connaissance, il n'y a pas d'inventaire des projets de réhabilitation de sites contaminés réalisés dans le monde à l'aide de la S/S. Cette information est au mieux fragmentée, car chaque pays ne possède pas un inventaire des sites contaminés et de leur état de réhabilitation tel que celui mis en place au Québec. Toutefois, tel que ci-haut mentionné, du grand nombre de projets réalisés aux États-Unis, il est possible d'en recenser quelques-uns dans la présente section.

Wilk (2004) rapporte deux projets de traitement de sols et de sédiments contaminés. Un premier projet consistait à traiter 37 000 mètres cubes de sols contaminés sur le site d'une usine de traitement du bois à Port Newark au New Jersey. Un traitement *in situ* et *ex situ* du sol a été réalisé à l'aide de ciment Portland. Le sol était contaminé par des sous-produits du traitement du bois, notamment par de l'arsenic, du chrome et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Un second projet consistait à traiter plusieurs millions de mètres cubes de sédiments au port de New York afin d'immobiliser les métaux, les dioxines, les biphényles polychlorés (BPC) et autres contaminants organiques qu'ils contenaient. Les sédiments traités ont été réutilisés comme remblai structural pour la réhabilitation d'autres sites contaminés (Wilk, 2004).

Maher et al. (2008) rapportent plusieurs projets de traitement par S/S ayant utilisé le mode *in situ*. Ces projets utilisaient principalement du ciment et plusieurs additifs non identifiés. Ces auteurs font état du traitement de sols, de boues et de sédiments contaminés notamment par des métaux, des hydrocarbures, de l'acide sulfurique, des HAP, des BPC et des solvants halogénés au cours de quatre projets aux États-Unis, deux projets en Angleterre et un projet en Finlande. Maher et al. (2008) rapportent également

leur expérience avec le traitement par S/S en mode *in situ* de sédiments contaminés dans la baie de Newark.

Klein et Magné (2005) rapportent que le traitement par S/S est utilisée en France pour la réhabilitation de sites contaminés, principalement pour le traitement de contamination par des métaux et par des hydrocarbures lourds. Ils estiment que 15 000 à 50 000 tonnes de sols contaminés sont ainsi traités chaque année.

Al-Tabbaa et Perera (2005) rapportent également plusieurs cas de réhabilitation de sites contaminés au Royaume-Uni à l'aide du traitement par S/S. Les contaminants identifiés étaient des métaux, du cyanure, des hydrocarbures pétroliers, des hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et des HAP. Souvent, la contamination était décrite comme étant un mélange de plusieurs de ces contaminants. Les matériaux traités étaient des sols, des remblais et des boues. Les volumes traités variaient de 3 000 à 100 000 mètres cubes.

2.3.2 Au Canada

Au Canada, quelques projets de réhabilitation environnementale par S/S ont été réalisés tel que rapporté par l'Association canadienne du ciment (2012), notamment en Colombie-Britannique, au Manitoba et en Nouvelle-Écosse. Plus particulièrement, le projet d'assainissement des étangs de goudron de Sydney, en Nouvelle-Écosse (Sydney Tar Ponds Agency, 2012) comprenait le traitement par S/S de 1.1 millions de tonnes de sols et sédiments contaminés par des métaux, des PBC et des HAP.

2.3.3 Au Québec

Au Québec, le premier projet de traitement par S/S d'un site contaminé a été réalisé en 2010 (Boudreault et al., 2010). Ce site était principalement contaminé par des métaux (zinc) et le volume de sols traités a été de l'ordre de 8 000 mètres cubes. Un second projet de traitement par S/S a été réalisé en 2013 au Port de Montréal (Boudreault et al., 2014). Dans le cadre de ce projet, le traitement par S/S a été retenu principalement à des fins de renforcement mécanique des propriétés physiques des sols contaminés pour

permettre leur valorisation au sein de la nouvelle structure portuaire de chaussée. Ces sols étaient contaminés en métaux et en HAP. Le volume de sols traités par S/S a été de l'ordre de 19 000 mètres cubes.

2.4 Cadre d'application du traitement par S/S au Québec

Afin d'encadrer l'évaluation de la performance du traitement par S/S dans le cadre d'un projet de réhabilitation environnementale d'un site contaminé (scénario de maintien sur le terrain d'origine des matériaux traités), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) a publié en avril 2012 le document intitulé « *Lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification* » (MDDEFP, 2012). Ces lignes directrices présentent, entre autres, le cadre technique et législatif régissant l'approbation et la vérification de la conformité des projets de réhabilitation environnementale par S/S de sites contaminés. Elles seront citées, ci-après dans le rapport, par « lignes directrices du MDDELCC ». Ces dernières définissent les matériaux contaminés ainsi que les contaminants admissibles au traitement. Les lignes directrices du MDDELCC proposent également une série d'essais pour évaluer l'intégrité physique de la matrice solidifiée résultant du traitement ainsi que la mobilité des contaminants. Finalement, elles décrivent un cadre d'évaluation permettant de statuer sur le rendement du traitement.

3 DESCRIPTION SOMMAIRE DES MATÉRIAUX À TRAITER

Dans le cadre du projet d'agrandissement du Port de Québec, le traitement par S/S est envisagé pour deux types de matériaux distincts : 1) les sols contaminés présentement en pile au secteur Beauport du Port de Québec et 2) les sédiments contaminés devant être dragués afin d'augmenter la profondeur navigable dans la zone de manœuvre des navires pour leur amarrage au nouveau quai.

3.1 Description sommaire des sols contaminés

Actuellement, plusieurs piles de sols contaminés sont entreposées temporairement au secteur Beauport du Port de Québec. Ces sols ont fait l'objet de caractérisation environnementale durant les dernières années afin d'évaluer à la fois leur qualité environnementale et le potentiel de traiter ces sols par S/S. Les sections qui suivent présentent un portrait environnemental sommaire de ces sols ainsi que leur nature.

3.1.1 Étude de caractérisation et de traitabilité des sols du site d'ASL

Une étude de caractérisation environnementale a été réalisée à l'intention de Compagnie d'Arrimage Québec Itée (CAQ) en décembre 2010 par Groupe Qualitas inc. (QUALITAS) spécifiquement pour des sols contaminés mis en pile sur le site d'Arrimage du Saint-Laurent (ASL). Il est à préciser que le site d'ASL est situé au secteur Beauport du Port de Québec et que CAQ est un locataire de ce dernier. Cette étude avait pour objectif d'évaluer la qualité environnementale de différentes piles de sols totalisant un volume de l'ordre de 16 000 mètres cubes. Un échantillon d'un volume total de l'ordre de 3 mètres cubes avait été prélevé sur l'ensemble des piles afin de procéder à une étude de traitabilité en laboratoire.

Globalement, les sols du site d'ASL se composaient principalement de sable graveleux. Lors de la phase de traitabilité en laboratoire et de l'essai pilote sur ces sols (voir sections 5.1.1 et 5.1.2), les résultats analytiques obtenus sur les sols avant traitement se résument comme suit :

- Les concentrations mesurées en métaux étaient supérieures au critère C du MDDELCC. Les métaux faisant l'objet de dépassement du critère C ont été le cadmium, le cuivre, le nickel et le zinc.
- Les concentrations mesurées en HAP et en hydrocarbures pétroliers (HP) C₁₀ à C₅₀ ont été inférieures au critère B du MDDELCC.
- Les concentrations mesurées en soufre total ont été supérieures au critère C du MDDELCC mais inférieures à 1%.
- Les concentrations mesurées en sulfates ont été comprises entre 2500 et 5000 mg/kg.
- Les concentrations mesurées en carbone organique total (COT) ont été inférieures à 1%.

3.1.2 Étude de caractérisation de piles de sols au secteur Beauport

Une étude de caractérisation environnementale a été également réalisée à l'intention de l'APQ en décembre 2014 par PANGEOS spécifiquement pour d'autres piles de sols au secteur Beauport du Port de Québec. Cette étude avait pour objectif d'évaluer la qualité environnementale de différentes piles de sols totalisant un volume de l'ordre de 24 000 mètres cubes. Globalement, les sols qui avaient fait l'objet d'une caractérisation se composaient principalement de sable graveleux. Les résultats analytiques obtenus sur les échantillons prélevés de ces différentes piles se résument comme suit :

- Les concentrations mesurées en métaux étaient principalement supérieures au critère C du MDDELCC. Par endroits, ces concentrations ont été également supérieures ou égales au critère RESC. Les métaux faisant l'objet de dépassement du critère C ont été l'arsenic, le cadmium, le cuivre, le nickel, le plomb et le zinc. Le cuivre, le nickel et le zinc ont fait également l'objet de dépassement du critère RESC.
- Les concentrations mesurées en HAP et en HP C₁₀ à C₅₀ ont été inférieures au critère B du MDDELCC.

3.2 Description sommaire des sédiments contaminés

Dans le cadre de la construction des nouvelles infrastructures portuaires projetées, le dragage de sédiments a été initialement prévu dans deux secteurs distincts : 1) le secteur des ducs-d'Albe projetés et 2) le secteur du nouveau quai projeté.

Le secteur des ducs-d'Albe projetés est situé dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles tandis que le secteur du nouveau quai projeté est plutôt situé en bordure du fleuve Saint-Laurent, entre l'estuaire de la rivière Saint-Charles et la Baie de Beauport.

Une étude exhaustive de caractérisation à la fois géotechnique et environnementale a été réalisée à l'automne 2012 par QUALITAS dans ces deux secteurs distincts. L'objectif global de la partie environnementale de cette étude de caractérisation était d'évaluer la nature et la qualité environnementale des sédiments afin de connaître les conditions existantes aux endroits prévus pour la construction des nouvelles infrastructures et pour le dragage projeté.

Les sections qui suivent présentent un portrait environnemental sommaire de ces sédiments ainsi que leur nature.

3.2.1 Sédiments du secteur des ducs-d'Albe projetés

Bien qu'actuellement la construction des ducs-d'Albe ne soit pas d'intérêt primaire pour le développement du Port de Québec, certains travaux résumés dans le présent rapport ont porté spécifiquement sur les sédiments contaminés de ce secteur puisqu'ils représentaient, initialement, un enjeu environnemental et économique important. Un sommaire de la nature et la qualité environnementale de ces sédiments est de ce fait présenté dans la présente section.

Ainsi, l'étude de caractérisation environnementale de 2012 a permis de soulever les éléments suivants pour le secteur des ducs-d'Albe projetés :

Synthèse de la nature des sédiments

- Les sédiments de surface du fond marin se composent principalement de silt argileux. Ce type de sédiment a été retrouvé sur plusieurs mètres d'épaisseur (variant de plus de 4 mètres à près de 14 mètres).
- La présence de matières fibreuses a été notée sur l'ensemble des échantillons prélevés dans ce dépôt de sédiments silto-argileux. La présence de copeaux de bois a été également notée par endroits.

Synthèse des résultats chimiques

- Du côté intérieur des ducs-d'Albe projetés (entre le quai existant et les ducs-d'Albe projetés), les concentrations mesurées en métaux ont été supérieures au critère C du MDDELCC (critère génériques pour les sols) et au critère CEF¹ (critères de qualité pour les sédiments) établi conjointement entre Environnement Canada (EC) et le MDDELCC (EC et MDDEP, 2007). Les métaux faisant l'objet d'un dépassement du critère C ont été le cadmium, le cuivre et le zinc. La concentration en nickel était plutôt située dans la plage BC. Les métaux faisant l'objet d'un dépassement du critère CEF à plusieurs endroits ont été le cadmium et le zinc. Par endroits, les métaux suivants ont été également retrouvés en concentration dépassant le critère CEF : le chrome, le cuivre, le mercure et le plomb. Il est à préciser qu'aucun critère CEF n'est spécifié pour le nickel. Celui-ci a été retrouvé toutefois en concentrations supérieures au critère CEO². L'arsenic a été retrouvé, par endroits, à des concentrations supérieures au critère CEO mais inférieures ou égales au critère CEF.

¹ Le critère CEF correspond à la concentration d'effets fréquents. Lors de la gestion des sédiments résultant de travaux de dragage, ces sédiments doivent être considérés de « classe 3 ».

² Le critère CEO correspond à la concentration d'effets observés. Lors de la gestion des sédiments résultant de travaux de dragage, les sédiments dont la qualité chimique est comprise entre le critère CEO et le critère CEF doivent être considérés de « classe 2 ».

- Du côté extérieur des ducs-d'Albe projetés (entre les ducs-d'Albe projetés et le fleuve), les concentrations en métaux ont été plus faibles. D'ordre général, les concentrations mesurées en métaux ont été principalement situées dans la plage AB et comprises entre les critères CEO et CEF.
- D'ordre général, les concentrations mesurées en HAP ont été inférieures au critère B et au critère CEO. Par endroits, les concentrations en HAP ont été comprises entre les critères CEO et CEF.
- D'ordre général, les concentrations mesurées en HP C₁₀ à C₅₀ ont été inférieures au critère C. À un seul endroit, la concentration en HP C₁₀ à C₅₀ a dépassé le critère C. Il est à noter qu'aucun critère de qualité pour les sédiments n'existe pour ce paramètre.
- Les concentrations mesurées en BPC ont été inférieures au critère C et principalement comprises entre les critères CEO et CEF. À deux endroits, la concentration en BPC a dépassé le critère CEF.
- Les concentrations mesurées en composés phénoliques ont été inférieures au critère C. Il est à noter qu'aucun critère de qualité pour les sédiments n'existe pour ce paramètre.
- D'ordre général, les concentrations mesurées en soufre total ont été supérieures au critère C. Bien que le soufre total n'ait pas une valeur seuil au sein des critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments, une valeur seuil de référence de 1400 mg/kg a été proposée dans le cadre d'une évaluation du risque écotoxicologique³. Par endroits, les concentrations mesurées en soufre total ont dépassé largement cette valeur seuil proposée.
- Les concentrations mesurées en carbone organique total (COT) ont été, par endroits, supérieures à 10% mais, d'ordre général, ont été situées entre 1% et 5%.

³ Voir le document intitulé : *L'évaluation du risque écotoxicologique (ERE) du rejet en eau libre des sédiments, en soutien à la gestion des projets de dragage en eau douce* (MDDEFP et Environnement Canada, 2013).

Synthèse des résultats écotoxicologiques

- Les bioessais (ou essais biologiques) suivants ont été réalisés sur l'eau éluutriée (élutriat suite à une élutriation⁴) obtenue à partir de certains échantillons prélevés : 1) *Daphnia magna* CL50-48h (SPE/RM/14), Mené tête-de-boule *Pimephales promelas* CL50-96h (EPA-821-R-02-012) et *Microtox phase liquide* - *Vibrio fischeri* (SPE 1/RM/24).
- Les résultats de ces bioessais ont montré que certains échantillons ont eu des effets biologiques néfastes sur les organismes soumis aux essais. Également, pour les bioessais *Daphnia magna* et Mené tête-de-boule *Pimephales promelas*, les résultats obtenus ont démontré que certains échantillons sont considérés toxiques.

3.2.2 Sédiments du secteur du nouveau quai projeté

Le secteur du nouveau quai projeté est divisé en trois zones distinctes : 1) la zone de dragage projeté pour l'amarrage de navires au nouveau quai, 2) la zone de remblayage formée à l'arrière du nouveau quai et de la digue de retenue projetés et 3) la zone de mise en dépôt de sédiments pour la nouvelles configuration projetée de la plage de la Baie de Beauport.

3.2.2.1 Étude de caractérisation environnementale – Automne 2012

L'étude de caractérisation environnementale réalisée en 2012 a permis de soulever les éléments suivants pour le secteur du nouveau quai projeté :

Synthèse de la nature des sédiments

- Globalement, les sédiments de surface du fond marin se composent principalement de sable graveleux.

⁴ L'élutriat se définit comme étant la solution aqueuse obtenue après addition d'eau à une substance solide (par exemple des sédiments) et brassage du mélange puis suivi d'une centrifugation et d'une filtration ou décantation du surnageant (Environnement Canada, 2002).

- Spécifiquement dans la zone de dragage projetée, deux parcelles de sédiments de nature principalement silteuse ont été retrouvées.
- La première parcelle de sédiments de nature silteuse a été retrouvée en profondeur (entre environ 4.5 et 8.0 mètres de profondeur sous le fond marin) au droit d'un seul forage situé dans la proximité du centre de la façade du nouveau quai projeté.
- La deuxième parcelle de sédiments de nature silteuse a été retrouvée en surface du fond marin sur une épaisseur de l'ordre de 1 mètre au droit de quelques stations environnementales situées dans l'extrémité nord-est de la zone de dragage projetée. Pour les échantillons prélevés au sein de ce dépôt de sédiments de nature silteuse, la présence de matières fibreuses a été notée.

Synthèse des résultats chimiques

- Pour l'ensemble des paramètres analysés, les concentrations mesurées spécifiquement pour les échantillons de sable graveleux ont été principalement inférieures au critère B et inférieures au critère CEO. Ces sédiments ne seront pas commentés plus en détails dans le présent rapport puisque leur traitement n'est pas requis.
- Pour les sédiments de nature silteuse des deux parcelles identifiées précédemment, les concentrations mesurées en métaux ont été principalement inférieures au critère B mais supérieures au critère CEF. Les métaux faisant l'objet d'un dépassement du critère CEF ont été le chrome, le mercure et le plomb. Le zinc a été retrouvé à des concentrations comprises entre les critères CEO et CEF.
- Pour les sédiments de nature silteuse des deux parcelles identifiées précédemment, les concentrations mesurées en HAP ont été principalement inférieures au critère C, mais supérieures au critère CEF.
- Pour les sédiments de nature silteuse des deux parcelles identifiées précédemment, les concentrations mesurées en HP C₁₀ à C₅₀ ont été inférieures au critère C. Il est à noter qu'aucun critère de qualité pour les sédiments n'existe pour ce paramètre.

- Pour les sédiments de nature silteuse de la deuxième parcelle identifiée précédemment, la concentration mesurée en BPC a été inférieure au critère B et comprise entre les critères CEO et CEF.
- Pour les sédiments de nature silteuse des deux parcelles identifiées précédemment, les concentrations maximales mesurées en soufre total ont été supérieures au critère C et supérieures à la valeur seuil de référence de 1400 mg/kg en ce qui concerne l'évaluation du risque écotoxicologique.
- Pour les sédiments de nature silteuse des deux parcelles identifiées précédemment, les concentrations mesurées en COT ont été situées entre 1% et 5%.

Synthèse des résultats écotoxicologiques

- Les bioessais (ou essais biologiques) suivants ont été réalisés sur l'eau éluutriée obtenue à partir de certains échantillons prélevés : 1) *Daphnia magna* CL50-48h (SPE/RM/14), Mené tête-de-boule *Pimephales promelas* CL50-96h (EPA-821-R-02-012) et *Microtox phase liquide* - *Vibrio fischeri* (SPE 1/RM/24).
- Les résultats de ces bioessais ont montré que certains échantillons ont eu des effets biologiques néfastes sur les organismes soumis aux essais. Toutefois, en regard aux résultats obtenus transposés en unité toxique, aucun échantillon n'a été considéré toxique.

3.2.2.2 Étude de caractérisation environnementale complémentaire – Automne 2015

Une étude de caractérisation environnementale complémentaire a été également réalisée en 2015 par PANGEOS pour les sédiments du fond marin présents au secteur du nouveau quai projeté. Cette étude avait, comme objectif principal, d'évaluer la nature et la qualité environnementale des sédiments de surface du fond marin, à l'aide de plongeurs, à des endroits intermédiaires au programme de caractérisation réalisé en 2012 afin de préciser le portrait environnemental global de certains secteurs d'intérêt. Un objectif secondaire de cette étude a été d'échantillonner, pour les fins d'essais subséquents en laboratoire, un volume de l'ordre de 150 litres de sédiments contaminés

de nature silteuse (avec matières fibreuses) présents en surface du fond marin dans la deuxième parcelle identifiée précédemment.

Globalement, des résultats très similaires à la caractérisation réalisée en 2012 ont été obtenus lors de cette étude. Pour la deuxième parcelle constituée de sédiments contaminés de nature silteuse présents en surface du fond marin (parcelle située dans l'extrémité nord-est de la zone de dragage projetée), les résultats analytiques obtenus se résument comme suit :

- Les concentrations mesurées en métaux ont été principalement inférieures au critère C mais, par endroits, supérieures au critère CEF. Le métal faisant l'objet d'un dépassement du critère CEF a été le chrome. Le cuivre, le mercure, le plomb et le zinc ont été retrouvés à des concentrations comprises entre les critères CEO et CEF.
- Les concentrations mesurées en HAP ont été principalement inférieures au critère C mais supérieures au critère CEF.
- Les concentrations mesurées en HP C₁₀ à C₅₀ ont été inférieures au critère C. Il est à noter qu'aucun critère de qualité pour les sédiments n'existe pour ce paramètre.
- Les concentrations mesurées en soufre total ont été situées dans la plage BC et supérieures à la valeur seuil de référence de 1400 mg/kg en ce qui concerne l'évaluation du risque écotoxicologique.
- Les concentrations maximales mesurées en COT ont été de l'ordre de 3%.

3.3 Échantillonnage des sédiments contaminés avec drague à benne preneuse

Pour les fins d'essais subséquents en laboratoire et sur site, l'échantillonnage de sédiments contaminés d'un volume totalisant environ 35 mètres cubes a été effectué en mai 2013 à l'aide d'une drague à benne preneuse. Un échantillon composite ayant fait l'objet d'un prélèvement à dix points distincts situés spécifiquement au secteur des ducs-d'Albe projetés a été entreposé sur le site même du Port de Québec dans des conteneurs étanches et couverts.

Les dix points de prélèvement ont été choisis en fonction de la configuration des ducs-d'Albe projetés datée de janvier 2013 qui minimisait le dragage du côté intérieur des ducs-d'Albe comparativement à la configuration précédente.

Lors des essais subséquents en laboratoire, les résultats analytiques suivants ont été obtenus sur cet échantillon composite (provenant du secteur des ducs-d'Albe) :

- Les concentrations mesurées en nickel étaient situées dans la plage BC et supérieures au critère CEO. Les concentrations mesurées en Cu et Zn étaient comprises entre les critères CEO et CEF, sans dépassement du critère B du MDDELCC. Les autres métaux n'ont pas fait l'objet de dépassement du critère B et du critère CEO.
- Les concentrations mesurées en HAP ont été inférieures au critère B, mais comprises entre les critères CEO et CEF.
- Les concentrations mesurées en HP C₁₀ à C₅₀ ont été inférieures au critère A. Il est à noter qu'aucun critère de qualité pour les sédiments n'existe pour ce paramètre.
- Les concentrations mesurées en soufre total ont été inférieures au critère B et à la valeur seuil de référence de 1400 mg/kg en ce qui concerne l'évaluation du risque écotoxicologique.
- Les concentrations mesurées en COT ont été situées entre 1% et 3%.

4 STRATÉGIE GLOBALE DE VALORISATION DES SOLS ET SÉDIMENTS CONTAMINÉS

4.1 Présentation globale du site

Le secteur Beauport du Port de Québec est situé à Québec, sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent. Il est accessible, par voie terrestre, à partir du boulevard Henri-Bourassa et est à vocation industrielle.

Le secteur Beauport du Port de Québec est situé sur une propriété fédérale administrée par l'APQ et est délimité principalement par le fleuve Saint-Laurent (en y englobant la Baie de Beauport et l'estuaire de la rivière Saint-Charles) et à l'ouest par l'autoroute Dufferin-Montmorency (440).

Les activités à proximité qui ceinturent directement le secteur Beauport du Port de Québec sont :

- Usine de papier White Birch (Stadacona);
- Dépôt de neige usée de la Ville de Québec;
- Station de traitement des eaux usées de la Ville de Québec;
- Cour de triage du Canadien National.

4.2 Stratégie globale de valorisation

Le traitement par S/S s'insère dans une volonté de réutiliser, autant que possible, des matériaux contaminés ou ayant des propriétés inadéquates à un usage géotechnique visé et de les valoriser, suite à leur traitement, au sein d'un ouvrage de construction donné.

Dans le cadre de la construction des nouvelles infrastructures portuaires projetées au secteur Beauport du Port de Québec, la réutilisation et la valorisation des matériaux contaminés suite à leur traitement par S/S sont envisagées au sein de la future chaussée portuaire en tant que matériau structural servant d'assise et/ou de sous-fondation à la structure de chaussée.

En plus de viser une réutilisation sécuritaire d'un matériau contaminé suivant l'encapsulation d'une contamination et la réduction de sa mobilité, ce procédé de traitement apporte une plus-value structurale à la future chaussée portuaire suivant un renforcement de ses propriétés mécaniques comparativement à une chaussée conventionnelle. En effet, de par ses propriétés mécaniques grandement supérieures à un matériau granulaire traditionnel, le remplacement d'une sous-fondation granulaire par un matériau traité par S/S devient une solution durable, non seulement du point de vue environnemental, mais également du point de vue de la durée de vie utile d'une chaussée industrielle sollicitée par de fortes charges statiques (dus par exemple à l'empilement de vrac solide) et dynamiques (dus par exemple à la manutention du vrac solide avec des chargeurs frontaux). Par exemple, dans le cadre d'un autre projet dans lequel la sous-fondation de la structure de chaussée a été remplacée par un massif monolithique de sols traités par S/S, la durée de vie utile estimée de la nouvelle chaussée a surpassé de plus de 50% celle estimée pour une chaussée conventionnelle en se basant sur le calcul du nombre de passages admissibles spécifiquement pour un type d'équipement lourd (Boudreault et al., 2014).

4.2.1 Concept global de la structure de chaussée portuaire envisagée

L'agrandissement du secteur Beauport prévoit une superficie accrue de l'ordre de 17.5 hectares de terrain portuaire à l'arrière du nouveau quai et de la digue de retenue projetés. La future structure de chaussée portuaire de cet agrandissement devra donc être suffisamment durable afin de résister aux sollicitations répétées induites, par endroits, par des fortes charges liées aux activités de manutention, de transport et d'entreposage envisagées. À cet effet, la structure de chaussée alternative envisagée pourrait être composée d'une superposition de matériaux comme suit (en ordre à partir de la surface finale) :

- Couche 1 (en surface) : Pavage étanche en surface (par exemple enrobé bitumineux);
- Couche 2 : Fondation en matériau granulaire;
- Couche 3 : Massif monolithique de sols contaminés traités par S/S;

- Couche 4 : Massif monolithique de sédiments contaminés traités par S/S;
- Assise : Sédiments non contaminés de type sableux pour lesquels un dragage est projeté (servant de remblayage massif à l'arrière du nouveau quai).

La base du massif monolithique construit à partir des sols contaminés traités par S/S serait préférablement située au-dessus du niveau « Pleine mer supérieure – grande marée » (PMSGM) correspondant à la moyenne des plus hautes marées des pleines mers durant 19 années de prédiction (sur une base de la valeur maximale retenue pour chaque année de prédiction). Ceci permettrait de limiter, autant que possible, le contact de l'eau souterraine avec le massif monolithique de sols contaminés traités par S/S. Il est à préciser que la « pleine mer » correspond à la marée haute, en d'autres termes la position la plus haute de la mer, en un point donné et au cours d'une oscillation de la marée. Si la nappe d'eau souterraine suite à la construction du nouveau quai projeté s'avère toutefois être à un niveau différent de l'eau du fleuve, ce massif monolithique devrait être également situé au-dessus de cette nappe d'eau souterraine.

Le massif monolithique construit à partir des sédiments contaminés traités par S/S serait pour sa part situé probablement entre le niveau « Pleine mer supérieure – marée moyenne » (PMSMM) et le niveau PMSGM. Le niveau PMSMM correspond de son côté à la moyenne de toutes les pleines mers durant les 19 années de prédiction.

Les trois aspects suivants seraient notamment pris en compte lors de la détermination de la position de chacun des massifs monolithiques :

- Le niveau du pavage final sera fonction de la hauteur du nouveau quai construit et de la conception des pentes de drainage de surface du nouveau terrain portuaire.
- L'épaisseur de chacune des couches devra faire l'objet d'une analyse structurale détaillée spécifique à l'usage prévue du nouveau terrain portuaire.

- L'épaisseur et la superficie de chacun des massifs monolithiques seraient fonction du volume total des matériaux contaminés (sols et sédiments) disponibles devant être traités.

4.2.2 Concept global du traitement par S/S

Le traitement par S/S spécifiquement pour les matériaux contaminés devant être gérés lors de l'agrandissement portuaire pourrait s'effectuer selon une séquence de travaux de traitement qui s'adapterait à la fois aux particularités et à l'échéancier du projet. À titre indicatif, cette séquence pourrait, par exemple, se présenter comme suit :

- 1) Consolidation des sédiments sableux non contaminés à l'arrière du nouveau quai;
- 2) Dragage des sédiments contaminés;
- 3) Assèchement des sédiments contaminés et contrôle des eaux d'assèchement;
- 4) Traitement par S/S des sédiments contaminés;
- 5) Construction du massif monolithique à partir des sédiments contaminés;
- 6) Traitement par S/S des sols contaminés;
- 7) Construction du massif monolithique à partir des sols contaminés;
- 8) Recouvrement des massifs monolithiques.

Le traitement par S/S des sols contaminés pourrait s'effectuer selon un procédé similaire à celui utilisé pour le béton compacté au rouleau (BCR) avec une usine mobile de malaxage (de type « pugmill ») qui pourrait être installée directement sur le site. Ce procédé a été utilisé avec succès au sein de d'autres projets de traitement S/S réalisés au Québec. Ce même procédé a été employé pour la réalisation de l'essai pilote avec les sols contaminés du site d'ASL (voir section 5.1.2).

Le traitement par S/S des sédiments contaminés pourraient s'effectuer selon diverses approches. Des projets réalisés dans d'autres pays ont été réalisés par exemple de manière similaire au traitement *in situ* mais avec des têtes agitatrices (ou mixeurs stabilisateurs) qui permettent à la fois l'injection du mélange de traitement et le malaxage de sédiments ou de boues. Pour ces projets, le traitement a été effectué directement dans les barges contenant les sédiments dragués ou dans des bassins de

confinement. Suivant une courte période de mûrissement, les sédiments traités sont retirés de la barge puis mis en place dans la zone désirée. Également, comme pour les sols contaminés, une usine mobile de malaxage (de type « pugmill ») a été parfois employée pour le traitement par S/S de sédiments contaminés. Il est toutefois reconnu que l'utilisation d'une usine mobile de malaxage permet un meilleur contrôle pour l'injection et l'uniformité du malaxage, par le fait même une meilleure efficacité du traitement (Ciment Québec inc., 2013). Dans le cas présent, l'approche de malaxage avec une usine mobile serait privilégiée dans le cadre de la construction d'un massif monolithique obtenu à partir des sédiments contaminés et utilisé comme couche inférieure de la structure de chaussée portuaire projetée.

4.3 Évaluation de l'efficacité d'un traitement par S/S

L'efficacité d'un traitement par S/S est évaluée selon deux aspects interreliés : l'efficacité de la stabilisation chimique et l'efficacité de l'encapsulation physique (ou solidification). Pour évaluer ces deux aspects, des tests à la fois physiques et chimiques sont requis. Ceux-ci sont résumés dans les deux prochaines sections.

4.3.1 Tests physiques

Les principaux tests physiques réalisés lors de l'évaluation de l'efficacité du traitement par S/S sont la résistance à la compression, la conductivité hydraulique et les tests d'altération.

La résistance à la compression est une mesure de l'évaluation de l'efficacité du mécanisme de solidification ayant lieu lors d'un traitement par S/S. Cette résistance est habituellement suivie et contrôlée afin de s'assurer que le mécanisme d'hydratation du ciment a eu lieu. Les lignes directrices du MDDELCC spécifient une valeur minimale de 3.5 MPa comme critère à atteindre lors du traitement par S/S des sols contaminés.

La conductivité hydraulique est une mesure associée à la facilité de l'eau à circuler à travers un matériau poreux. Lorsque la conductivité hydraulique du massif monolithique de matériaux traités est suffisamment faible par rapport au sol environnant, le contact

de l'eau avec les matériaux traités sera limité à la face externe du massif monolithique. Ainsi, le relargage des contaminants hors du monolithe sera contrôlé principalement par les mécanismes de diffusion. Les lignes directrices du MDDELCC spécifient une valeur maximale de 10^{-7} cm/s comme critère à atteindre lors du traitement par S/S des sols contaminés.

Des tests d'altération, par exemple suite à des fluctuations de température ou d'humidité peuvent être réalisés. Ces tests permettent d'évaluer la perte de masse d'échantillons monolithiques suite à des cycles répétés de gel/dégel ou de mouillage/séchage. Ces tests permettent d'obtenir une évaluation de la durabilité physique du massif monolithique. Les lignes directrices du MDDELCC spécifient une valeur maximale de 10% d'altération après 12 cycles comme critère à atteindre lors du traitement par S/S des sols contaminés.

Par ailleurs, dans le cadre d'une analyse structurale exhaustive de la chaussée intégrant un massif monolithique de matériaux traités par S/S (chaussée rigide ou semi-rigide), d'autres essais physiques pourraient également être requis tels que la résistance à la flexion et la détermination du module de rigidité.

4.3.2 Tests chimiques

Les tests chimiques sont normalement divisés en deux catégories soit les tests statiques et les tests dynamiques. Les premiers sont des tests de lixiviation réalisés en réacteur fermé avec un volume fixe de lixiviant, alors que les seconds sont des tests de lixiviation réalisés avec un volume renouvelé de lixiviant.

4.3.2.1 Tests statiques

Les quatre essais de lixiviation demandés au sein des lignes directrices du MDDELCC font partie du *Protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques* (MA.100 – Lix.com. 1.1) du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2012). Ce sont le *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP), l'*Amount available for leaching test* (CTEU-10 ou couramment identifié comme TCLP modifié), le *Synthetic Precipitation*

Leaching Procedure (SPLP) et l'*Equilibrium Extraction* (CTEU-9). Chacun de ces essais de lixiviation se caractérise par des conditions opératoires prédéterminées (rapport liquide:solide, temps de culbutage, taille maximale de particules, solution de lixiviation, etc.). Dans tous les cas, le broyage du matériau traité par S/S, c'est-à-dire d'un échantillon monolithique, est inévitable afin qu'il puisse y avoir un contact accru entre le solide et le lixiviant et en vue de mesurer la quantité du contaminant d'intérêt susceptible d'être lixiviée dans des conditions spécifiques à chaque de ces essais.

L'essai TCLP permet de déterminer si une matière résiduelle est considérée lixiviable au sens du *Règlement sur les matières dangereuses (RMD)*. De son côté, l'essai TCLP modifié est employé lorsqu'un matériau présente une capacité de neutralisation d'acide supérieure à 3 eq/kg (à pH 9) et vise un maintien plus ou moins constant à pH 5 comme condition de lixiviation (essai de lixiviation tamponné et très agressif). L'essai SPLP et l'essai CTEU-9 visent, quant à eux, à évaluer le potentiel de valorisation de matières résiduelles non dangereuses, notamment par S/S. L'essai SPLP vise à simuler une lixiviation des contaminants causée par un contact du matériau avec des pluies acides. L'essai CTEU-9 consiste à évaluer la lixivabilité des contaminants au contact de l'eau. Pour l'ensemble de ces essais de lixiviation, les concentrations des contaminants sont mesurées dans les lixiviats et ensuite comparées à des critères de mobilité fixés. Les lignes directrices du MDDELCC spécifient des critères de mobilité à atteindre pour divers paramètres chimiques qui sont basés sur les critères de potabilité de l'eau.

4.3.2.2 Tests dynamiques

Les tests dynamiques visent à mesurer la lixiviation des contaminants à partir du matériau traité par S/S au cours du temps. Il existe deux types d'essais dynamiques, notamment sur matrice monolithique ou sur une matrice granulaire. Dans le premier type, un échantillon monolithique est immergé dans une succession de volumes d'eau sur une période fixée. Dans le second type, la matrice granulaire est placée dans un perméamètre à travers lequel une circulation d'eau continue est maintenue pendant une période fixée. Les contaminants lixiviés sont mesurés dans l'eau d'immersion ou le lixiviat à la sortie du perméamètre et ce, en fonction du temps.

Le premier type de test dynamique, aussi appelé « essai de diffusion », permet d'évaluer la diffusivité des contaminants à partir de la matrice monolithique du matériau stabilisé et solidifié. Globalement, il consiste en l'immersion d'éprouvettes monolithiques de matériau traité dans une succession de volumes d'eau pendant des intervalles de temps fixés, jusqu'à un temps d'immersion cumulé de 5 jours. Les concentrations des contaminants de l'eau d'immersion sont ensuite mesurées à la fin de chaque intervalle et le coefficient de diffusion est calculé pour chaque étape d'immersion. Un indice de diffusivité des échantillons monolithiques est ensuite déterminé à l'aide du coefficient de diffusion moyen selon l'équation suivante :

$$L = -\log(D)$$

où L = indice de diffusivité;
 D = coefficient de diffusion (cm^2/s).

Alors que les tests statiques de lixiviation décrits à la section précédente permettent d'évaluer l'efficacité de l'immobilisation des contaminants par stabilisation chimique, l'essai de diffusion permet d'évaluer l'efficacité de l'encapsulation physique des contaminants produite par le procédé.

Les lignes directrices du MDDELCC spécifient une valeur minimale de l'indice de diffusivité de 9 comme critère à atteindre lors du traitement par S/S des sols contaminés, lequel correspond à un coefficient de diffusion de $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$.

5 TRAITEMENT PAR S/S DES SOLS CONTAMINÉS

5.1 Études réalisées jusqu'à maintenant

5.1.1 Étude de traitabilité par S/S en laboratoire des sols contaminés du site d'ASL

Une étude de traitabilité en laboratoire a été effectuée en 2011 spécifiquement pour les sols contaminés du site d'ASL (étude de QUALITAS pour le compte de CAQ). À partir de l'échantillon composite prélevé (voir section 3.1.1), différents mélanges préliminaires ont été expérimentés en laboratoire afin d'en évaluer à la fois leur performance physique et chimique. Suite à la réalisation d'essais exploratoires de traitement par S/S, une formule préliminaire de mélange a été élaborée.

Les échantillons confectionnés de sols traités par S/S ont été soumis au programme d'essais physiques et chimiques présenté à la section 0.

Les principaux résultats obtenus se résument comme suit :

- La résistance à la compression pour 28 jours de mûrissement a atteint des valeurs, en moyenne, de l'ordre de 8.0 MPa.
- La résistance à la flexion pour 28 jours de mûrissement a atteint des valeurs, en moyenne, de l'ordre de 2.2 MPa.
- La conductivité hydraulique a atteint des valeurs dans les ordres de grandeur de 10^{-7} à 10^{-8} cm/s.
- L'altération due à des cycles de gel/dégel a présenté des valeurs moyennes d'altération de l'ordre de 2.5% après 28 cycles en présence d'eau. En absence d'eau, aucune altération significative n'a été notée (<0.1%).
- La masse volumique totale des échantillons monolithiques de sols traités a été en moyenne de 2330 kg/m³.
- Les essais de diffusivité ont démontré que les concentrations en métaux diffusés dans l'eau de trempage ont été inférieures aux critères de potabilité de l'eau et les indices de diffusivité ont atteint des valeurs supérieures à 11 pour les métaux présents en concentration dépassant le critère C.

- Les résultats des tests statiques de lixiviation SPLP et CTEU-9 ont démontré que les concentrations en métaux sont généralement inférieures aux critères de potabilité de l'eau.

Globalement, l'étude préliminaire de traitabilité en laboratoire a permis de démontrer le potentiel de traiter ces sols par S/S en se basant sur les critères fixés dans les lignes directrices du MDDELCC relatives au traitement par S/S.

5.1.2 Essai pilote du traitement par S/S des sols du site d'ASL

Basé sur l'étude de traitabilité en laboratoire des sols du site d'ASL, un essai pilote a été réalisé à l'automne 2013 dans le but d'évaluer le comportement des sols traités à une échelle intermédiaire à la réhabilitation pleine échelle et de servir de projet de démonstration pour le Port de Québec. Cet essai pilote a consisté à la confection d'un monolithe d'essai de l'ordre de 1000 mètres carrés par 0.6 mètre d'épaisseur servant également de sous-fondation pour une route interne du Port de Québec. Ce monolithe d'essai a été recouvert d'un matériau granulaire puis d'un enrobé bitumineux. Lors du traitement par S/S à l'échelle pilote, des échantillons ont été confectionnés pendant les opérations de malaxage. Par la suite, des échantillons ont été carottés au sein du monolithe d'essai afin d'évaluer la performance obtenue.

Les principaux résultats obtenus se résument comme suit :

- La résistance à la compression pour 28 jours de mûrissement a atteint des valeurs, en moyenne, de l'ordre de 9.0 MPa.
- La résistance à la flexion pour 28 jours de mûrissement a atteint des valeurs, en moyenne, de l'ordre de 2.1 MPa.
- La conductivité hydraulique a atteint des valeurs dans l'ordre de grandeur de 10^{-7} cm/s.
- L'altération due à des cycles de gel/dégel a présenté des valeurs d'altération inférieures à 1% après 28 cycles en présence d'eau. En absence d'eau, aucune altération significative n'a été notée (<0.1%).

- La masse volumique totale des échantillons monolithiques de sols traités a été en moyenne de 2350 kg/m³.
- Les essais de diffusivité ont démontré que les concentrations en métaux diffusés dans l'eau de trempage ont été inférieures aux critères de potabilité de l'eau et les indices de diffusivité ont atteint des valeurs supérieures à 13 pour les métaux présents en concentration dépassant le critère C.
- Les résultats des tests statiques de lixiviation SPLP et CTEU-9 ont démontré que les concentrations en métaux sont inférieures aux critères de potabilité de l'eau pour les métaux présents en concentration dépassant le critère C.

Les résultats obtenus lors de l'essai pilote ont été très comparables, voire meilleurs pour certains essais, à ceux obtenus lors de l'étude de traitabilité en laboratoire. Ainsi, cet essai pilote a permis de confirmer la possibilité de traiter ces sols par S/S en se basant sur les critères fixés dans les lignes directrices du MDDELCC relatives au traitement par S/S.

5.2 Études en cours de réalisation

5.2.1 Suivi de l'essai pilote du traitement par S/S des sols du site d'ASL

Deux ans suivant la réalisation de l'essai pilote, il est prévu de réaliser deux forages au sein du monolithe d'essai. Ces forages serviront à :

- Prélever des carottes au sein du monolithe afin de les soumettre à des essais physiques et chimiques;
- Installer des puits d'observation pour le suivi de la qualité environnementale de l'eau souterraine.

Les essais suivants seront réalisés sur les carottes prélevées dans le monolithe de sols traités par S/S :

- Résistance à la compression;
- Conductivité hydraulique;

- Essai de diffusivité;
- Altération due aux cycles de gel/dégel.

Les résultats de ces essais permettront d'évaluer l'efficacité du traitement suite à deux périodes de gel/dégel (2 ans). Cette évaluation permettra d'évaluer la stabilité du traitement suite à deux années de sollicitations par des agresseurs physiques (par exemple les charges de trafic, l'altération potentielle due au séchage/mouillage et au gel/dégel) et chimiques (par exemple les sulfates et les chlorures).

Par ailleurs, la mise en place de puits d'observation au droit des forages permettra d'évaluer la qualité de l'eau souterraine et ses variations potentielles afin de démontrer, à long terme sur une période potentielle de plusieurs années, que le monolithe d'essais ne comporte pas d'effets indésirables sur la nappe d'eau souterraine.

5.2.2 Étude de traitabilité par S/S des autres sols contaminés

En se basant sur l'étude de traitabilité en laboratoire des sols du site d'ASL et de son essai pilote, une étude exhaustive de traitabilité sera réalisée en laboratoire spécifiquement pour les autres sols contaminés présents au secteur Beauport et qui ont été caractérisés en 2014 (voir section 3.1.2). Le même programme d'essais physiques et chimiques sera réalisé que pour les études précédentes de traitabilité. Cette étude exhaustive permettra de déterminer également une formule optimale de mélange qui répondra aux critères spécifiques du projet. Les critères spécifiques du projet pourront être déterminés conjointement avec les différents intervenants impliqués dans le projet tout en étant basés sur la conception structurale exhaustive de la future chaussée portuaire.

6 TRAITEMENT PAR S/S DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS

En vue d'optimiser la performance du traitement par S/S spécifiquement pour les sédiments contaminés, un assèchement des sédiments serait préférable. Cet assèchement des sédiments contaminés dragués pourraient être réalisé par différentes voies possibles. Celles-ci pourraient toutefois affecter les propriétés finales des sédiments dragués, en grande partie leur contenu en eau. Une des voies possibles qui pourrait présenter des avantages intéressants en ce qui a trait à la minimisation de la surface requise d'assèchement et l'évitement de la construction d'ouvrages de retenue serait l'utilisation du procédé d'assèchement par tubes géotextile (voir description à la section 6.1.1). Ce procédé requiert l'usage d'un agent flocculant (généralement un polymère) qui pourrait toutefois entraîner des effets sur l'efficacité du traitement par S/S.

Puisque le choix de la voie d'assèchement n'est pas déterminé, il a donc été préféré de réaliser des études de traitabilité en laboratoire spécifique aux sédiments contaminés suivant deux options possibles :

- Option A : Traitement par S/S sans présence de polymère;
- Option B : Traitement par S/S avec présence de polymère (résultat d'un assèchement par tubes géotextile).

6.1 Études réalisées jusqu'à maintenant

6.1.1 Essai pilote d'assèchement sur site

Un essai pilote d'assèchement a été réalisé sur le site en novembre 2013 à partir de l'échantillon composite d'environ 35 mètres cubes de sédiments de nature silto-argileuse prélevé spécifiquement au secteur des ducs-d'Albe (voir section 3.3).

Bien qu'il existe d'autres techniques d'assèchement qui pourraient être applicables pour ces sédiments, la technique d'assèchement choisie pour cet essai pilote a été le procédé de déshydratation par tubes géotextile. Sommairement, ce procédé de déshydratation

consiste à injecter des boues, contaminées ou non (par exemple des boues de dragage), dans un tube géotextile (ou sac filtrant) suite à l'ajout, pendant le pompage, d'un agent flocculant prédéterminé (généralement un polymère). Les boues ainsi préconditionnées formeront des agglomérations de leurs particules solides qui seront emprisonnées à l'intérieur du sac filtrant. Puisque les boues pompées comportent une quantité importante d'eau (de l'ordre de 80 à 90% généralement), elles seront donc déshydratées (ou asséchées) à un certain niveau (fonction de divers paramètres affectant l'efficacité du procédé) suite à l'exfiltration de l'eau libre à travers les interstices du sac filtrant.

Ce procédé d'assèchement permet ainsi d'obtenir une eau exfiltrée (sortant du sac filtrant) ayant généralement une faible concentration en matières en suspension. En présence d'une contamination ayant une affinité élevée pour la phase solide, celle-ci demeure généralement adsorbée aux agglomérations de particules solides et ainsi emprisonnée à l'intérieur du sac filtrant. Selon le cas, l'eau exfiltrée obtenue suite à la déshydratation de boues contaminées pourrait faire l'objet d'un traitement ou non avant son rejet dans l'environnement ou dans un réseau d'égout si applicable.

L'objectif principal de cet essai pilote a été d'évaluer l'efficacité d'assèchement du procédé de déshydratation par tubes géotextile spécifiquement pour les sédiments soumis à l'essai. L'évaluation de l'efficacité d'assèchement a été basée sur les deux aspects suivants :

- Évaluation de la siccité des sédiments suite à leur assèchement;
- Évaluation de la qualité de l'eau exfiltrée lors du procédé d'assèchement.

Les travaux sur le site à une échelle pilote ont consisté à l'injection dans un tube géotextile de sédiments afin de reproduire le procédé d'assèchement qui pourrait être employé à grande échelle. Un tube géotextile d'une capacité de l'ordre de 20 mètres cubes avait été déposé préalablement dans un conteneur étanche muni d'une cage de filtration. Les sédiments, qui étaient entreposés dans des conteneurs étanches, ont été

d'abord dilués avec de l'eau du fleuve Saint-Laurent puis pompés dans le tube géotextile suite à leur conditionnement dans une unité mobile de polymérisation.

6.1.2 Évaluation de la siccité des sédiments suite à leur assèchement

Suivant la fin de l'injection des sédiments dilués dans le tube géotextile (c'est-à-dire une fois que le tube géotextile a été considéré rempli à sa pleine capacité), des échantillons de sédiment ont été prélevés directement à l'intérieur du tube géotextile (par l'ouverture centrale du tube géotextile à l'aide d'un carottier manuel) après 6 et 16 jours d'assèchement. Également, le montage pilote d'assèchement a été laissé sur le site durant l'hiver afin d'évaluer l'impact supplémentaire que pouvait engendrer une période de gel/dégel. Lors de l'ouverture à l'aide d'une pelle mécanique du tube géotextile suivant sa période de dégel, trois échantillons composites ont été prélevés à trois endroits distincts. La siccité des sédiments suite à leur assèchement a atteint 52% avant la période de gel tandis qu'elle a été, en moyenne, de 57% lors de l'ouverture du tube géotextile suivant la période de dégel. À titre indicatif, les sédiments dilués avaient une siccité de l'ordre de 15% avant leur assèchement.

6.1.3 Évaluation de la qualité de l'eau exfiltrée lors du procédé d'assèchement

L'eau exfiltré du tube géotextile a été recueillie à la sortie du conteneur étanche et emmagasinée dans un réservoir temporaire d'échantillonnage. L'échantillonnage de l'eau exfiltrée a été réalisée dans le réservoir après 4, 8 et 150 heures suivant le début des opérations d'injection des sédiments dilués. Ces échantillons d'eau ont été soumis à un programme exhaustif d'analyses chimiques et de bioessais pour en évaluer à la fois leur qualité chimique et leur toxicité potentielle. Un échantillon de l'eau ayant servi à la dilution des sédiments (en l'occurrence l'eau du fleuve Saint-Laurent) a été soumis au même programme d'analyses chimiques et de bioessais.

Les objectifs environnementaux de rejet (OER) spécifiques à l'eau exfiltrée devront être définis ultérieurement par les différents intervenants impliqués afin de procéder à une interprétation détaillée des résultats obtenus et à la détermination de la nécessité ou non de procéder à un traitement préalable de l'eau exfiltrée avant son rejet. Dans

l'attente de ces OER, les résultats obtenus ont été comparés à titre indicatif à ceux obtenus sur l'échantillon prélevé d'eau du fleuve Saint-Laurent.

Les principaux résultats obtenus se résument comme suit :

- Les concentrations de matières en suspension (MES) mesurées sur les échantillons d'eau exfiltrée ont été comparables à celle de l'eau du fleuve. Les valeurs mesurées en MES sur les échantillons d'eau exfiltrée ont varié de 33 à 42 mg/L alors que la valeur mesurée sur l'échantillon d'eau du fleuve a été de 37 mg/L.
- L'eau exfiltrée a montré des changements de qualité en comparaison avec l'eau du fleuve, notamment une augmentation des concentrations en métaux, en azote ammoniacal, en nitrite, en sulfate, en chlorure et en bromure.
- Une augmentation importante du carbone organique dissous, du carbone organique total, de la demande chimique en oxygène, de la demande biochimique en oxygène (DBO₅) a été observée pour les échantillons d'eau exfiltrée comparativement à l'échantillon d'eau du fleuve.
- Les bioessais (ou essais biologiques) suivants ont été réalisés sur l'eau exfiltrée et sur l'échantillon d'eau du fleuve Saint-Laurent : 1) *Daphnia magna* CL50-48h (SPE/RM/14), Mené tête-de-boule *Pimephales promelas* CL50-96h (EPA-821-R-02-012) et *Microtox phase liquide* - *Vibrio fischeri* (SPE 1/RM/24). Aucun effet biologique néfaste n'a été observé pour les bioessais *Microtox phase liquide* et *Daphnia magna* réalisés sur les échantillons d'eau exfiltrée ainsi que sur l'échantillon d'eau du fleuve. Toutefois, des effets biologiques néfastes ont été observés pour le bioessai Mené tête-de-boule *Pimephales promelas* à la fois sur les trois échantillons d'eau exfiltrée et sur l'échantillon d'eau du fleuve. En termes de toxicité, deux des trois échantillons d'eau exfiltrée ont été considérés toxiques (valeurs de l'unité toxique de 2.6 et 1.5).

Ces changements de qualité devront être validés de concert avec les instances gouvernementales qui seraient en mesure éventuellement de recommander les critères

de rejet de l'eau exfiltrée spécifique au projet. Selon ces derniers, l'eau exfiltrée pourra devoir faire l'objet d'un traitement avant son rejet dans l'environnement ou dans un réseau d'égout. Selon le cas, des demandes d'autorisation pourraient également être exigées.

6.1.4 Étude de traitabilité en laboratoire – Option A

Une étude préliminaire de traitabilité en laboratoire a été effectuée spécifiquement pour les sédiments échantillonnés au secteur des ducs-d'Albe projetés. À partir de l'échantillon composite prélevé (voir section 3.3), différents mélanges préliminaires ont été expérimentés en laboratoire afin d'en évaluer à la fois leur performance physique et chimique. Suite à la réalisation d'essais exploratoires de traitement par S/S, trois formules préliminaires de mélange ont été élaborées en variant notamment leur teneur en ciment et leur teneur en additifs et/ou en ajouts cimentaires. Lors de la formulation en laboratoire, la consistance des sédiments échantillonnés par drague à benne preneuse a été considérée représentative de ce qui serait obtenu lors de futures opérations de dragage de type mécanique. Aucun assèchement n'a donc été réalisé sur ces sédiments (et aucun usage de polymère).

Les échantillons confectionnés de sédiments traités par S/S ont été soumis au programme d'essais physiques et chimiques présenté à la section 0.

Les principaux résultats obtenus se résument comme suit :

- La résistance à la compression à 28 jours de mûrissement a atteint des valeurs comprises entre 2 et 5 MPa pour les trois formules de mélange.
- La conductivité hydraulique a atteint des valeurs dans les ordres de grandeur de 10^{-8} à 10^{-9} cm/s pour les trois formules de mélange.
- La masse volumique totale des échantillons monolithiques de sédiments traités a été en moyenne de 1670 kg/m^3 .
- Les essais de diffusivité ont démontré que les concentrations en métaux diffusés dans l'eau de trempage ont été inférieures aux critères de potabilité de l'eau et

les indices de diffusivité ont atteint une valeur supérieure à 10 pour les métaux présents en concentration dépassant le critère CEO et le critère B.

- Les résultats des tests statiques de lixiviation SPLP et CTEU-9 ont démontré que les concentrations en métaux ont été généralement inférieures aux critères de potabilité de l'eau.

Globalement, cette étude préliminaire de traitabilité en laboratoire a permis de démontrer le potentiel de traiter ces sédiments par S/S. Une étude exhaustive de traitabilité en laboratoire pourra faire l'objet de travaux futurs afin d'adapter et d'optimiser les formules de mélange par rapport à la conception structurale de la future chaussée portuaire projetée.

6.2 Études en cours de réalisation

6.2.1 Étude d'assèchement en laboratoire

Une étude d'assèchement en laboratoire sera réalisée spécifiquement pour les sédiments contaminés de nature silteuse qui ont été prélevés au secteur du nouveau quai durant la caractérisation environnementale complémentaire (voir section 3.2.2.2). Le volume prélevé de l'ordre de 150 litres de ces sédiments silteux permettra de :

- Caractériser de façon exhaustive leur qualité environnementale et leur toxicité;
- Évaluer la siccité potentielle spécifique à ces sédiments suite au procédé d'assèchement par tubes géotextile;
- Évaluer à la fois la qualité environnementale et la toxicité de l'eau exfiltrée lors du procédé d'assèchement spécifique à ces sédiments.

Cette étude complémentaire permettra de statuer sur le caractère toxique potentiel de l'eau exfiltrée. Également, les sédiments contaminés qui seront asséchés (suite à leur conditionnement avec un polymère choisi) seront conservés pour les fins de l'option B de l'étude de traitabilité en laboratoire des sédiments contaminés (voir section suivante).

6.2.2 Étude de traitabilité en laboratoire – Option B

Une étude de traitabilité en laboratoire sur des sédiments contaminés qui auront été préalablement asséchés par tubes géotextile sera réalisée en vue notamment d'évaluer si la présence résiduelle de polymère peut affecter l'efficacité du traitement par S/S (option B du traitement par S/S des sédiments contaminés).

Une même formule de mélange déterminée lors de l'option A de l'étude de traitabilité en laboratoire sera réalisée durant cette étude spécifiquement sur les sédiments qui ont été emprisonnés dans le tube géotextile lors de l'essai pilote d'assèchement (sédiments provenant du secteur des ducs-d'Albe, voir sections 3.2.1 et 3.3).

Également, les sédiments contaminés qui ont été prélevés lors de la caractérisation environnementale complémentaire feront l'objet de l'évaluation du potentiel d'applicabilité d'un traitement par S/S suivant les 2 options :

- Option A : sans présence de polymère;
- Option B : avec présence de polymère suite à la réalisation de l'étude d'assèchement en laboratoire.

La comparaison du même programme d'essais physiques et chimiques que les autres études de traitabilité permettra de déterminer l'impact potentiel de la présence du polymère dans les sédiments contaminés. Par ailleurs, l'évaluation de l'efficacité du traitement permettra à la fois de déterminer la possibilité de traiter par S/S les sédiments contaminés spécifiquement prélevés lors de la caractérisation environnementale complémentaire au secteur du nouveau quai et les sédiments contaminés ayant été préalablement asséchés à l'aide du procédé de déshydratation par tubes géotextile.

7 CONCLUSIONS

L'Administration portuaire de Québec désire procéder à la construction de nouvelles infrastructures portuaires afin de procéder à l'agrandissement du secteur Beauport du Port de Québec. La construction de ces nouvelles infrastructures portuaires nécessitera notamment le dragage d'un volume considérable de sédiments. Au sein de la zone de dragage envisagée, les résultats obtenus lors d'études de caractérisation ont révélé la présence, par endroits, de sédiments contaminés à des concentrations dépassant le critère CEF. Par ailleurs, des sols contaminés à des concentrations supérieures au critère C sont entreposés temporairement en pile au Port de Québec. Le traitement par stabilisation et solidification (S/S), à la fois de ces sédiments contaminés et de ces sols contaminés, a été proposé comme solution viable qui permettrait la réutilisation et la valorisation de ces matériaux en tant que matériau de remblaiement structural à l'arrière du nouveau quai.

À cet effet, la présente étude a porté sur la définition d'une stratégie potentielle de valorisation, suite à leur traitement par S/S, des sols et des sédiments contaminés devant être gérés dans le cadre du projet d'agrandissement du secteur Beauport. Le présent rapport se voulait ainsi être une introduction au traitement par S/S et un sommaire à la fois de la stratégie de valorisation proposée ainsi que des études s'y rapportant, déjà réalisées ou en cours de réalisation.

D'ordre général, les sédiments pour lesquels un traitement par S/S est envisagé sont de nature silteuse et sont contaminés en métaux et en HAP à des concentrations dépassant le critère CEF. Pour leur part, les sols pour lesquels un traitement par S/S est envisagé se composent de sable graveleux et sont contaminés en métaux à des concentrations dépassant le critère C. Afin d'évaluer la possibilité de traiter ces matériaux par S/S, des études de traitabilité en laboratoire et sur site ont été réalisées.

Globalement, les résultats obtenus lors des études de traitabilité en laboratoire et sur site (essai pilote) réalisées sur les sols du site d'ASL ont démontré la possibilité de les traiter par S/S. Dans l'ensemble, les résultats obtenus lors des études de traitabilité sur

ces sols ont été conformes aux attentes fixées dans les lignes directrices du MDDELCC pour un traitement par S/S.

Un essai pilote d'assèchement par tubes géotextile a également été réalisé sur site spécifiquement pour les sédiments contaminés de nature silto-argileuse du secteur des ducs-d'Albe projetés. Les sédiments asséchés ont atteint une valeur de siccité de plus de 50% à la fin de l'essai pilote sur site. Bien que la concentration en matières en suspension ait été comparable à celle de l'eau du fleuve, les échantillons d'eau exfiltrée ont présenté une augmentation de la concentration pour certains paramètres analytiques comparativement à l'eau du fleuve ayant servi pour la dilution des sédiments. Aussi, deux des trois échantillons prélevés d'eau exfiltrée ont été considérés toxiques. Pour une interprétation détaillée des résultats obtenus sur la qualité de l'eau exfiltrée, les objectifs environnementaux de rejet devront donc être déterminés, spécifiquement pour le projet d'agrandissement du Port de Québec et par les différents intervenants impliqués, afin de statuer sur la nécessité ou non de traiter l'eau exfiltrée devant être gérée lors de probables opérations d'assèchement des sédiments du secteur des ducs-d'Albe projetés.

L'étude de traitabilité en laboratoire réalisée sur ces mêmes sédiments contaminés du secteur des ducs-d'Albe projetés a démontré un bon potentiel du traitement par S/S. Dans l'ensemble, les résultats obtenus lors de cette étude de traitabilité sur ces sédiments ont été conformes aux attentes fixées dans les lignes directrices du MDDELCC pour un traitement par S/S.

D'autres études sont en cours et à venir afin de confirmer le potentiel du traitement par S/S spécifiquement pour ces sols et ces sédiments. Une étude d'assèchement sera également réalisée en laboratoire sur les sédiments contaminés du secteur du nouveau quai projeté afin d'évaluer l'efficacité d'assèchement du procédé de déshydratation par tubes géotextile ainsi que la qualité de l'eau exfiltrée spécifiquement pour ces sédiments.

8 PORTÉE ET LIMITATIONS

Ce rapport présente un résumé des résultats obtenus pour les phases terminées ainsi que des phases en cours et à venir relativement au traitement par S/S de sols et de sédiments contaminés devant être gérés lors du projet d'agrandissement du Port de Québec. Un rapport final couvrira chacune de ces phases et rapportera l'ensemble des résultats obtenus, leur analyse et leur interprétation. Ainsi, les résultats, les observations, les conclusions et les recommandations de ces rapports finaux ou des autres études consultées prévalent ou prévaudront sur le présent rapport s'il advenait une quelconque divergence.

Les propositions émises dans ce rapport ne peuvent en aucun cas être utilisées pour fins de construction. La conception de la structure de chaussée devra être réalisée par un expert afin de s'assurer qu'elle pourra résister aux charges spécifiques à son utilisation. Par ailleurs, des critères environnementaux de conception et spécifiques au projet global seront émis par d'autres parties et des instances gouvernementales. Toute interprétation ou information intégrée dans ce rapport s'avère donc présentée à titre informel et indicatif. La conformité du traitement par S/S devra être réalisée une fois seulement que tous les critères environnementaux spécifiques au projet global seront définis.

La présente étude a été réalisée conjointement par PANGEOS et l'ÉTS pour le compte de l'Administration portuaire de Québec dans le cadre du traitement par S/S envisagé à la fois pour les sols contaminés et les sédiments contaminés devant être gérés lors de la construction des nouvelles infrastructures portuaires au secteur Beauport du Port de Québec. Ce rapport ne peut, en aucun cas, être utilisé dans un autre contexte.

PANGEOS et l'ÉTS ne peuvent être tenues responsables de dommages résultant de toute utilisation faite par un tiers de la présente étude. La présente version du rapport annule et remplace toute autre version antérieure déjà émise du rapport de la présente étude.

9 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Al-Tabbaa, A. et A.S.R. Perera. 2005. *Part 3: Binders & technologies – Applications. Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes.* R.D.Spence et C. Shi (éd.).CRC Press, Boca Raton, États-Unis.

Association canadienne du ciment. 2015. Site internet : <http://www.cement.ca/fr/>. Site consulté le 14 décembre 2015.

Boudreault, J.-P., É. Hardy et J.-S. Dubé. 2010. *Traitement par stabilisation/solidification au ciment de sols contaminés par le zinc : premier projet pilote au Québec.* 2010 International Solidification/Stabilization Technology Forum. Sydney, Nouvelle-Écosse, Canada.

Boudreault, J.-P., É. Hardy, L. D'Amours, A. Contant, J.-S. Dubé et H. Brassard. 2014. *Optimisation de la conception de chaussées portuaires par une approche de traitement par stabilisation et solidification - Réaménagement du secteur Viau au Port de Montréal.* Communication lors de la conférence : 49e Congrès annuel de l'Association québécoise des transports (Québec, QC, Canada, 31 mars-2 avril 2014).

Ciment Québec inc. 2013. Communication personnelle.

Environnement Canada (EC). 2002. *Guide d'échantillonnage des sédiments du Saint-Laurent pour les projets de dragage et de génie maritime. Volume 2 : Manuel du praticien de terrain.* Environnement Canada, Direction de la Protection de l'Environnement, Région du Québec, Section innovation technologique et secteurs industriels. 107 pages.

Environnement Canada (EC) et ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP). 2007. *Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration.* 39 pages.

Klein, P.Y. et M.C. Magnié. 2005. *Stabilisation/solidification experience in France.* Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes. R.D.Spence et C. Shi (éd.).CRC Press, Boca Raton, États-Unis.

- Maher, A., V. Schaefer et D. Yang. 2008. *In-situ deep soil mixing for solidification of soft estuarine sediments – shear strength*. GeoCongress 2008: Geotechnics of Waste Management and Remediation: pp. 668-675.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). 2012. *Lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification*. MDDEFP, Direction des matières résiduelles et des lieux contaminés. Québec. 40 p.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) et Environnement Canada (EC). 2013. *L'évaluation du risque écotoxicologique (ERE) du rejet en eau libre des sédiments, en soutien à la gestion des projets de dragage en eau douce*. 35 pages.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). [En ligne]. *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés* (révision: novembre 2001). Québec, Canada.
- Publications du Québec. [En ligne]. *Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPRT)* : L.Q.R., chap. Q-2, r.18.1.01. Québec, Canada: Éditeur officiel du Québec.
- Publications du Québec. [En ligne]. *Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés (RESC)* : L.Q.R., chap. Q-2, r.6.01. Québec, Canada: Éditeur officiel du Québec
- Sydney Tar Ponds Agency. 2015. Site internet : <http://www.tarpondscleanup.ca/>. Site consulté le 14 décembre 2015.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2009. *Technology Performance Review: Selecting and Using Solidification/Stabilization Treatment for Site Remediation*. EPA/300/R-09/148. USEPA National Risk Management Research Laboratory. Cincinnati, OH. 21 p.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2010. *Superfund Remedy Report, 13th Edition*. EPA-542-R-10-004. USEPA Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, DC. 19 p.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2013. *Superfund Remedy Report, 14th Edition*. EPA-542-R-10-004. USEPA Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, DC. 22 p.

- Wilk, C. 2004. Solidification/Stabilization *Treatment and Examples of Use at Port Facilities*. Ports 2004: pp. 1-10. doi: 10.1061/40727(2004)92
- Wilk, C. 2007. *Principles and Use of Solidification/Stabilization Treatment for Organic Hazardous Constituents in Soil, Sediment, and Waste*. Waste Management 2007 Conference. Tucson, AZ.



TERRE ET ENVIRONNEMENT
L'INGÉNIERIE REINVENTÉE

www.pangeos.ca