

APPLICABILITE DIRECTE EN TUBE GEOTEXTILE DU PROCEDE DE TRAITEMENT PAR STABILISATION ET SOLIDIFICATION DE BOUES DE DRAGAGE HYDRAULIQUE

Valeri Ondo Mambilo^{1,2}, Jean-Philippe Boudreault² et Jean-Sébastien Dubé¹

¹Département de génie de la construction, École de technologie supérieure, Montréal

² Pangeos inc., Laval

RÉSUMÉ

Le réaménagement ou la construction d'infrastructures portuaires nécessite souvent le recours à des opérations de dragage des sédiments. Les boues de dragage sont souvent éliminées, car elles présentent parfois de la contamination, des caractéristiques géotechniques indésirables, et parfois les deux. Le traitement par stabilisation et solidification (S/S) pourrait permettre le développement durable et la gestion des boues de dragage en améliorant les propriétés de ces dernières et en permettant de les valoriser directement sur place et les intégrer dans des projets d'ouvrages structuraux.

Ainsi, cette étude vise une démonstration en laboratoire de la déshydratation et du traitement simultané par S/S de boues contaminées issues d'un dragage hydraulique. La solution proposée consiste en l'application d'un processus de traitement innovant des boues de dragage dans des tubes géotextiles en ajoutant divers constituants et additifs pour le traitement S/S. L'utilisation de tubes géotextiles dans le procédé sert de filtre afin de permettre une déshydratation passive des boues de dragage, tout en contrôlant le niveau des solides en suspension rejetés dans un cours d'eau.

Les résultats des essais de résistance en compression (2 à 5 MPa) montrent que la S/S a permis d'améliorer les propriétés physiques des boues décantées. Les résultats des essais de diffusion et de lixiviation ont montré une diminution de la mobilité des métaux (cuivre, nickel et zinc). Les résultats de turbidité (31,4 NTU) et de MES (32 mg/l), montrent que le procédé permet la rétention de MES dans les tubes géotextiles et la clarification de l'eau de filtration.

Mots clés: Boues de dragage hydraulique, Déshydratation, Stabilisation/Solidification, Tubes géotextiles.

INTRODUCTION

Les enjeux économiques et sociaux de par le monde amènent de nombreux gouvernements et administrations à penser à des stratégies de diversification et d'accroissement des activités économiques. L'accroissement des activités portuaires, notamment l'agrandissement des infrastructures portuaires, peut ainsi contribuer à un développement économique local.

Ces travaux de réaménagement ou de construction d'infrastructures portuaires requièrent, dans certains cas, des opérations de dragage des sédiments. Ces sédiments dragués sont souvent perçus comme des «déchets» à gérer puisqu'ils présentent parfois une contamination, parfois des caractéristiques géotechniques indésirables, parfois les deux. Pourtant, ces matériaux dragués pourraient être réutilisés au sein de nouvelles infrastructures portuaires, suite à l'amélioration de leurs propriétés tant environnementales que géotechniques.

À cet effet, le traitement par stabilisation et solidification (S/S) permet une gestion des sédiments

dragués directement sur le site en améliorant leurs propriétés mécaniques et environnementales.

Ainsi, cette étude vise à démontrer la faisabilité de valoriser par S/S des boues contaminées du fleuve Saint-Laurent issues d'un dragage hydraulique. La solution proposée consiste en l'application d'un procédé innovateur de traitement direct des boues dans des tubes géotextiles avec l'ajout simultané de constituants de traitement par S/S. L'utilisation des tubes géotextiles dans le procédé sert de matériau filtrant afin de permettre un assèchement passif des boues de dragage hydraulique, tout en contrôlant les matières en suspension dans l'eau exfiltrée. Ce procédé consiste ainsi à mettre en œuvre les mécanismes d'assèchement passif, de stabilisation et de solidification qui sont ainsi combinés de façon simultanée en une seule étape afin de réduire à la fois les coûts d'assèchement, de traitement et d'amélioration géotechnique tout en limitant le relargage de contaminants dans l'environnement.

Il s'agit donc de démontrer l'applicabilité directe en tube géotextile du procédé de stabilisation et solidification des boues de dragage hydraulique. Cette application constituerait ainsi une variante à la

méthode conventionnelle de traitement par S/S. Tel qu'illustré à la Fig. 1, cette variante pourrait permettre le couplage direct des opérations de dragage, du pompage dans des unités de traitement pour la stabilisation et solidification, de la décantation des boues et, à la fin, d'une filtration et d'une déshydratation des boues traitées.

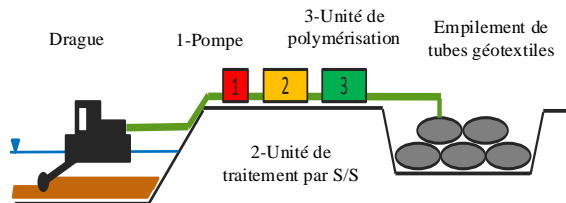


Fig.1 Variante proposée de traitement par S/S de boues de dragage hydraulique

REVUE DE LITTÉRATURE

Généralités et intérêts du traitement par S/S

Le traitement des matériaux contaminés par S/S est un procédé dont la première application remonte aux années 1950 pour le traitement des déchets radioactifs. Depuis, le traitement par S/S a été utilisé pour la gestion et l'élimination d'une vaste gamme de déchets, en particulier ceux classés comme dangereux [1].

Des études ont aussi porté sur le traitement des sols et sédiments contaminés en métaux. Selon certaines études, le traitement des contaminants organiques semble être plus difficile et plus coûteux [2]. Le procédé de traitement par S/S consiste principalement à mélanger un matériau contaminé avec de l'eau, du ciment et des additifs liquides ou solides. D'une part, la stabilisation, permet de réduire chimiquement le danger potentiel d'un matériau en convertissant les contaminants sous une forme moins mobile. D'autre part, la solidification, permet l'encapsulation de la contamination par la formation d'un matériau solide et peu perméable [3].

Au Canada, les projets d'application de la S/S sur des sédiments contaminés de dragage semblent être inexistantes. Les projets réalisés jusqu'à maintenant ont porté sur la réhabilitation de sols contaminés [4]-[5]. Pourtant, au Québec, ce sont en moyenne près de 450 000 m³ de sédiments à gérer, qui sont dragués chaque année dans le fleuve Saint-Laurent [6].

Une étude de Silitonga (2010) fait état des performances obtenues suite à l'utilisation de la S/S à base de liant hydraulique (ciment) et pouzzolanique (cendres volantes et fumée de silice) spécifiquement pour le traitement des sédiments contaminés [7]. Les résultats de cette étude démontrent la valorisation possible en tant que matériau de construction dans le domaine du génie civil [7].

Déshydratation des boues

Deux grands moyens sont généralement utilisés pour le dragage des sédiments marins : le dragage mécanique et le dragage hydraulique. Lorsque la nature des sédiments le permet, le dragage hydraulique est souvent préféré au dragage mécanique puisqu'il permet des taux de production beaucoup plus grand et peut présenter un taux de remise en suspension des sédiments relativement faible [8]. Par contre, les boues obtenues par dragage hydraulique ont une teneur en eau très élevée. Pour permettre la déshydratation des boues, on utilise généralement des polymères de floculation qui vont ainsi permettre la décantation des matières en suspensions [9].

Les polymères ont longtemps été utilisés dans le domaine du traitement des eaux usées. L'intérêt d'utilisation des polymères de floculation réside dans le fait qu'ils permettent la séparation des particules solides et/ou colloïdales avec l'eau, ce qui facilite la filtration des boues et ainsi leur déshydratation.

Tubes géotextiles

Les tubes géotextiles, utilisés comme matériaux filtrants, suscitent de nos jours un intérêt marqué, particulièrement pour des applications marines. Les tubes géotextiles peuvent en effet servir à la protection des côtes, au contrôle de l'érosion des plages et à la construction de noyaux de digues et de brise-lames (Fig. 2). Ils sont aussi utilisés comme structures sous-marines et peuvent former des digues

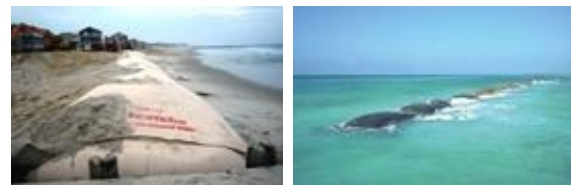


Fig. 2 Protection de bordure de plage (gauche) et digues sous-marines (droite).

La filtration étant l'une des fonctions principales des tubes géotextiles, il serait ainsi possible d'obtenir un matériau compactable suivant la déshydratation de boues par ce procédé [10].

STRATÉGIE DE RECHERCHE

Objectifs visés

Le projet de recherche présenté dans cet article vise deux objectifs principaux. Le premier objectif est de montrer l'applicabilité du procédé de traitement par S/S sur des sédiments fins contaminés (boue déshydratée) qui seraient obtenus suite à une décantation. Le deuxième objectif vise à évaluer

ensuite l'applicabilité d'une variante du traitement par S/S, spécifiquement pour une boue de dragage hydraulique (boue liquide).

Pour atteindre le premier objectif de cette étude, l'utilisation d'une boue décantée (voir Fig. 3A) a été nécessaire afin de démontrer l'applicabilité du traitement par S/S sur des sédiments fins contaminés, selon une approche par malaxage [12]. Pour le deuxième objectif, il s'agissait de traiter par S/S une boue de dragage hydraulique ayant une siccité d'environ 15% (siccité typique pour un dragage hydraulique) (voir Figure 3B).



Fig.3 A) boue décantée (gauche) et B) boue liquide (droite)

Sédiments à l'étude

Les sédiments à l'étude ont été échantillonnés dans le fleuve Saint-Laurent (Québec, Canada). Les sédiments récupérés ont fait l'objet d'un sous-échantillonnage en laboratoire afin d'être soumis à un programme de caractérisation physique et chimique au Laboratoire de géotechnique et de génie géoenvironnemental (LG2) du département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure (ÉTS). Certaines analyses chimiques ont été réalisées par un laboratoire privé. Les tableaux I et II ci-après présentent les caractéristiques des sédiments avant leur traitement par S/S.

Tableau I : Caractéristiques physiques des boues de dragage avant traitement

Types d'essais	Boues décantées	Boues liquides
Granulométrie	silto-argileuse : silts (67 %), argiles (32 %), sable (<1 %)	
Teneur en eau moyenne	83%	564%
Siccité	54%	15%

Tableau II : Caractéristiques chimiques des boues de dragage avant traitement

Paramètres	Teneur moyenne (mg/kg)	Niveau
Métaux extractibles totaux*	Cu : 84 Ni : 100 Zn : 280	CEO-CEF (critères pour les sédiments) et B-C (critères pour les sols), selon le MDDELCC**
HAP (somme)	< 0,15	CSE-CEO (critères pour les sédiments) et A-B (critères pour les sols) selon le MDDELCC
Soufre total	530	-

*métaux présentant des teneurs des dépassements des critères

**critères du ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [13]-[14].

Travaux réalisés

Suivant les objectifs visés dans cette étude, le programme de recherche a consisté en deux phases d'essais de contrôle et d'évaluation de la performance du traitement, soit :

- Phase 1 : Traitement par S/S sur les boues « décantées »;
- Phase 2 : Traitement par S/S sur les boues « liquides ».

Phase 1 : Traitement par S/S sur les boues « décantées »

Dans le cadre de cette étude, les boues décantées avaient été obtenues par dragage mécanique puis ont été laissées en décantation dans des conteneurs. C'est le décantat, tel que présenté à la Fig. 3A, qui a donc ainsi été prélevé pour cette phase du traitement.

La première étape de la phase 1 (phase 1A) a consisté en l'élaboration d'un programme d'essais physiques et chimiques permettant d'évaluer la performance du traitement en se basant sur le programme proposé par le MDDELCC au sein des lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification [15].

La deuxième étape (phase 1B) a consisté en l'élaboration de différentes formules de traitement par S/S et la confection d'éprouvettes pour chacune d'elles.

Phase 2 : Traitement par S/S sur les boues « liquides »

La boue liquide utilisée lors de cette phase a été obtenue en diluant la boue décantée afin d'obtenir une valeur de 15% en siccité. Le but de cette dilution était donc d'appliquer le traitement par S/S sur une boue liquide similaire à celle obtenue directement lors d'un dragage hydraulique (Fig. 3B). À partir de cette boue liquide, il s'agissait donc de simuler, en laboratoire, le traitement par S/S simultanément à une opération de dragage hydraulique des sédiments. Les étapes de cette procédure ont consisté en :

- Programme de contrôle (phase 2A)
- Choix d'un agent de floculation (phase 2B)
- Essai de filtration sur colonnes (phase 2C)
- Essai de simulation de pompage et d'injection dans un tube géotextile (phase 2D)

Lors de l'étape préliminaire (phase 2A), il s'agissait de définir un programme complémentaire de suivi de la qualité de l'eau exfiltrée des tubes géotextiles qui s'appuyait sur l'analyse chimique des principaux paramètres ci-après :

- Métaux extractibles totaux
- HAP (somme)
- pH
- Potentiel redox
- Conductivité électrique
- Turbidité
- Matière en suspension (MES)
- Demande chimique en oxygène (DCO)

L'étape suivante (phase 2B) a permis de choisir un agent de floculation efficace pour la séparation solide/liquide de la boue liquide. Les polymères ont été préparés et testés selon la méthode du « Jar Test », suivant le protocole de la norme ASTM D2035-13 [16]. Il s'agit d'un test permettant une comparaison de l'efficacité de plusieurs agents de floculation et ce, à des dosages variables. Grâce à un dispositif de « Jar Test » à vitesse constante, un certain volume du polymère était injecté dans des béchers contenant les boues liquides, jusqu'à l'observation de flocs et d'une clarification du surnageant (Fig. 4A-B).

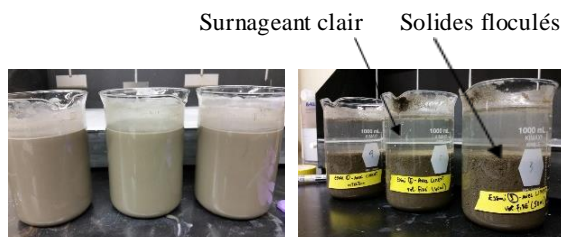


Fig. 4 Test de floculation (« Jar Test »). A) avant ajout de polymère (gauche) et B) après ajout de polymère (droite).

Lors de ces tests de floculation, l'impact des caractéristiques suivantes a été évalué : la concentration des solutions (à 0.1% ; 0.2% ; 0.3% et 0.4%), le type de polymère (cationique vs anionique) ainsi que la charge du polymère. Dans le cadre de cette étude, le polymère AQ8539 (AQUASAN) a été choisi à partir des caractéristiques visuelles suivantes : la grosseur des flocs, la vitesse de sédimentation des flocs et la clarté de l'eau.

L'étape de filtration sur colonne (phase 2C) a été réalisée grâce à un montage essentiellement constitué d'une colonne de filtration (voir Fig. 5) et d'un disque de tube géotextile servant de membrane filtrante. Le principe était ainsi d'évaluer la capacité filtrante des tubes géotextiles qui seraient utilisés dans l'étape suivante, ainsi que le temps de déshydratation du matériau traité retenu au-dessus de la membrane filtrante.



Fig. 5 Montage et schématisation des résultats obtenus lors des essais de filtration sur colonne

La dernière étape (phase 2D) a été de procéder à la simulation du traitement direct par S/S sur les sédiments à l'étude. Le montage a été constitué d'un réservoir contenant la boue liquide de dragage à traiter qui était maintenu en agitation de manière continue ainsi que deux autres réservoirs distincts servant à contenir, d'une part, une suspension de l'additif cimentaire et, d'autre part, la solution diluée de polymère. Des pompes submersibles contenues dans chaque réservoir permettaient le pompage des différents constituants du mélange en continu. Les fluides qui étaient simultanément pompés passaient à travers deux segments de colonnes de culbutage servant à favoriser l'homogénéisation et la floculation du mélange. Le mélange floculé a été injecté à la sortie des colonnes dans un tube géotextile disposé dans un bac qui permettait la récupération de l'eau de filtration.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Phase 1 : Résultats du traitement par S/S sur les boues « décantées »

La Figure 6 présente le résultat visuel des cylindres obtenus à la suite de l'application du traitement par S/S sur les boues décantées.

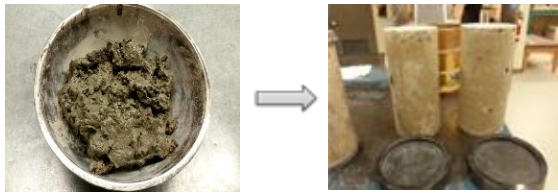


Fig. 6 Photographie d'éprouvettes confectionnées suivant le traitement par S/S de la boue décantée.

Résultats des essais physiques et chimiques

Tableau III : Résultats des essais physiques et chimiques de contrôle – phase 1

Essais de contrôle	Résultats obtenus
Essais physiques	
Résistance à la flexion (à 28 jours de mûrissement)	0,6 à 1,6 MPa
Résistance à la compression (à 28 jours de mûrissement)	2,0 à 5,0 MPa
Conductivité hydraulique	10-8 à 10-9 cm/s
Altérations physique (mouillage/séchage)	<1% perte à 56 cycles
Essais chimiques	
Lixiviation SPLP	< valeurs du RQEP*
Lixiviation à l'eau	< valeurs du RQEP
Diffusivité (indice de lixivibilité)	> 10

*Règlement sur la qualité de l'eau potable au Québec

Phase 2 : Résultats du traitement par S/S sur les boues « liquides » déshydratées

Le résultat visuel (phase 2) obtenu suivant les essais de simulation de pompage et d'injection directe dans un tube géotextile (boues liquides) est présenté à la Fig. 7.

Résultats des essais physiques

Puisque le temps de mûrissement est plus long pour la boue liquide déshydratée traitée, certains essais et résultats restent à venir au moment de la rédaction de cet article.

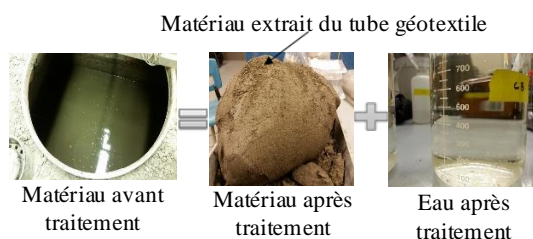


Fig. 7 Photographies présentant les résultats obtenus lors de la simulation du traitement direct par S/S sur la boue liquide

Résultats chimiques sur l'eau exfiltrée des tubes géotextiles

Tableau IV. Résultats d'analyses chimiques sur l'eau exfiltrée des tubes géotextiles – phase 2

Paramètres	unités	Moyenne des résultats obtenus
pH		11,6
Potentiel redox	mV	-312,5
Conductivité électrique	S/m	1890
Turbidité	NTU	31,4
Matières en suspension (MES)	mg/l	32
Demande chimique en oxygène (DCO)	mg/l	139
Métaux extractibles totaux	mg/l	< critères du RQEP
HAP (somme)	µg/l	< critères du RQEP

Dans le cadre de ce projet, les données des résultats des phases 1 et 2 devront être comparés afin d'évaluer l'applicabilité de la variante de S/S à l'étude. Les résultats de la phase 1 ont montré qu'il était possible d'atteindre en moyenne une résistance à la compression de 2 à 5 MPa, après 28 jours de mûrissement, pour des boues décantées traitées par S/S. Les essais d'altération physique (mouillage/séchage) ont résulté en une perte de masse du matériau (boues solidifiées) inférieure à 1% après plus de 28 cycles.

Les concentrations mesurées sur les lixiviats obtenus lors des essais de lixiviation et de diffusion n'ont révélé aucun dépassement des critères du RQEP et ce, à la fois pour les métaux extractibles totaux et les HAP.

L'observation visuelle de l'eau exfiltrée (Fig. 7) a permis de constater que le procédé de traitement des boues par S/S permet d'obtenir une eau d'aspect clair. Les résultats de la caractérisation des échantillons d'eau exfiltrée (tableau IV), en particulier pour la turbidité (31,4 NTU) et MES (32 mg/l) donnent également une indication de la qualité de l'eau obtenue à l'issue de l'application du traitement par S/S sur des boues liquides. Ceci permet de confirmer le résultat visuel, ainsi que l'efficacité du procédé quant à la clarification de l'eau.

Le pH de 11,6 de l'eau exfiltrée représentait une forte augmentation par rapport au pH initial des boues (pH de 7,0). Cette augmentation était attendue étant donné les ajouts cimentaires utilisés pour le traitement des boues. Par contre, ce pH demeure élevé par rapport aux valeurs recommandables dans le cas d'un rejet de ces eaux dans l'environnement, soit entre 7,0 et 8,7 selon les recommandations du Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME). Un traitement de l'eau exfiltrée pourrait être envisagé afin de neutraliser son caractère alcalin.

CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif global d'évaluer la possibilité d'appliquer le procédé de traitement par S/S sur des boues issues d'un dragage hydraulique de sédiments. Un objectif corolaire était de montrer l'applicabilité de ce traitement simultanément à une opération de dragage hydraulique.

La phase 1 de l'étude a ainsi consisté en un traitement d'une boue décantée. Les résultats des essais de résistance en compression obtenus montrent que le procédé a permis d'améliorer de façon marquée les propriétés physiques du matériau. Les résultats de diffusion et de lixiviation chimique sur des échantillons solidifiés ont montré que les métaux pouvaient être considérés peu mobiles suite au traitement. Les mesures réalisées sur l'eau exfiltrée produite lors des essais de simulation de pompage et d'injection directe dans un tube géotextile ont permis de constater que les valeurs mesurées en turbidité et en MES ont indiqué une floculation relativement efficace des sédiments à l'intérieur des tubes géotextiles ainsi qu'une clarification de l'eau de filtration.

À ce stade du projet, les essais physiques et chimiques sur le matériau traité extrait à l'intérieur des tubes géotextiles n'ont pas encore été réalisés. Une analyse comparative sera réalisée suite à l'obtention de l'ensemble de ces résultats.

RÉFÉRENCES

- [1] Ali Maher, D. H. N., and Dr. Maria Boile. "Solidification/Stabilization of Soft River Sediments Using Deep Soil Mixing". Final Report, 09/1/2004 - 10/20/2005, pp. 44.
- [2] Hester, R. E., and Harrison, R. M. "Assessment and Reclamation of Contaminated Land." Section 7.2.6. Royal Society of Chemistry, 2001, pp. 115-139.
- [3] EPA - Environmental Protection Agency. "Solidification/Stabilization resources guides." 1999.
- [4] Boudreault, J.-P., Hardy, E., D'Amours, L., Contant, A., Dubé, J.-S. et Brassard, H. "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, Canada, 31 mars - 2 avril 2014.
- [5] Boudreault, J.-P., Hardy, E. et Dubé, J.-S. 2010. "Traitement par stabilisation/solidification au ciment de sols contaminés par le zinc : premier projet pilote au Québec." Communication lors de la conférence : 2010 International Stabilisation/Solidification Technology Forum Sydney, NS, Canada, 2010.
- [6] Rieussec, E. "Analyse comparative des différents modes de gestion des sédiments de dragage en milieux terrestre et marin." Environnement. Université de Sherbrooke, Sherbrooke. Mémoire de maîtrise, 2008.
- [7] Silitonga, E. "Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice." Thèse de doctorat, Université de Caen, 2010.
- [8] Saint-Laurent, C. Guide pour le choix et l'opération des équipements de dragage et des pratiques qui s'y rattachent. 1992.
- [9] Saint-Pierre, X. "Procédure de réduction des consommations de polymère utilisé pour l'épaississement et la déshydratation des boues produites en stations d'épuration." Université de Paris Nord/Université Cergy-Pontoise, Maîtrise, 2009.
- [10] Mori, H., Miki, H., Tsuneoka, N., Dobashi, K., and Takahashi, I. "Swamp Restoration Using the Geo-Tube Method" In ASCE (Ed.), Dredging '02, 2002, pp. 1-9.
- [11] Guo, W., Chua, J., and Yan W. "Effect of subgrade soil stiffness on the design of geosynthetic tube." Geotextiles and Geomembranes 29(3), 2011, pp. 277-284.
- [12] Charles M. Wilk, L., QEP "Solidification/Stabilization Treatment and Examples of Use at Port Facilities." Waste Treatment Program Manager, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2004.
- [13] Environnement Canada et ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs du Québec. Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration, 2007.
- [14] Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques). Annexe 2 : Les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines. 2016.
- [15] St-Laurent S., B., S., OUELLETTE, H. Lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2011.
- [16] ASTM - American Society for Testing and Materials. "Standard practice of Coagulation-Flocculation jar test water". 2013.